



HAL
open science

Régionalisation du changement climatique et développement de services climatiques dans le sud-ouest de l'océan Indien et ses territoires insulaires

Marie-Dominique Leroux, François Bonnardot, Stephason François Kotomangazafy, Abdoul-Oikil Said, Philippe Veerabadren, Vincent Amélie

► To cite this version:

Marie-Dominique Leroux, François Bonnardot, Stephason François Kotomangazafy, Abdoul-Oikil Said, Philippe Veerabadren, et al.. Régionalisation du changement climatique et développement de services climatiques dans le sud-ouest de l'océan Indien et ses territoires insulaires. METEO FRANCE. 2023. hal-03966983v2

HAL Id: hal-03966983

<https://hal.science/hal-03966983v2>

Submitted on 24 Mar 2023 (v2), last revised 13 Sep 2024 (v7)

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

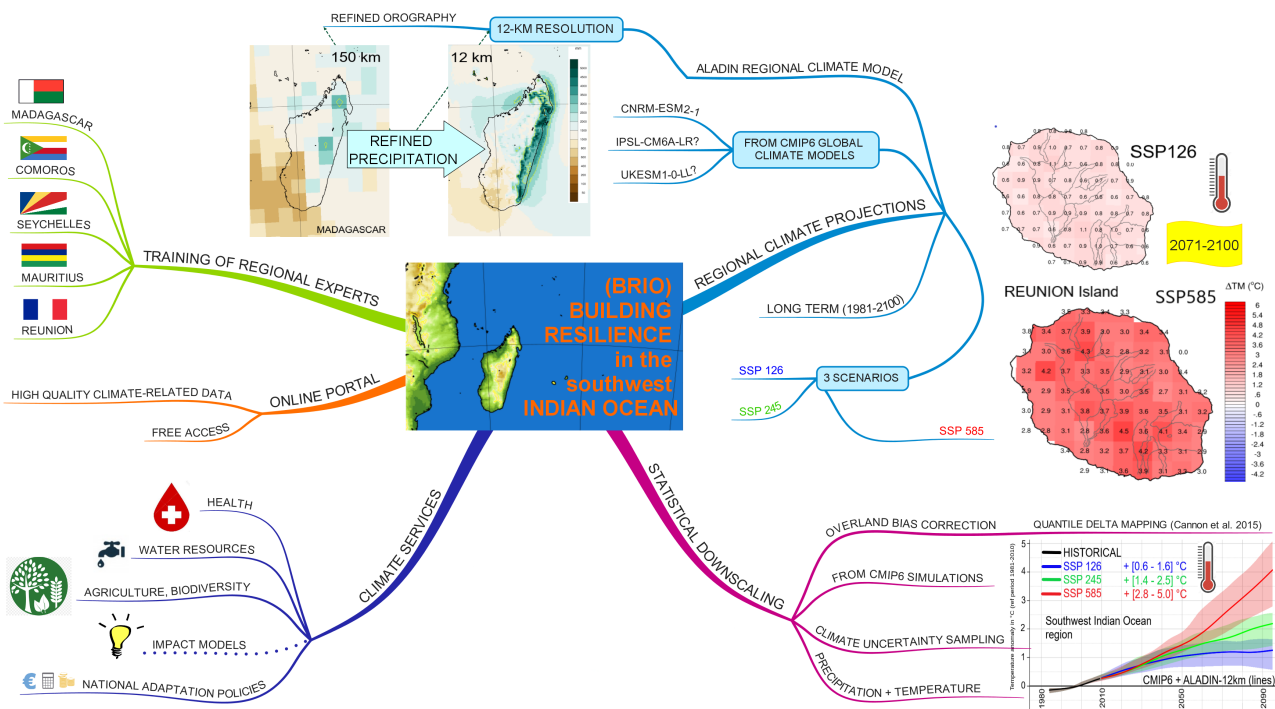


Distributed under a Creative Commons Attribution - NonCommercial - NoDerivatives 4.0 International License

BRIO

Building Resilience in the Indian Ocean

Régionalisation du changement climatique et développement de services climatiques dans le sud-ouest de l'océan Indien et ses territoires insulaires



Rapport final
soumis le 31 août 2022

Rédacteurs :

Mme	Marie-Dominique LEROUX	Météo-France DIROI/EC	La Réunion
Mr	François BONNARDOT	Météo-France DIROI/EC	La Réunion
Mr	Stephason KOTOMANGAZAFY	Direction Générale de la Météorologie (DGM)	Madagascar
Mr	Abdoul-Oikil Said RIDHOINE	Agence Nationale de l'Aviation Civile et de la Météorologie (ANACM)	Comores
Mr	Philippe VEERABADREN	Mauritius Meteorological Services (MMS)	Maurice
Mr	Vincent AMELIE	Seychelles' Meteorological Authority (SMA)	Seychelles

Le projet de recherche [BRIO](#) est financé par le programme AdaptAction de l'Agence Française de Développement. AdaptAction accompagne depuis 2017 des pays et organisations régionales particulièrement vulnérables au changement climatique dans la définition et mise en œuvre de leurs stratégies d'adaptation. Pour plus d'informations, visitez <https://www.afd.fr/fr/adaptaction>.

Table des matières

Table des matières	3
Liste des figures	8
Liste des tableaux	19
CHAPITRE 1 : Introduction et plan	1
CHAPITRE 2 : Contexte de l'étude et état de l'art de la modélisation climatique	3
2.1 LE CONTEXTE GLOBAL ACTUEL.....	5
2.1.1 Définitions du climat et du GIEC	5
2.1.2 Scénarios du GIEC	7
2.1.3 Modèles de climat globaux et exercice d'intercomparaison CMIP	12
2.1.4 Descente d'échelle	15
2.1.5 Modèles de climat régionaux et exercice CORDEX	18
2.1.6 Incertitudes climatiques	21
2.1.7 Indicateurs climatiques et outils statistiques	23
2.1.8 Elévation du niveau des océans	24
2.2 BASSIN SUD-OUEST DE L'OCÉAN INDIEN ET SYSTÈMES TROPICAUX	25
2.2.1 Systèmes dépressionnaires tropicaux	25
2.2.2 Surveillance par les CMRS	26
2.2.3 Classification des systèmes tropicaux	26
2.2.4 Activité cyclonique du sud-ouest de l'océan Indien	28
2.3 PROJET BRIO ET OBJECTIFS	30
2.4 SIMULATIONS CLIMATIQUES ET TRAVAUX D'ANALYSE DU PROJET BRIO	32
2.4.1 Caractéristiques des modèles de climat utilisés	32
2.4.2 Scénarios retenus et coûts de calcul	34
2.4.3 Etendue des tâches réalisées	35

CHAPITRE 3 : Evaluation du modèle ALADIN et apport de la haute résolution	39
3.1 ACTIVITÉ CYCLONIQUE SUR LA PÉRIODE HISTORIQUE DU MODÈLE	41
3.1.1 Apport de la haute résolution sur la modélisation des cyclones	41
3.1.2 Localisation des systèmes dépressionnaires	41
3.1.3 Représentation spatiale de l'activité cyclonique	45
3.1.4 Représentation de l'activité cyclonique en nombre de systèmes	46
3.1.5 Représentation de l'activité cyclonique en distribution des intensités	46
3.2 APPORT DE LA HAUTE RÉOLUTION SUR LE RELIEF DES ÎLES	48
3.2.1 Madagascar	48
3.2.2 Archipel principal des Seychelles et des Comores	48
3.2.3 Les îles des Mascareignes	48
3.3 EVALUATION DES PRÉCIPITATIONS DU MODÈLE	51
3.3.1 Climatologie des précipitations sur le bassin	51
3.4 APPORT DE LA HAUTE RÉOLUTION SUR LES PRÉCIPITATIONS	54
3.4.1 Précipitations sur les îles à fort relief	54
CHAPITRE 4 : Données de référence sur les îles	57
4.1 DONNÉES DE RÉFÉRENCE SUR MADAGASCAR	59
4.1.1 Caractéristiques climatiques et changement climatique observé	59
4.1.2 Stations de mesures climatologiquement exploitables	59
4.1.3 Complétion des données	62
4.1.4 Produit de données combinées à 4 km de résolution	63
4.1.5 Normales spatialisées de précipitations et de températures	65
4.1.6 Zonage climatique	66
4.2 DONNÉES DE RÉFÉRENCE SUR LA RÉUNION	68
4.2.1 Caractéristiques climatiques et changement climatique observé	68
4.2.2 Stations de mesures climatologiquement exploitables	68
4.2.3 Normales spatialisées de précipitations	70
4.2.4 Normales spatialisées de températures	72
4.2.5 Zonage climatique	73
4.3 DONNÉES DE RÉFÉRENCE SUR LA RÉPUBLIQUE DE MAURICE	74
4.3.1 Caractéristiques climatiques et changement climatique observé	74
4.3.2 Stations de mesures climatologiquement exploitables	74
4.3.3 Complétion des données et interpolation à n km de résolution	74
4.3.4 Normales spatialisées de précipitations et de températures	81
4.3.5 Zonage climatique	81
4.4 DONNÉES DE RÉFÉRENCE SUR L'ARCHIPEL DES COMORES	83
4.4.1 Caractéristiques climatiques et changement climatique observé	83
4.4.2 Stations de mesures climatologiquement exploitables	85
4.4.3 Complétion des données	85
4.4.4 Normales de précipitations et de températures en points stations	86
4.5 DONNÉES DE RÉFÉRENCE SUR L'ARCHIPEL DES SEYCHELLES	90
4.5.1 Caractéristiques climatiques et changement climatique observé	90
4.5.2 Stations de mesures climatologiquement exploitables	90
4.5.3 Normales spatialisées de précipitations	91
4.5.4 Zonage climatique	91

CHAPITRE 5 : Correction des biais du modèle sur les îles	95
5.1 CORRECTION DE BIAIS : MÉTHODES ET EXPLICATIONS	97
5.1.1 Méthode Delta (ou méthode de perturbation)	97
5.1.2 Correction de biais	97
5.1.3 Correction de biais quantile-quantile	98
5.1.4 Spécificités des méthodes de correction de biais	100
5.1.5 Correction de biais CDF-t	100
5.2 CORRECTION DES BIAIS SUR LA PÉRIODE HISTORIQUE ET FUTURE	102
5.2.1 Correction des biais sur Madagascar - période historique	102
5.2.2 Correction des biais sur Madagascar - période future	102
5.2.3 Correction des biais sur La Réunion - période historique	107
5.2.4 Correction des biais sur Maurice - période historique	109
5.2.5 Correction des biais sur Rodrigues - période historique	110
5.2.6 Correction des biais sur Agalega - période historique	111
5.2.7 Correction des biais sur Saint Brandon - période historique	112
5.2.8 Correction des biais sur l'archipel des Comores - période historique	113
5.2.9 Correction des biais sur l'archipel des Comores - période future	116
5.2.10 Correction des biais sur l'archipel des Seychelles - période historique	119
5.2.11 Correction des biais sur l'archipel des Seychelles - période future	121
5.2.12 Correction des biais d'intensité cyclonique	122
CHAPITRE 6 : Diagnostic du changement climatique dans le bassin SOOI	123
6.1 PROJECTIONS CLIMATIQUES DE TEMPÉRATURES ET PRÉCIPITATIONS (NON CORRIGÉES)	125
6.1.1 Projections des températures sur le bassin SOOI	125
6.1.2 Projections des températures sur des îles du bassin SOOI	125
6.1.3 Projections des précipitations sur le bassin SOOI	130
6.1.4 Projections des précipitations trimestrielles sur le bassin SOOI en scénario SSP5-8.5	132
6.1.5 Projections des précipitations sur des îles du bassin SOOI	133
6.1.6 Comparaison des projections de précipitations brutes et corrigées sur La Réunion en scénario SSP5-8.5	135
6.2 APPORT DE LA HAUTE RÉOLUTION SUR LE SIGNAL DU CHANGEMENT CLIMATIQUE (NON CORRIGÉ)	136
6.2.1 Cas des précipitations sur les îles à fort relief	136
6.2.2 Cas des températures sur les îles à fort relief	136
6.3 PROJECTIONS CLIMATIQUES DE L'ACTIVITÉ CYCLONIQUE (CORRIGÉES EN INTENSITÉ)	141
6.3.1 Evolution en fréquence de l'activité cyclonique	141
6.3.2 Evolution spatiale de l'activité cyclonique	143
6.3.3 Evolution de la position du maximum d'intensité cyclonique	143
6.3.4 Messages clés sur l'évolution de long terme	143
6.4 PROJECTIONS CLIMATIQUES DE TEMPÉRATURES ET PRÉCIPITATIONS SUR LES ÎLES (CORRIGÉES)	145
6.4.1 Projections des précipitations à Madagascar	145
6.4.2 Projections des précipitations à La Réunion	152
6.4.3 Projections des précipitations sur les îles de la République de Maurice	158

6.4.4	Projections des précipitations sur l'archipel des Comores	164
6.4.5	Projections des précipitations sur l'archipel des Seychelles	165
6.4.6	Projections des températures à Madagascar	168
6.4.7	Projections des températures à La Réunion	170
6.4.8	Projections des températures sur les îles de la République de Maurice	174
6.4.9	Projections des températures sur l'archipel des Comores	174
6.4.10	Projections des températures sur l'archipel des Seychelles	174
6.5	INDICATEURS CLIMATIQUES	178
6.5.1	Indicateurs climatiques sur Madagascar	178
6.5.2	Indicateurs climatiques sur La Réunion	179
6.5.3	Indicateurs climatiques sur les îles de la République de Maurice	181
6.5.4	Indicateurs climatiques sur l'archipel des Comores	182
6.5.5	Indicateurs climatiques sur l'archipel des Seychelles	182
6.6	QUANTIFICATION DE L'INCERTITUDE DU CHANGEMENT CLIMATIQUE (CMIP6)	185
6.6.1	Projections CMIP6 des températures et précipitations annuelles sur le bassin	185
6.6.2	Positionnement des modèles utilisés dans le panache CMIP6	185
6.6.3	Cartes d'anomalies de précipitations CMIP6 sur la zone COI	190
6.6.4	Projections CMIP6 de la température moyenne sur les îles	192
6.6.5	Projections CMIP6 des précipitations annuelles sur les îles	194
6.7	PROTOTYPE DE DESCENTE D'ÉCHELLE STATISTIQUE SUR LA RÉUNION	197
6.7.1	Méthode innovante de descente d'échelle statistique	197
6.7.2	Descente d'échelle statistique pour les précipitations	198
6.7.3	Descente d'échelle statistique pour la température	204
CHAPITRE 7 : Communications, géoportail, utilisateurs et études d'impact		209
7.1	CONFÉRENCES ET PUBLICATIONS	211
7.1.1	Communications dans des congrès internationaux	211
7.1.2	Articles scientifiques dans des revues internationales avec comité de lecture	211
7.1.3	Articles dans des revues sans comité de lecture	211
7.1.4	Rapports	212
7.1.5	Conférences de presse et séminaires	212
7.2	PORTAIL RÉGIONAL DU CHANGEMENT CLIMATIQUE	213
7.3	PROJETS ET UTILISATEURS DES DONNÉES BRIO	214
7.3.1	Utilisateurs des résultats du projet BRIO	214
7.3.2	Projets utilisant les données BRIO	216
7.4	ETUDE D'IMPACT POUR L'AGRICULTURE (CANNE À SUCRE)	216
7.4.1	Motivation	217
7.4.2	Définitions agronomiques	217
7.4.3	Indicateurs climatiques, hydriques et agronomiques - période historique	218
7.4.4	Indicateurs climatiques, hydriques et agronomiques - période future	220
7.4.5	Variabilité du nombre de jours de déficit hydrique annuel	223
7.4.6	Étude de cas sur deux bassins canniers	223
7.4.7	Conclusion et perspectives	223
7.5	ETUDE D'IMPACT POUR LA SANTÉ (VIRUS DE LA DENGUE)	226
7.5.1	Article MACATIA	227

CHAPITRE 8 : Synthèse des changements climatiques observés et projetés dans le sud-ouest de l’océan Indien	235
8.1 CHANGEMENT CLIMATIQUE OBSERVÉ SUR LES ÎLES DU BASSIN	237
8.1.1 Augmentation des températures	237
8.1.2 Modification des précipitations	237
8.2 PROJECTIONS CLIMATIQUES SUR LE BASSIN SOOI ET LES ÎLES	238
8.2.1 Projections des températures	238
8.2.2 Projections des précipitations	240
8.2.3 Projections climatiques de l’activité cyclonique	241
CHAPITRE 9 : Conclusion et perspectives	245
Glossaire	249
Bibliographie	255
Annexes	259
A.1 NOTATIONS	261
A.2 INTERVIEWS ÉCRITES DES EXPERTS PAR LA COI	262
A.2.1 Interview COI	263
A.2.2 Interview Météo-France	265
A.2.3 Interview Madagascar	267
A.2.4 Interview Maurice	269
A.2.5 Interview Comores	271
A.2.6 Interview Seychelles	273
A.3 ABSTRACTS ÉTENDUS DE CONFÉRENCES INTERNATIONALES	275
A.3.1 Abstract AMS	276
A.3.2 Abstract EGU	281

Liste des figures

2.1	Frise chronologique des rapports d'évaluation du GIEC et des principales COP	6
2.2	Fonctionnement du bilan radiatif de la terre	8
2.3	Evolution du forçage radiatif et des émissions globales annuelles de CO ₂ selon les différents scénarios du GIEC	9
2.4	Élaboration parallèle des scénarios climatiques et socioéconomiques	10
2.5	Les trajectoires SSP du GIEC, leurs forçages radiatifs associés et leurs équivalents RCP	11
2.6	Les cinq familles SSP	11
2.7	Grille tridimensionnelle d'un modèle atmosphérique	13
2.8	Composantes d'un GCM	14
2.9	Élévation de la température globale pour les 5 scénarios SSP	15
2.10	Descente d'échelle en climat	17
2.11	Les étapes de descente d'échelle dynamique et statistique depuis la modélisation globale à la correction de biais	20
2.12	Domaines CORDEX à 50 km de résolution pour la régionalisation du climat en CMIP5	20
2.13	La cascade d'incertitudes climatiques	22
2.14	Evolution de la température annuelle moyenne de surface océanique sur la zone sud-ouest de l'océan Indien et sur la zone Réunion pour la période 1968-2018	25
2.15	Élévation moyenne sur le globe du niveau de la surface océanique sur la période 1993-2021	25
2.16	Evolution et tendance du niveau de la surface océanique aux Seychelles sur la période 1993-2020	26
2.17	Amas convectifs de la ZCIT observés par image satellitaire en été (austral et boréal) .	27
2.18	Les 6 CMRS et leurs zones de responsabilité respectives	27
2.19	La région d'activité cyclonique du bassin SOOI	29
2.20	Trajectoires des systèmes tropicaux du bassin SOOI sur la période 1986-2018	29
2.21	Evolution du nombre de tempêtes et de cyclones dans le bassin SOOI depuis 1981 . .	30
2.22	Migration vers le sud de la position du maximum d'intensité cyclonique dans le bassin SOOI sur la période 1980-2015	30
2.23	Carte heuristique résumant les principaux tenants et aboutissants du projet BRIO . .	33
2.24	Descente d'échelle dynamique du projet BRIO et domaine ALADIN-Climat	34
2.25	Résolution du modèle ARPEGE-str (projet ReNovRisk-Cyclones)	35
2.26	Stratégie de modélisation climatique du projet BRIO	36
2.27	Descentes d'échelle dynamique et statistique du projet BRIO	37
3.1	Evolution de la pression au niveau de la mer et des précipitations sur 3 heures pour un exemple de système dépressionnaire simulé par le modèle global CNRM-ESM2-1 et le modèle régional ALADIN	42
3.2	Pression au niveau de la mer et précipitations sur 3 heures pour un exemple de système dépressionnaire simulé par le modèle global CNRM-ESM2-1 et le modèle régional ALADIN le 10 février 2012 à 1800 UTC	43
3.3	Trajectoires cycloniques dans le bassin SOOI sur la période historique 1980-2013 dans les modèles ALADIN et ARPEGE-str en comparaison de la Best track	44

3.4	Densité de tempêtes et cyclones dans le bassin SOOI sur la période historique 1980-2013 dans les modèles ALADIN et ARPEGE-str en comparaison de la Best track . . .	45
3.5	Histogramme des vents maximaux dans les modèles ALADIN et ARPEGE-str en comparaison de la Best track	47
3.6	Biais moyen de température de surface de la mer en décembre dans le modèle régional ALADIN	48
3.7	Comparaison de l'orographie de Madagascar dans le modèle régional ALADIN et dans le modèle global CNRM-ESM2-1	49
3.8	Comparaison de l'orographie de l'archipel des Seychelles, des Comores et des îles Mascareignes dans ALADIN versus CNRM-ESM2-1	50
3.9	Cumul moyen de précipitations annuelles sur le bassin durant la période historique dans le modèle régional ALADIN en comparaison de la climatologie IMERG	51
3.10	Cumul moyen de précipitations annuelles sur le bassin durant la période historique dans le modèle global CNRM-ESM2-1 en comparaison de la climatologie IMERG	52
3.11	Cumul moyen de précipitations trimestrielles sur le bassin durant la période historique dans le modèle régional ALADIN en comparaison de la climatologie IMERG	53
3.12	Cumul moyen de précipitations annuelles pour la période historique (1981-2010) sur Madagascar dans CNRM-ESM2-1 versus ALADIN	54
3.13	Cumul moyen de précipitations annuelles pour la période historique (1981-2010) sur La Réunion dans CNRM-ESM2-1 versus ALADIN	55
4.1	Evolution temporelle des anomalies de température moyenne annuelle à +2 m observées sur 6 villes de Madagascar depuis 1961	60
4.2	Evolution temporelle des anomalies du cumul annuel de précipitations observées sur 6 villes de Madagascar depuis 1961	61
4.3	Sélection des stations de mesures climatologiquement exploitables sur Madagascar	62
4.4	Cumul annuel moyen de précipitations et température moyenne annuelle à +2 m observés sur Madagascar à la résolution de 4 km (produit de données combinées)	65
4.5	Classification de Madagascar en 6 zones climatiques	67
4.6	Evolution temporelle des anomalies de température moyenne annuelle à +2 m observées à La Réunion depuis 1968	69
4.7	Evolution temporelle (i) des anomalies du cumul annuel de précipitations et (ii) du nombre de jours de pluies intenses observés à La Réunion depuis 1961	69
4.8	Tendance du cumul annuel de précipitations par décennie observé à La Réunion depuis 1961	69
4.9	Réseau des stations météorologiques de l'île de La Réunion	70
4.10	Cumul annuel moyen de précipitations observé sur La Réunion en isohyètes et en points de grille à 3 km de résolution sur la période 1981-2010	71
4.11	Température moyenne annuelle à +2 m observée sur La Réunion en isolignes et en points de grille à 3 km de résolution sur la période 1981-2010	72
4.12	Les 10 zones climatiques de La Réunion pour les précipitations	73
4.13	Evolution temporelle des anomalies de la température maximale à +2 m en moyenne annuelle observées à Maurice, Rodrigues, Agalega et Saint Brandon depuis 1961	75
4.14	Evolution temporelle des anomalies du cumul annuel de précipitations observées à Maurice depuis 1901, Rodrigues depuis 1954, Agalega et Saint Brandon depuis 1945	76
4.15	Stations de mesures climatologiquement exploitables sur Maurice, Rodrigues, Saint Brandon et Agalega	77

4.16	Résolution des produits d'observation griddés sur Maurice, Saint Brandon, Agalega et Rodrigues	78
4.17	RMSE et distribution d'erreur en fonction du degré du polynôme utilisé dans l'interpolation avec pondération par l'inverse de la distance	79
4.18	Exemple de traitement des valeurs nulles erronées dans les relevés de précipitations sur l'île Maurice	79
4.19	Situation pluvieuse du 24 novembre 1981 sur l'île Maurice	80
4.20	Cumul annuel moyen de précipitations à l'île Maurice en points de grille sur la période 1981-2010 et comparaison aux valeurs observées en points de station	80
4.21	Cumul annuel moyen de précipitations et température moyenne annuelle à +2 m observés à Maurice sur la période 1981-2010	81
4.22	Cumul annuel moyen de précipitations observé à Agalega, Saint Brandon et Rodrigues sur la période 1981-2010	82
4.23	Classification en zones climatiques des îles Maurice et Rodrigues pour la variable précipitations	82
4.24	Evolution temporelle des anomalies de température moyenne annuelle à +2 m et de cumul annuel de précipitations observées à Pamandzi, Mayotte, sur la période 1981-2010	83
4.25	Evolutions temporelles à Moroni, Comores, des anomalies de température moyenne annuelle à +2 m observées et du nombre de systèmes cycloniques observés dans un rayon de 500 km depuis 1981	84
4.26	Réseau de stations météorologiques de l'archipel des Comores	84
4.27	Sélection des stations de mesures climatologiquement exploitables sur l'archipel des Comores pour la période 1981-2010	85
4.28	Méthode de complétion des données sur l'archipel des Comores	86
4.29	Séries de données de précipitations complétées pour 6 stations de l'archipel des Comores	87
4.30	Séries de données de températures minimales complétées pour 5 stations de l'archipel des Comores	88
4.31	Séries de données de températures maximales complétées pour 5 stations de l'archipel des Comores	89
4.32	Cumul annuel moyen de précipitations et température moyenne annuelle à +2 m observés sur l'archipel des Comores en points stations pour la période 1981-2010	89
4.33	Evolution temporelle des anomalies de température moyenne annuelle à +2 m observées aux Seychelles depuis 1972	90
4.34	Evolution temporelle du cumul annuel de précipitations observé aux Seychelles depuis 1972	91
4.35	Réseau de stations météorologiques de l'île de Mahé, Seychelles	92
4.36	Cumul annuel moyen de précipitations observé sur l'île de Mahé en points de grille à 2 km de résolution sur la période 1981-2010	93
4.37	Les 4 zones climatiques de l'île de Mahé pour les précipitations	93
5.1	Exemples des méthodes de post-traitement par delta et par correction de biais	98
5.2	Illustration des corrections de biais par quantile quantile	98
5.3	Illustration des PDF historique et future d'un modèle avant et après correction de ses biais	99
5.4	Comparaison des cumuls annuels moyens de précipitations sur Madagascar dans le modèle régional ALADIN par rapport à la climatologie, avant et après correction des biais du modèle sur la période 1981-2010	102

5.5	Comparaison des cumuls annuels moyens de précipitations sur Madagascar dans le modèle régional ALADIN corrigé à 4 km et dans la climatologie de référence sur la période 1981-2010	103
5.6	Comparaison des températures moyennes annuelles à +2 m sur Madagascar dans le modèle régional ALADIN par rapport à la climatologie de référence, avant et après correction des biais du modèle	104
5.7	Evolution temporelle sur la période 1981-2100 du cumul annuel de précipitations sur les 6 zones climatiques de Madagascar selon le modèle régional ALADIN pour 3 scénarios SSP	105
5.8	Evolution temporelle sur la période 1981-2100 de la température moyenne annuelle à +2 m sur les 6 zones climatiques de Madagascar selon le modèle régional ALADIN pour 3 scénarios SSP	106
5.9	Comparaison des cumuls annuels moyens de précipitations sur La Réunion dans le modèle régional ALADIN avant et après correction des biais sur la période 1981-2010	107
5.10	Comparaison des températures moyennes annuelles sur La Réunion dans le modèle ALADIN avant et après correction des biais sur la période 1981-2010	108
5.11	Comparaison des cumuls annuels moyens de précipitations sur l'île Maurice dans le modèle ALADIN avant et après correction des biais sur la période 1981-2010	109
5.12	Comparaison des cumuls annuels moyens de précipitations sur l'île Rodrigues dans le modèle ALADIN avant et après correction des biais sur la période 1981-2010	110
5.13	Comparaison des cumuls annuels moyens de précipitations sur Agalega dans le modèle ALADIN avant et après correction des biais sur la période 1981-2010	111
5.14	Comparaison des cumuls annuels moyens de précipitations sur Saint Brandon dans le modèle ALADIN avant et après correction des biais sur la période 1981-2010	112
5.15	Comparaison des cumuls annuels moyens de précipitations et des températures moyennes annuelles à +2 m du modèle ALADIN par rapport à la climatologie sur l'archipel des Comores pour la période 1981-2010	113
5.16	Décalage spatial entre points de grille modèle et stations de référence pour la correction des biais sur l'archipel des Comores	113
5.17	Illustration de la raison du décalage spatial entre points de grille et stations de référence pour la correction des biais de température sur Hahaya, Moroni, et des biais de précipitations sur Ouani	114
5.18	Fonctions de distribution cumulée des précipitations pour chacune des 3 stations des Comores avant et après correction des biais du modèle ALADIN pour la période 1981-2010	115
5.19	Fonctions de distribution cumulée des températures moyennes annuelles pour chacune des 4 stations de référence de l'archipel des Comores avant et après correction des biais du modèle ALADIN pour la période 1981-2010	115
5.20	Evolution temporelle du cumul annuel de précipitations simulé par le modèle ALADIN sur la période 1981-2100 pour 3 scénarios SSP et sur les 6 stations de l'archipel des Comores	117
5.21	Evolution temporelle de la température moyenne annuelle à +2 m simulée par le modèle ALADIN sur la période 1981-2100 pour 3 scénarios SSP et sur les 5 stations de l'archipel des Comores	118
5.22	Comparaison des cumuls annuels moyens de précipitations sur l'île principale de Mahé, Seychelles, dans le modèle ALADIN avant et après correction des biais	120

5.23	Evolution temporelle sur la période 1981-2100 de la température moyenne annuelle à +2 m simulée par le modèle ALADIN pour 3 scénarios SSP sur la station de référence de l'archipel des Seychelles	121
5.24	Histogramme des vents maximaux dans ALADIN et dans la Best track	122
6.1	Anomalies de températures moyennes annuelles à +2 m (en °C par rapport à 1981-2010) sur la zone océan Indien selon le modèle régional ALADIN en milieu et fin de siècle pour trois scénarios SSP	126
6.2	Anomalies de températures moyennes annuelles à +2 m (en °C par rapport à 1981-2010) sur la Grande Comore selon le modèle régional ALADIN en milieu et fin de siècle pour 3 scénarios SSP	127
6.3	Anomalies de températures moyennes annuelles à +2 m (en °C par rapport à 1981-2010) sur l'île Maurice selon le modèle régional ALADIN en milieu et fin de siècle pour 3 scénarios SSP	128
6.4	Anomalies de températures moyennes annuelles à +2 m (en °C par rapport à 1981-2010) sur l'archipel principal des Seychelles selon le modèle régional ALADIN en milieu et fin de siècle pour 3 scénarios SSP	129
6.5	Anomalies (en % par rapport à la normale 1981-2010) des cumuls annuels moyens de précipitations sur la zone océan Indien selon le modèle régional ALADIN en milieu et fin de siècle	131
6.6	Anomalies (en % par rapport à la normale 1981-2010) des cumuls trimestriels moyens de précipitations sur la zone océan Indien selon le modèle régional ALADIN pour la fin du siècle (2071-2100) dans le scénario SSP5-8.5	132
6.7	Anomalies (en % par rapport à la normale 1981-2010) du cumul annuel de précipitations sur l'archipel des Comores selon le modèle régional ALADIN en milieu et fin de siècle pour trois scénarios SSP	133
6.8	Anomalies (en % par rapport à la normale 1981-2010) des cumuls annuels moyens de précipitations sur les îles sœurs selon le modèle régional ALADIN en milieu et fin de siècle pour trois scénarios SSP	134
6.9	Anomalies (en % par rapport à la normale 1981-2010) du cumul annuel de précipitations sur La Réunion selon le modèle régional ALADIN en milieu et fin de siècle pour le scénario SSP5-8.5 avant et après correction des biais	135
6.10	Anomalies (en mm par rapport à la normale 1981-2010) du cumul annuel moyen de précipitations sur Madagascar selon les modèles CNRM-ESM2 et ALADIN en milieu et fin de siècle pour le scénario SSP5-8.5	137
6.11	Anomalies (en mm par rapport à la normale 1981-2010) du cumul annuel moyen de précipitations sur l'archipel des Mascareignes selon les modèles CNRM-ESM2 et ALADIN en milieu et fin de siècle pour le scénario SSP5-8.5	138
6.12	Anomalies (en mm par rapport à la normale 1981-2010) du cumul annuel moyen de précipitations sur l'archipel des Comores selon les modèles CNRM-ESM2 et ALADIN en milieu et fin de siècle pour le scénario SSP5-8.5	138
6.13	Anomalies de températures moyennes annuelles à +2 m (en °C par rapport à la normale 1981-2010) sur Madagascar selon les modèles CNRM-ESM2 et ALADIN en milieu et fin de siècle pour le scénario SSP5-8.5	139
6.14	Anomalies de températures moyennes annuelles à +2 m sur l'archipel des Mascareignes selon les modèles CNRM-ESM2 et ALADIN en milieu et fin de siècle pour le scénario SSP5-8.5	140

6.15 Anomalies de températures moyennes annuelles à +2 m sur l'archipel des Comores selon les modèles CNRM-ESM2 et ALADIN en milieu et fin de siècle pour le scénario SSP5-8.5	140
6.16 Evolution par rapport à la période de référence de la fréquence des systèmes cycloniques du bassin SOOI par seuil de vent sur la période 2066-2099 dans ALADIN pour 3 scénarios SSP	141
6.17 Evolution par rapport à la période de référence de la fréquence des systèmes cycloniques par seuil de vent sur la période 2047-2093 dans ARPEGE-str pour le scénario RCP8.5	141
6.18 Evolution chronologique sur la période 1965-2100 de la densité des systèmes cycloniques par catégorie d'intensité dans ALADIN et ARPEGE-str pour divers scénarios	142
6.19 Trajectoires des systèmes tropicaux du bassin SOOI sur la période 2066-2100 dans ALADIN pour 3 scénarios SSP	143
6.20 Evolution de la latitude du maximum d'intensité cyclonique sur la période 1965-2100 par catégorie d'intensité dans ALADIN et ARPEGE-str pour divers scénarios	144
6.21 Evolution temporelle sur la période 1981-2100 des anomalies (en % par rapport à la normale 1981-2010) du cumul annuel de précipitations sur les 6 zones climatiques de Madagascar selon le modèle régional ALADIN pour 3 scénarios SSP, après correction des biais	146
6.22 Anomalies (en % par rapport à la normale 1981-2010) des cumuls annuels de précipitations sur Madagascar selon le modèle régional ALADIN pour trois scénarios SSP et deux horizons temporels, après correction des biais	147
6.23 Anomalies (en % ou en mm par rapport à la normale 1981-2010) des cumuls moyens de précipitations sur l'année et sur 4 trimestres de l'année sur Madagascar selon le modèle régional ALADIN pour le scénario SSP1-2.6 en milieu de siècle, après correction des biais	148
6.24 Anomalies (en % ou en mm par rapport à la normale 1981-2010) des cumuls moyens de précipitations sur l'année et sur 4 trimestres de l'année sur Madagascar selon le modèle régional ALADIN pour le scénario SSP1-2.6 en fin de siècle, après correction des biais	149
6.25 Anomalies (en % ou en mm par rapport à la normale 1981-2010) des cumuls moyens de précipitations sur l'année et sur 4 trimestres de l'année sur Madagascar selon le modèle régional ALADIN pour le scénario SSP5-8.5 en fin de siècle, après correction des biais	150
6.26 Anomalies (en % ou en mm par rapport à la normale 1981-2010) des cumuls moyens de précipitations sur l'année et sur 4 trimestres de l'année sur Madagascar selon le modèle régional ALADIN pour le scénario SSP5-8.5 en fin de siècle, après correction des biais	151
6.27 Anomalies (en % par rapport à la normale 1981-2010) des cumuls annuels de précipitations sur La Réunion selon le modèle régional ALADIN pour trois scénarios SSP et deux horizons temporels, après correction des biais	153
6.28 Anomalies (en % par rapport à la normale 1981-2010) des cumuls moyens de précipitations sur l'année et sur 4 trimestres de l'année sur La Réunion selon le modèle régional ALADIN pour le scénario SSP1-2.6 en milieu de siècle, après correction des biais	154
6.29 Anomalies (en % par rapport à la normale 1981-2010) des cumuls moyens de précipitations sur l'année et sur 4 trimestres de l'année sur La Réunion selon le modèle régional ALADIN pour le scénario SSP1-2.6 en fin de siècle, après correction des biais	155

6.30 Anomalies (en % par rapport à la normale 1981-2010) des cumuls moyens de précipitations sur l'année et sur 4 trimestres de l'année sur La Réunion selon le modèle régional ALADIN pour le scénario SSP5-8.5 en milieu de siècle, après correction des biais	156
6.31 Anomalies (en % par rapport à la normale 1981-2010) des cumuls moyens de précipitations sur l'année et sur 4 trimestres de l'année sur La Réunion selon le modèle régional ALADIN pour le scénario SSP5-8.5 en fin de siècle, après correction des biais	157
6.32 Evolution temporelle sur la période 1981-2100 du cumul annuel de précipitations sur les îles de la République Mauricienne selon le modèle régional ALADIN pour 3 scénarios SSP, après correction des biais	159
6.33 Anomalies (en % par rapport à la normale 1981-2010) des cumuls annuels moyens de précipitations sur l'île Maurice selon le modèle régional ALADIN pour trois scénarios SSP et deux horizons temporels, après correction des biais	160
6.34 Anomalies (en % par rapport à la normale 1981-2010) des cumuls moyens de précipitations sur le trimestre OND sur l'île Maurice selon le modèle régional ALADIN pour trois scénarios SSP et deux horizons temporels, après correction des biais	161
6.35 Anomalies (en % par rapport à la normale 1981-2010) des cumuls annuels moyens de précipitations sur Rodrigues selon le modèle régional ALADIN pour trois scénarios SSP et deux horizons temporels, après correction des biais	162
6.36 Anomalies (en % par rapport à la normale 1981-2010) des cumuls moyens de précipitations sur le trimestre OND sur Rodrigues selon le modèle régional ALADIN pour trois scénarios SSP et deux horizons temporels, après correction des biais	163
6.37 Evolution temporelle sur la période 1981-2100 du cumul annuel de précipitations sur l'archipel des Comores selon le modèle régional ALADIN pour 3 scénarios SSP, après correction des biais	164
6.38 Evolution temporelle sur la période 1981-2100 du cumul annuel de précipitations sur les 4 zones climatiques de l'île principale des Seychelles, Mahé, et sur Praslin et La Digue, selon le modèle régional ALADIN pour 3 scénarios SSP, après correction des biais	165
6.39 Anomalies (en % par rapport à la normale 1981-2010) du cumul annuel moyen de précipitations sur l'île principale des Seychelles, Mahé, pour trois scénarios SSP et deux horizons temporels dans le modèle ALADIN après correction des biais	166
6.40 Evolution temporelle sur la période 1981-2100 des anomalies de température moyenne annuelle à +2 m sur les 6 zones climatiques de Madagascar selon le modèle régional ALADIN pour 3 scénarios SSP, après correction des biais	169
6.41 Anomalies de températures moyennes annuelles à +2 m sur La Réunion selon le modèle régional ALADIN par rapport à 1981-2010 pour trois scénarios SSP et deux horizons temporels, après correction des biais	171
6.42 Anomalies de température moyenne à +2 m sur l'année et sur 4 trimestres de l'année sur La Réunion selon le modèle régional ALADIN pour le scénario SSP5-8.5 en fin de siècle, après correction des biais	172
6.43 Isolignes des anomalies de température moyenne annuelle à +2 m sur La Réunion selon le modèle régional ALADIN à l'horizon 2071-2100 pour trois scénarios SSP, après correction des biais	173
6.44 Evolution temporelle sur la période 1981-2100 de la température moyenne annuelle à +2 m sur l'île Maurice selon le modèle régional ALADIN pour 3 scénarios SSP, après correction des biais	175

6.45	Evolution temporelle sur la période 1981-2100 de la température moyenne annuelle à +2 m (°C) sur l'archipel des Comores selon le modèle régional ALADIN pour 3 scénarios SSP, après correction des biais	176
6.46	Evolution temporelle sur la période 1981-2100 de la température moyenne annuelle à +2 m (°C) sur l'archipel des Seychelles selon le modèle régional ALADIN pour 3 scénarios SSP, après correction des biais	176
6.47	Evolution temporelle sur la période 1981-2100 du nombre maximal de jours secs consécutifs sur Madagascar selon le modèle régional ALADIN pour 3 scénarios SSP, après correction des biais	179
6.48	Anomalies moyennes (en % par rapport à la normale 1981-2010) des périodes de sécheresse sur Madagascar selon le modèle régional ALADIN pour trois scénarios SSP en fin de siècle, après correction des biais	179
6.49	Evolution temporelle sur la période 1981-2100 du nombre de jours annuel où la température maximale simulée par ALADIN dépasse le seuil de 31°C sur Gillot, La Réunion, pour 3 scénarios SSP, après correction des biais	180
6.50	Evolution temporelle du nombre maximal de jours secs consécutifs prévu par ALADIN sur l'île de La Réunion jusqu'en 2100 pour 3 scénarios SSP, après correction des biais	180
6.51	Evolution temporelle sur la période 1981-2100 de l'indice sécheresse sur La Réunion selon le modèle régional ALADIN pour le scénario SSP5-8.5, après correction des biais	181
6.52	Evolution temporelle sur la période 1981-2100 du cumul maximal de précipitations sur 5 jours consécutifs sur l'île de La Réunion selon le modèle régional ALADIN pour 3 scénarios SSP, après correction des biais	181
6.53	Evolution temporelle sur la période 1981-2100 du nombre de jours annuel de chaleur extrême sur l'île Maurice selon le modèle régional ALADIN pour 3 scénarios SSP, après correction des biais	182
6.54	Evolution temporelle sur la période 1981-2100 du nombre de jours annuel de chaleur extrême sur l'archipel des Comores selon le modèle régional ALADIN pour 3 scénarios SSP, après correction des biais	182
6.55	Evolution temporelle sur la période 1981-2100 du nombre de jours annuel où la température maximale simulée par ALADIN dépasse le seuil de 32°C sur Pamandzi, Mayotte, pour 3 scénarios SSP, après correction des biais	183
6.56	Evolution temporelle sur la période 1981-2100 de l'indice sécheresse sur Mayotte selon le modèle régional ALADIN pour le scénario SSP5-8.5, après correction des biais	183
6.57	Evolution temporelle sur la période 1981-2100 du cumul annuel des précipitations extrêmes sur l'archipel des Seychelles selon le modèle régional ALADIN pour 3 scénarios SSP, après correction des biais	183
6.58	Evolution temporelle sur la période 1981-2100 du pourcentage de jours extrêmement chauds (TX > 99 ^{ème} percentile) selon le modèle régional ALADIN sur l'archipel des Seychelles pour 3 scénarios SSP, après correction des biais	184
6.59	Evolution temporelle sur la période 1981-2100 des anomalies de température moyenne annuelle à +2 m et de cumul annuel de précipitations (par rapport à la normale 1981-2010) selon 22 modèles globaux de CMIP6 et selon le modèle régional ALADIN pour 3 scénarios, sur la boîte COI	186
6.60	Evolution annuelle sur la période 1981-2100 des anomalies du cumul de précipitations sur les saisons JAS et OND (en % par rapport à la normale 1981-2010) selon 22 modèles globaux de CMIP6 et selon le modèle régional ALADIN pour 3 scénarios, sur la boîte COI	187

6.61	Diagramme 2D de l'évolution décennale des anomalies, par rapport à la normale 1981-2010, de température moyenne à +2 m sur 20 ans et de cumuls annuels de précipitations moyens sur 20 ans dans 3 scénarios SSP pour 22 modèles CMIP6 et le modèle régional ALADIN, sur la boîte COI	189
6.62	Anomalies de précipitations annuelles (% par rapport à la normale 1981-2010) sur le bassin océan Indien à l'horizon 2080 selon 22 modèles globaux CMIP6 dans 3 scénarios SSP	190
6.63	Anomalies de précipitations (% par rapport à la normale 1981-2010) pour chaque trimestre sur le bassin océan Indien à l'horizon 2080 et dans le scénario SSP5-8.5 selon 22 modèles globaux CMIP6	191
6.64	Evolution temporelle sur la période 1981-2100 des anomalies de température moyenne annuelle à +2 m (en °C par rapport à la période 1981-2010) sur les îles de la COI selon 22 modèles globaux de CMIP6 dans 3 scénarios et selon le modèle régional ALADIN	193
6.65	Evolution temporelle sur la période 1981-2100 des anomalies du cumul annuel de précipitations sur les îles de la COI (en % par rapport à la normale 1981-2010) selon 22 modèles globaux de CMIP6 et selon le modèle régional ALADIN pour 3 scénarios	195
6.66	Evolution temporelle sur la période 1981-2100 des anomalies du cumul de précipitations du trimestre OND sur les îles de la COI (en % par rapport à la normale 1981-2010) selon 22 modèles globaux de CMIP6 et selon le modèle régional ALADIN pour 3 scénarios	196
6.67	Cumul quotidien de précipitations sur La Réunion le 31 décembre 2005 : observations, produit ERA-Interim brut et corrigé de ses biais avec ou sans prise en compte des régimes de temps	198
6.68	Centiles des anomalies (en % par rapport à la normale 1981-2010) des cumuls annuels moyens de précipitations sur La Réunion pour un ensemble de 22 modèles globaux CMIP6 pour le scénario SSP1-2.6 en milieu de siècle, après descente d'échelle statistique	200
6.69	Centiles des anomalies (en % par rapport à la normale 1981-2010) des cumuls annuels moyens de précipitations sur La Réunion pour un ensemble de 22 modèles globaux CMIP6 pour le scénario SSP1-2.6 en fin de siècle, après descente d'échelle statistique	201
6.70	Centiles des anomalies (en % par rapport à la normale 1981-2010) des cumuls annuels moyens de précipitations sur La Réunion pour un ensemble de 22 modèles globaux CMIP6 pour le scénario SSP5-8.5 en milieu de siècle, après descente d'échelle statistique	202
6.71	Centiles des anomalies (en % par rapport à la normale 1981-2010) des cumuls annuels moyens de précipitations sur La Réunion pour un ensemble de 22 modèles globaux CMIP6 pour le scénario SSP5-8.5 en milieu de siècle, après descente d'échelle statistique	203
6.72	Centiles des anomalies (en °C par rapport à la normale 1981-2010) de la température moyenne annuelle à +2 m sur La Réunion pour un ensemble de 22 modèles CMIP6 pour le scénario SSP1-2.6 en milieu de siècle, après descente d'échelle statistique	205
6.73	Centiles des anomalies (en °C par rapport à la normale 1981-2010) de la température moyenne annuelle à +2 m sur La Réunion pour un ensemble de 22 modèles CMIP6 pour le scénario SSP1-2.6 en fin de siècle, après descente d'échelle statistique	206
6.74	Centiles des anomalies (en °C par rapport à la normale 1981-2010) de la température moyenne annuelle à +2 m sur La Réunion pour un ensemble de 22 modèles CMIP6 pour le scénario SSP5-8.5 en fin de siècle, après descente d'échelle statistique	207

6.75	Centiles des anomalies (en °C par rapport à la normale 1981-2010) de la température moyenne annuelle à +2 m sur La Réunion pour un ensemble de 22 modèles CMIP6 pour le scénario SSP5-8.5 en fin de siècle, après descente d'échelle statistique	208
7.1	Illustration du portail régional du changement climatique : page de couverture et menu principal	213
7.2	Illustration du portail régional du changement climatique : vue en points de stations sur l'archipel des Comores et valeurs climatiques pour la station de Ouani	214
7.3	Représentation schématique de la partie superficielle du sol dans un modèle hydrique à deux réservoirs	218
7.4	Valeurs moyennes sur la période historique 1981-2010 de l'évapotranspiration potentielle quotidienne, du niveau de remplissage quotidien du réservoir utile, de l'évapotranspiration réelle quotidienne et du nombre moyen de jours en déficit hydrique par an sur La Réunion selon le modèle ALADIN, après correction des biais	219
7.5	Anomalies (en % par rapport à 1981-2010) d'évapotranspiration potentielle quotidienne sur La Réunion en milieu et fin de siècle pour les scénarios SSP1-2.6 et SSP5-8.5 selon le modèle ALADIN, après correction des biais	220
7.6	Anomalies (en % par rapport à 1981-2010) du niveau de remplissage quotidien du réservoir utile sur La Réunion en milieu et fin de siècle pour 3 scénarios SSP selon le modèle ALADIN, après correction des biais	221
7.7	Anomalies (en % par rapport à 1981-2010) d'évapotranspiration réelle quotidienne de la canne à sucre sur La Réunion en milieu et fin de siècle pour 3 scénarios SSP selon le modèle ALADIN, après correction des biais	222
7.8	Anomalies (en jours par rapport à 1981-2010) du nombre moyen annuel de jours de déficit hydrique sur La Réunion en milieu et fin de siècle pour 3 scénarios SSP selon le modèle ALADIN, après correction des biais	224
7.9	Evolution des niveaux de remplissage quotidien du réservoir utile de 2 bassins canniers de La Réunion sur la période historique et deux horizons futurs dans 2 scénarios SSP selon le modèle ALADIN, après correction des biais	225
8.1	Synthèse des anomalies de température moyenne annuelle à +2 m (en °C par rapport à 1981-2010) attendues en milieu et fin de siècle sur les pays de la COI pour 3 scénarios SSP	239
8.2	Synthèse des anomalies (en % par rapport à la normale 1981-2010) du cumul annuel de précipitations attendu en milieu et fin de siècle sur les pays de la COI pour 3 niveaux de réchauffement planétaire, selon le modèle régional ALADIN	242
8.3	Synthèse des anomalies (en % par rapport à la normale 1981-2010) du cumul de précipitations en saison des pluies (de décembre à mai) attendu en milieu et fin de siècle sur les pays de la COI pour 3 niveaux de réchauffement planétaire, selon le modèle régional ALADIN	243
8.4	Synthèse des anomalies (en % par rapport à la normale 1981-2010) du cumul de précipitations sur le semestre couvrant juin à novembre attendu en milieu et fin de siècle sur les pays de la COI pour 3 niveaux de réchauffement planétaire, selon le modèle régional ALADIN	244
8.5	Evolution des paramètres hydro climatiques sur l'île de La Réunion à l'horizon 2041-2070 dans le scénario SSP2-4.5	244
9.1	Domaines des simulations AROME-Climat et ALADIN-Climat comparés à la zone de responsabilité du CMRS	247

9.2 Carte heuristique résumant les principaux tenants et aboutissants du projet BRIO . . . 248

Liste des tableaux

2.1	Les 5 scénarios RCP	9
2.2	Les trois sources d'incertitude climatique et leur importance relative	23
2.3	Classification des cyclones selon la force des vents maximaux pour 4 bassins cycloniques d'intérêt	28
3.1	Nombre annuel de systèmes par catégorie sur la période historique 1980-2013 dans les modèles CNRM-ESM2-1, ALADIN, ARPEGE-str en comparaison de la Best track	46
4.1	Ensemble de données constituant la version 3 du produit de données combinées pour Madagascar	64
4.2	Extrait des valeurs quotidiennes de précipitations extrêmes localisées qui ont été rejetées dans le produit final de précipitations en points de grille de l'île Maurice.	79
6.1	Liste des indicateurs climatiques disponibles sur le portail BRIO	178
A.1	Liste des variables et des constantes	261

Chapitre 1

Introduction et plan

SÉCHERESSES, inondations, cyclones : chaque jour ou presque, de nouvelles études décrivent le monde inquiétant dans lequel nous pourrions vivre à la fin du 21^{ème} siècle, à l'aune du changement climatique en cours. L'organisation mondiale de la météorologie (OMM) stipule que les sept années les plus chaudes ont toutes été enregistrées depuis 2015, la température moyenne globale dépassant de plus de 1 degré Celsius les niveaux préindustriels. La plupart de ces résultats se fondent sur des simulations provenant de modèles climatiques globaux qui permettent de simuler les processus complexes d'interactions atmosphère-océan aboutissant à un climat en un lieu donné. Ce sont ces modèles, notamment, que l'on retrouve dans les rapports successifs du GIEC. Or, pour traiter des petits territoires insulaires, ces derniers apparaissent limités.

Le présent projet vise à doter la zone sud-ouest de l'océan Indien (SOOI) de simulations climatiques à haute résolution permettant d'affiner régionalement les signaux globaux du changement climatique sur l'ensemble des terres habitées comprenant des îles au relief très accidenté. Ces simulations ont pour but d'aider à anticiper les variations du climat à divers horizons temporels dont le plus éloigné est l'horizon 2100 et pour différents scénarios climatiques, en se basant sur les toutes dernières simulations globales sur lesquels s'appuient les rapports 2021 et 2022 du GIEC. Le projet permet également de faire coopérer les différents pays de la COI en vue de consolider les bases de données du climat passé sur la région.

Le plan retenu pour ce rapport technique est le suivant. Dans le chapitre 2, nous décrivons le contexte de l'étude, dresserons les constats globaux sur le changement climatique et citerons les récents accords pris par certains pays. Nous présenterons les outils numériques utilisés pour simuler l'évolution du climat à l'échelle du globe ou d'une région, ainsi que l'organisation aux niveaux mondial et régional des différents centres de modélisation du climat pour fournir des projections lors d'exercices coordonnés. Nous détaillerons les spécificités de notre bassin sud-ouest de l'océan Indien, et notamment les caractéristiques des systèmes tropicaux qui y évoluent. Dans ce contexte, nous soulignerons le manque de données climatiques pour s'adapter ou faire face aux impacts du changement climatique sur notre région et introduirons le projet BRIO qui vise à combler ces lacunes. Les configurations utilisées pour faire de la descente d'échelle dynamique sur le bassin à partir d'un modèle global de climat seront détaillées et nous préciserons les scénarios climatiques retenus pour faire des projections régionales.

Le chapitre 3 sera dédié à l'évaluation du modèle régional de climat utilisé en le comparant aux données d'observation de référence sur la période historique. L'activité cyclonique aussi bien que les précipitations seront évaluées ; l'apport de la haute résolution sur l'intensité des systèmes cycloniques et des précipitations sera illustré ; l'orographie des îles dans le modèle régional comparée au modèle global sera cartographiée.

Les jeux de données d'observation de référence sur les îles seront présentés au chapitre 4. Le travail de sélection des données climatologiquement exploitables sera explicité. Des produits en points de grille seront dérivés de ces observations, là où la densité du réseau de stations le permettra. Des zonages climatiques seront également proposés.

Ces jeux de référence en points de grille serviront de base à la correction de biais du modèle régional et à la descente d'échelle statistique auxquels le chapitre 5 sera consacré. Les corrections porteront sur chacune des îles partenaires, en points de station ou en points de grille selon le jeu de données de référence disponible. Les données de référence pour les systèmes tropicaux du bassin sud-ouest de l'océan Indien permettront une correction en intensité du modèle régional.

Le chapitre 6 exposera l'ensemble des résultats du projet. Seront ainsi illustrés et commentés (a) les projections de température et de précipitations sur le bassin à divers horizons temporels et pour divers scénarios climatiques, (b) l'apport de la haute résolution sur le signal du changement climatique, (c) des exemples d'indicateurs climatiques pour quantifier les événements extrêmes que sont les sécheresses, inondations, et vagues de chaleur dans un climat futur, et (d) la mise en perspective des résultats compte tenu de la position des modèles utilisés dans le panache des simulations globales CMIP6. Enfin, un prototype de descente d'échelle statistique sur La Réunion à partir des simulations CMIP6 sera détaillé pour démontrer la possibilité de quantifier l'incertitude du changement climatique à l'échelle d'un petit territoire insulaire.

Le chapitre 7 représentera la vitrine du projet BRIO : quelle valorisation a été faite du projet ? Comment les résultats ont-ils été utilisés en aval pour des diagnostics in fine ? Nous présenterons les conférences et séminaires qui ont été donnés et dresserons une liste d'organismes ayant manifesté leur intérêt pour utiliser les données du projet dans les diverses îles. Le portail régional du changement climatique, qui offre un accès libre aux données du projet et aux diagnostics du changement climatique sur le bassin sud-ouest de l'océan Indien et ses états insulaires, sera présenté. Les projets partenaires utilisant les données BRIO dans des modèles d'impact seront détaillés pour la culture de la canne à sucre et l'évolution de la dengue à La Réunion.

Le chapitre 8 synthétisera le diagnostic du changement climatique sur l'ensemble de la zone et des territoires insulaires en milieu et fin de siècle pour trois scénarios d'émission de gaz à effet de serre. Nous résumerons ici les projections climatiques de température, précipitations et activité cyclonique.

La conclusion donnée au chapitre 9 clôturera le manuscrit en mettant en avant les principaux travaux réalisés et les perspectives ultérieures à mener dans un futur projet.

Chapitre 2

Contexte de l'étude et état de l'art de la modélisation climatique

SOMMAIRE

2.1	LE CONTEXTE GLOBAL ACTUEL	5
2.1.1	Définitions du climat et du GIEC	5
	<i>Qu'est-ce que le climat ?</i>	5
	<i>Qu'est-ce que le GIEC et comment fonctionne-t-il ?</i>	5
	<i>Rapport spécial du GIEC sur le réchauffement planétaire à 1,5°C</i>	6
2.1.2	Scénarios du GIEC	7
	<i>Scénarios des rapports 2001 et 2007</i>	7
	<i>Nouvelles représentations climatiques de référence depuis le 5^{ème} rapport du GIEC</i>	8
	<i>Comparaison entre RCP et anciens scénarios</i>	10
	<i>Représentation des évolutions sociales et économiques (SSP)</i>	10
	<i>Cohérence entre évolutions climatiques et socioéconomiques</i>	12
2.1.3	Modèles de climat globaux et exercice d'intercomparaison CMIP	12
	<i>Modèles de climat globaux</i>	12
	<i>Projet d'intercomparaison de modèles couplés (CMIP)</i>	14
	<i>Phase CMIP6 et défis</i>	15
2.1.4	Descente d'échelle	15
	<i>Descente d'échelle statistique</i>	16
	<i>Bénéfices et inconvénients de chaque descente d'échelle</i>	18
2.1.5	Modèles de climat régionaux et exercice CORDEX	18
	<i>Descente d'échelle dynamique</i>	18
	<i>Biais des modèles et corrections de biais</i>	19
	<i>CORDEX</i>	19
	<i>Simulations EURO-CORDEX</i>	20
2.1.6	Incertitudes climatiques	21
	<i>Divers types d'incertitudes</i>	21
	<i>Importance relative des incertitudes selon l'horizon considéré</i>	22
	<i>Prise en compte des incertitudes dans la fourniture de services climatiques</i>	22
2.1.7	Indicateurs climatiques et outils statistiques	23
2.1.8	Élévation du niveau des océans	24
2.2	BASSIN SUD-OUEST DE L'OCÉAN INDIEN ET SYSTÈMES TROPICAUX	25
2.2.1	Systèmes dépressionnaires tropicaux	25
2.2.2	Surveillance par les CMRS	26
2.2.3	Classification des systèmes tropicaux	26
2.2.4	Activité cyclonique du sud-ouest de l'océan Indien	28
2.3	PROJET BRIO ET OBJECTIFS	30

2.4 SIMULATIONS CLIMATIQUES ET TRAVAUX D'ANALYSE DU PROJET BRIO . . .	32
2.4.1 Caractéristiques des modèles de climat utilisés	32
2.4.2 Scénarios retenus et coûts de calcul	34
2.4.3 Etendue des tâches réalisées	35

DANS ce chapitre, nous rappelons le contexte de l'étude et l'état actuel des connaissances sur le changement climatique pour le globe et dans le sud-ouest de l'océan Indien. Nous présentons également les caractéristiques climatiques de notre région pour mettre en avant l'aléa cyclonique et ses spécificités. Cette introduction permet de souligner le besoin d'un projet dédié aux territoires insulaires du bassin, et de présenter le projet **BRIO**, son financement et les principaux partenaires scientifiques impliqués. Nous détaillons ensuite les caractéristiques des modèles climatiques utilisés, les scénarios climatiques retenus et l'ensemble des simulations et post-traitements réalisés.

2.1 LE CONTEXTE GLOBAL ACTUEL

2.1.1 Définitions du climat et du GIEC

Qu'est-ce que le climat ?

Le climat, selon la définition de Ribes (2009) inspirée du 4^{ème} rapport du GIEC (IPCC 2013), est une description statistique en termes de moyenne et de variabilité de diverses variables (température, vent, précipitations), sur une période de temps allant de quelques mois à plusieurs millions d'années. Aussi, le climat se distingue de la météorologie, qui s'attache à décrire et à prévoir l'évolution chronologique du temps. Le système climatique est un système complexe constitué de cinq composantes principales : l'atmosphère, l'hydrosphère, la cryosphère, la lithosphère et la biosphère. Par ailleurs, étudier le climat et non le temps qu'il fait au quotidien, signifie que l'on s'intéresse à des variables climatiques sur des fréquences temporelles mensuelles, saisonnières, annuelles mais moyennées sur des périodes temporelles assez longues qui peuvent aller de 20 à 30 ans suivant la variable météorologique d'intérêt.

Qu'est-ce que le GIEC et comment fonctionne-t-il ?

Le Groupe d'experts Intergouvernemental sur l'Evolution du Climat (GIEC, ou IPCC en anglais) a été mis en place en 1988 par l'Organisation Météorologique Mondiale (OMM) et par le Programme des Nations Unies pour l'Environnement. La Convention-cadre des Nations Unies sur les changements climatiques (CCNUCC) a été signée en 1992. Le GIEC a pour mission d'évaluer, sans parti pris et de façon méthodique, claire et objective, les informations d'ordre scientifique, technique et socioéconomique sur le changement climatique, ses impacts et les différentes options pour l'atténuer ou s'y adapter. Il n'a pas pour mandat d'entreprendre des travaux de recherche ni de suivre l'évolution des variables climatologiques ou d'autres paramètres pertinents. Ses activités sont principalement la production de rapports (rapports d'évaluation, rapports spéciaux), de directives méthodologiques et de documents techniques. Il doit produire sur demande des avis scientifiques, techniques et socioéconomiques pour les Conférence des Parties (COP). Ses évaluations sont principalement fondées sur les publications scientifiques et techniques dont la valeur scientifique est largement reconnue. Pour la rédaction de ses rapports, le GIEC fait appel à des centaines d'experts éminents, spécialistes des divers domaines traités dans ses rapports. Il organise les travaux d'évaluation en s'appuyant notamment sur un bureau composé de 34 membres et sur 3 groupes de travail se focalisant sur les bases scientifiques du changement climatique (groupe I), les impacts, l'adaptation et la vulnérabilité (groupe II), et l'atténuation (groupe III). Les rapports du GIEC ont été publiés à intervalles réguliers (1990, 1995, 2001, 2007, 2014). Le 2^{ème} rapport a fourni aux négociateurs d'importants documents avant l'adoption du protocole de Kyoto en 1997. Le 5^{ème} rapport, dont les travaux de rédaction ont commencé en 2010 et se sont achevés en 2014, comprend trois volumes dont la contribution du groupe de travail I (Working group I ou WGI) consacrée aux sciences physiques du changement climatique (IPCC 2013) et un rapport de synthèse (Fig. 2.1).

À la suite des menaces de baisse de financement de la part du nouveau président des États-Unis élu en 2016, Donald Trump, le gouvernement français a annoncé, en mars 2018, augmenter sa contribution au GIEC d'un million d'euros par an ce qui porte son soutien à hauteur de 15% des contributions des États.

Le cycle de réalisation du 6^{ème} rapport d'évaluation du GIEC (ou AR6 pour "Assessment Report" en anglais) est en cours depuis 2016. Outre les trois volumes classiques de l'AR publiés en 2021 et 2022 - dont la contribution du groupe de travail I consacrée aux sciences physiques du changement climatique (IPCC 2021), le rapport de synthèse et leurs résumés -, trois rapports spéciaux seront aussi

produits au cours de ce 6^{ème} cycle, dont le rapport spécial sur l'impact d'un réchauffement global de 1.5°C au-dessus des niveaux préindustriels et sur les trajectoires d'émission de gaz à effet de serre (GES) correspondantes (octobre 2018), et un rapport sur les liens entre le changement climatique, les océans et la cryosphère (septembre 2019).

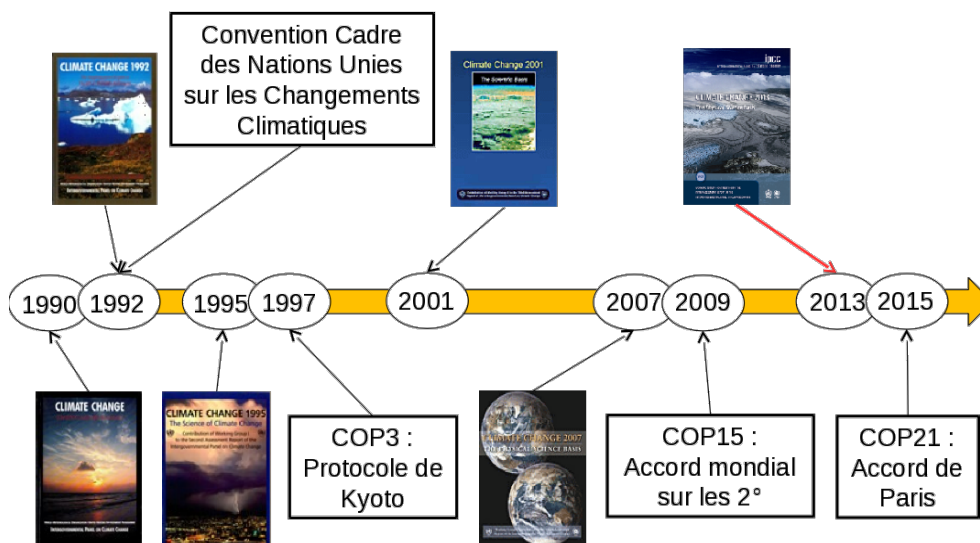


FIGURE 2.1 – Frise chronologique des rapports d'évaluation du GIEC et des principales COP. Source : Météo-France, Serge Planton.

Rapport spécial du GIEC sur le réchauffement planétaire à 1.5°C

Lors de la COP 21 à Paris en 2015, les états se sont engagés à limiter le réchauffement climatique bien en dessous de 2°C par rapport aux niveaux préindustriels et à poursuivre les efforts pour limiter la hausse des températures à 1.5°C par rapport à 1850-1900. L' Accord de Paris vise aussi à renforcer les capacités des pays à faire face aux impacts du changement climatique. Voici ci-dessous un extrait du rapport spécial du GIEC sur le réchauffement planétaire à 1.5°C d'octobre 2018.

L'évaluation des jeux d'observations de température de surface disponibles montre que le réchauffement global imputé aux activités humaines atteignait 0.87°C (±0.12°C) en moyenne sur la période 2006-2015, par rapport à la période 1850-1900. En 2017, le réchauffement en moyenne mondiale était de +1°C (±0.2°C) par rapport à la période 1850-1900. La teneur de CO₂ atmosphérique a franchi le cap des 400 parties par million (ppm¹) en moyenne annuelle en 2016. Le niveau actuel d'émissions anthropiques de CO₂ (de l'ordre de 40 Gt² par an) induit un réchauffement de l'ordre de 0.2°C ±0.1°C par décennie. Ce qui implique que le réchauffement moyen du globe pourrait franchir le seuil de 1.5°C d'ici 2040 si aucune mesure drastique de réduction des émissions de gaz à effet de serre n'est prise rapidement. La faisabilité technique et l'acceptabilité sociale de telles mesures restent pour le moment hypothétiques.

L'analyse des résultats de modèles de climat ayant été utilisés dans le dernier rapport du GIEC (AR5) suggère qu'un niveau de réchauffement global même limité à 1.5°C pourrait accroître la fréquence des évènements extrêmes tels que les vagues de chaleur et les fortes précipitations dans de nombreuses régions du globe, voire des sécheresses dans certaines régions. Les extrêmes chauds et froids de température sur les continents devraient se réchauffer plus que les températures moyennes. Ainsi, selon les projections climatiques, dans un climat réchauffé de 1.5°C en moyenne mondiale, les

1. 1 partie par million (en volume) correspond à 1 cm³ par m³ d'air

2. 1 Gt = 1 milliard de tonnes

extrêmes chauds pourraient se réchauffer d'environ 3°C tandis que les extrêmes froids progresseraient de l'ordre de 4.5°C, suggérant des vagues de froid moins intenses. Le maintien du réchauffement global en deçà de 1.5°C permettrait de limiter la sévérité de nombreux impacts sur les écosystèmes naturels et humains. A contrario, dépasser ce seuil pourrait mettre à défaut la résilience des écosystèmes les plus fragiles tel que les écosystèmes arctiques et les zones humides. Sur les continents, un réchauffement climatique limité à 1.5°C permettrait également de réduire la pression sur l'accès aux ressources en eau. En effet, deux fois moins de personnes pourraient souffrir d'un manque d'eau à 1.5°C qu'à 2°C. Le même constat existe pour l'accès à la nourriture pour lequel la pression alimentaire pour un grand nombre de régions subtropicales et insulaires serait moindre pour un réchauffement à 1.5°C par rapport à 2°C. Du point de vue de l'océan, cette différence de réchauffement (de 1.5°C par rapport à 2°C) permettrait de réduire notablement les risques d'effondrement des écosystèmes marins des mers polaires, tropicales et des régions côtières. Le niveau des océans monterait de 10 cm de moins à 1.5°C qu'à 2°C, mais le rapport n'exclut pas une hausse plus importante à ce niveau de réchauffement au-delà de 2100. Il précise également que la déstabilisation des calottes Groenlandaise et Antarctique (qui pourrait constituer un apport d'eau considérable vers les océans) au-delà de 2100 reste encore possible avec un niveau de réchauffement de 1.5°C.

Ce rapport souligne qu'il est nécessaire de réduire drastiquement les émissions de gaz à effet de serre tel que le CO_2 et le méthane pour limiter le réchauffement global à 1.5°C. Plus ces réductions seront ambitieuses et plus tôt elles débiteront (obligatoirement avant 2030), plus la probabilité de limiter le réchauffement à 1.5°C sera importante. En effet, les scénarios compatibles avec un niveau de réchauffement à 1.5°C imposent de réduire les émissions nettes de gaz à effet de serre à zéro en milieu de siècle. La majorité des scénarios de mitigation implique un recours massif aux émissions négatives telles que la bioénergie avec capture et séquestration de carbone d'ici la fin du siècle mais cela reste modulé par l'ampleur des réductions des émissions de GES qui seront opérées à court terme.

2.1.2 Scénarios du GIEC

Scénarios des rapports 2001 et 2007

Le climat à venir est notamment fonction des émissions ou concentrations de gaz à effet de serre et d'aérosols dues aux activités humaines. Or, les émissions humaines dépendent de notre consommation énergétique : chauffage et climatisation, transports, production de biens de consommation, activités agricoles, etc. Pour réaliser des projections climatiques, il faut donc émettre des hypothèses sur l'évolution de la démographie mondiale et des modes de vie à travers la planète.

Dans les précédents rapports du GIEC, l'analyse reposait sur un faisceau de futurs possibles de nos sociétés et de nos modes de vie. Ces scénarios socioéconomiques, appelés SRES (du nom du rapport spécial publié en 2000 pour les présenter, Special Report on Emissions Scenarios) étaient organisés en 4 familles (A1, A2, B1 et B2) et se traduisaient chacun en termes d'émission de GES pour le 21^{ème} siècle. Ces évolutions des émissions ou des concentrations de GES et d'aérosols étaient alors utilisées par les climatologues comme **données d'entrée** des modèles simulant le climat futur. Les scénarios climatiques émergeant de ces simulations étaient à leur tour utilisés dans des modèles d'impact permettant notamment de simuler les effets du climat sur les écosystèmes ou l'hydrologie. Ces résultats étaient enfin utilisés dans des études socioéconomiques sur les impacts et l'adaptation aux changements climatiques.

Nouvelles représentations climatiques de référence depuis le 5^{ème} rapport du GIEC

Lors de la préparation du 5^{ème} rapport, une approche différente a été adoptée afin d'accélérer le processus d'évaluation et permettre aux économistes et aux climatologues de ne plus travailler de manière séquentielle mais parallèle. Pour analyser le futur du changement climatique, les experts du GIEC ont cette fois défini *a priori* quatre trajectoires d'émission et de concentrations de gaz à effet de serre, d'ozone et d'aérosols, ainsi que d'occupation des sols baptisés "Profils représentatifs d'évolution de concentration" ou RCP en anglais pour "Representative Concentration Pathways".

Au nombre de quatre, pour éviter un scénario médian "fourre-tout", les profils d'évolution d'émission de GES ont été sélectionnés par les scientifiques sur la base de plusieurs centaines de scénarios publiés. Ils ont été décrits par Moss et al. (2010) et récapitulés dans le tableau 2.1 et la figure 2.3(a). Ils ont été traduits en termes de forçage radiatif, c'est-à-dire de modification du bilan radiatif de la planète. Le bilan radiatif représente la différence entre le rayonnement solaire reçu et le rayonnement infrarouge réémis par la planète (figure 2.2). Il est calculé au sommet de la troposphère (entre 10 et 16 km d'altitude). Lorsque le bilan radiatif est nul, cela signifie que le flux d'énergie rejeté est égal au flux d'énergie absorbé. Sous l'effet de facteurs d'évolution du climat, comme par exemple une augmentation de la concentration de CO_2 - gaz à effet de serre - ce bilan radiatif se modifie : on parle de forçage radiatif. Les 4 profils RCP correspondent chacun à une évolution différente de ce forçage à l'horizon 2300. Ils sont identifiés par un nombre, exprimé en $W.m^{-2}$ (puissance par unité de surface), qui indique la valeur du forçage considéré. Plus cette valeur est élevée, plus le système terre-atmosphère gagne en énergie et se réchauffe. La valeur pour 2011 est de $2.84 W.m^{-2}$. Par ailleurs, il est aujourd'hui aussi envisagé d'avoir des évolutions des émissions globales de GES qui diminueraient après une phase de croissance au 21^{ème} siècle ce qui a obligé certains scénarios à être prolongés au-delà de 2100.

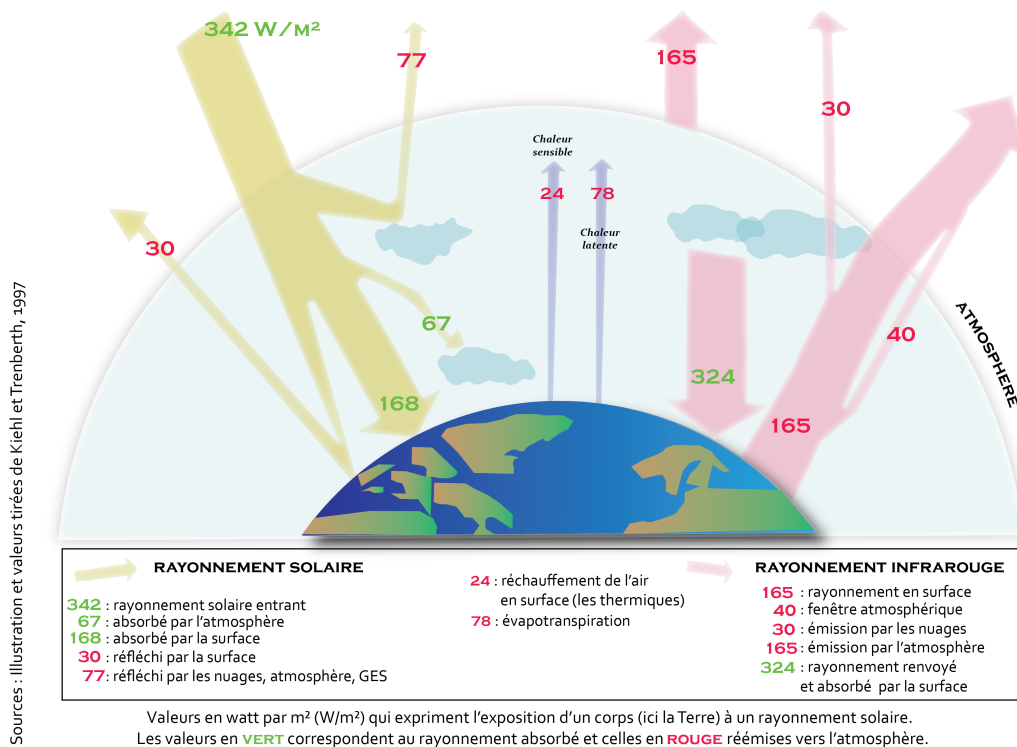


FIGURE 2.2 – Fonctionnement du bilan radiatif de la terre. Source : illustration et valeurs tirées de Kiehl et Trenberth (1997).

2.1. Le contexte global actuel

Nom	Forçage radiatif	Concentration de GES (ppm)	Trajectoire
RCP 8.5	$> 8.5 \text{ W.m}^{-2}$ en 2100	$> 1370 \text{ eq-CO}_2$ en 2100	Croissante
RCP 6.0	$\sim 6 \text{ W.m}^{-2}$ au niveau de stabilisation après 2100	$\sim > 850 \text{ eq-CO}_2$ au niveau de stabilisation après 2100	Stabilisation sans dépassement
RCP 4.5	$\sim 4.5 \text{ W.m}^{-2}$ au niveau de stabilisation après 2100	$\sim > 660 \text{ eq-CO}_2$ au niveau de stabilisation après 2100	Stabilisation sans dépassement
RCP 2.6	Pic à $\sim 3.5 \text{ W.m}^{-2}$ avant 2100 puis déclin	Pic $\sim > 490 \text{ eq-CO}_2$ avant 2100 puis déclin	Pic puis déclin
RCP 1.9	Pic à $\sim 3 \text{ W.m}^{-2}$ puis déclin	Pic $\sim > 430 \text{ eq-CO}_2$ avant 2100 puis déclin	Pic puis déclin

TABLEAU 2.1 – Caractéristiques principales des profils représentatifs d'évolution de concentration (RCP) qui sont des scénarios de référence de l'évolution du forçage radiatif sur la période 2006-2300. D'après Moss et al. (2010), avec ajout du dernier RCP 1.9.

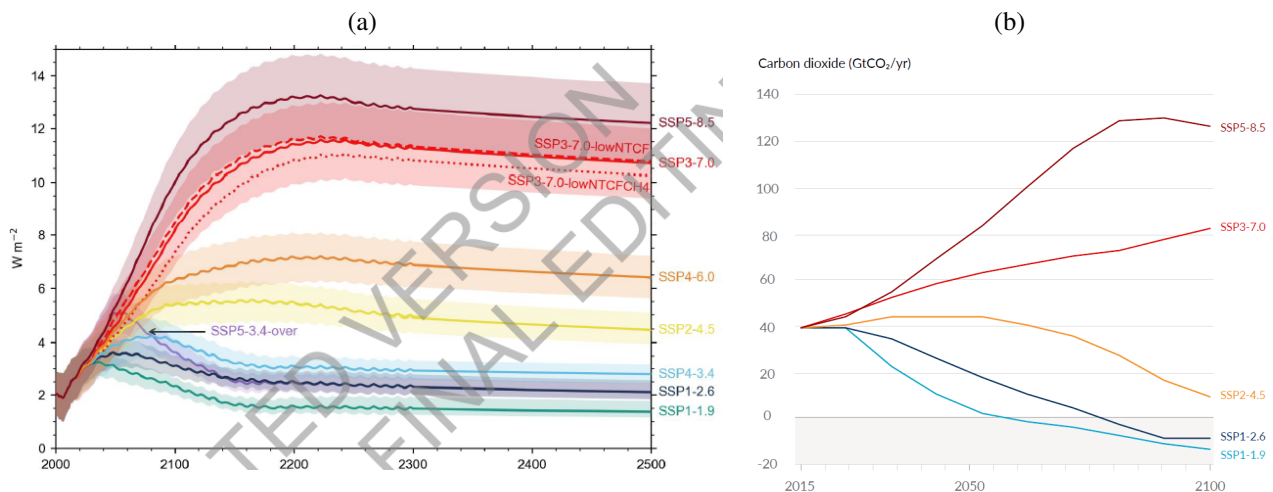


FIGURE 2.3 – Évolution selon les différents scénarios du GIEC : (a) du bilan radiatif de la terre ou “forçage radiatif” en W.m^{-2} sur la période 2000-2500, et (b) des émissions globales annuelles de CO_2 (en Gt/an) sur la période 2015-2100. Source : rapport IPCC (2021).

Comparaison entre RCP et anciens scénarios

Le profil **RCP 8.5** est le plus extrême (pessimiste). Il est un peu plus fort que le scénario le plus marqué utilisé dans les simulations du rapport du **GIEC 2007 (A2)**. Les profils **RCP 6.0** et **RCP 4.5** correspondent sensiblement et respectivement aux scénarios **A1B** et **B1**. Le profil **RCP 2.6** est sans équivalent dans les anciennes propositions du **GIEC**. En effet, sa réalisation implique, et c'est une nouveauté importante, l'intégration des effets de politiques de réduction des émissions susceptibles de limiter le réchauffement planétaire à 2°C . Enfin, le profil **RCP 1.9**, très ambitieux, a été créé dernièrement pour représenter l'objectif de l'Accord de Paris (**COP21**), visant à réduire le réchauffement planétaire moyen en deçà de 1.5°C par rapport à la période pré-industrielle à l'horizon 2100.

Représentation des évolutions sociales et économiques (SSP)

Ces **RCP** sont utilisés par les différentes équipes d'experts (climatologues, hydrologues, agronomes, économistes...), qui travaillent pour la première fois en parallèle : les climatologues produisent des projections climatiques utilisant les **RCP** comme entrée, tandis que les sociologues et les économistes établissent des scénarios qui explorent toutes les possibilités d'évolutions technologiques et socioéconomiques compatibles avec les **RCP**. Cette méthode peut être schématisée par le diagramme en figure 2.4.

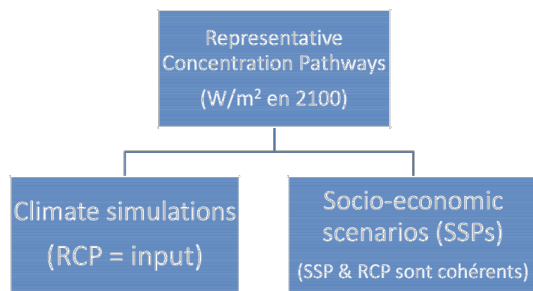


FIGURE 2.4 – *Élaboration en parallèle des scénarios climatiques et socioéconomiques : le processus de Noorwijkerhout (simplifié)*

Cinq familles de scénarios, nommés **SSP** (pour “Shared Socioeconomic Pathways” ou trajectoires socioéconomiques partagées), ont ainsi été définies (**O’Neill et al. 2016**). Le principe repose sur une architecture en matrice, qui définit pour les cinq familles de scénarios **SSP1** à **SSP5**, les efforts à consentir à l'échelle mondiale pour parvenir aux profils de concentrations correspondantes à chacun des **RCP** (Fig. 2.5). Cette approche novatrice a la particularité d'isoler la décision prise du point de vue du climat de toutes les autres décisions : politiques, sociales et économiques.

Les scénarios **SSP** seront utilisés pour évaluer des politiques sur le changement climatique. Pour cela, il est important que ces scénarios socioéconomiques soient décrits précisément et couvrent une large gamme de futurs possibles pour nos sociétés, en se répartissant selon deux axes (Fig. 2.6) :

- Un axe (horizontal) représente le défi en matière d'adaptation des sociétés au changement climatique.
- Un autre axe (vertical) représente le défi en matière d'atténuation des émissions de gaz à effet de serre.
- Le **SSP 1** (faible défi d'adaptation, faible défi d'atténuation), décrit un monde marqué par une forte coopération internationale, donnant la priorité au **développement durable**.
- Le **SSP 2** (défi d'adaptation moyen, défi d'atténuation moyen), décrit un monde caractérisé par la poursuite des **tendances actuelles**.
- Le **SSP 3** (défi d'adaptation élevé, défi d'atténuation élevé) dépeint un monde **fragmenté** affecté par la compétition entre pays, une croissance économique lente, des politiques orientées vers la sécurité et la production industrielle et peu soucieuses de l'environnement.

2.1. Le contexte global actuel

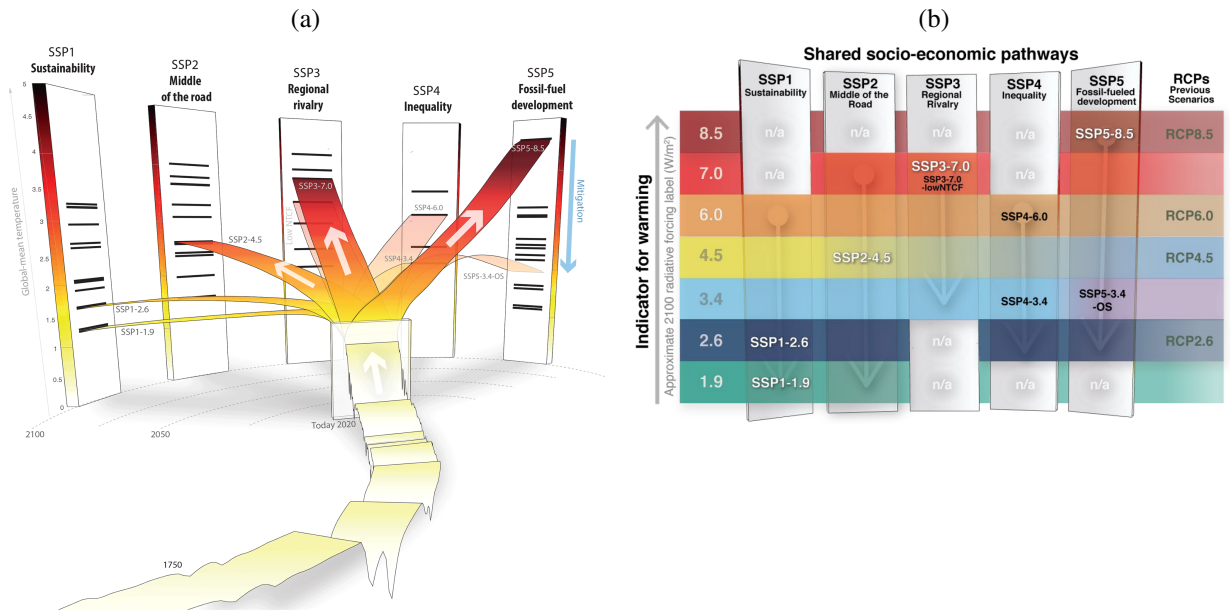


FIGURE 2.5 – Les trajectoires des *SSP* du *GIEC*, leurs forçages radiatifs associés (en $W.m^{-2}$) avec une indication d'élévation moyenne de température globale, leurs correspondances en scénarios *RCP*, et les 5 histoires socioéconomiques sur lesquelles ils se basent.

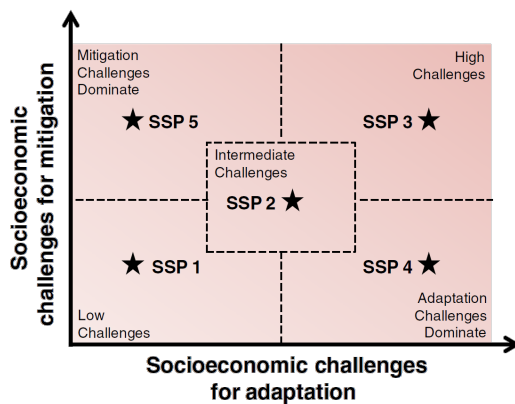


FIGURE 2.6 – Les cinq familles *SSP*, réparties selon le défi socioéconomique pour l'adaptation et pour l'atténuation (d'après *O'Neill et al. 2016*)

- Le **SSP 4** (défi d'adaptation élevé, faible défi d'atténuation) est celui d'un monde marqué par de **grandes inégalités** entre pays et en leur sein. Une minorité y serait responsable de l'essentiel des émissions de **GES**, ce qui rend les politiques d'atténuation plus faciles à mettre en place tandis que la plus grande partie de la population resterait pauvre et vulnérable au changement climatique.
- Le **SSP 5** (faible défi d'adaptation, défi d'atténuation élevé) décrit un monde qui se concentre sur un **développement traditionnel alimenté par les combustibles fossiles** et rapide des pays en voie de développement, fondé sur une forte consommation d'énergie et des technologies émettrices de carbone ; la hausse du niveau de vie permettrait d'augmenter la capacité d'adaptation, notamment grâce au recul de l'extrême pauvreté.

Pour chacune de ces familles, la figure 2.3 montre le profil moyen d'évolution de nos émissions annuelles globales de CO₂, principal gaz à effet de serre, sur la période 2015-2100.

Cohérence entre évolutions climatiques et socioéconomiques

En fonction des différents paramètres des scénarios socioéconomiques (démographie, urbanisation, PIB par habitant, croissance, etc.), certaines familles de scénarios **SSP** sont compatibles avec une partie des profils d'émission **RCP**. Par exemple, les familles **SSP3** et **SSP5** ne sont pas compatibles avec les profils d'émissions des **RCP1.9** (Fig. 2.5(b), n/a). Autrement dit, le monde décrit selon les paramètres définissant les familles **SSP3** et **SSP5** ne permet pas de limiter les émissions de gaz à effet de serre à un bas niveau.

La figure 2.5(b) montre en outre que le profil d'émission **RCP4.5** peut être respecté pour l'ensemble des cinq familles **SSP** en fonction des valeurs plus ou moins modérées des paramètres descriptifs. Il montre aussi que le monde décrit par la famille **SSP1** est préservé des profils d'émission les plus élevés.

2.1.3 Modèles de climat globaux et exercice d'intercomparaison CMIP

Modèles de climat globaux

Les simulations climatiques à l'échelle du globe se font à partir de modèles de circulation générale appelés **GCM** (General Circulation Model) qui couvrent l'ensemble du globe, représentent la dynamique de l'atmosphère et ses lois physiques. Dans tout modèle atmosphérique de circulation générale, l'atmosphère est découpée en boîtes régulières sur l'horizontale et la verticale (Fig. 2.7). La valeur d'une variable en un point de grille d'un **GCM** représente une moyenne de cette variable sur une boîte ou "maille" dont la taille dépend des résolutions horizontale (ex : 100 km x 100 km = 10 000 km² pour une maille de 100 km) et verticale du modèle. Plus la résolution est faible, plus la valeur modèle s'éloigne des valeurs observées en un point précis. De plus, les phénomènes physiques qui prennent place à des échelles spatiales plus fines que la maille du modèle ne sont pas explicitement résolus et doivent donc être approximés par des paramétrisations. Certaines de ces paramétrisations sont développées de manière heuristique, en se basant sur des observations, quelques connaissances théoriques et des sorties de modèles à très haute résolution. D'autres reposent sur des bases fondamentales solides mais doivent être simplifiées, coulées dans un moule statistique, puisqu'on en cherche des effets « moyens ». Méconnaissances, hypothèses, approximations dans ces paramétrisations font qu'en dépit d'un réalisme croissant, des biais plus ou moins importants apparaissent sur certaines variables du modèle de climat. C'est plus particulièrement le cas pour les précipitations dont la nature convective dans les régions tropicales fait intervenir des processus de très fine échelle qui ne sont pas représentés de manière réaliste dans les **GCMs**. La principale différence entre un **GCM** et un modèle

de prévision numérique du temps est la nécessité de forcer le modèle vers des valeurs climatologiques (ou leur évolution probable) pour éviter des dérives trop fortes du modèle. Ces valeurs climatologiques sont généralement des moyennes mensuelles permettant ainsi de prendre en compte le cycle annuel saisonnier.

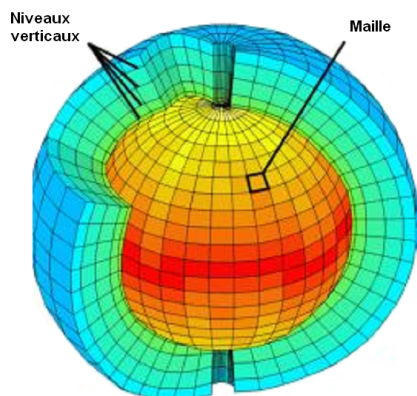


FIGURE 2.7 – Grille tridimensionnelle d'un modèle atmosphérique. Source : S. Planton.

L'atmosphère interagit avec les autres composantes du système climatique à différentes échelles de temps. Pour étudier le climat global de la planète, les modèles atmosphériques sont couplés à des modèles représentant les autres parties du système terre : l'océan, la végétation, les fleuves, la biogéochimie marine, la chimie atmosphérique, les calottes polaires, et le cycle du carbone. Pour reproduire ces interactions dans un modèle de climat, on calcule les flux d'énergie, de matière ou de quantité de mouvement qui sont échangés entre les différentes composantes à intervalles de temps plus ou moins longs selon les échelles de temps des interactions.

Les modèles climatiques ont progressé en même temps que la puissance des ordinateurs et au grès des progrès dans la connaissance du fonctionnement du système climatique dans son ensemble. La première composante du système climatique couplée à l'atmosphère était la surface terrestre pour le calcul des échanges d'énergie et d'eau à l'interface continent-atmosphère. L'étape la plus récente a consisté à inclure dans les modèles une représentation de la dynamique de la végétation et un traitement simplifié de la chimie atmosphérique. La figure 2.8 montre l'évolution au cours des décennies du niveau de complexité (en termes de couplage des différentes composantes du système terrestre) des modèles climatiques globaux. Le terme couplage fait référence à une interaction dans les 2 sens entre les éléments considérés. Si on parle de couplage océan-atmosphère, cela signifie donc que les fluctuations des températures de surface de la mer vont altérer la température de l'atmosphère qui a son tour agit sur la température de l'océan, le tout étant piloté par les flux en surface (rayonnement, turbulence...). Les modèles de climat globaux sont aujourd'hui tous couplés océan-atmosphère et appelés **AOGCMs** depuis les années 1990. Au minimum, les versions les plus récentes des **AOGCMs** (exploités par le **GIEC**) couplent l'atmosphère, la surface terrestre et l'océan. Les modèles du système terrestre les plus complexes pouvant inclure l'ensemble des phénomènes chimiques de l'atmosphère, les processus terrestres dynamiques – y compris la croissance et la décomposition des végétaux – et le cycle du carbone interactif sur les terres émergées et dans les océans.

Un modèle climatique couplant un modèle atmosphérique et de surface continentale à un modèle océanique, comprend plusieurs dizaines de millions de variables décrivant l'état du climat à chaque pas de temps de calcul du modèle (~ horaire). Depuis une trentaine d'année, la puissance de calcul des ordinateurs suit sensiblement une courbe exponentielle avec un doublement de la puissance environ tous les 18 mois. La liste des produits requis ou souhaités pour prendre des décisions en fonction du climat a ainsi pu considérablement s'allonger et la résolution de base s'est améliorée. Aujourd'hui les **AOGCMs** ont une résolution spatiale autour de 150 km (généralement supérieure à 100km).

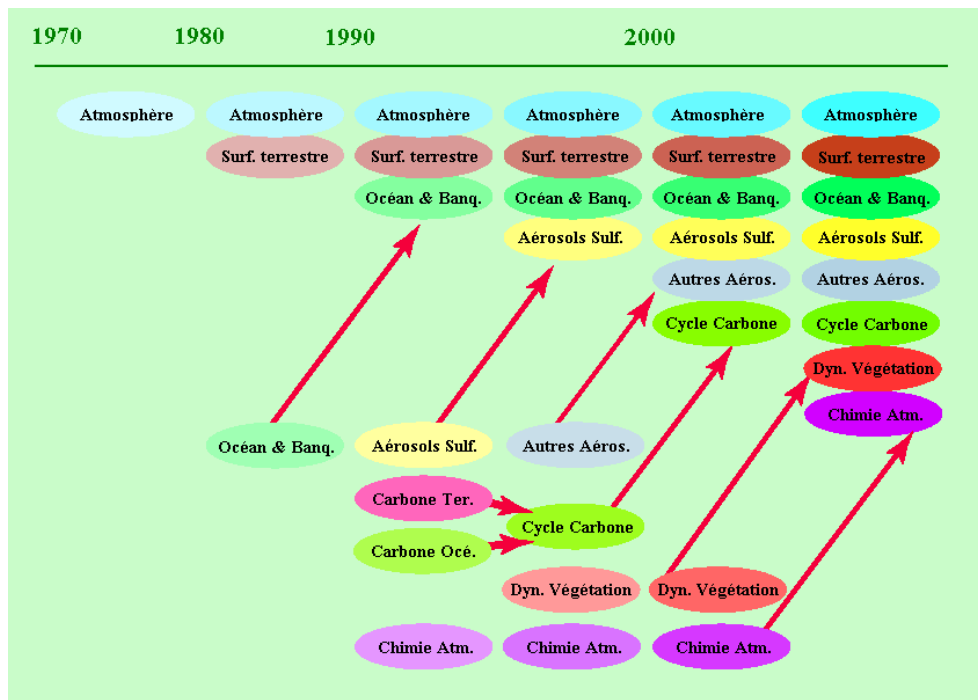


FIGURE 2.8 – Composantes d'un modèle climatique de grande échelle. Source : S. Planton

Projet d'intercomparaison de modèles couplés (CMIP)

Le projet d'intercomparaison de modèles couplés (Coupled Model Intercomparison Project, **CMIP**), a été créé il y a plus de 20 ans par le Programme mondial de recherche sur le climat (World Climate Research Program, **WCRP**), qui dépend lui-même de l'**OMM**. Son objectif est de favoriser la coopération internationale entre les centres de modélisation du climat et de définir des expériences numériques standards qui facilitent la comparaison des résultats et conduisent à de nouvelles connaissances et à une meilleure compréhension du système climatique. C'est un remarquable exemple de coordination scientifique et technique entre des dizaines de centres de modélisation du climat, auquel participent plus de mille chercheurs. L'idée de comparer les modèles, qui semble aujourd'hui évidente, a surgi lorsque les centres de modélisation de l'atmosphère ont commencé dans le monde entier à exploiter des modèles couplés océan-atmosphère à des fins climatologiques. L'intérêt de diffuser et de comparer les produits des modèles est apparu très vite. Mais c'était difficile à mettre en œuvre : il fallait définir un ensemble organisé et durable de protocoles et de mécanismes, établir la coordination voulue et mettre au point les outils de comparaison. Le **CMIP** aide depuis 1995 les centres de modélisation et une large palette de concepteurs et d'utilisateurs de modèles à réaliser selon des protocoles communs les expériences fondamentales d'analyse et de comparaison des derniers modèles climatiques. En plus d'offrir au **GIEC** et à d'autres instances une base solide pour procéder à des évaluations indépendantes dans les règles, **CMIP** permet de quantifier les incertitudes sur le changement climatique liées aux incertitudes sur les modèles climatiques.

Le graphique 2.9, par exemple, présente l'élévation chronologique des températures en degrés Celsius prévue par l'ensemble des simulations **CMIP6** pour les cinq scénarios **SSP** principaux du **GIEC-6** décrits en section 2.1.2 ; les panaches d'incertitudes représentés en rouge et bleu donnent les fourchettes de valeurs probables pour chacun des deux scénarios **SSP3-7.0** et **SSP1-2.6**. On y lit aussi qu'une trentaine d'**AOGCMs** ont fourni des scénarios climatiques à l'échelle globale pour le 6^{ème} exercice du **GIEC**.

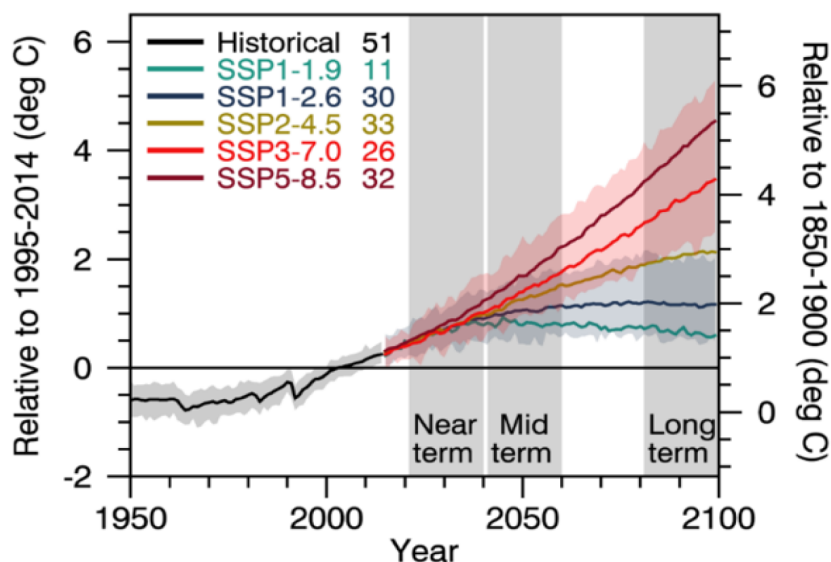


FIGURE 2.9 – Élévation de la température globale moyenne jusqu'en 2100 selon les cinq scénarios *SSP* du *GIEC*, par rapport à la période préindustrielle 1850-1900 (échelle de droite) ou par rapport à la période 1995-2014 (échelle de gauche). Source : rapport *IPCC* (2021)

Phase **CMIP6** et défis

Le projet s'est considérablement développé avec cinq phases successives, passant d'une seule expérience en 1995 (**CMIP1**) à plus de deux cents expériences dans la phase actuelle (**CMIP6**). Cette dernière a débuté fin 2014 avec la livraison du protocole sur les lots de simulations numériques à mener d'ici 2020. À noter que, dans le cadre de **CMIP6**, le climat futur commence en 2015. Des jeux de données historiques sur le forçage – notamment sur les émissions et les concentrations de gaz à effet de serre, les changements d'affectation des terres, les variations de l'activité solaire et des conditions stratosphériques (aérosols d'origine volcanique, ozone) – ont été disponibles en avril 2016. Depuis cette date, des simulations du climat passé et futur (2015-2100 + extensions jusque 2300) ont progressivement été conduites par les divers centres de modélisation. Les résultats de ces simulations ont été archivés et rendus directement accessibles au niveau international via le réseau avancé de distribution de données **ESGF** à partir de 2018, c'est-à-dire au démarrage du projet **BRIO**, et finalisés pour 2020. La contribution française à **CMIP6** aura représenté plus de 500 millions d'heures de calcul pour la réalisation des simulations climatiques de plusieurs modèles sur plusieurs supercalculateurs français 24 heures/24 et 7 jours/7.

2.1.4 Descente d'échelle

La mise en place de politiques d'adaptation en lien avec certains enjeux régionaux ou locaux nécessite la mise en œuvre de modèles d'impact. Ceux-ci supposent de disposer de projections de certaines variables météorologiques à des échelles spatiales plus fines que celles proposées par les **AOGCMs**. En effet, le climat peut, selon les caractéristiques physiographiques d'une zone géographique donnée, présenter une variabilité spatiale à des échelles très fines. Certaines particularités telles que l'usage des sols, la topographie, les contrastes terre-mer des régions côtières ou insulaires sont primordiales dans la détermination du climat régional ou local. Les caractéristiques de surface n'ont pas un effet uniforme sur les différentes variables climatiques, et cette influence peut aussi varier d'une saison à l'autre. Par exemple, la température de l'air en surface (et plusieurs des indices qui en sont dérivés) est généralement uniforme sur de vastes régions de terrain plat, mais varie brusquement près de la côte. Par contre, les précipitations tendent à être plus variables dans l'espace en général.

Or les moyens informatiques limitent actuellement l'utilisation des AOGCMs à des grilles grossières de quelques centaines de kilomètres. En ne décrivant pas - ou en décrivant trop grossièrement - certaines composantes du paysage (îles, relief), ces simulations ignorent les effets de ces composantes sur le climat. Sur la région COI par exemple, seule la Grande Île de Madagascar est résolue dans la grille des AOGCMs. Les "petites" îles comme La Réunion, Maurice, Seychelles, Comores, Rodrigues, Agaléga et Saint Brandon, ne sont pas représentées (présence de mer). Or, on sait par exemple que la pluviométrie des ces îles est fortement contrainte par la présence de relief ou par le contraste terre-mer qui induisent localement une forte variabilité spatio-temporelle des précipitations. Cette contrainte n'étant pas simulée par le modèle de climat, les valeurs de pluie prévues par le modèle sont bien souvent largement sous-estimées.

La résolution spatiale des AOGCMs est en effet trop faible pour permettre une représentation explicite et donc réaliste de certains phénomènes d'échelle locale (orages, pluies convectives intenses, cyclones, perturbations des paramètres météorologiques par le relief, etc.) puisque ce sont des processus d'échelle inférieure à la maille du modèle. De même, à cette résolution, ces modèles ne permettent pas de fournir des données d'entrée assez fines (spatialement) pour toutes les études d'impact du changement climatique, comme par exemple l'impact sur l'agriculture, sur les maladies tropicales, sur l'océan côtier, ou pour un modèle hydrologique qui simule la transformation de la pluie en débit à l'échelle d'un bassin versant particulier... Le dernier inconvénient des modèles à basse résolution est leur faible capacité à simuler les événements extrêmes qui sont souvent liés à des processus ou à des forçages de petites échelles.

Pour corriger partiellement ces lacunes et traduire certaines des tendances mises en évidence par les AOGCMs sur les paramètres locaux, la communauté scientifique du climat a développé la notion de régionalisation climatique à partir de méthodes de **désagrégation spatiale** des données des AOGCMs, appelées également "**descentes d'échelle**". Il s'agit d'exploiter l'information climatique de grande échelle disponible dans les scénarios proposés par les AOGCMs pour dériver des scénarios régionaux voir locaux pour la ou les variables météorologiques d'intérêt et pour la mise en œuvre d'un modèle d'impact. Les modèles globaux utilisés permettent une régionalisation des projections, en passant d'une résolution de 100 à 300 km pour les modèles globaux à une résolution de 10 à 50 km pour les modèles régionaux. Ce sont ensuite des modèles d'adaptation locaux qui prennent le relai avec une résolution de l'ordre du kilomètre et nous donnent une idée plus fine des impacts à l'échelle de nos territoires et même d'une parcelle forestière (Fig. 2.10).

Les principaux objectifs de la régionalisation sont :

- Améliorer la représentation de la variabilité spatiale et temporelle du climat et de son évolution, en particulier les statistiques des événements extrêmes climatiques (vagues de chaleur, fortes pluies, sécheresses, tempêtes, cyclones, etc.).
- Faciliter les études d'impact du changement climatique sur les différents secteurs socioéconomiques (hydrologie, écosystèmes, santé, etc.).

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

- L'approche dynamique, qui utilise des modèles climatiques régionaux pour résoudre explicitement la physique et la dynamique du système climatique régional.
- L'approche statistique, qui repose sur la recherche d'une relation statistique entre les variables locales ou régionales (prédicteurs) et les variables modèles de grande échelle (prédicteurs).

Descente d'échelle statistique

Les méthodes statistiques tentent de reproduire le climat régional à partir du climat de grande échelle et des caractéristiques locales ou régionales (telles que la topographie, l'indice terre/mer, le

2.1. Le contexte global actuel

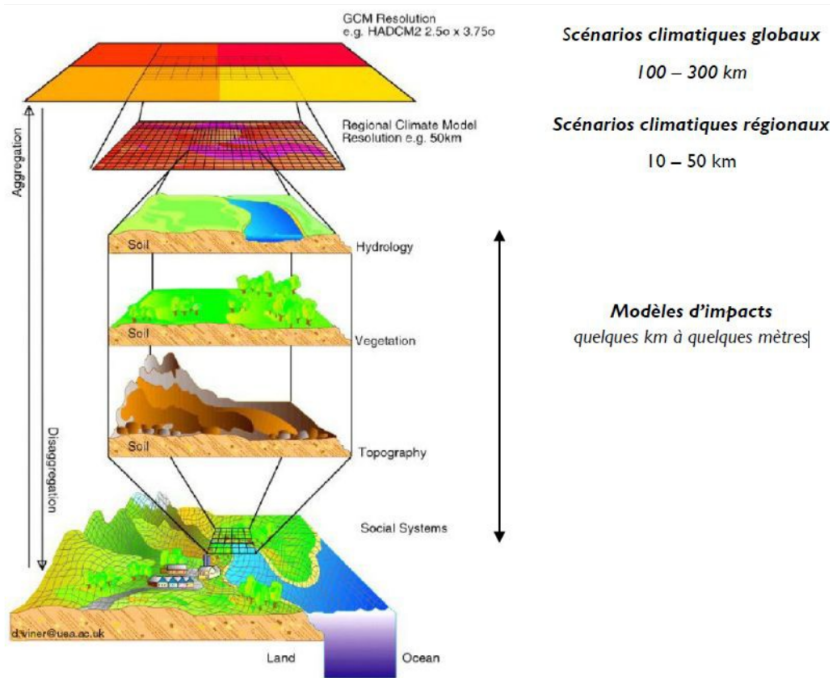


Figure 3 : Échelles des différents scénarios et modèles utilisés dans la descente d'échelle (d'après S. Planton).

FIGURE 2.10 – Echelles des différents scénarios et modèles utilisés dans la descente d'échelle.

Source : Climate Research Unit, University of East Anglia.

type de surface, la couverture du sol, etc.). Elles nécessitent de trouver une méthode adaptée au type d'impact que l'on souhaite étudier (paramètres, domaine...) et de disposer de données historiques sur une période aussi longue que possible (une vingtaine d'années étant un minimum sous lequel il est difficile de descendre) pour la construction du modèle statistique. Elles permettent de mettre en évidence des relations physiquement interprétables entre les champs de grande échelle et les conditions climatiques de surface mais présentent parfois l'inconvénient d'une mauvaise représentation de la variance observée ou des phénomènes extrêmes. Il existe un grand nombre de techniques que l'on peut combiner entre elles pour établir des relations statistiques entre les conditions locales observées et les prédicteurs produits à partir des données sur le climat récent (par ex. 1981-2100) : régression linéaire multiple, analyse de corrélation canonique, générateurs stochastiques, réseau de neurones artificiels, modèles multi-variés auto-régressifs, échantillonnage conditionnel et autres méthodes basées sur les analogues, méthodes basées sur un indice de circulation potentielle de précipitations et de circulations-types critiques, générateur de séries conditionnel, correction à l'échelle locale.

Les méthodes statistiques reposent sur trois hypothèses implicites, qui s'appliquent également partiellement à l'approche dynamique :

- (H1) Les prédicteurs sont des variables appropriées pour le problème étudié (climat régional/local) et sont simulés de façon réaliste par les modèles climatiques.
- (H2) les relations statistiques établies pour le passé récent demeureront les mêmes pour le climat futur (hypothèse de stationnarité). Dans un contexte de changements climatiques, cette hypothèse forte est problématique, car le climat n'est pas stationnaire et la validité de l'hypothèse est difficile à tester. Idéalement, les données observées devraient couvrir une large palette de conditions climatiques incluant les modifications futures des prédicteurs climatiques.
- (H3) Les prédicteurs climatiques doivent être représentatifs du signal du changement climatique.

Bénéfices et inconvénients de chaque descente d'échelle

Les deux approches peuvent être utilisées de façon indépendante ou combinée (méthodes statistico-dynamiques). Le choix final dépend des objectifs du projet et des ressources disponibles. Mettre en œuvre plusieurs méthodes de descente d'échelle pour un même problème est un moyen de quantifier une partie de l'incertitude introduite par la descente d'échelle et d'évaluer le degré de confiance que l'on peut accorder aux résultats obtenus. L'approche dynamique est souvent plus coûteuse en temps de calcul (nombre plus restreint de simulations issues de modèles régionaux disponibles). Mais elle assure la cohérence spatiotemporelle entre les variables et permet l'analyse d'un plus grand nombre de variables (vent, humidité du sol, etc.). Les méthodes statistiques ont pour avantage d'être plus abordables en temps de calcul et ainsi de permettre le traitement d'un grand nombre de simulations globales disponibles. Elles sont capables d'apporter une information localisée (ponctuelle) sur un ou plusieurs sites. La principale faiblesse est liée au fait que l'hypothèse de stationnarité (on suppose que les relations calculées sur le climat présent restent valides pour le climat futur) ne peut être vérifiée. Cette hypothèse n'est peut-être pas aussi problématique pour les projections de certaines variables à court terme, mais l'incertitude est plus grande pour des projections pour la fin du siècle. De plus, puisque l'utilisation de la mise à l'échelle simultanée de plusieurs variables climatiques présente encore un défi, les variables climatiques sont souvent traitées séparément, ce qui peut entraîner une perte de cohérence spatiotemporelle. Une autre contrainte de l'approche statistique est de disposer de données fiables et homogènes sur la période observée pour permettre le calage du modèle statistique. Il convient de mentionner que la technique de mise à l'échelle statistique peut également être appliquée à des données de **RCM** à une résolution déjà élevée.

Pour le projet **BRIO**, c'est la méthode de descente d'échelle dynamique qui a été retenue. Néanmoins, nous avons eu le temps de développer et tester sur la Réunion une méthode de descente d'échelle statistique pour la variable précipitations (section 6.7). Il s'agit d'une mise à l'échelle statistique impliquant une étape de correction de biais basée sur l'utilisation du concept de type de temps.

2.1.5 Modèles de climat régionaux et exercice CORDEX

Descente d'échelle dynamique

Parmi les méthodes de descente d'échelle dynamiques, on distingue celles utilisant une grille à haute résolution sur l'ensemble du globe pour le modèle de circulation générale, celles utilisant une grille "déformée" avec une plus haute résolution spatiale dans la zone d'étude, et celles couvrant seulement une partie du globe, solution retenue pour le projet **BRIO**.

Cette solution consiste à utiliser un modèle atmosphérique régional dit à aire limitée (**RCM**) couplé à un modèle de climat global **AOGCM**. De tels modèles sont utilisés pour affiner la résolution horizontale du climat dans une région sélectionnée de la planète. Leur résolution plus fine (typiquement de 10 à 50 km) signifie que ces modèles sont capables de développer des caractéristiques plus détaillées du climat, notamment car ils tirent profit d'une représentation beaucoup plus précise de la surface de la Terre, comme les montagnes, les contours côtiers et la présence de lacs et de rivières. Ils sont ainsi capables de résoudre partiellement les effets du relief sur les paramètres locaux.

Pour rester connecté au climat mondial, un **RCM** doit disposer en périphérie de variables provenant d'un modèle sous-jacent, généralement un **AOGCM**. On dit que le modèle régional est "forcé" en données initiales et sur ses limites géographiques par les simulations de l'**AOGCM**. Bien que coûteuse en temps de calcul, cette technique de mise à l'échelle assure la cohérence des variables climatiques dans le temps et l'espace. De plus, les modèles climatiques physiques comme les **RCM** et les **AOGCM** ont la capacité de simuler les interactions entre les aérosols et les gaz à effet de serre

(des quantités qui sont régulées par les scénarios de changements futurs en émissions ou en concentrations) avec les autres composantes du système climatique. Les principales limitations théoriques de cette technique sont donc les effets des erreurs systématiques du champ de grande échelle, provenant du modèle global et le manque d'interaction "two ways" entre le climat régional et le climat global (les modifications de la circulation atmosphérique simulées par le modèle régional ne sont pas reportées dans le modèle global). En d'autres termes, le RCM est contraint (ou forcé) par le modèle global coupleur au niveau de sa circulation de grande échelle. Les erreurs introduites par la représentation de grande échelle du GCM sont donc transmises au RCM. Des simulations en mode "two ways" existent mais sont très coûteuses en temps de calcul et donc peu utilisées dans la pratique.

Biais des modèles et corrections de biais

Les modèles climatiques sont une représentation du système climatique, et les équations mathématiques qui sont résolues pour représenter ce système sont une simplification du monde réel. Une simulation climatique est donc une représentation numérique imparfaite de la météorologie basée sur l'hypothèse que la simulation de la variabilité naturelle est près de la réalité. Cela signifie que même si des observations d'émission de GES pour le passé sont utilisées pour piloter un modèle climatique, la simulation résultante donnera une réponse qui est différente de ce qui est enregistré aux stations météorologiques. De plus, en raison de la nature chaotique du système climatique et de la sensibilité du modèle climatique à des facteurs tels que les conditions initiales d'une simulation, même un modèle climatique "parfait" ne serait pas en mesure de reproduire la succession ou la séquence des événements météorologiques historiques observés. L'objectif consiste plutôt à ce que le modèle reproduise les propriétés statistiques (moyenne, variance, variabilité interannuelle, etc.) des observations. Étant donné que chaque modèle représente le système climatique différemment et imparfaitement, ils ont tous leur propre biais. Cela signifie entre autres que certains modèles peuvent toujours produire des températures qui sont légèrement plus froides en moyenne que les autres modèles, alors que certains peuvent toujours projeter plus de précipitations que d'autres. En outre, le biais d'un modèle n'est pas nécessairement équivalent pour tout le globe, et peut varier selon les régions. Il est important de tenir compte de ce biais dans le calcul des scénarios de changements climatiques. Les biais sont présents dans les modèles GCM et les RCM, ainsi que dans les données d'observations sur grille.

Il est reconnu que les RCMs génèrent eux-mêmes des biais qui ne sont pas attribuables au biais transmis par les modèles coupleurs de grande échelle. Les biais de température moyens saisonniers et régionaux sont généralement inférieurs à 1.5°C, tandis que les biais de précipitations sont généralement situés dans la plage de -40 à +40% (Kotlarski et al. 2014). C'est la raison pour laquelle l'exploitation des données en sortie des RCMs nécessite un post-traitement, nommé "**correction de biais**". Ce post-traitement n'est pas, à proprement parler, liées aux techniques de mise à l'échelle, bien qu'il permette généralement de descendre en résolution (la résolution effective des observations). Le but cette fois est de corriger les biais du modèle par des méthodes statistiques calibrées sur les observations d'une période du climat passé (ex : méthode "quantile-quantile", Déqué et al. 2007). L'ensemble des étapes de descente d'échelle dynamique puis correction de biais et/ou descente d'échelle statistique est illustrée en figure 2.11.

CORDEX

La régionalisation des simulations de changement climatique a été une des grandes avancées de la période séparant le 4^{ème} et le 5^{ème} rapport du GIEC (2007-2013). Elle a permis de traduire plus localement et concrètement les incidences prévisibles des élévations globales de températures sous l'effet des scénarios d'émissions de GES. Le projet international CORDEX (Coordinated Regional Climate Downscaling Experiment), soutenu par le Programme Mondial de Recherche sur le

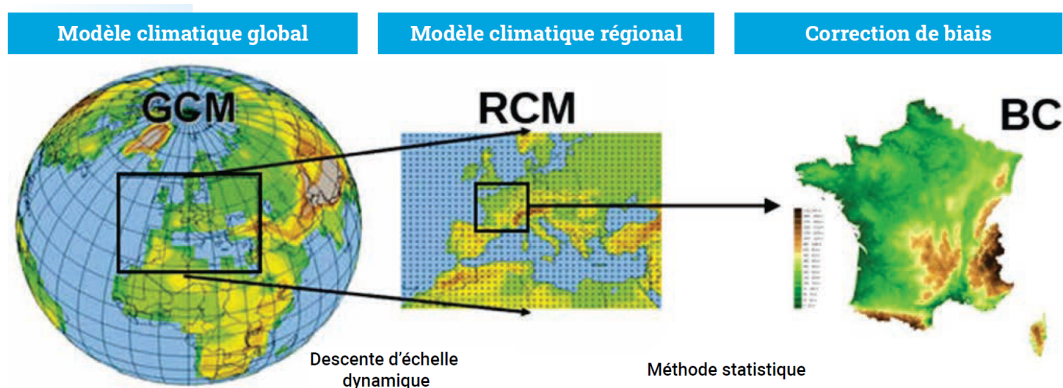


FIGURE 2.11 – Les étapes de descente d'échelle (dynamique et statistique) depuis la modélisation globale à régionale jusqu'à la correction de biais. Source : [DRIAS \(2020\)](#)

Climat ([WCRP](#)) vise à organiser et coordonner un cadre international de production de projections climatiques régionales pour toutes les régions continentales du globe. Les objectifs principaux du projet [CORDEX](#) sont de fournir un cadre pour l'évaluation des modèles, un cadre pour la régionalisation des scénarios climatiques, et une interface pour les utilisateurs de simulations climatiques impliqués dans des études d'impact, d'atténuation ou d'adaptation au changement climatique ([Giorgi 2006](#)). [CORDEX](#) a en particulier fourni les simulations régionalisées sur le continent africain et la péninsule arabique (Fig. 2.12) à 50 km de résolution. Hélas, le domaine [CORDEX](#)-Africa ne couvre qu'une partie des pays du sud-ouest de l'océan Indien et ne permet pas de représenter convenablement l'activité cyclonique de notre bassin océanique. L'un des objectifs du projet [BRIO](#) est ainsi d'étendre le projet [CORDEX](#) à la zone sud-ouest de l'océan Indien, en avance de phase puisqu'au démarrage du projet [BRIO](#), la phase 6 de [CORDEX](#) n'avait pas encore vu le jour !

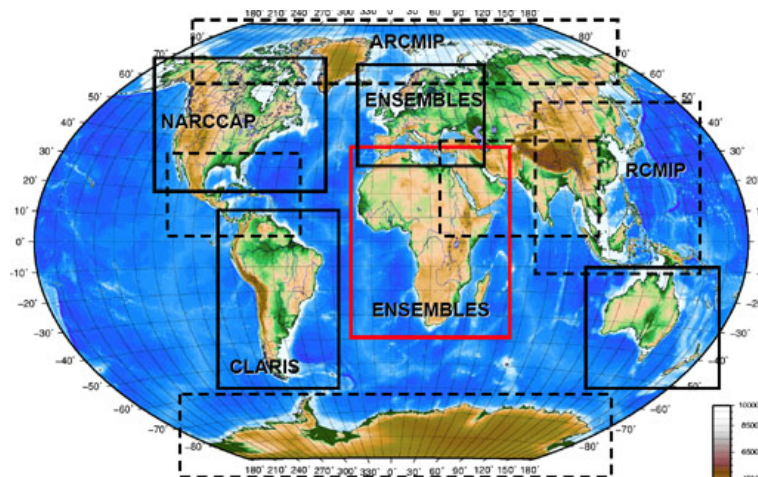


FIGURE 2.12 – Domaines [CORDEX](#) de 50 km de résolution pour la régionalisation du climat à partir des simulations [CMIP5](#). Source : <http://www.meteo.unican.es/en/projects/CORDEX>

Simulations EURO-CORDEX

Créé en 2009, le projet [EURO-CORDEX](#) est la branche européenne du projet international [CORDEX](#). Il met à disposition un ensemble de simulations climatiques basées sur des modèles utilisant des descentes d'échelle statistiques et dynamiques forcées par les modèles globaux utilisés dans le précédent rapport du GIEC (Coupled Model Intercomparison Project Phase 5 - [CMIP5](#)). Une description détaillée des simulations [EURO-CORDEX](#) est disponible sur la page d'archivage [CORDEX](#). Les simulations [EURO-CORDEX](#) sont ensuite projetées en France sur une grille de 8 km de résolu-

tion, et corrigées de leur biais par la méthode CDF-t (Michelangeli et al. 2009) à partir de l'analyse de données d'observations SAFRAN. Les paramètres atmosphériques disponibles pour ces modèles sont les précipitations totales (pr), les températures moyennes (tas), minimales (tasmin) et maximales (tasmax) journalières.

L'ensemble EURO-CORDEX est ainsi constitué de simulations réalisées à partir des scénarios RCP4.5 et RCP8.5, et de 10 modèles de climat régionaux (RCM pour Regional Climate Model). Une vingtaine de ces simulations sont réalisées à 0.11° de résolution (EUR11, environ 12 km) sur un même domaine couvrant l'Europe. Elles sont contrôlées à leurs bords par des modèles de climat globaux (GCM, pour General Climate Model) du programme CMIP5. Pour chaque modèle les simulations ont été produites sur la période continue 1971-2100 (1971-2005 pour la partie historique et 2006-2100 pour la projection climatique).

Le rapport DRIAS (DRIAS 2020) a été publié en 2020 par Météo-France pour constituer un guide scientifique et pratique à l'utilisation du jeu de données CORDEX pour la France (disponibles sur le portail DRIAS). Ce jeu de données est basé sur la régionalisation des CMIP5 à partir des scénarios RCP. Cette régionalisation a été réalisée dans les laboratoires français de modélisation du climat (IPSL, CERFACS, CNRM). Les informations climatiques sont délivrées sous différentes formes graphiques ou numériques.

2.1.6 Incertitudes climatiques

Divers types d'incertitudes

Cette section est tirée du rapport DRIAS (2020) (encart "quelles sont les sources d'incertitudes des projections climatiques ?") et du rapport Charron (2016).

L'incertitude des projections climatiques provient de trois grandes sources : (1) la variabilité naturelle ou chaotique du climat, (2) les imprécisions des modèles climatiques et les incertitudes sur les paramètres d'entrée, (3) les incertitudes liées aux évolutions socioéconomiques (dont nos émissions de gaz à effet de serre) et celles liées aux facteurs non pris en compte dans ces scénarios. Leur part relative évolue selon les paramètres et les périodes temporelles considérées :

- **La variabilité naturelle intrinsèque du système climatique** : la variabilité naturelle est liée aux interactions des différentes composantes du système climatique entre elles. Le caractère en partie chaotique du climat du fait de sa variabilité naturelle se traduit par le fait qu'un même modèle partant de deux états climatiques très proches calcule deux évolutions climatiques qui peuvent être notablement différentes. La variabilité naturelle peut masquer temporairement les effets de l'évolution du climat aux horizons temporels proches.
- **L'incertitude des modèles climatiques** : plusieurs modèles (on parle ici de couple GCM/RCM) numériques peuvent fournir avec les mêmes hypothèses de départ des estimations différentes de l'évolution du climat. En effet, la formulation et la paramétrisation des processus physiques et thermodynamiques peuvent être très différentes selon les modèles ainsi que leur résolution spatiale (horizontale ou verticale). Le niveau d'incertitude liée aux modèles climatiques est beaucoup plus important pour les précipitations que pour les températures.
- **Les incertitudes du scénario socioéconomique** : une part importante d'incertitude repose sur le fait que nous ne savons pas quelles seront les concentrations de gaz à effet de serre et des aérosols dans le futur. Elles sont traitées au travers de scénarios climatiques délivrant une image d'un climat futur possible, scénarios prescrits en données d'entrée aux modèles de climat. A celles-ci s'ajoutent d'autres sources d'incertitude non quantifiables pour l'instant (crises, guerres, épidémies végétales et animales, éruptions volcaniques, tremblements de terre, etc.). L'incertitude

liée au scénario socioéconomique est en général masquée par les autres incertitudes jusqu'au milieu du siècle mais devient importante à la fin du siècle.

A noter qu'il existe aussi des **incertitudes associées à la méthode de correction** : les modèles climatiques utilisés pour simuler le climat futur contiennent des erreurs systématiques (biais) que l'on corrige avec des outils statistiques, comme la méthode Adamont utilisée dans le jeu **DRIAS-2020**. Cette correction elle-même n'est pas parfaite et peut influencer sur la valeur attendue du changement climatique notamment sur les extrêmes de température ou de précipitations, plus difficiles à évaluer. Si l'on met en œuvre un modèle d'impact pour une application précise, alors on rajoute les **incertitudes du modèle d'impact**, qui lui non plus n'est pas parfait. On obtient ce que l'on appelle couramment la cascade d'incertitudes climatiques (Fig. 2.13) qui intègre l'ensemble des incertitudes, jusqu'à celles sur les réponses de la société en terme d'adaptation.

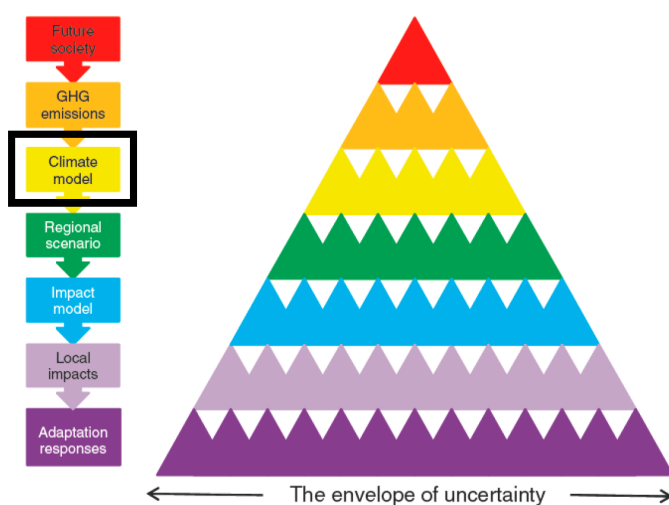


FIGURE 2.13 – La cascade d'incertitudes climatiques. Source : Météo-France, Serge Planton.

Importance relative des incertitudes selon l'horizon considéré

L'importance relative future des sources d'incertitude dépend de la période considérée. Sur une période de quelques décennies, la variabilité naturelle du climat est la source la plus importante d'incertitude et peut même masquer le signal de changement climatique. Cela est d'une grande importance, car cette variabilité peut s'opposer, au moins pendant quelques décennies, aux tendances à long terme qui sont associées au changement climatique anthropique. Autrement dit, plusieurs décennies peuvent être nécessaires avant que le signal climatique émerge du "bruit" de la variabilité interannuelle. À court terme, le choix du scénario d'émission est relativement peu important. Cela est peut-être surprenant, mais il s'écoule environ 30 ans avant qu'une quelconque différence entre les scénarios d'émission ait un effet notable sur le climat. La figure 2.9 illustre bien cet aspect : les lignes de couleur commencent à diverger autour de l'année 2040 mais la distinction entre les différents **SSP** devient plus nette et évidente à partir de 2050. Sur des horizons temporels plus longs en revanche, le choix d'un scénario d'émission devient très important, alors que l'incertitude du modèle demeure relativement constante, peu importe l'échelle temporelle sur laquelle les décisions sont prises. Ainsi, dans un cadre de prise de décision, l'horizon de planification doit être pris en compte, afin de pondérer l'importance des différentes sources d'incertitude (tableau 2.2), ce qui aura également une grande influence sur le type d'information climatique qui serait le plus approprié.

Prise en compte des incertitudes dans la fourniture de services climatiques

Les utilisateurs d'information climatique expriment souvent le désir de posséder le "meilleur" scénario, ou celui qui est le plus susceptible d'être "vrai". Cependant, il n'est pas possible pour des

2.1. Le contexte global actuel

Horizon de planification	Importance relative des sources d'incertitude			Source clé à considérer pour la prise de décision
	Variabilité naturelle	Scénario d'émission	Modèle climatique	
Court terme (<30 ans)	***	*	**	Variabilité naturelle
Moyen terme (30-50 ans)	*	**	**	Scénario d'émission et modèle climatique
Long terme (>50 ans)	*	***	**	Scénario d'émission

TABLEAU 2.2 – Importance relative des trois sources principales d'incertitude climatique au fil du temps. D'après [Charron \(2016\)](#).

fournisseurs de services climatiques de choisir un tel scénario de changement climatique au sein de l'ensemble dont ils disposent. Cela est expliqué par les propriétés intrinsèques des modèles climatiques, des simulations climatiques, des scénarios d'émissions et des scénarios de changement climatique. Ensemble, ces éléments fournissent une représentation plausible du monde réel actuel et du changement possible du climat, selon les connaissances actuelles. Les modèles climatiques à la fine pointe fournissent une représentation sophistiquée, mais imparfaite du système climatique du monde réel. Il est très difficile de déterminer quel modèle est le meilleur, car chacun comporte des forces et des faiblesses différentes. Ils ont tous certains biais et produisent conséquemment des résultats différents. Aucun modèle climatique ne peut constamment fournir les meilleurs résultats pour toutes les variables, saisons et régions. De plus, il est impossible de déterminer quel scénario d'émissions sera le plus près de la réalité. Ainsi, lorsque l'information climatique est fournie, il est prudent de considérer un ensemble de simulations, ou un grand nombre de simulations lors du processus de prise de décision. En d'autres termes, il vaut mieux considérer un ensemble qui inclut le scénario le plus favorable ainsi que le plus défavorable. Par contre, prendre une décision sur le nombre exact de simulations qui devrait être considéré n'est pas simple.

Ultimement, le choix du nombre de simulations à considérer dans un projet sera influencé par le temps et les ressources disponibles. L'objectif est de veiller à ce que les modèles choisis illustrent adéquatement la plage complète de conditions futures possibles pour les indices à l'étude. Une de ces techniques est l'analyse par grappe. Brièvement, cette méthode consiste tout d'abord à sélectionner les variables climatiques qui sont à l'étude dans un projet particulier. Ensuite, pour chaque simulation, les variables sont calculées pour la période de référence et pour l'horizon futur, et la différence entre les deux valeurs est calculée (i.e. le changement climatique). Cet exercice a été fait en section 6.6 pour les variables précipitations et température. Nous avons comparé les variations moyennes de ces variables sur la zone d'intérêt [COI](#) pour divers horizons temporels par rapport à la période de référence 1981-2010 et ce pour trois scénarios du [GIEC-6](#) et pour une vingtaine de modèles globaux [CMIP6](#) plus le modèle régional utilisé dans notre étude.

Quand les ressources disponibles limitent les simulations à un unique couple de modèles [GCM-RCM](#), une autre méthode souvent adoptée est de sélectionner des scénarios de changement climatique "faible", "moyen" et "élevé" qui couvrent adéquatement la plage de toutes les simulations disponibles. C'est ce qui a été retenu dans le projet [BRIO](#).

2.1.7 Indicateurs climatiques et outils statistiques

L'analyse du changement climatique concerne les principales variables atmosphériques telles que la température, les précipitations ou le vent. L'analyse peut concerner leur comportement moyen (température moyenne, cumul annuel de précipitations...) ou encore des comportements extrêmes (nombre de jours de fortes chaleurs, nombre de nuits tropicales ($T_{min} > 20^{\circ}C$), précipitations ex-

trêmes, nombre de jours de vent fort, etc.). Dans tous les cas, on procède à cette analyse sur des périodes de 30 ans (parfois 20 pour la température car elle change vite dans le contexte du réchauffement climatique) afin de lisser la variabilité naturelle du climat décrite en section 2.1.6.

Lorsque l'on s'intéresse au changement climatique et que l'on veut évaluer ce qui "change" on utilise souvent des indicateurs qui représentent des écarts par rapport à une référence connue (1981-2010 dans notre cas). Par exemple, l'écart relatif (en %) du cumul annuel de précipitations par rapport à la référence. Le calcul des indicateurs peut relever de traitements complexes et nécessite parfois le calcul des paramètres statistiques d'une distribution.

Dès lors que l'on dispose d'un ensemble de modèles, on peut représenter la dispersion des signaux climatiques modélisés pour chaque scénario. Cela permet d'accéder à une évaluation de l'incertitude associée aux simulations du climat futur. Nous en verrons un prototype en section 6.7 avec une descente d'échelle statistique de la variable précipitations à La Réunion, réalisée sur 22 simulations CMIP6 et pour deux scénarios SSP. Des outils statistiques simples permettent de quantifier et de décrire la dispersion d'une distribution. Le plus courant d'entre eux est le centile. En voici quelques instances :

1. Le 5^{ème} centile (C5) est la valeur seuil pour laquelle 95% des valeurs de la distribution sont plus élevées (la probabilité de dépasser le 5^{ème} centile est de 95%).
2. 90% des valeurs de la distribution sont plus élevées que le 10^{ème} centile (C10).
3. La médiane (C50) est la valeur seuil pour laquelle 50% des valeurs de la distribution sont plus élevées (la probabilité de dépasser la médiane est de 50%).
4. 10% des valeurs de la distribution sont plus élevées que le 90^{ème} centile (C90).
5. Le 95^{ème} centile (C95) est la valeur seuil pour laquelle 5% des valeurs de la distribution sont plus élevées (la probabilité de dépasser le 95^{ème} centile est de 5%)

On utilisera le mot générique quantile pour désigner le découpage d'une distribution en intervalles réguliers (centiles, quintiles,...).

Dans ce projet nous avons traité les variables climatiques de surface (à 2 m de la surface du sol) à fréquence quotidienne : température moyenne, minimale et maximale, et précipitations (liquides). La liste des indicateurs climatiques est consultable sur le portail BRIO.

2.1.8 Elévation du niveau des océans

Sur 51 ans, on observe un réchauffement de 0.5°C à 0.6°C de la surface océanique, que ce soit sur une majeure partie du bassin sud-ouest de l'océan Indien (SOOI) ou sur une plus petite zone entourant la Réunion (Fig. 2.14). Aux Seychelles, une tendance de +0.2°C/an a été observée sur la période 1990-2019 (non illustrée). Cette augmentation est préoccupante pour la bonne santé des récifs coraliens et pour la pêche, l'un des piliers de l'économie seychelloise. Le fort épisode El Niño (ENSO) de 1997/1998 y a déjà sérieusement endommagé les récifs coralliens.

Une constellation de satellites altimétriques a pu mesurer l'élévation moyenne du niveau de la surface océanique sur le globe pour la période 1993-2021 (Fig. 2.15). On constate que l'évolution du niveau de la mer est disparate suivant les régions. Il est important de savoir que ces tendances évoluent également temporellement, à des échelles de temps longues (au moins 30 ans) et les dipôles peuvent s'inverser. Sur ces 29 dernières années, on relève pour notre bassin SOOI une élévation relativement importante de +14 cm, soit +5 mm/an en moyenne, supérieure à la valeur moyenne de 3.7 mm/an relevée sur le globe (IPCC 2021). Ces valeurs ne peuvent pas être extrapolées à long terme à cause d'effets de seuils en lien avec la fonte des calottes glaciaires. Aux Seychelles, la tendance à long terme mesurée sur la période 1993-2020 est bien d'environ +5 mm/an en moyenne (Fig. 2.16) et

2.2. Bassin sud-ouest de l’océan Indien et systèmes tropicaux

a atteint +6.1 mm/an pendant les 10 dernières années. La variabilité interannuelle du niveau marin observée aux Seychelles (Fig. 2.16) et aux Tropiques de façon plus générale est en partie due à des modes internes de variabilité du climat (ex., ENSO, IOD, MJO). La plupart des activités économiques des Seychelles ont lieu sur la côte et la montée du niveau marin pourrait menacer le développement socioéconomique des zones de basse terre et la sécurité alimentaire du pays. Les processus d’érosion côtière dus à l’activité humaine seront exacerbés par le changement climatique selon le rapport 2014 de l’agence JICA sur l’érosion côtière et de la maîtrise des crues aux Seychelles.

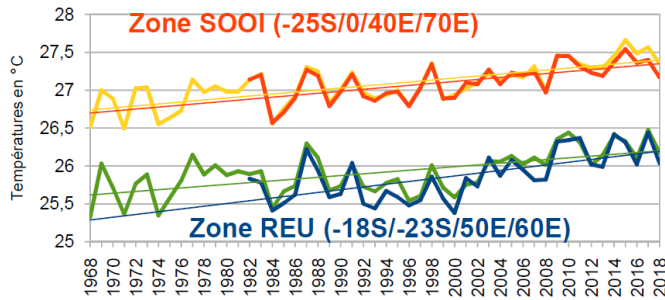


FIGURE 2.14 – Evolution de la température annuelle moyenne de surface océanique sur la zone sud-ouest de l’océan Indien et sur la zone Réunion pour la période 1968-2018. Les données utilisées proviennent des réanalyses de surface ERSST de la NOAA.

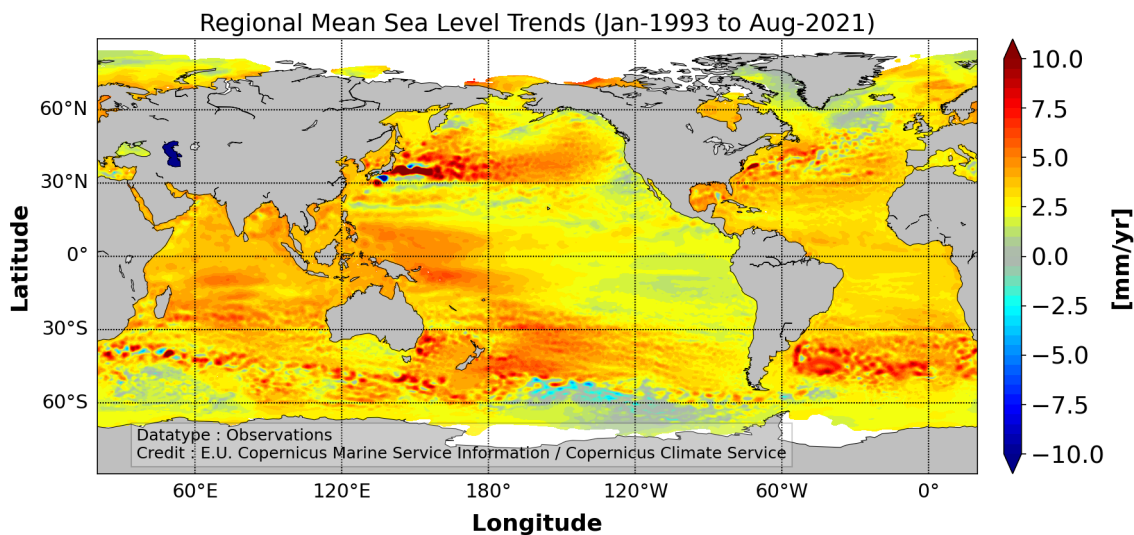


FIGURE 2.15 – Elévation moyenne (en mm/an) sur le globe du niveau de la surface océanique durant la période 1993-2021. Source : Copernicus.

Dans ce projet, les modèles climatiques utilisés ne permettent pas de renseigner l’évolution du niveau des océans ou des températures de la mer. Aussi, il n’en sera pas fait état dans la suite de ce document. A noter que les données d’érosion du trait de côte produites par le CEREMA sont disponibles via le site de [GéoLittoral](#).

2.2 BASSIN SUD-OUEST DE L’OCÉAN INDIEN ET SYSTÈMES TROPICAUX

2.2.1 Systèmes dépressionnaires tropicaux

Les cyclones tropicaux sont des perturbations météorologiques qui se forment aux tropiques, une zone que l’on définit en météorologie comme la bande délimitée par les axes des anticyclones subtropicaux des deux hémisphères. En moyenne, les tropiques sont donc situés entre 30°S et 30°N, mais

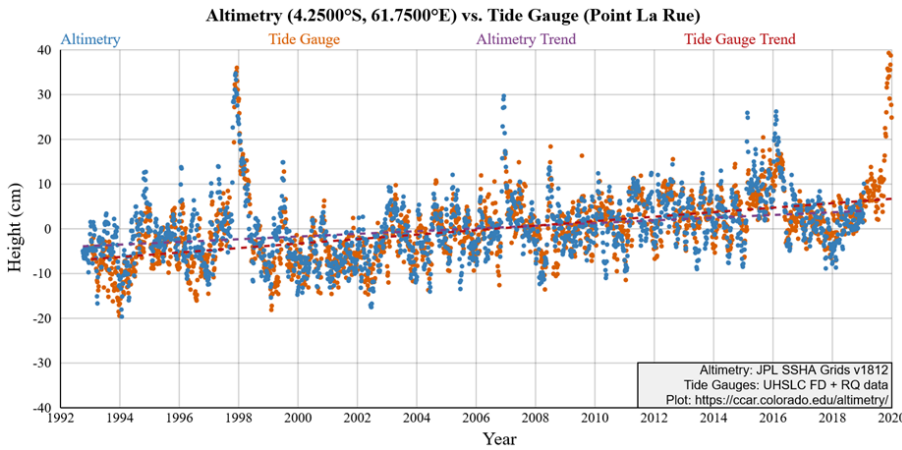


FIGURE 2.16 – Evolution et tendance du niveau de la surface océanique mesurée aux Seychelles par le marégraphe de Pointe Larue et par altimétrie satellitaire durant la période 1993-2020. Source : University of Hawaii Sea Level Centre.

il s'agit en réalité d'un domaine en perpétuelle évolution puisqu'il se déplace avec le mouvement apparent du soleil. La zone de convergence intertropicale (**ZCIT**) retient toute l'attention des prévisionnistes car elle constitue la première zone de formation des perturbations tropicales qui peuvent dans certaines situations se transformer en dépression tropicale voire en cyclone.

La **ZCIT** désigne la région située près de l'équateur vers laquelle convergent les vents de basses couches dirigés par les anticyclones subtropicaux. Nommés alizés, ils ont une orientation de nord-est dans l'hémisphère nord et de sud-est dans l'hémisphère sud. L'afflux de masse atmosphérique crée des mouvements verticaux de grande échelle. Dans ces vastes zones d'ascendance, des foyers convectifs beaucoup plus intenses vont pouvoir se former et caractériser la **ZCIT**. Ces amas convectifs sont de la convection isolée (cumulus, orage unicellulaire ou multicellulaire) ou de la convection organisée à méso-échelle (systèmes convectifs de méso-échelle ou MCS). Ces derniers atteignent 1 000 à 2 000 km sur certaines zones géographiques comme le Pacifique Ouest et l'Indonésie (Fig. 2.17). La **ZCIT** n'est pas une entité continue puisqu'elle se compose de zones de convection profonde de quelques centaines de kilomètres de longueur séparées par des zones de ciel clair d'une taille équivalente (Fig. 2.17). À l'échelle planétaire, les contours de la **ZCIT** sont définis par la position moyenne de ces amas convectifs sur une échelle temporelle de l'ordre du mois (enveloppe orange). Dans l'océan Indien, la position de la **ZCIT** oscille entre 25°N en juillet et 15°S en janvier.

2.2.2 Surveillance par les **CMRS**

Le World Weather Watch (WWW), Programme de l'Organisation Météorologique Mondiale (**OMM**), a formellement désigné six Centres Météorologiques Régionaux Spécialisés (**CMRS**), dont celui de La Réunion, pour la surveillance des systèmes dépressionnaires tropicaux. Ils sont listés en figure 2.18 avec leur zone de responsabilité respective. Les **CMRS** se répartissent sur les 7 bassins cycloniques du globe où se forment par an un total moyen de 84 tempêtes tropicales dont 45 évoluent en cyclones (Neumann 1993).

2.2.3 Classification des systèmes tropicaux

L'**OMM** a défini une norme internationale pour quantifier l'intensité d'un système dépressionnaire tropical : la moyenne sur 10 minutes de la vitesse du vent mesuré à 10 mètres. Un système dépressionnaire tropical est « baptisé » (on lui attribue un nom) dès lors qu'il atteint le stade de tempête tropicale (vents supérieurs à 34 nœuds, voir tableau 2.3). Il devient un « ouragan », « typhon », ou encore « cyclone » lorsque les vents près du centre s'intensifient pour atteindre 64 nœuds ($1 \text{ kt} = 1,852 \text{ km.h}^{-1} = 0,5144 \text{ m.s}^{-1}$). Les différentes terminologies dépendent du bassin océa-

2.2. Bassin sud-ouest de l'océan Indien et systèmes tropicaux

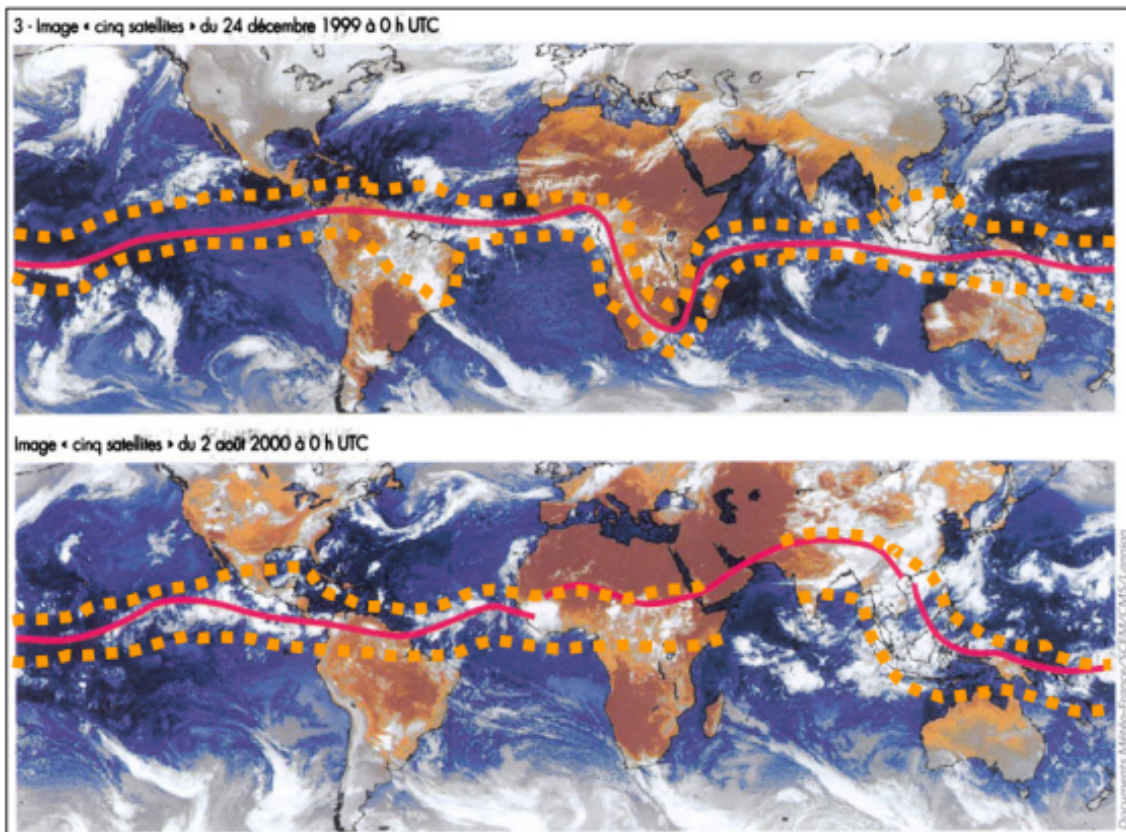


FIGURE 2.17 – Amas convectifs de la *ZCIT* observés par image satellitaire un jour d'été austral (en haut) et d'été boréal (en bas), sur toute la zone intertropicale. Le trait rouge marque le contour moyen de la *ZCIT* ; l'enveloppe pointillée orange représente la position climatologique de la *ZCIT*. Source : Météo-France (Centre de Météorologie Spatiale).

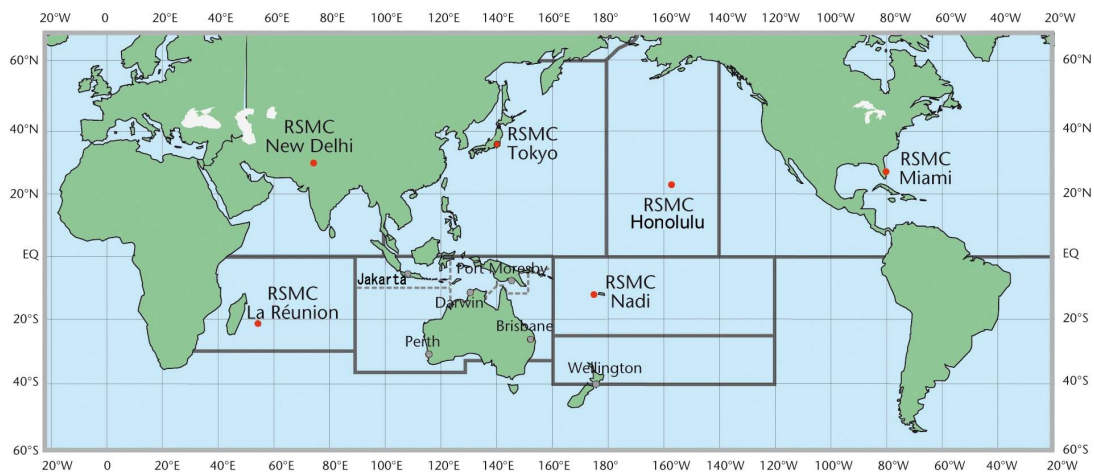


FIGURE 2.18 – Organisation mondiale de la veille cyclonique. Figurent en points rouges les 6 *CMRS* (*RSMC* en anglais) avec leurs zones de responsabilité respectives. Source : [http : //www.wmo.int/pages/prog/www/tcp/Advisories-RSMCs.html](http://www.wmo.int/pages/prog/www/tcp/Advisories-RSMCs.html)

nique : respectivement l'Atlantique Nord et le Pacifique Nord-Est pour les ouragans, le Pacifique Nord-Ouest pour les typhons, ou le reste du monde pour les cyclones. Les cyclones sont ensuite classés en catégories pour décrire les potentiels dommages et risques d'inondations qu'ils peuvent causer en atterrissant sur terre. La classification n'est pas universelle et fluctue d'un CMRS à un autre, ce qui peut être source de confusion. Le tableau 2.3 illustre la terminologie employée pour le SOOI. Une comparaison est donnée avec l'échelle la plus célèbre de Saffir-Simpson, mise en œuvre aux Etats-Unis pour l'Atlantique et le Pacifique Nord-Est (CMRS du NHC et du JTWC) à l'est de la ligne de changement de date.

Vitesse vents (kt)	Vitesse vents (m.s ⁻¹)	Atlantique Nord Pacifique Nord-Est	Echelle Saffir-Simpson	Sud-Ouest Océan Indien
< 28	< 14	Tropical depression (TD)	-	Perturbation Tropicale (PT)
28 – 33	14 – 16			Dépression Tropicale (DT)
34 – 47	17 – 24	Tropical storm (TS)	-	Tempête tropicale (TT) modérée
48 – 63	25 – 33	Severe TS	-	Forte TT
64 – 83	34 – 42	Hurricane (H)	1	Cyclone tropical (CT)
84 – 89	43 – 45	Severe Hurricane	2 – 3	
90 – 115	46 – 59			CT intense (CTI)
116 – 129	60 – 66	Very severe or major Hurricane	4	CT très intense (CTTI)
130 – 136	67 – 70		5	
> 136	> 71			

TABLEAU 2.3 – Terminologie et classification des cyclones tropicaux dans le bassin sud-ouest de l'océan Indien (CMRS de Météo-France) en comparaison avec les bassins Atlantique et Pacifique Nord-Est (CMRS du NHC et du JTWC). Les vents, indiqués en nœuds et en m.s⁻¹, sont les vents maximaux moyennés sur une période de 10 minutes (recommandation OMM) sauf pour les bassins Atlantique Nord et Pacifique Nord-Est (moyenne sur 1 minute).

2.2.4 Activité cyclonique du sud-ouest de l'océan Indien

Le présent travail de recherche se focalise sur le bassin du sud-ouest de l'océan Indien, qui est sous la responsabilité du CMRS de La Réunion (Météo-France). La zone de surveillance s'étend depuis les côtes africaines (vers 30°E) jusque 90°E en longitude et de l'équateur à 40°S en latitude. C'est un bassin très actif où évoluent en moyenne 9.4 tempêtes tropicales par saison cyclonique (officiellement de novembre-avril) parmi lesquelles 4.8 deviennent des cyclones (Leroux et al. 2018). Ceci représente 11 % de l'activité annuelle mondiale et égale presque l'activité de l'Atlantique Nord (WMO 2017). La figure 2.19 illustre les principales zones d'activité du SOOI. Les cyclones de ce bassin ont été peu étudiés jusqu'ici en comparaison de l'Atlantique Nord et du Pacifique Nord-Ouest. Or le bassin possède des spécificités qui contraignent la dynamique des cyclones qui y évoluent, comme par exemple la thermodynamique de l'océan superficiel (notamment dans le canal du Mozambique) et ses rétroactions sur l'atmosphère ainsi que l'influence des latitudes moyennes australes (Leroux et al. 2018). Les données de référence du CMRS utilisées dans ce projet proviennent de la base de données "Best track", qui est une réanalyse a posteriori de l'ensemble des données des systèmes tropicaux sur la période passée. La Best track permet de tracer les trajectoires de l'ensemble des systèmes tropicaux du bassin sur la période 1986-2018 par exemple (Fig. 2.20).

L'évolution du nombre de tempêtes et de cyclones dans le bassin SOOI depuis la saison cyclonique 1981-1982 (Fig. 2.21) montre une forte variabilité interannuelle mais ne décèle pas de tendance significative sur l'évolution du nombre ou de l'intensité des phénomènes cycloniques sur la période de

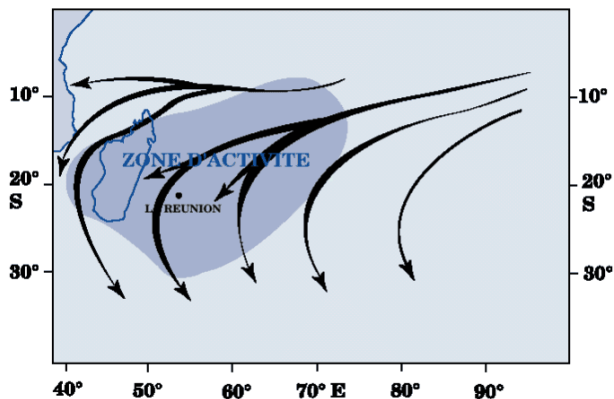


FIGURE 2.19 – La région d'activité cyclonique du bassin sud-ouest de l'océan Indien (SOOI). Source : *Beucher (2010)*.

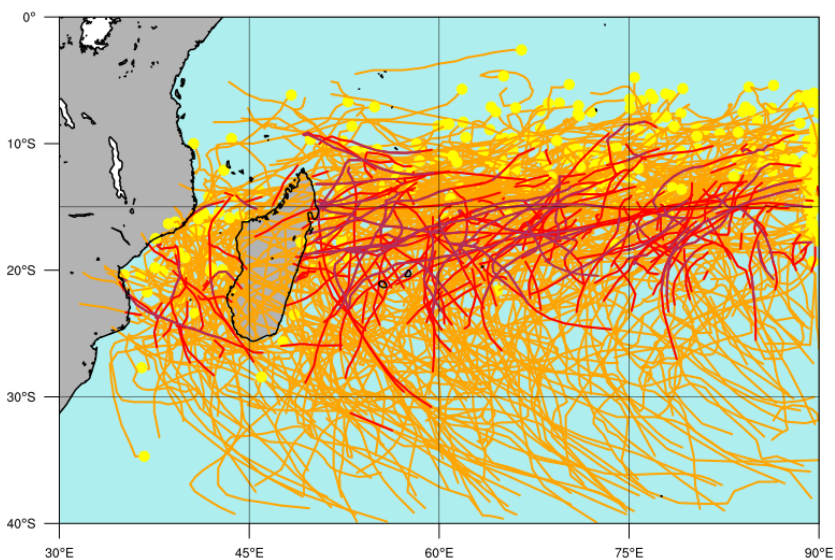


FIGURE 2.20 – Trajectoires des systèmes tropicaux du bassin SOOI ayant atteint le seuil minimal de tempête tropicale sur la période 1986-2018. Les données sont issues de la Best track. Les tempêtes sont en orange, les cyclones en rouge, et les cyclones intenses et très intenses en pourpre. Un rond jaune matérialise le début de chaque trajectoire référencée.

référence. En revanche, on observe une migration vers le pôle de la position du maximum d'intensité cyclonique (Fig. 2.22). C'est un phénomène observé sur les autres bassins cycloniques (Kossin et al. 2014) et qui correspond à l'extension des tropiques.

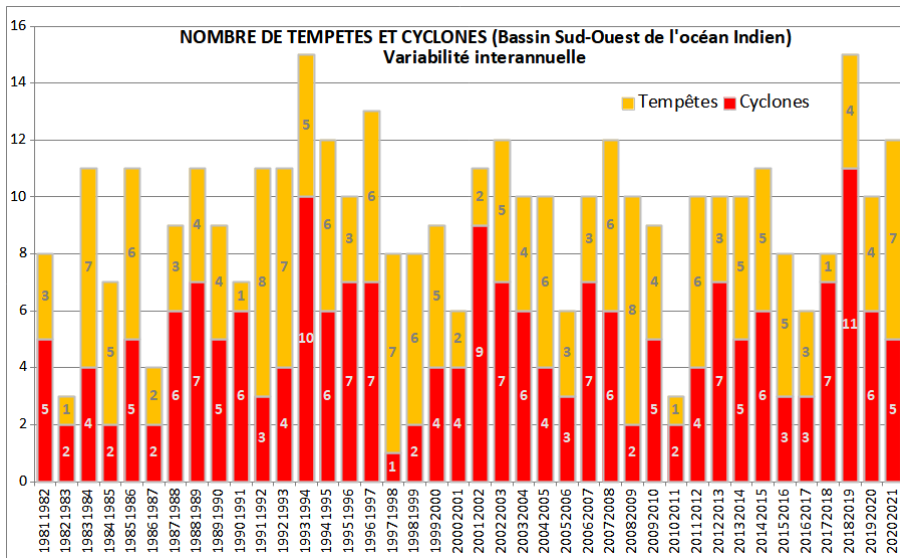


FIGURE 2.21 – Evolution du nombre de tempêtes et de cyclones dans le bassin SOOI par saison cyclonique depuis la saison 1981-1982 (données Best track).

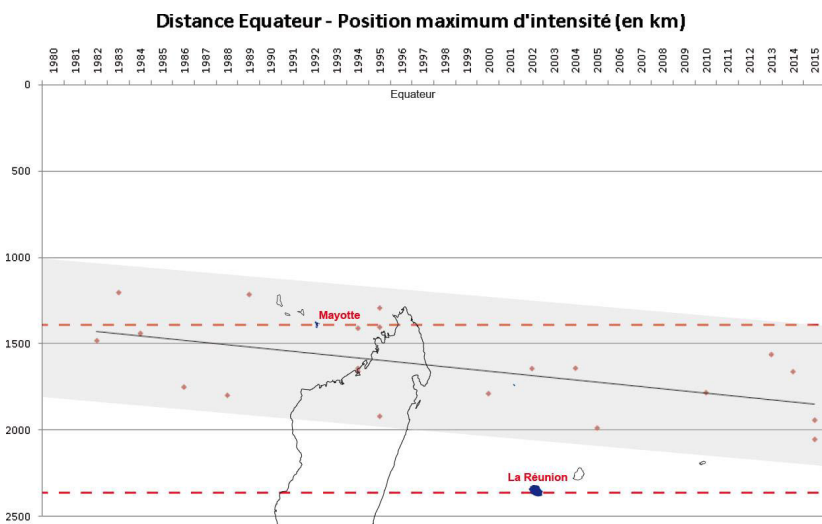


FIGURE 2.22 – Migration vers le sud de la position du maximum d'intensité cyclonique dans le bassin SOOI sur la période 1980-2015 (données Best track).

2.3 PROJET BRIO ET OBJECTIFS

Pour mieux se préparer aux aléas climatiques auxquels notre bassin sera confronté dans le cadre du changement climatique (section 2.1), et dans le cadre du nouvel exercice CMIP6 en cours pour lequel seules des simulations globales d'une résolution lâche d'environ 150 km sont disponibles (voir section 2.1.3), il apparaissait crucial de s'intéresser à la régionalisation du changement climatique pour le sud-ouest de l'océan Indien. C'est l'objet principal du projet intitulé BRIO pour "Building Resilience in the Indian Ocean", financé par la facilité Adapt'Action de l'AFD sur la période septembre 2018 - mars 2022. Les partenaires techniques du projet sont : la Direction Interrégionale de Météo-France pour l'Océan Indien (DIROI), le Centre National de Recherches Météorologiques (CNRM) de Météo-France, et les centres de météorologie nationaux des pays de la COI. Les partenaires institutionnels sont la COI (Département Changement Climatique et Environnement Durable) ainsi que l'Agence Française pour le Développement (AFD, Chargé de mission du département Recherche, division Climat et Nature.

BRIO vise à développer des projections climatiques haute résolution pour décrire le climat de la région jusqu'à l'horizon 2100 en dégagant des tendances à long terme sur la température, la pluviométrie et l'activité cyclonique. Il s'agit d'une aide précieuse fournie aux états pour leur permettre d'appréhender les implications du changement climatique sur la santé humaine et animale, la sécurité alimentaire, les réserves en eau, l'érosion des sols et les risques naturels.

Le projet se base sur de nouvelles simulations climatiques régionales sur un domaine couvrant l'ensemble des territoires de la zone (Mascareignes, Madagascar, Seychelles, Comores, Mozambique, Tanzanie) avec le modèle ALADIN à 12 km de résolution et dans une approche multiscénarios ; ces simulations sont décrites en section 2.4. En parallèle, le projet a exploité les simulations globales issues de l'exercice d'intercomparaison CMIP6, qui constituent un nouveau jeu de données à des résolutions assez variables de l'ordre de la centaine de kms. Des méthodes statistiques de corrections de biais ont été appliquées aux simulations régionales pour exploiter au mieux ces données à l'échelle des petits territoires insulaires de la zone. Pour ce faire, des séries de données représentatives des micro-climats de chacun des territoires ont été préalablement créées et utilisées afin de mettre en évidence la variabilité spatiale fine des tendances climatiques. Ceci constitue une valeur ajoutée essentielle par rapport aux données disponibles par exemple sur le géoportail sud-africain (<http://cip.csag.uct.ac.za/webclient2/app/>) qui repose sur un nombre de points trop limité sur la région sud-ouest de l'océan Indien. Le croisement des informations issues de simulations régionales à très haute résolution (ALADIN-12km) avec celles issues d'autres simulations (CMIP6) qui ont subi les traitements statistiques adéquats sur La Réunion a permis de démontrer l'intérêt d'une descente d'échelle statistique à l'échelle d'un territoire insulaire pour disposer de projections climatiques plus robustes en quantifiant l'incertitude climatique, avec des applications directes pour les décideurs et les secteurs d'activités impactés par les changements climatiques.

Pour finir, ce projet s'articule naturellement avec le programme de recherche ReNovRisk-CYCLONES (octobre 2017 - mars 2021) du Laboratoire de l'Atmosphère et des Cyclones (LACy) qui a posé la question de l'évolution future de l'activité cyclonique sur le sud-ouest de l'océan Indien ainsi que de l'activité pluvieuse associée. Météo-France était partenaire de ce projet et y a contribué à travers les simulations régionales ALADIN mais également à travers une simulation globale (ARPEGE-Climat) mise en œuvre au CNRM. Cette simulation a été spécialement conçue pour le diagnostic de l'activité cyclonique, avec une résolution variable sur la zone atteignant au mieux 15 km. Les données issues de cette dernière simulation ont été exploitées dans BRIO en complément des données ALADIN.

Rappelons les trois objectifs majeurs du projet **BRIO** :

- Doter les pays du sud-ouest de l'océan Indien de simulations climatiques régionales à haute résolution.
- Mettre à disposition les données climatiques issues du projet sur un portail internet régional en libre accès.
- Faire monter en compétence la région sur le thème du changement climatique par la formation d'experts nationaux dans les différents pays de la zone (Madagascar, Comores, Maurice et Seychelles) à l'exploitation des jeux de données issues de l'ensemble des simulations disponibles dans la région.

Ces trois objectifs ont bien été atteints et on peut dire que **BRIO** est un véritable succès avec la mise en place des premiers services climatiques dans le bassin sud-ouest de l'océan Indien. Les résultats ont été au-delà des attentes initiales du projet :

- La production d'un ensemble de jeux de données du climat futur à partir des simulations climatiques globales et régionales disponibles, permettant une meilleure estimation des impacts

attendus sur les secteurs d'activités climato-sensibles. A cet effet, de nombreux indicateurs climatiques ont pu être calculés sur l'ensemble des pays partenaires.

- La mise à disposition de l'ensemble des données issues des travaux menés via le portail régional changement climatique de l'océan Indien. Les données climatiques sont disponibles au téléchargement sous forme d'informations brutes mais également visualisables à travers le géoportail interactif.
- La formation sur deux ans (mars 2019 - mai 2021) des experts en climatologie issus des pays partenaires à l'exploitation des jeux de données climatiques pour la production de services climatiques dédiés aux divers usagers.
- L'organisation de forums utilisateurs pour permettre aux usagers d'exploiter les résultats pour des applications agricoles, sanitaires, énergétiques, hydrologiques, environnementales etc., selon les priorités de chaque pays en fonction de leurs principales vulnérabilités au changement climatique. Ces forums utilisateurs étaient intégrés aux forums de prévisions saisonnières du **SWIOCOF** tenu annuellement en septembre, http://regionalclimate-change.sc/swiocof_data_portal/
- La mise en place de nombreux partenariats d'études de l'impact du changement climatique dans différents secteurs climato-sensibles tels que le risque sanitaire (maladies vectorielles), la biodiversité, l'agriculture, et le bâtiment. Ces partenariats sont explicités en section 7.3.
- La fourniture de services climatiques pour les pays partenaires du projet.
- La mise en avant du projet via diverses communications régionales ou internationales.
- La rédaction d'un rapport final par chaque expert concerné par la formation à destination de son service météorologique.

L'ensemble des résultats du projet ont été développés en collaboration avec les pays membres de la **COI** en s'appuyant sur la contribution des experts des différents pays participants et la fourniture des données climatologiques de leurs territoires respectifs. Un questionnaire destiné aux professionnels exerçant dans les pays membres de la **COI** a été diffusé en ligne en 2019 afin de mieux comprendre les besoins en données climatiques. Le questionnaire est disponible en [version française](#) et en [version anglaise](#) (par simple clic sur les liens). Il est particulièrement ciblé pour les personnes impliqués dans l'agriculture, la santé, l'énergie renouvelable, la recherche scientifique, la gestion des risques de catastrophes naturelles ou les réponses aux crises humanitaires.

Une mind map du projet, conçue pour une conférence internationale en 2021, permet de résumer les principaux tenants et aboutissants de **BRIO** (Fig. 2.23).

2.4 SIMULATIONS CLIMATIQUES ET TRAVAUX D'ANALYSE DU PROJET BRIO

2.4.1 Caractéristiques des modèles de climat utilisés

Comme vu en section 2.1.5, les simulations à 50 km de résolution du projet **CORDEX** ne couvrent que peu (ou pas du tout) les pays du sud-ouest de l'océan Indien et ne permettent pas de représenter convenablement l'activité cyclonique de notre bassin océanique. Même si des simulations climatiques à 50 km apportent une information très utile sur l'évolution du climat aux échelles régionales ou continentales, elles sont peu adaptées aux problématiques des pays de l'océan Indien. Il a donc été décidé de réaliser, pour le projet **BRIO**, une descente d'échelle dynamique. C'est le modèle climatique régional **ALADIN-Climat** dans sa version 6.3 ([Daniel et al. 2019](#), [Nabat et al. 2020](#)) qui

2.4. Simulations climatiques et travaux d'analyse du projet BRIO

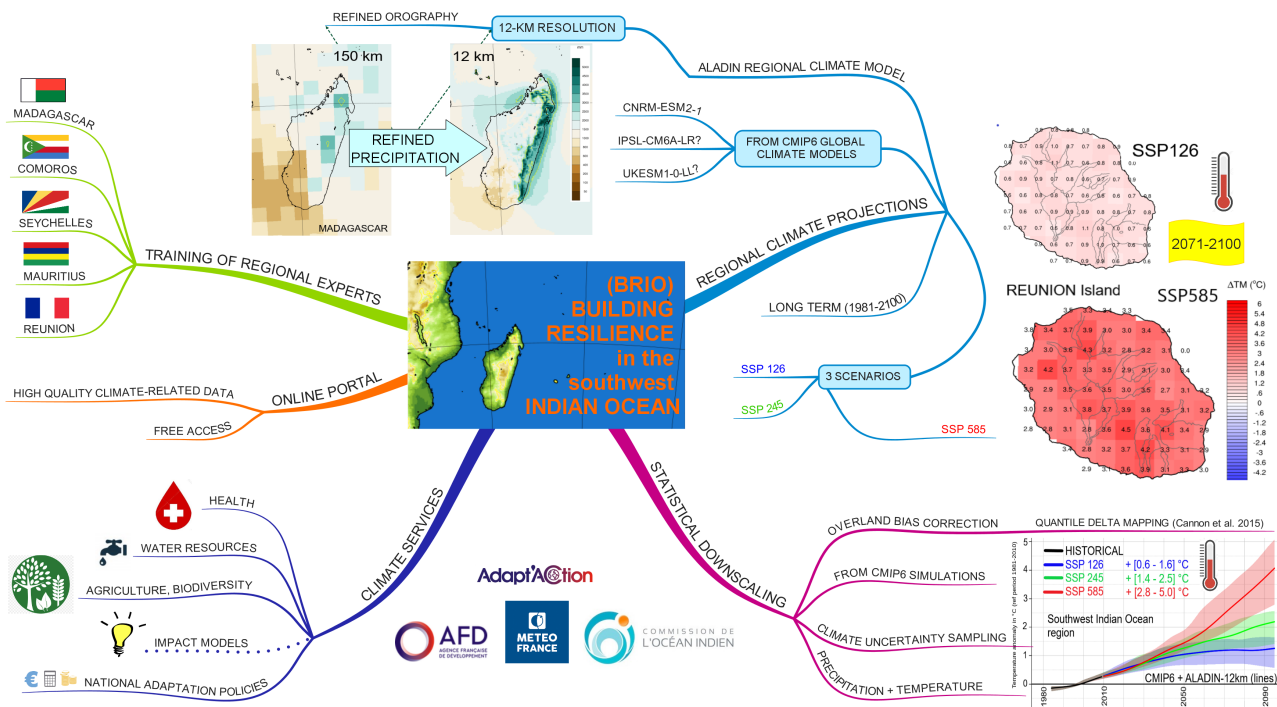


FIGURE 2.23 – Carte heuristique résumant les principaux tenants et aboutissants du projet BRIO.

a été utilisé. Il bénéficie des toutes dernières évolutions de la physique du modèle testées au Centre National de Recherche en Météorologie (CNRM) de Météo-France à Toulouse. C'est un modèle atmosphérique à aire limitée d'une résolution de 12 km sur l'horizontale, et qui possède 91 niveaux verticaux. Il n'est pas couplé à l'océan. La résolution d'ALADIN-Climat permet de préciser la déclinaison des tendances climatiques de grande échelle sur des territoires de petite taille à fort relief comme La Réunion (<http://www.meteofrance.re/climat/changement-climatique>) ou Maurice.

Dans le cadre du projet BRIO, les simulations ALADIN-Climat ont été réalisées sur un domaine dont la taille a été optimisée pour limiter les coûts de calcul tout en étant assez grande pour :

- Couvrir les pays membres de la COI ainsi que les pays d'Afrique qui bordent le canal du Mozambique et qui sont sensibles aux ressources en eau, c'est-à-dire Maurice, Rodrigues, Seychelles, Madagascar, Comores, Mayotte, Réunion, Tanzanie, Mozambique, tout en évitant d'inclure sur le bord ouest trop de relief du continent Africain (néfaste au comportement d'un modèle numérique).
- Etendre le domaine suffisamment à l'est pour bien voir l'arrivée des systèmes prescrits par le modèle coupleur et leur laisser le temps d'être repris par la dynamique d'ALADIN avant de toucher les Mascareignes (important pour leur intensification notamment, au vu de l'effet de la résolution sur l'intensité des systèmes).
- Inclure la zone de Diego Garcia au Nord où se forme une grande partie des systèmes tropicaux (cyclogénèse). En contrepartie, le domaine est restreint côté polaire à 28°S.

Le domaine d'ALADIN retenu [2°S - 27.8°S ; 33.8°E - 74.2°E] est illustré en figure 2.24. A noter que c'est un très grand domaine pour un modèle de climat de cette résolution.

Pour ce projet, ALADIN-Climat est initialisé et forcé aux bords par le modèle climatique global de Météo-France nommé CNRM-ESM2-1 (Séférian et al. 2019) dont la composante atmosphérique n'est autre que le modèle ARPEGE. C'est un modèle couplé (Earth System Model ou Système Terre),

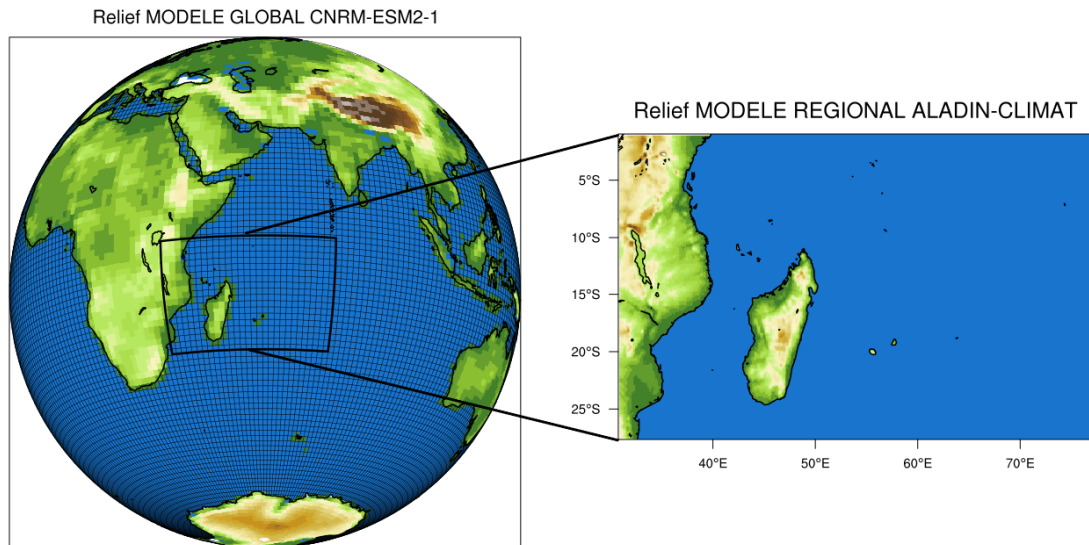


FIGURE 2.24 – Illustration de la descente d'échelle dynamique réalisée dans le projet BRIO et du domaine de simulation du modèle ALADIN-Climat.

plus complexe que le modèle couplé CNRM-CM6, et qui comprend les composantes (ou modules) suivantes :

- Pour l'atmosphère : ARPEGE V6.3-T127 à la résolution horizontale de $\simeq 150$ km, avec 91 niveaux verticaux.
- Pour l'océan : Nemo 3.6 à la résolution horizontale de $1/3^\circ$ aux Tropiques, avec 75 niveaux verticaux.
- Pour la surface : SURFEX et ISBA-CTRIP.

Rappelons que ce sont les nouvelles simulations CNRM-ESM2-1 réalisées dans le cadre de CMIP6 qui sont utilisées dans le projet de régionalisation BRIO (Fig. 2.24).

Pour l'analyse de l'activité cyclonique du bassin SOOI et de son évolution future (sections 3.1 et 6.3), nous exploitons également les résultats de la simulation ARPEGE-Climat V6 mise en œuvre par le CNRM dans le cadre du projet ReNovRisk-Cyclones. ARPEGE est un modèle de climat global en troncature T359 mais la simulation a été réalisée avec une maille étirée (non constante) qui permet de descendre en résolution au niveau du "pôle" prescrit, ici l'océan Indien (Fig. 2.25). Nous la nommerons ARPEGE-str pour "stretché". Cette simulation a une résolution d'environ 15 km sur le bassin SOOI et utilise des forçages (dont les gaz à effet de serre) de l'exercice CMIP5. Les températures de la mer sont prescrites et proviennent de CMIP5 après correction des biais. Le modèle a tourné en climat présent sur la période 1965-2014 et en climat futur sur la période 2031-2094 pour le scénario RCP8.5 uniquement.

2.4.2 Scénarios retenus et coûts de calcul

Une approche multi-scénarios a été retenue dans ce projet pour quantifier l'incertitude climatique liée aux scénarios d'émissions de GES. Trois scénarios de référence du GIEC-6 ont été simulés avec ALADIN-Climat afin de mieux éclairer les stratégies et décisions publiques : SSP1-2.6 (faible ou optimiste), SSP2-4.5 (médian ou intermédiaire) et SSP5-8.5 (élevé ou pessimiste). La figure 2.26 offre une synthèse des simulations climatiques de BRIO, de leurs caractéristiques et de leurs atouts qui seront détaillés en section 3.4.

En temps de calcul sur le supercalculateur de Météo-France localisé à Toulouse, il faut 12h pour préparer un an de fichiers de couplage CNRM-ESM2-1 (interpolations horizontales et verticales sur

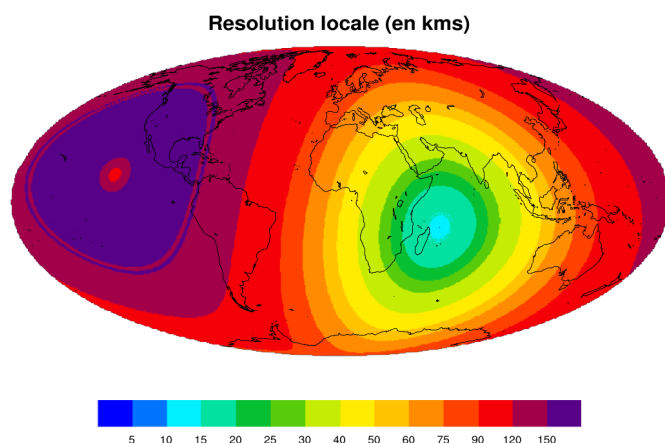


FIGURE 2.25 – Résolution (en km) du modèle *AR-PEGE-str* avec pôle sur l'océan Indien (projet *ReNovRisk-Cyclones*).

la grille d'*ALADIN* quatre fois par jour) puis 8h30 pour obtenir un an de simulation *ALADIN*. Il faut donc compter environ un jour par an de simulation au total. Les périodes de simulation sont les suivantes :

- Une simulation historique de 36 ans couvrant la période 1979-2014 (environ 1 mois sur le calculateur).
- Trois simulations scénarios de 86 ans sur la période 2015-2100 (presque 3 mois chacune sur le calculateur).

L'ensemble des simulations ont été finalisées sur le calculateur en février 2020. En effet, une erreur avait été détectée en octobre 2019 par les équipes du *CNRM* sur les sorties de *CNRM-ESM2-1* pour le scénario *SSP5-8.5*, conduisant à refaire tourner la simulation globale puis la simulation régionale sur le supercalculateur pour ce scénario. Les résultats présentés dans ce rapport final sont donc susceptibles d'avoir évolué par rapport au rapport intermédiaire.

2.4.3 Etendue des tâches réalisées

Voici une synthèse, parfois chronologique, des divers développements et travaux d'analyse qui ont été réalisés durant le projet *BRIO* :

- Des simulations *ALADIN* préparatoires sur le supercalculateur pour des périodes test en vue de choisir un domaine et une configuration appropriée du modèle et de sa physique sous les tropiques (divers paramètres).
- Quatre simulations *ALADIN* sur le supercalculateur (période historique et trois scénarios), ainsi qu'une simulation erronée (*SSP5-8.5*) et des essais infructueux de couplage à un autre modèle *CMIP6* que *CNRM-ESM2-1*.
- La création de jeux de données quotidiens de référence solides à partir des observations disponibles (complétion de données manquantes et spatialisation lorsque possible) sur chaque île et pour les variables températures (minimale, maximale, moyenne) et précipitations.
- Le post-traitement des fichiers de sortie *ALADIN* pour extraire diverses variables à divers pas de temps et faire des moyennes annuelles et saisonnières.
- Le calcul des biais du modèle (comparaison modèle et jeux de données de référence sur la période 1981-2010) sur les archipels des Seychelles et des Comores, ainsi que sur Mayotte, Madagascar, Maurice, Agalega, Saint Brandon, Rodrigues et La Réunion.
- La correction de ces biais sur la période historique 1981-2010 et la période 2015-2100 pour trois scénarios pour les variables précipitations et température (descente d'échelle statistique illustrée en figure 2.27).

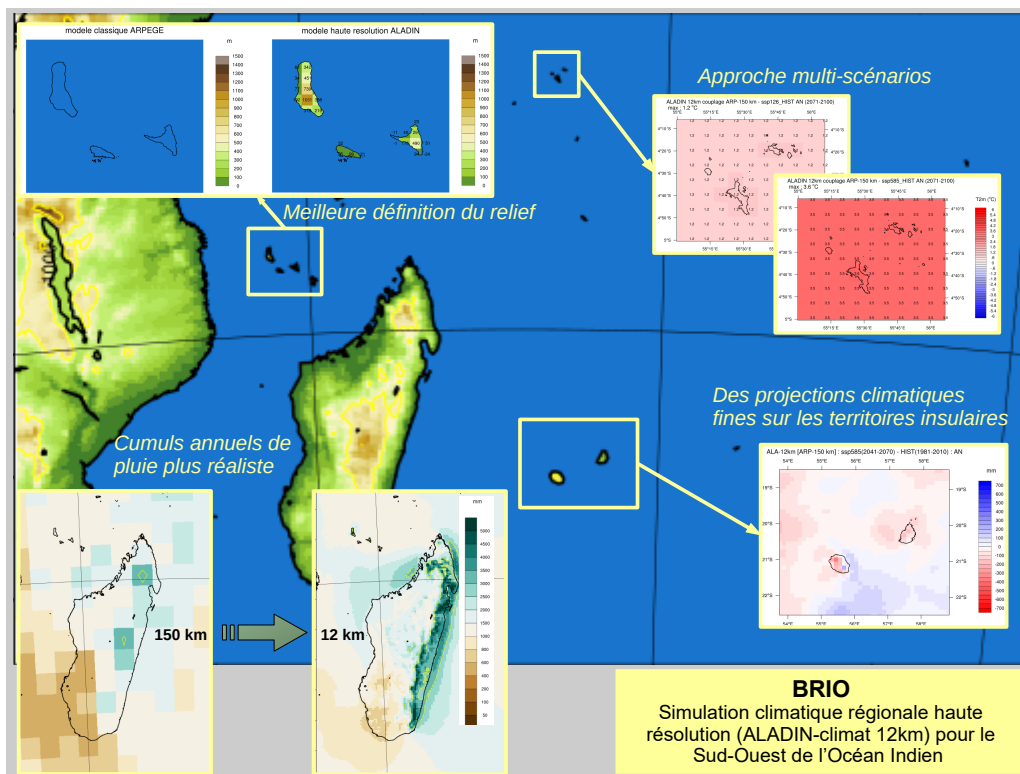


FIGURE 2.26 – Carte résumant la stratégie de modélisation climatique du projet BRIO avec les principales caractéristiques des simulations et leurs atouts. Le fond de carte représente le domaine ALADIN comme illustré en figure 2.24.

- L'identification et le comptage des systèmes dépressionnaires dans le modèle ALADIN sur la période historique et future (trois scénarios) afin de valider le comportement du modèle et d'analyser les tendances climatiques futures ; la correction des biais d'intensité d'ALADIN ; l'analyse des résultats au regard de ceux de ReNovRisk-Cyclones.
- L'analyse des simulations globales CMIP6 pour une vingtaine de modèles disponibles pour (i) quantifier l'incertitude du changement climatique sur notre zone et pour (ii) situer le modèle global et régional utilisé (couple CNRM-ESM2-1 / ALADIN) parmi les autres modèles globaux en termes de précipitations et de température sur la zone et sur les diverses îles.
- Le développement d'un prototype sur La Réunion de descente d'échelle statistique à partir des simulations globales CMIP6 en vue de quantifier l'incertitude du changement climatique sur un petit territoire insulaire à l'orographie complexe.
- La définition et le calcul d'indices climatiques sur les divers états insulaires.
- La définition d'une nomenclature commune pour les fichiers netcdf de température minimale, température maximale, précipitations, et d'un ensemble d'indicateurs climatiques sur les îles pour la période historique et pour la période 2015-2100 pour trois scénarios ; la livraison de ces fichiers pour le portail BRIO ; la participation aux spécifications du portail pour le téléchargement des données et la production des produits à valeur ajoutée permettant le diagnostic du changement climatique.
- La valorisation des résultats du projet lors de diverses conférences et séminaires scientifiques ou dans la presse ; la présentation des projections climatiques à destination de divers secteurs d'activité ou communes ou administrations en charge de la gestion des risques ; la préparation et la mise à disposition des données au sein de partenariats mis en place via des projets de recherche (santé, biodiversité, bâtiment, agriculture). Ces aspects seront détaillés en sections 7.1 et 7.3.

2.4. Simulations climatiques et travaux d'analyse du projet BRIO

- La création et la mise à jour régulière d'un tableau qui recense l'ensemble des demandes et réponses apportées aux potentiels utilisateurs de données du projet [BRIO](#).

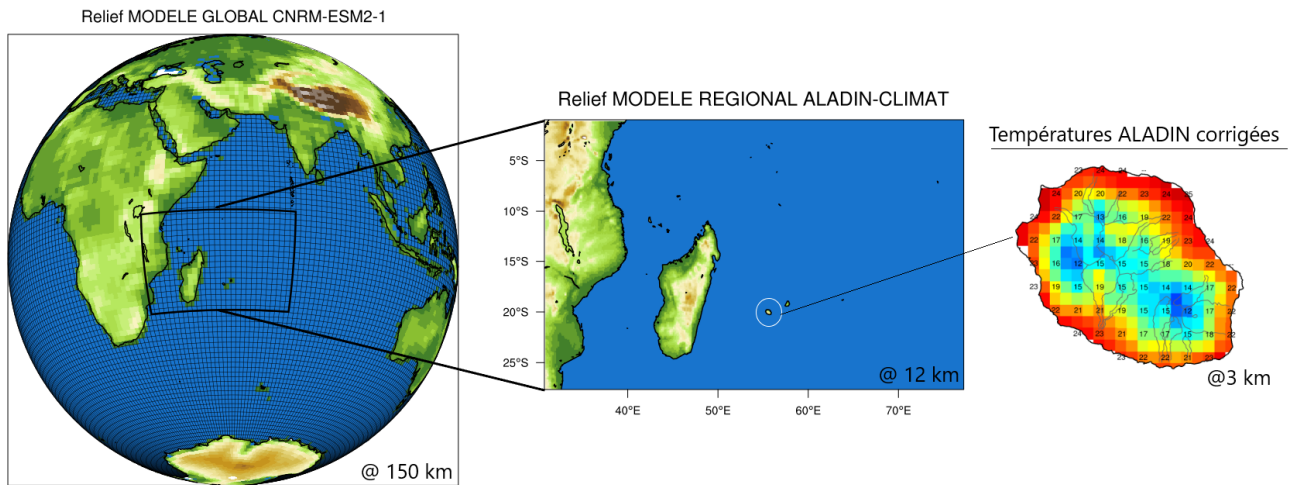


FIGURE 2.27 – *Illustration de l'ensemble des descentes d'échelle dynamique et statistique réalisées dans le projet [BRIO](#); exemple des températures moyennes annuelles sur l'île de la Réunion corrigées sur la période historique.*

Chapitre 3

Evaluation du modèle ALADIN et apport de la haute résolution

SOMMAIRE

3.1 ACTIVITÉ CYCLONIQUE SUR LA PÉRIODE HISTORIQUE DU MODÈLE	41
3.1.1 Apport de la haute résolution sur la modélisation des cyclones	41
3.1.2 Localisation des systèmes dépressionnaires	41
3.1.3 Représentation spatiale de l'activité cyclonique	45
3.1.4 Représentation de l'activité cyclonique en nombre de systèmes	46
3.1.5 Représentation de l'activité cyclonique en distribution des intensités	46
3.2 APPORT DE LA HAUTE RÉOLUTION SUR LE RELIEF DES ÎLES	48
3.2.1 Madagascar	48
3.2.2 Archipel principal des Seychelles et des Comores	48
3.2.3 Les îles des Mascareignes	48
3.3 EVALUATION DES PRÉCIPITATIONS DU MODÈLE	51
3.3.1 Climatologie des précipitations sur le bassin	51
3.4 APPORT DE LA HAUTE RÉOLUTION SUR LES PRÉCIPITATIONS	54
3.4.1 Précipitations sur les îles à fort relief	54

Ce chapitre dresse une évaluation des simulations régionales **ALADIN** en comparant les précipitations et l'activité cyclonique simulées par le modèle sur la période historique aux données de référence sur le bassin **SOOI**. Nous analysons la distribution spatiale des systèmes tropicaux ainsi que la distribution de leur intensité. Une comparaison est également faite avec le modèle global coupleur **CNRM-ESM2-1** pour montrer l'apport de la haute résolution sur (i) la modélisation de l'intensité et de la structure des systèmes tropicaux, (ii) la représentation de l'orographie des territoires insulaires, et *a fortiori* (iii) la représentation des précipitations sur les îles à fort relief. Il est démontré qu'**ALADIN** représente bien la distribution spatiale des précipitations dans le bassin. Néanmoins, ses précipitations sont trop intenses par rapport aux observations climatologiques notamment sur les côtes exposées aux alizés ; la correction de ces biais d'intensité fera l'objet du chapitre 5. Enfin, **ALADIN** produit des systèmes cycloniques ayant des structures réalistes, il les développe à la fois à partir de systèmes entrants dans son domaine ou les crée à l'intérieur de son domaine. La climatologie des systèmes tropicaux indique un biais spatial (systèmes décalés à l'ouest et au sud dans **ALADIN**) et un biais en intensité (systèmes trop intenses dans **ALADIN**) dont la correction sera abordée au chapitre 5.

3.1 ACTIVITÉ CYCLONIQUE SUR LA PÉRIODE HISTORIQUE DU MODÈLE

Pour l'analyse de l'activité cyclonique et de son évolution à long terme, nous utilisons les deux jeux de données haute résolution disponibles en incluant la simulation **ARPEGE** étiré ou "stréché" de ReNovRisk-Cyclones décrite en section 2.4. Un algorithme de suivi des systèmes dépressionnaires dans le modèle **ARPEGE** du **CNRM** a été développé au **CNRM** (Chauvin et al. 2006). Dans le cadre du projet **BRIO**, nous avons adapté cet algorithme pour suivre et compter le nombre de systèmes tropicaux dans la simulation **ALADIN** historique en vue d'évaluer la performance du modèle **ALADIN** par rapport aux données de référence.

3.1.1 Apport de la haute résolution sur la modélisation des cyclones

L'animation en figure 3.1 illustre l'apport de la haute résolution numérique sur la représentation d'un système dépressionnaire. L'animation requiert une version récente de Acrobat Reader ; une image prise à un instant donnée est proposée alternativement en figure 3.2. On y voit l'évolution par pas de 6 heures d'un exemple de système tropical modélisé par **CNRM-ESM2-1** et qui entre par le bord est du domaine **ALADIN** au stade de dépression. Les trajectoires sont semblables dans les deux modèles, et le système touche Maurice, La Réunion, puis Madagascar (Figs. 3.1(a),(b)). Pourtant, dans **ALADIN**, le système s'intensifie rapidement au stade de **CTTI** avec un record de minimum de pression mer à 850 hPa (Fig. 3.1(b)), alors que dans **CNRM-ESM2-1**, il n'atteint pas le stade de tempête tropicale modérée (avec 987 hPa au maximum d'intensité, Fig. 3.1(a)). Le champ de précipitations cumulées sur 3 heures pour ce même système dépressionnaire a une allure bien plus réaliste dans **ALADIN** avec des valeurs dépassant localement les 100 mm dans **ALADIN** (Fig. 3.1(d)) contre environ 10 mm dans **CNRM-ESM2-1** (Fig. 3.1(c)). On aperçoit bien la structure du cyclone dans **ALADIN** (Fig. 3.1(d)) et l'enroulement nuageux autour de l'œil.

3.1.2 Localisation des systèmes dépressionnaires

Nous avons suivi les systèmes tropicaux au stade minimal de tempête tropicale modérée (≥ 17 m/s) dans **ALADIN** en comparaison de la Best track sur 34 saisons de la période historique (1980-2013). Le modèle est bien capable de reproduire l'allure générale des trajectoires des systèmes dépressionnaires de notre bassin, malgré sa couverture plus restreinte. La figure 3.3(b) indique qu'**ALADIN** fabrique des systèmes tropicaux à l'intérieur de son domaine, dans les zones de cyclogénèse habituelle (**ZCIT**, thalweg de mousson et canal du Mozambique, Chagos). Il est également capable de faire entrer par son bord Est des systèmes prescrits par son modèle forceur **CNRM-ESM2-1**. Dû au domaine limité d'**ALADIN**, le stade de cyclone n'est observé qu'à l'ouest de 67°E, le temps pour les systèmes de s'intensifier en puisant l'énergie des mers chaudes. A la différence de la Best track, on note dans **ALADIN** : (i) davantage de systèmes au stade de tempête tropicale modérée à l'intérieur des terres (continent Africain et Madagascar) et (ii) une plus grande densité de trajectoires dans le canal du Mozambique relativement à l'océan Indien ouvert. Une densité relative accrue de cyclones dans le canal du Mozambique se retrouve dans la simulation historique **ARPEGE-str** (Fig. 3.3(c)) qui permet quant à elle de couvrir l'ensemble du bassin. Dans les deux modèles, un grand nombre de systèmes se forment sous la latitude 20°S (points jaunes) contrairement à la réalité indiquée par la Best track (Fig. 3.3). Notons qu'**ALADIN** semble donner des résultats pertinents pour l'archipel des Comores sur la période historique mais au vu du faible nombre de systèmes sur cette zone il est plus difficile d'avoir des statistiques fiables.

(a) Pression mer - CNRM-ESM2-1

(b) Pression mer - ALADIN

(c) Précipitations sur 3h - CNRM-ESM2-1

(d) Précipitations sur 3h - ALADIN

FIGURE 3.1 – *Evolution par pas de 6 heures de la pression au niveau de la mer en hPa (en haut) et des précipitations cumulées sur 3 heures en mm (en bas) pour un exemple de système dépressionnaire simulé par le modèle global [CNRM-ESM2-1](#) (à gauche) et par le modèle régional [ALADIN](#) (à droite).*

3.1. Activité cyclonique sur la période historique du modèle

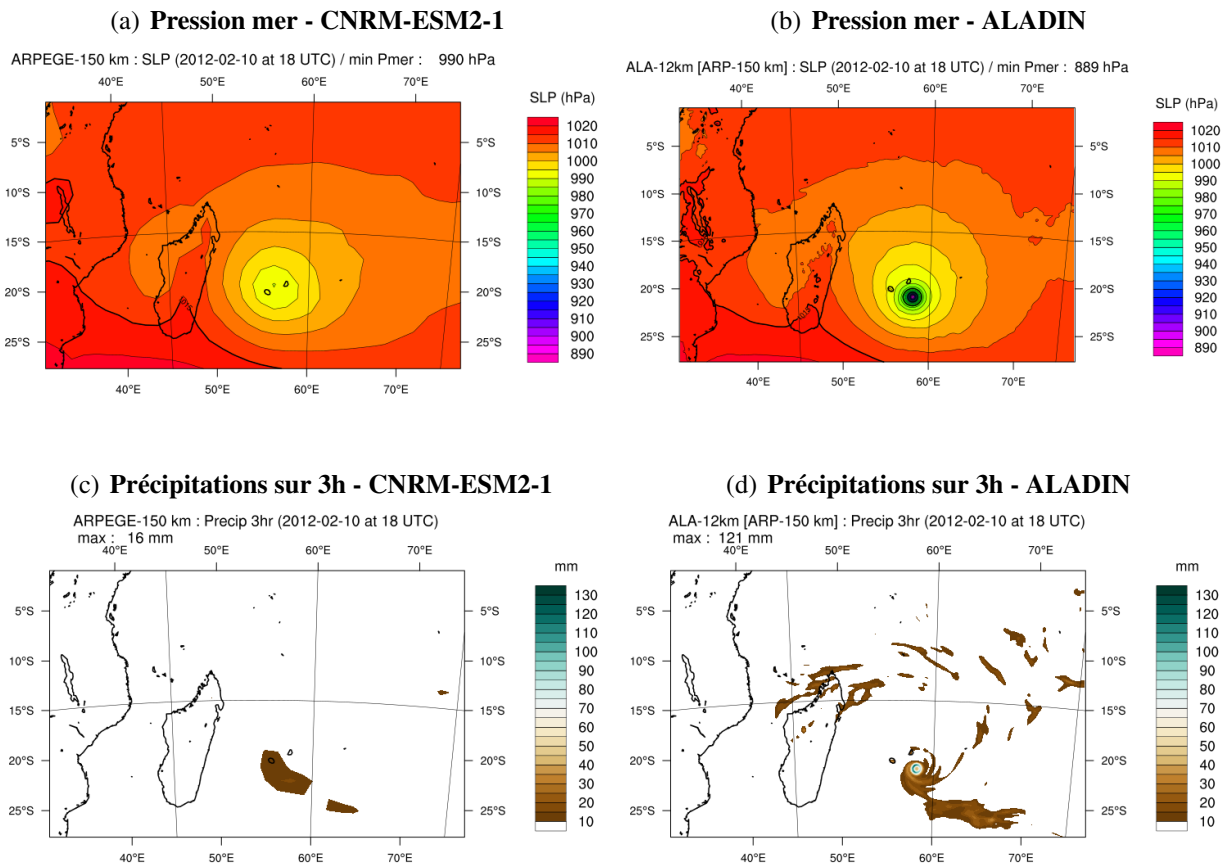


FIGURE 3.2 – Pression au niveau de la mer en hPa (en haut) et précipitations cumulées sur 3 heures en mm (en bas) pour un exemple de système dépressionnaire simulé par le modèle global *CNRM-ESM2-1* (à gauche) et par le modèle régional *ALADIN* (à droite) le 10 février 2012 à 1800 UTC.

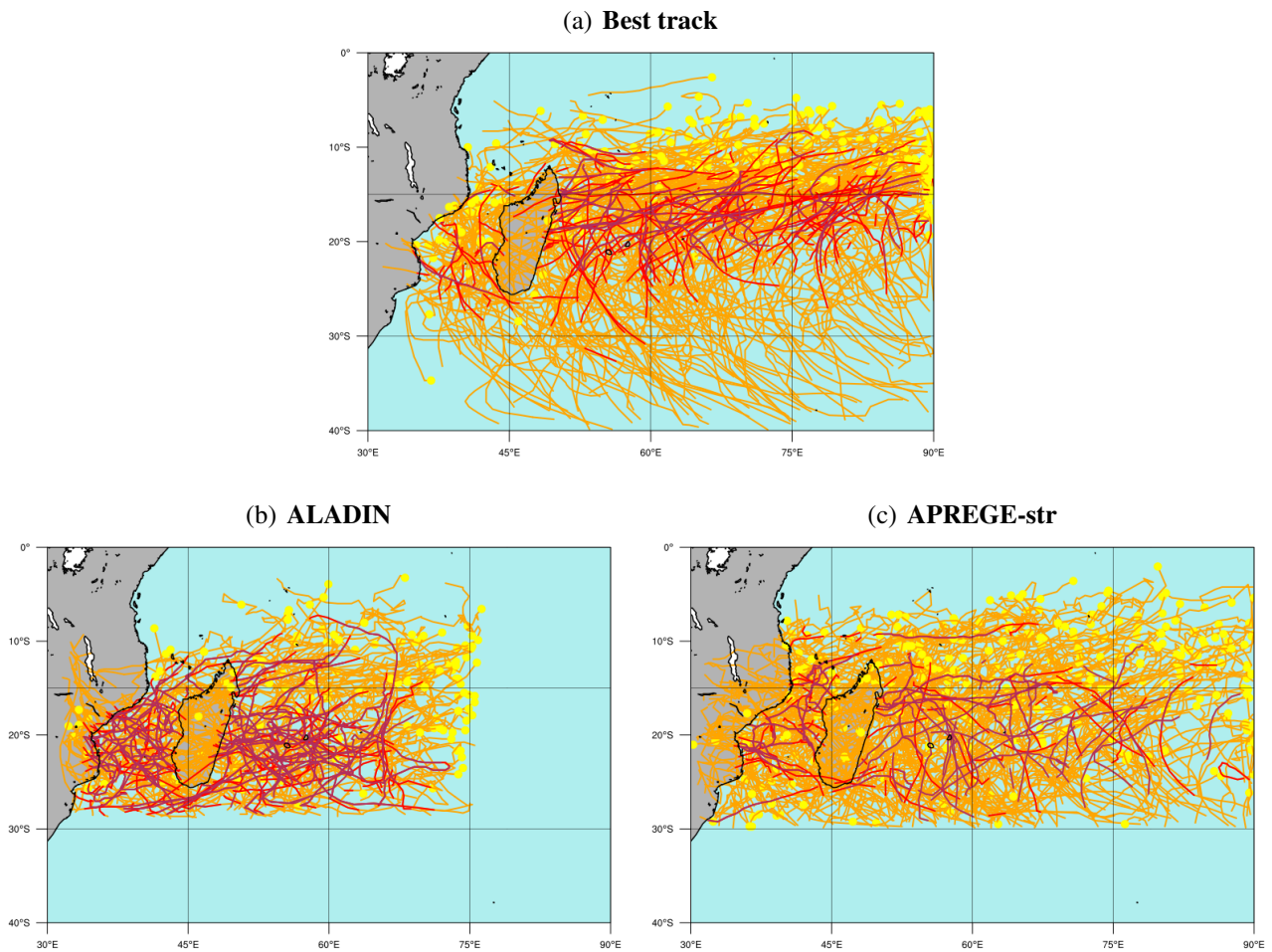


FIGURE 3.3 – Trajectoires des systèmes tropicaux du bassin sud-ouest de l’océan Indien sur 34 saisons de la période historique (1980-2013) : en orange les systèmes au stade de tempête, en rouge ceux au stade de cyclone, et en pourpre les cyclones intenses et très intenses. Un rond jaune matérialise le début de chaque trajectoire. (a) Données observées (Best track du [CMRS de La Réunion](#)) et données simulées par les modèles (b) [ALADIN](#) et (c) [ARPEGE-str](#).

3.1.3 Représentation spatiale de l'activité cyclonique

Une comparaison du nombre de jours de systèmes au stade minimal de tempête par carrés de 3° par 3° de longitude et latitude sur une période historique de 34 ans révèle l'existence d'un fort biais spatial dans le modèle **ALADIN** : le coeur de l'activité est décalé vers le sud et l'ouest par rapport à la Best track de référence (Fig.3.4(b)). Dans la simulation historique **ALADIN**, la densité de systèmes est aussi élevée dans le canal du Mozambique que dans l'est du bassin et l'activité est globalement décalée vers le sud-ouest. On observe également un biais spatial vers le sud (un peu moins prononcé) et l'ouest sur la simulation **ARPEGE-str** (Fig. 3.4(c)). Ce biais peut s'expliquer par un biais du modèle en circulation générale moyenne à 850 hPa et 200 hPa en saison cyclonique (trimestre DJF) en comparaison des réanalyses **ERA-Interim** du Centre Européen de Prévision Météorologique à Moyen Terme (**CEPMMT**) sur la période historique (non illustré). En basses couches la zone de cyclogénèse manque de convergence et de cyclonisme que ce soit dans **ARPEGE-str** ou dans le modèle forceur d'**ALADIN CNRM-ESM2-1** (flux d'ouest sous-estimé au nord de la **ZCIT** et flux d'alizés sous-estimé au sud de la **ZCIT**, entraînant une vorticité plus faible à 850 hPa). En altitude, le jet d'est tropical est moins intense dans **ARPEGE-str** comparé à **ERA-Interim** et il est situé trop au nord dans **CNRM-ESM2-1**. Une correction de biais spatial étant bien plus complexe à réaliser, elle n'a pas été développée dans le cadre de ce projet. Il serait innovant de la concevoir dans l'avenir.

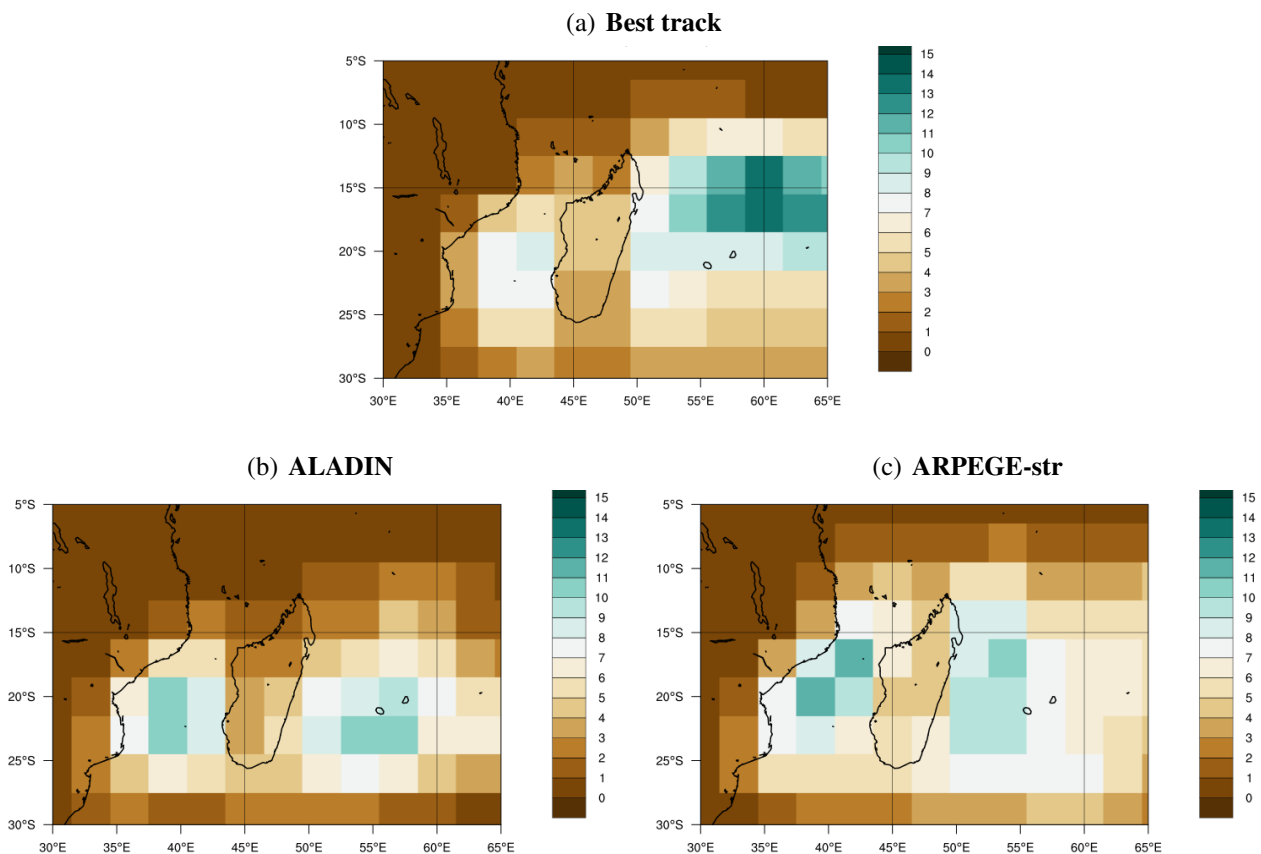


FIGURE 3.4 – Densité de tempêtes et cyclones dans le bassin **SOOI** (en nombre de jours sur des carrés de 3° par 3°) sur 34 saisons de la période historique (1980-2013) : (a) Données observées (Best track) et données simulées par les modèles (b) **ALADIN** et (c) **ARPEGE-str**.

3.1.4 Représentation de l'activité cyclonique en nombre de systèmes

Sur la même période 1980-2013, le décompte du nombre de systèmes annuel par catégorie d'intensité met en évidence l'apport de la haute résolution (tableau 3.1). CNRM-ESM2-1 ne produit qu'un seul système par an, au stade maximal de tempête et avec une valeur de Pmer ne descendant pas sous le seuil de 982 hPa. ALADIN, lui, est capable d'intensifier les systèmes au-delà du stade de cyclone. La valeur du minimum de pression mer d'ALADIN (850 hPa) est certes trop basse par rapport aux valeurs de référence observées dans la Best track (895 hPa); cela est vraisemblablement lié au manque de rétroaction négative océan-atmosphère puisque ALADIN n'est pas couplé à l'océan (les cyclones se déplaçant lentement voient leur intensité modérée par le refroidissement sous-jacent qu'ils génèrent en puisant l'énergie de l'océan). On note ainsi dans le tableau 3.1 un biais d'ALADIN vers les systèmes intenses relativement au nombre de systèmes totaux qu'il produit : 90% (3.5 sur 3.9) des systèmes dépassent le stade de cyclone (contre 50% dans la Best track) et plus de 60% dépassent le stade de cyclone tropical très intense (contre 5% dans la Best track). Comparé à la Best track, ALADIN produit relativement deux fois moins de tempêtes tropicales (3.9 contre 9.8) mais presque autant de cyclones (3.5 contre 4.9). La proportion des systèmes en fonction de leur intensité est mieux représentée par la simulation ARPEGE-str sauf en fin de distribution (les cyclones tropicaux très intenses sont sur-représentés).

	Tempêtes ≥ 17 m/s	Cyclones ≥ 34 m/s	CTI ≥ 46 m/s	CTTI ≥ 60 m/s	Min Pmer
CNRM-ESM2-1	1	0	0	0	982 hPa
ratio	100%	0%	0%	0%	-
ALADIN	3.9	3.5	2.9	2.4	850 hPa
ratio	100%	90%	73%	63%	-
ARPEGE-str	7.9	3.5	2.4	1.5	860 hPa
ratio	100%	44%	30%	20%	-
Best track	9.8	4.9	2.7	0.5	895 hPa
ratio	100%	50%	27%	5%	-

TABLEAU 3.1 – Nombre annuel de systèmes par catégorie sur 34 saisons de la période historique (1980-2013), en utilisant le vent maximum comme critère d'intensité et selon la classification du bassin sud-ouest de l'océan Indien (voir tableau 2.3). Une comparaison est donnée pour les modèles CNRM-ESM2-1, ALADIN, ARPEGE-str, et la Best track avec les ratios respectifs. La valeur du minimum de pression au niveau de la mer (Min Pmer) relevé pour chaque modèle et dans la Best track est également indiquée en dernière colonne.

3.1.5 Représentation de l'activité cyclonique en distribution des intensités

L'histogramme des vents maximaux en figure 3.5 montre la répartition des systèmes par intensité dans les modèles ALADIN et ARPEGE-str par rapport aux données de référence (Best track). On retrouve un biais positif d'ALADIN vers les systèmes de forte intensité (Fig. 3.5(a)). Ce biais pourra être corrigé pour en tenir compte dans les projections futures du modèle (voir section 5.2).

Ce biais peut être hérité des biais de température de surface de la mer prescrits par le modèle forceur CNRM-ESM2-1. Pour le mois de décembre par exemple on retrouve en moyenne sur la période historique une mer plus chaude dans le canal du Mozambique et autour de 20°S dans l'océan ouvert (biais maximum de 1°C) et plus froide au niveau de la ZCIT dans ALADIN par rapport aux réanalyses ERA-Interim (Fig. 3.6).

3.1. Activité cyclonique sur la période historique du modèle

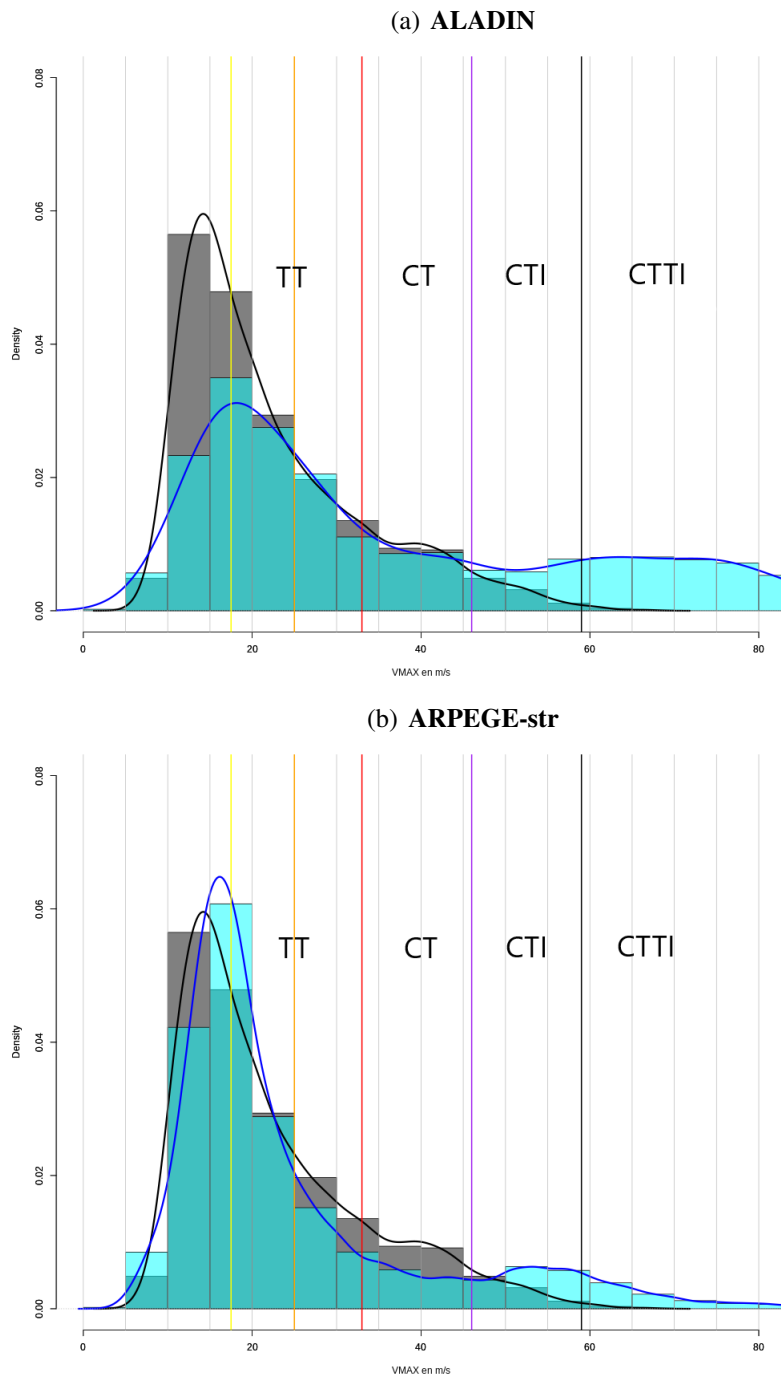


FIGURE 3.5 – Histogramme montrant la distribution des systèmes par seuil d'intensité (vent maximal par pas de $5 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$) dans les modèles (a) **ALADIN** et (b) **ARPEGE-str** (cyan) en comparaison de la **Best track** (gris).

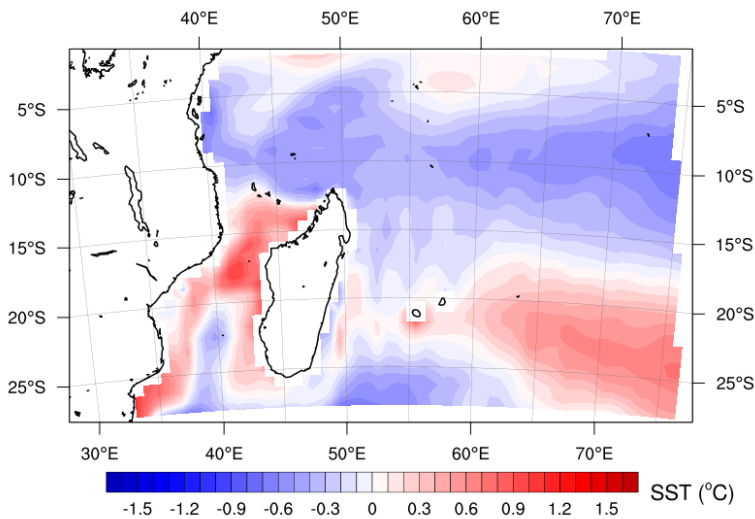


FIGURE 3.6 – Biais moyen de température de surface de la mer en décembre dans le modèle régional *ALADIN*. Le biais est calculé sur la période historique 1980-2014 par rapport aux réanalyses *ERA-Interim* à 0.75° de résolution.

3.2 APPORT DE LA HAUTE RÉOLUTION SUR LE RELIEF DES ÎLES

Du fait de sa résolution douze fois plus fine, l'orographie du modèle *ALADIN* est nettement plus réaliste que celle de *CNRM-ESM2-1*. *ALADIN* représente les îles de petite taille qui sont vues comme de l'eau dans un modèle global de climat. Nous illustrons ces deux points pour les principales îles inscrites dans le projet.

3.2.1 Madagascar

Les hauts plateaux de Madagascar comptent trois principaux massifs :

- Au nord, le Tsaratanana, qui possède le plus haut sommet de l'île (un pic volcanique de 2 876 m d'altitude, le Maromokotro).
- Au centre le massif volcanique de l'Ankaratra avec 2 642 m d'altitude au Tsiafajavona.
- Au sud l'Andringitra, qui culmine au pic Boby à 2 658 m.

L'orographie du modèle *ALADIN* représente bien les trois massifs principaux de Madagascar (Fig. 3.7) ; le massif volcanique de l'Ankaratra culmine à 2011 m dans *ALADIN* contre 2 642 m dans la réalité.

3.2.2 Archipel principal des Seychelles et des Comores

Le point culminant des Seychelles se situe sur l'île de Mahé au Morne Seychellois (905 m d'altitude). Les Comores ont un relief qui atteint 2 360 m au Karthala sur la Grande Comore, tandis que c'est le Mont Bénara qui culmine à Mayotte (660 m d'altitude).

CNRM-ESM2-1 voit principalement de la mer en lieu et place des archipels des Seychelles et des Comores, tandis qu'*ALADIN* représente bien de la terre et localise les principaux massifs montagneux (Figs. 3.8 (a)-(d)). Globalement, on voit qu'*ALADIN* sous-estime l'altitude maximale d'un facteur 2 pour les petites îles. A cause du relief très escarpé de La Grande Comore, *ALADIN*, avec sa résolution de 12 km, sur-estime le relief sur les points de côte.

3.2.3 Les îles des Mascareignes

Le Piton de la Petite Rivière Noire culmine à 828 mètres sur l'île Maurice, tandis que le Piton des Neiges culmine à 3069 m à La Réunion, qui comprend trois principaux cirques. Le plus haut

3.2. Apport de la haute résolution sur le relief des îles

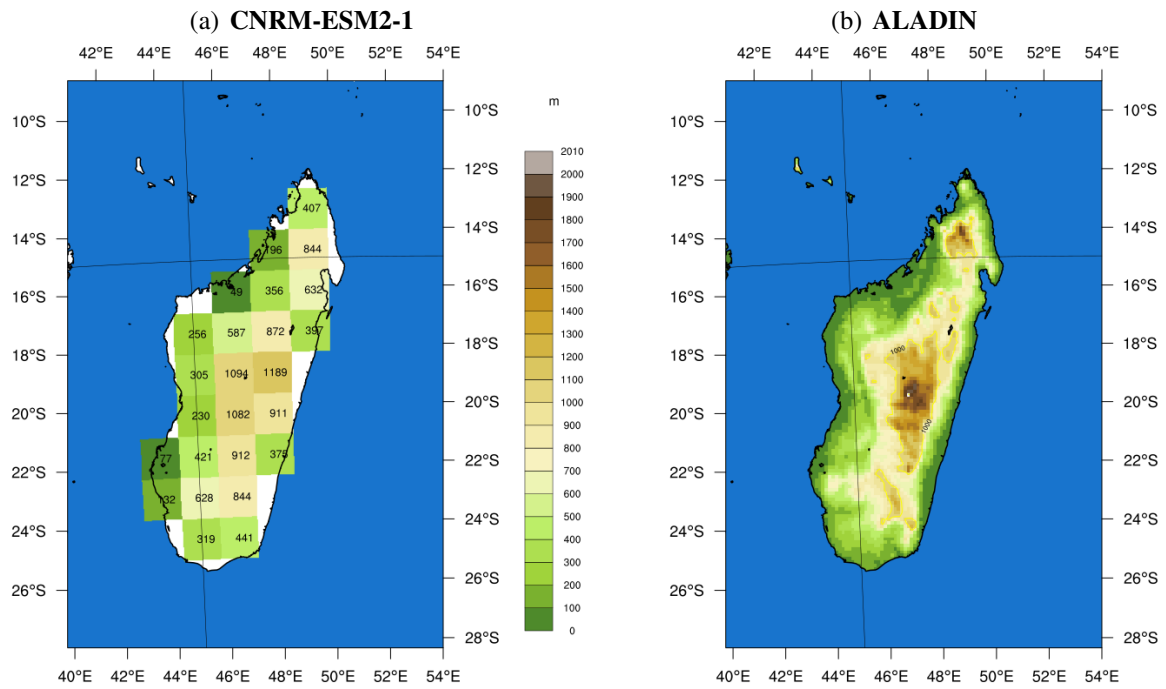


FIGURE 3.7 – Orographie (relief en m) de Madagascar dans les modèles (a) CNRM-ESM2-1 et (b) ALADIN.

sommet de Rodrigues, le mont Limont, atteint 398 mètres. Le relief de Rodrigues s’organise autour d’une arête centrale de direction ouest sud-ouest, d’où rayonnent des ravins abrupts.

Comme pour les Seychelles et les Comores, CNRM-ESM2-1 représente de la mer en lieu et place des îles Maurice et La Réunion (Fig. 3.8(e)) ainsi que sur Rodrigues (non illustré). ALADIN représente bien mieux l’orographie des îles Mascareignes avec une altitude maximale divisée par deux par rapport à la réalité sur les îles sœurs (Figs. 3.8(f), 3.8(h)). Bien que l’on ne puisse distinguer les trois cirques de La Réunion (Mafate, Cilaos, Salazie), on note une large zone d’altitude supérieure à 1000 m (contour jaune) dans ALADIN, englobant les trois cirques et la zone du volcan (Fig. 3.8(f)). Comme pour la Grande Comore, le relief à la côte est surévalué par ALADIN. L’île Rodrigues est très plate dans ALADIN (51 m maximum, Fig. 3.8(g)) mais elle existe bien.

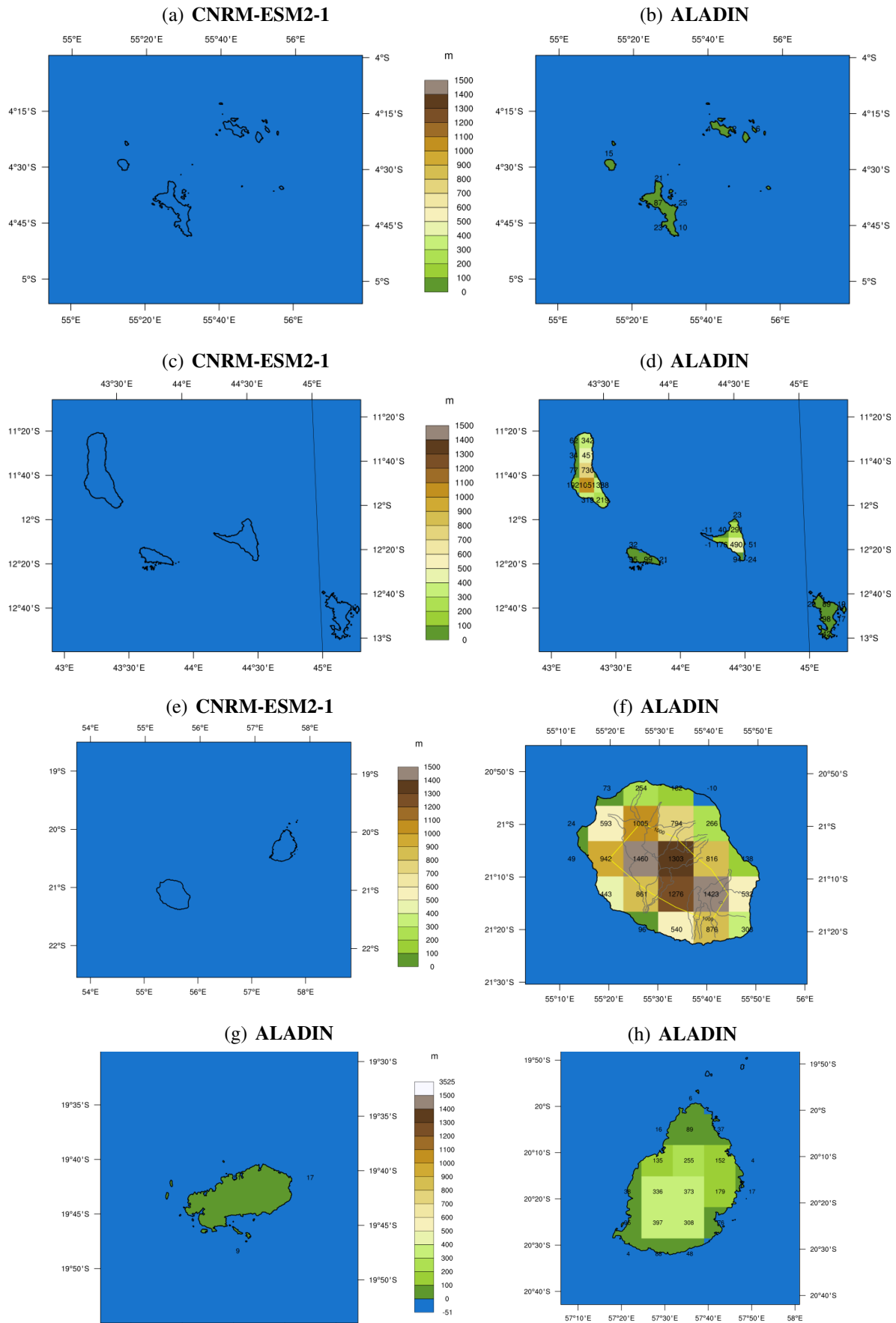


FIGURE 3.8 – Orographie (relief en m) de l'archipel des Seychelles, des Comores, et des îles Mascareignes dans les modèles *CNRM-ESM2-1* et *ALADIN*.

3.3 EVALUATION DES PRÉCIPITATIONS DU MODÈLE

3.3.1 Climatologie des précipitations sur le bassin

Dans cette section, nous utilisons le produit satellitaire de référence nommé **IMERG** V06 qui a une résolution temporelle de 30 minutes et une résolution spatiale de $0.1^\circ \times 0.1^\circ$ (environ 10 km). Avec l'algorithme **IMERG**, la **NASA** a fusionné les précipitations estimées par deux constellations de satellites provenant des missions successives **TRMM** (1998-2015), dont découlait le produit **TMPA-3B42**, et **GPM** (dès 2014). Les données proviennent de capteurs micro-ondes mais aussi infra-rouge (**Huffman et al. 2019**). Le produit **IMERG** délivre ainsi des estimations de précipitations globales (jusqu'à 60° de latitude) sur plus de 20 ans (les données débutent au 1er juin 2000). Dans la version "finale" d'**IMERG** utilisée ici, des mesures mensuelles de pluviomètres ont été utilisées, aux endroits où elles sont disponibles, pour corriger les biais mensuels des estimations satellitaires. Il avait été démontré dans la littérature que le premier produit **TMPA-3B42** (1998-2015) tendait à sous-évaluer les fortes précipitations (notamment dans les événements cycloniques) puisqu'il mesurait des taux de précipitations maximaux de 30 mm/h (**Huffman et Coauthors 2007**).

La climatologie des précipitations sur le bassin sud-ouest de l'océan Indien apparaît correcte dans le modèle **ALADIN** lorsque l'on compare la distribution annuelle des précipitations à celle du produit satellitaire **IMERG** (Fig. 3.9). La **ZCIT** est correctement positionnée dans **ALADIN** et les cumuls de pluie sont réalistes, malgré un excès sur la façade est de Madagascar et de manière générale sur les côtes exposées aux alizés. Cet excès pourrait être dû à un défaut de mesure des fortes précipitations dans **IMERG** comme à un défaut d'**ALADIN** (cyclones trop intenses ou excès de précipitations sur le relief en régime d'alizés).

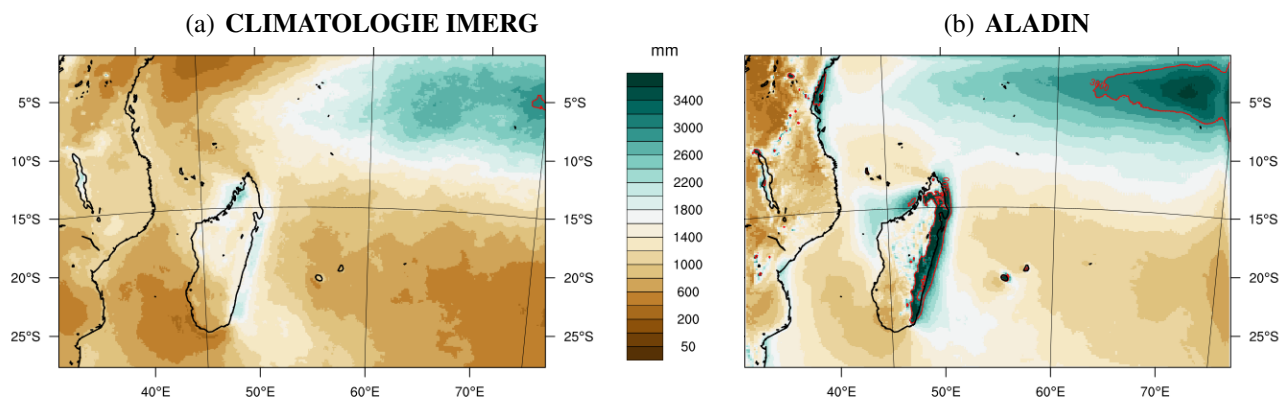


FIGURE 3.9 – Cumul moyen de précipitations annuelles (mm) sur le bassin sud-ouest de l'océan Indien durant la période historique dans (a) la climatologie donnée par le produit satellitaire **IMERG** (2001-2021) et (b) le modèle régional **ALADIN** (1981-2010). L'isoligne 3000 mm est représentée en contours rouges.

Le même exercice d'évaluation peut être réalisé sur le modèle coupleur **CNRM-ESM2-1** (Fig. 3.10) avec des conclusions semblables en terme de répartition spatiale des précipitations. En revanche, les cumuls de précipitations d'**CNRM-ESM2-1** sont bien inférieurs à ceux d'**ALADIN**, notamment sur les côtes exposées aux alizés.

Enfin, les cumuls de précipitations dans **ALADIN** sont évalués sur chaque trimestre de l'année (Fig. 3.11). C'est dans le premier semestre de l'année (Figs. 3.11(b) et 3.11(d)) que les cumuls d'**ALADIN** sont largement excédentaires par rapport à la climatologie, notamment sur les côtes est et nord-ouest de Madagascar, confirmant les deux pistes de représentation des pluies (i) dans les systèmes fortement précipitants et (ii) en régime d'alizés.

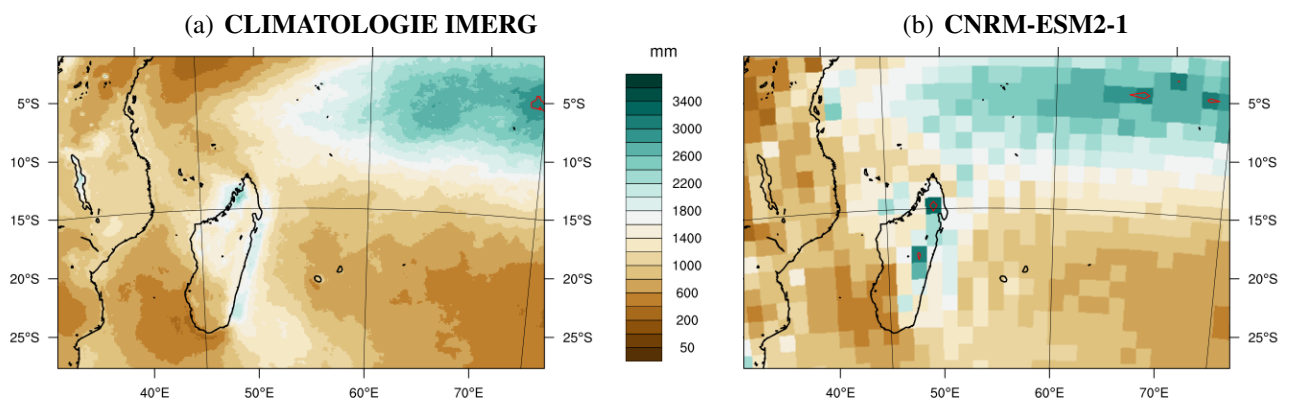


FIGURE 3.10 – *Similaire à la figure 3.9 mais pour le modèle CNRM-ESM2-1.*

3.3. Evaluation des précipitations du modèle

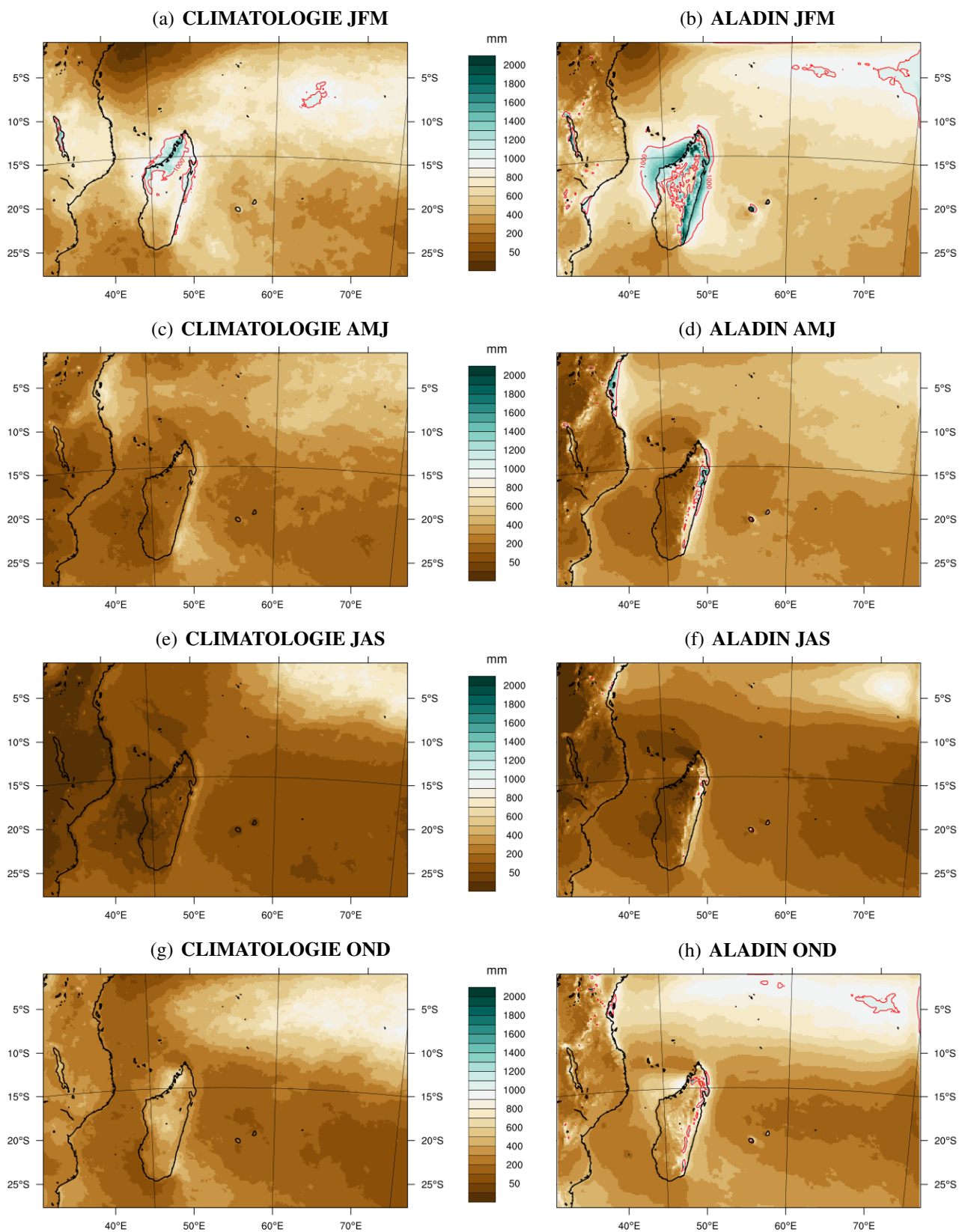


FIGURE 3.11 – *Similaire à la figure 3.9 mais pour les précipitations trimestrielles (mm). L'isoline 1000 mm apparaît en contours rouges.*

3.4 APPORT DE LA HAUTE RÉOLUTION SUR LES PRÉCIPITATIONS

3.4.1 Précipitations sur les îles à fort relief

L'apport de la haute résolution sur la distribution spatiale des précipitations pour les îles à fort relief comme Madagascar est frappant (Fig. 3.12). La pluviométrie sur la côte Est, exposée aux alizés, est mieux localisée dans **ALADIN**. Les quantités modélisées seront néanmoins évaluées en section 5.2 en comparaison des données de référence.

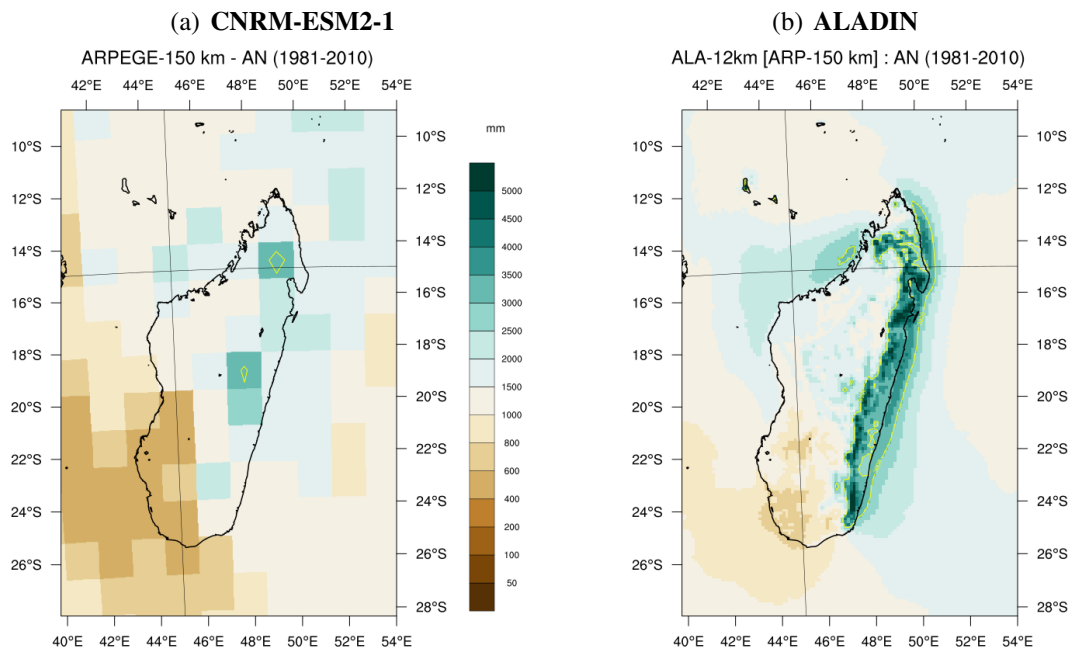


FIGURE 3.12 – Cumul moyen de précipitations annuelles (mm) sur la période historique (1981-2010) sur Madagascar dans (a) **CNRM-ESM2-1** et (b) **ALADIN**. L'isoligne 3000 mm est représentée en contours jaunes.

Les cumuls annuels moyens de précipitations sur La Réunion dans les simulations historiques de **CNRM-ESM2-1** et d'**ALADIN** sont également illustrés en figure 3.13. Dans **CNRM-ESM2-1**, La Réunion est divisée en 4 points de grille avec des valeurs maximales annuelles de 1200 mm sur le point de grille situé au sud-est (Fig. 3.13(a)). Grâce à une meilleure représentation de l'orographie de l'île, le modèle **ALADIN** distingue des variabilités climatiques entre le centre de l'île, ainsi que les façades est et ouest (Fig. 3.13(b)). Un maximum de 11.3 m d'eau annuel est observé pour le point de grille du volcan et correspond à la valeur du cumul annuel observé dans les hauts de Sainte-Rose, soit dans le coin nord-est de ce point de grille.

3.4. Apport de la haute résolution sur les précipitations

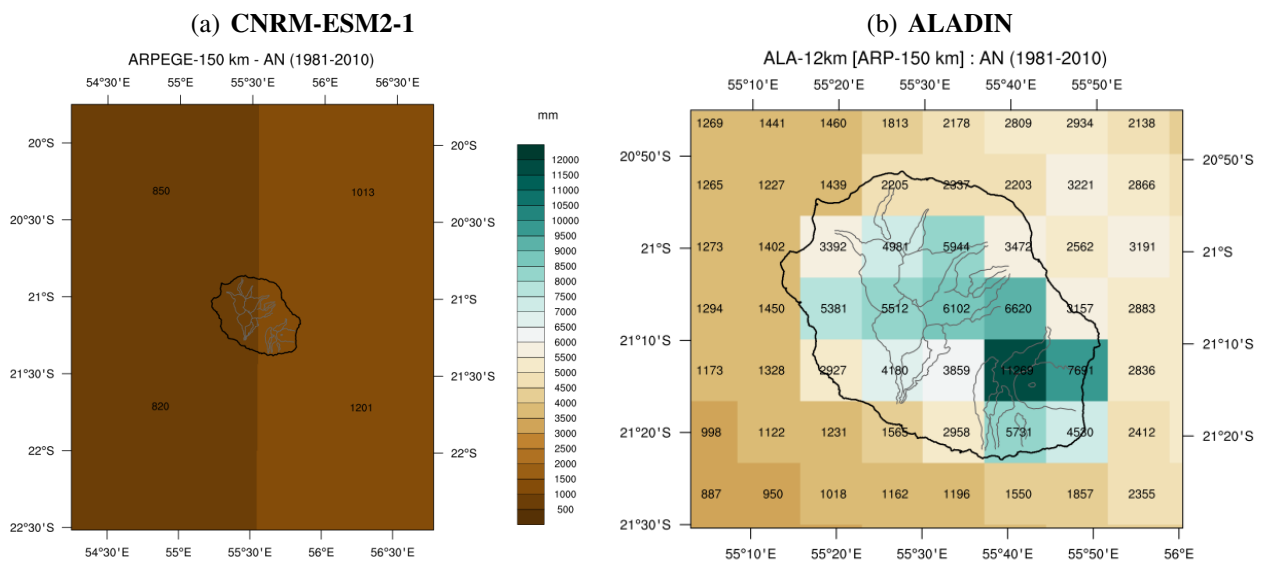


FIGURE 3.13 – Cumul moyen de précipitations annuelles (mm) pour la période historique (1981-2010) sur La Réunion dans (a) CNRM-ESM2-1 et (b) ALADIN.

Chapitre 4

Données de référence sur les îles

SOMMAIRE

4.1	DONNÉES DE RÉFÉRENCE SUR MADAGASCAR	59
4.1.1	Caractéristiques climatiques et changement climatique observé	59
4.1.2	Stations de mesures climatologiquement exploitables	59
4.1.3	Complétion des données	62
4.1.4	Produit de données combinées à 4 km de résolution	63
	<i>Caractéristiques de ces données</i>	63
	<i>Processus de combinaison des données de différentes sources</i>	63
	<i>Evaluation du produit de données combinées</i>	65
4.1.5	Normales spatialisées de précipitations et de températures	65
4.1.6	Zonage climatique	66
4.2	DONNÉES DE RÉFÉRENCE SUR LA RÉUNION	68
4.2.1	Caractéristiques climatiques et changement climatique observé	68
4.2.2	Stations de mesures climatologiquement exploitables	68
4.2.3	Normales spatialisées de précipitations	70
4.2.4	Normales spatialisées de températures	72
4.2.5	Zonage climatique	73
4.3	DONNÉES DE RÉFÉRENCE SUR LA RÉPUBLIQUE DE MAURICE	74
4.3.1	Caractéristiques climatiques et changement climatique observé	74
4.3.2	Stations de mesures climatologiquement exploitables	74
4.3.3	Complétion des données et interpolation à n km de résolution	74
	<i>Contrôle de qualité du produit spatialisé en points de grille</i>	77
4.3.4	Normales spatialisées de précipitations et de températures	81
4.3.5	Zonage climatique	81
4.4	DONNÉES DE RÉFÉRENCE SUR L'ARCHIPEL DES COMORES	83
4.4.1	Caractéristiques climatiques et changement climatique observé	83
4.4.2	Stations de mesures climatologiquement exploitables	85
4.4.3	Complétion des données	85
	<i>Méthode de complétion des données</i>	85
	<i>Séries complétées et vérification</i>	86
4.4.4	Normales de précipitations et de températures en points stations	86
4.5	DONNÉES DE RÉFÉRENCE SUR L'ARCHIPEL DES SEYCHELLES	90
4.5.1	Caractéristiques climatiques et changement climatique observé	90
4.5.2	Stations de mesures climatologiquement exploitables	90
4.5.3	Normales spatialisées de précipitations	91
4.5.4	Zonage climatique	91

CE chapitre décrit les caractéristiques climatiques et le changement climatique observé dans l'ensemble des pays partenaires. Nous décrivons les jeux de données climatologiquement exploitables. Quand cela est nécessaire, les méthodes de complétion de données sont également présentées. Rappelons ici que les normales climatologiques sont réalisées sur des périodes de 30 ans (préconisation OMM) pour lisser les variabilités climatiques naturelles (annuelles et interannuelles). L'ensemble des résultats et interprétations de ce chapitre ont été co-rédigés avec les experts des pays concernés.

Les données des stations météorologiques implantées sur les diverses îles permettent d'étudier leur climat et servent comme référence sur l'étude du changement climatique. C'est à partir des températures minimales et maximales enregistrées quotidiennement que sont calculées les moyennes annuelles des températures. La température moyenne d'un jour est la moyenne arithmétique de la température minimale et de la température maximale de ce même jour. Les études sur la variabilité climatique à long terme doivent s'appuyer sur des séries exemptes de données manquantes et d'hétérogénéité. Cette affirmation constitue le fondement de la crédibilité de toute analyse sur les changements climatiques.

Sur les îles où la densité du réseau d'observations était suffisante, une spatialisation des données est réalisée pour obtenir un produit en points de grille de résolution régulière (2 à 4 km suivant les îles). C'est souvent la méthode de krigeage qui a été retenue pour interpoler sur une île les valeurs issues des stations de mesures de référence.

4.1 DONNÉES DE RÉFÉRENCE SUR MADAGASCAR

4.1.1 Caractéristiques climatiques et changement climatique observé

Le climat de Madagascar est tropical humide le long de la côte Est, tropical d'altitude à l'intérieur des terres, tropical tempéré sur la partie ouest et nord-ouest et semi-aride à aride dans le sud-ouest et sud. La répartition spatiale et temporelle des paramètres climatiques est très variable. Des cyclones et des inondations d'origine fluviale et pluviale sont fréquents et forts pendant la saison des pluies. De nombreux secteurs économiques sont touchés de façon directe ou indirecte par cette variabilité.

Madagascar connaît deux saisons : une saison chaude et humide (été) de novembre à avril et une saison sèche plus fraîche (hiver) de mai à octobre. Les éléments les plus importants qui contrôlent le climat moderne de Madagascar sont les vents qui y règnent et les courants impliqués dans la circulation de l'océan Indien, à savoir les vents d'alizés du sud-est, la dérive sud-Indienne et les cyclones tropicaux. Tous ces éléments se déplacent en priorité à partir de l'océan en direction de l'ouest vers Madagascar (Goodman 2008). L'asymétrie pluviométrique est-ouest est encore accentuée par la géologie et la topographie. Les versants orientaux sont très abrupts et les plaines côtières correspondantes étroites. En revanche, les versants occidentaux sont en pente plus douce et les plaines ou pénéplaines beaucoup plus larges.

On observe à Madagascar un réchauffement de l'ordre de 0.75°C à 1.6°C en 58 ans selon les villes (Fig. 4.1). Ces villes sont représentatives des 6 zones climatiques qui seront définies par la suite (Fig. 4.5). L'élévation de température est plus prononcée sur le littoral sud et sud-ouest, les hautes terres centrales et le sud-ouest continental. Seul l'extrême nord s'est réchauffé de moins de 1°C. On observe une baisse significative du cumul annuel de précipitations depuis 1961, en particulier sur le littoral sud et sud-ouest et l'extrême Nord (Fig. 4.2).

4.1.2 Stations de mesures climatologiquement exploitables

Une analyse de la qualité et de la quantité des données des stations de mesures a été effectuée afin de déterminer quels sont les postes les plus appropriés pour la description de chaque paramètre climatique. La disponibilité des données de précipitations a été évaluée pour la période 1981-2018 (correspondant aux données satellitaires), et celle des températures pour la période 1961-2018. On dénombre au total 189 stations d'observation pour les précipitations et 177 pour les températures. On a choisi de retenir les 25 stations synoptiques qui ont moins de 30% de valeurs manquantes (exemple pour la variable précipitations en figure 4.3). Il est à noter que la Direction Générale de la Météoro-

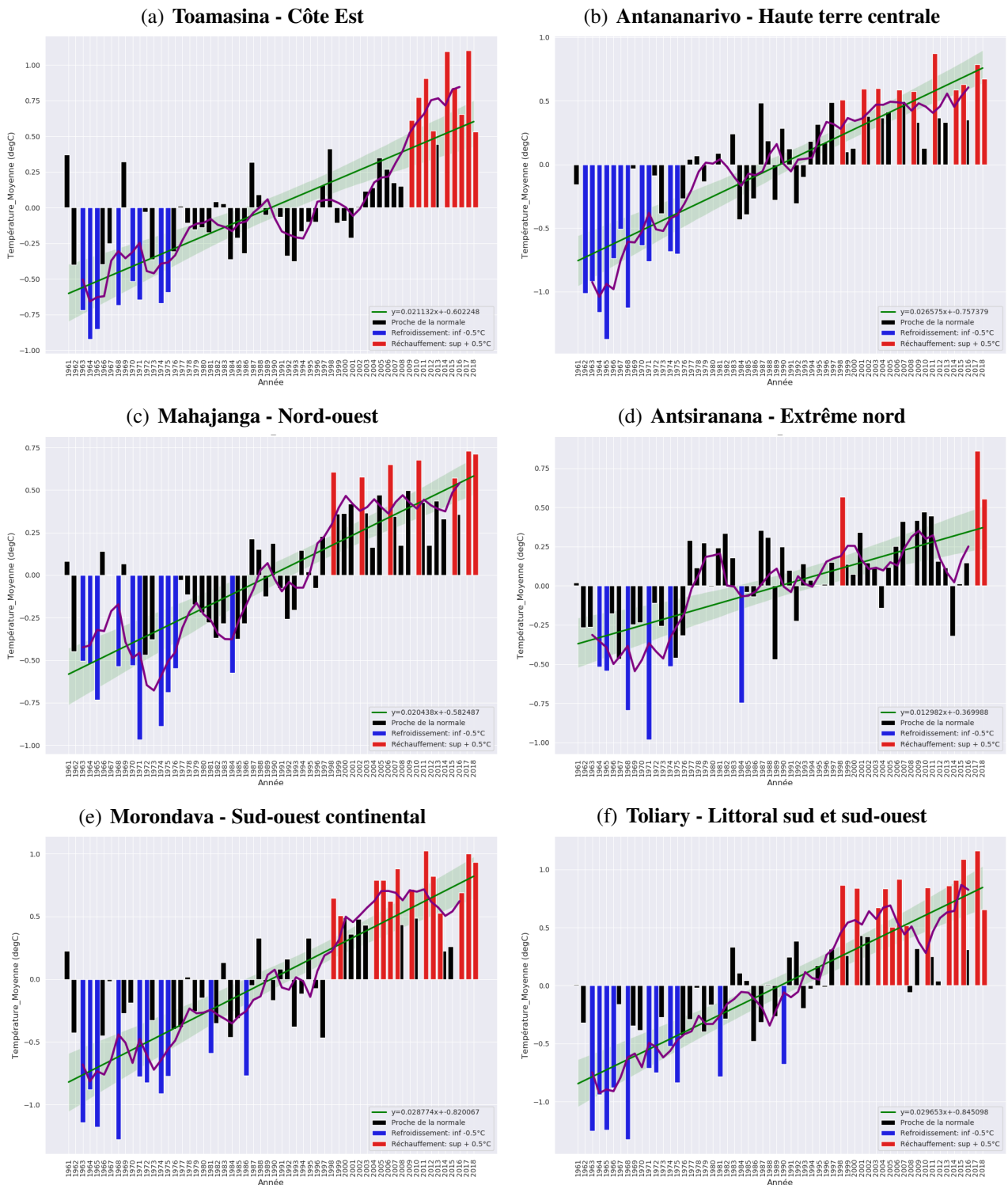


FIGURE 4.1 – Evolution temporelle des anomalies de température moyenne annuelle à +2 m (°C, par rapport à la moyenne sur la période historique 1981-2010) observées sur 6 villes de Madagascar depuis 1961. La ligne verte représente la tendance moyenne sur la période 1961-2018.

4.1. Données de référence sur Madagascar

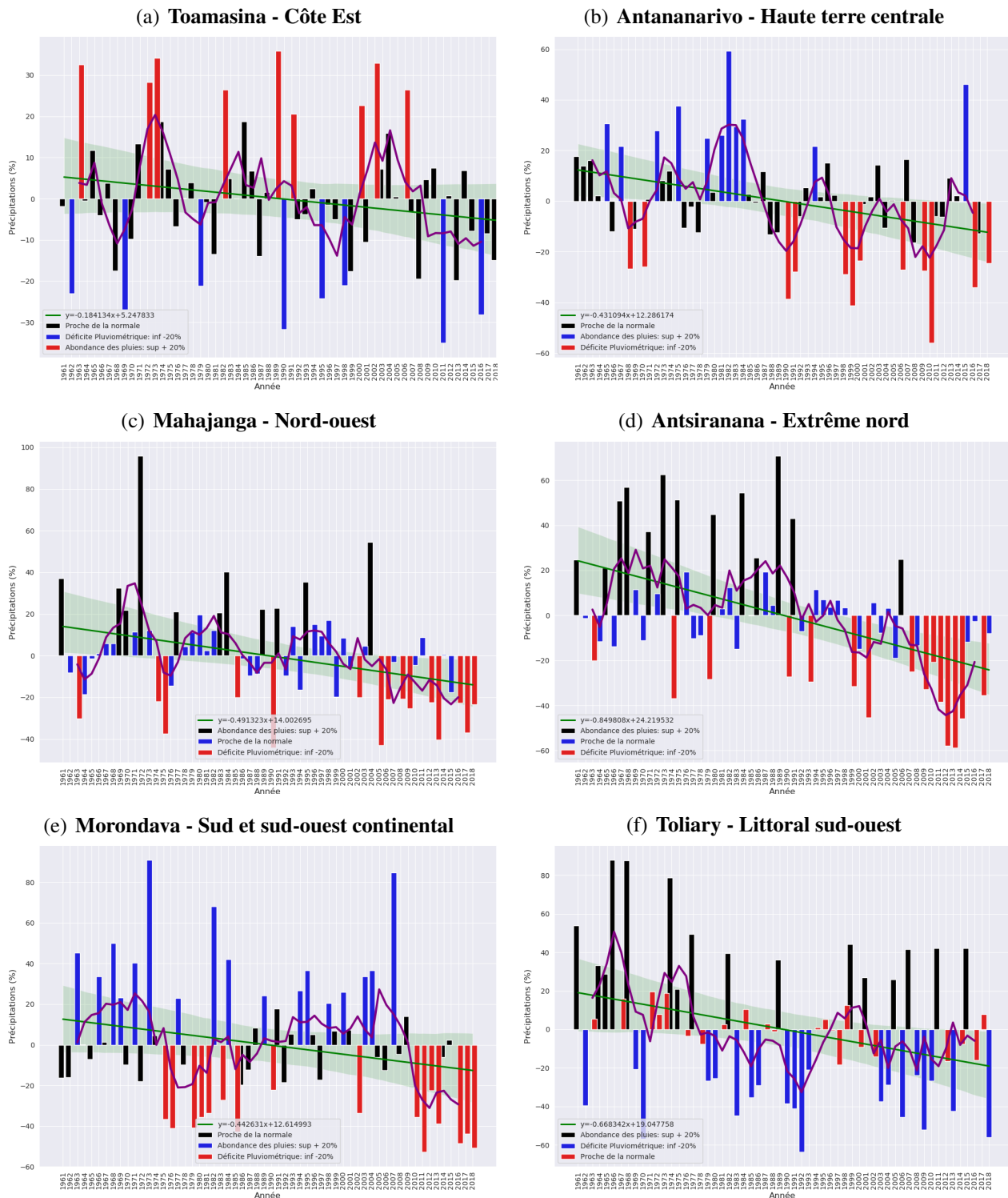


FIGURE 4.2 – Evolution temporelle des anomalies du cumul annuel de précipitations (% par rapport à la moyenne sur la période historique 1981-2010) observées sur 6 villes de Madagascar depuis 1961. La ligne verte représente la tendance moyenne sur la période 1961-2018.

logie (DGM) dispose d'un réseau de stations météorologiques automatiques, mais les données provenant de ces stations ne sont actuellement pas exploitables faute de base de données centralisée pour acheminer et stocker ces données.

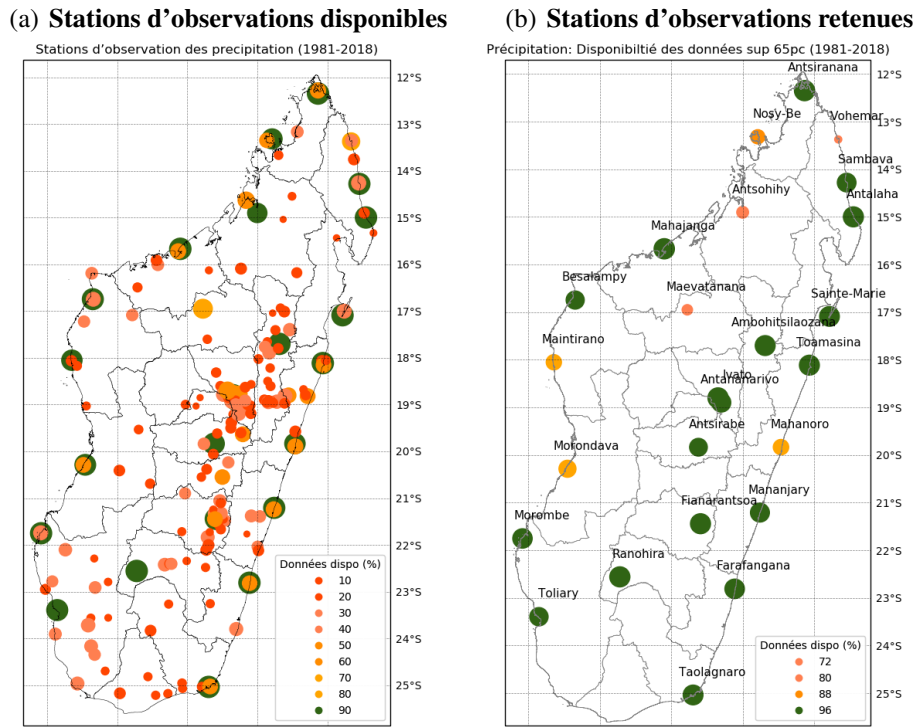


FIGURE 4.3 – Sélection des stations de mesures climatologiquement exploitables sur Madagascar pour les précipitations en fonction du pourcentage de données disponibles sur la période 1981-2018 (palette de couleurs). Sur les 189 stations d'observations disponibles (a), on retient les 25 qui ont moins de 30% de valeurs manquantes (b).

4.1.3 Complétion des données

Un contrôle de qualité rigoureux de ces données est effectué à l'aide de IRI-Climate Data Tools (IRI-CDT), développé par l'International Research Institute for Climate and Society (IRI), <https://github.com/rijaf-iri/CDT> pour la fiabilité des données et les tests d'homogénéité (Rija 2019). Malgré la qualité et quantité croissante de données disponibles, les problématiques de données manquantes restent très répandues dans les problèmes statistiques et nécessitent une approche particulière. Ignorer les données manquantes peut entraîner, outre une perte de précision, de forts biais dans les modèles d'analyse. Pour compléter ces données manquantes, la méthode des k plus proches voisins (KNN pour K-nearest neighbors) a été utilisée. La complétion par k plus proches voisins consiste à exécuter l'algorithme suivant qui modélise et prévoit les données manquantes :

- Choisir un entier n .
- Calculer les distances des observations d_{ik} à la station i avec : $1 \leq k \leq n$.
- Retenir les k observations Y_{i1}, \dots, Y_{ik} pour lesquelles ces distances sont les plus petites.
- Affecter aux valeurs manquantes $Y_{i,j}$ de la station i aux divers temps j la moyenne des observations des k stations les plus proches aux mêmes temps j : $(Y_{i,j})_{mis} = \frac{1}{k} * (Y_{1,j} + \dots + Y_{k,j})$

La méthode des plus proches voisins nécessite le choix du paramètre k par optimisation d'un critère ($k = 6$ ici). Concernant la distance entre les individus, on tient ici compte de la distance euclidienne ou de Mahalanobis. Il n'y a pas de correction par l'altitude.

Les données de température à Madagascar sont quant à elles mesurées par un plus petit nombre de stations d'observations météorologiques clairsemées (177 contre 189 pour les précipitations). Par conséquent, les informations sur la température d'un point donné doivent être calculées sur la base des stations environnantes, plus éloignées du point d'intérêt. L'utilisation de données de réanalyse comme proxy peut répondre à cette problématique. C'est l'objet du jeu de données combinées.

4.1.4 Produit de données combinées à 4 km de résolution

Caractéristiques de ces données

La base de données combinées en points de grille de la [DGM](#) à Madagascar est issue du développement et de la mise à jour du service d'information climatique Maproom de Madagascar ([Rija 2019](#)). Le [MAPROOM](#) est un outil de service de cartographie interactif en ligne fournissant des outils conviviaux pour l'analyse, la visualisation et le téléchargement de produits d'information sur le climat. Il peut donner des informations importantes sur les conditions climatiques historiques, courantes et prévues dans le pays, et des secteurs sociétaux associés.

La suite de cette section décrit toutes les étapes du processus de production de cette base de données, en s'inspirant largement du rapport de l'[IRI](#) ([Rija 2019](#), version 3, janvier 2019). La base de données de précipitations combinées est produite à partir de la combinaison de données d'observations, de produits satellitaires d'estimations de précipitations, et des réanalyses météorologiques [JRA-55](#) (Japanese 55-year Reanalysis) produites par le [JMA](#), à la résolution spatiale d'environ 55 km sur l'horizontale et au pas de temps de 3 heures. Les estimations des précipitations par satellites proviennent de [TAMSAT](#) et [CHIRP](#) v1.0 qui est un produit d'estimations satellitaires relativement nouveau avec une haute résolution temporelle et spatiale (0.05°). Ces produits ont été sélectionnés en raison de leurs longues séries chronologiques (plus de 30 ans), leurs résolutions spatiale et temporelle, et leur disponibilité en temps quasi-réel.

Le produit de données combinées est constitué par deux ensembles de données récapitulés dans le tableau [4.1](#) :

- Le premier ensemble de données est généré en utilisant toutes les données de stations disponibles (189 stations d'observation pour les précipitations et 177 stations pour les températures) que nous nommons 'ALL' ; cet ensemble de données est destiné à l'analyse des données climatiques.
- Le second ensemble de données est produit à partir des données de stations qui ont moins de 30% de valeurs manquantes (25 stations pour les paramètres température et précipitations) ; cet ensemble de données est baptisé 'CLM' et il est dédié au calcul de la climatologie et des moyennes à long terme.

Le produit est interpolé sur une grille régulière à 4 km de résolution ($0.0375^\circ \times 0.0375^\circ$).

Processus de combinaison des données de différentes sources

Il est largement reconnu que les observations au sol peuvent fournir des mesures ponctuelles plus précises. Cependant, l'incertitude liée aux données augmente lorsque les données ponctuelles sont interpolées sur des points de grille spatialisés. Cette limitation des observations au sol peut être bien pire sur des régions avec des reliefs complexes où les stations d'observation sont généralement rares ou inexistantes. Les estimations de précipitations par satellite ou les réanalyses offrent une alternative pour avoir des données climatiques dans les régions où les observations au sol sont limitées ou non disponibles. Cependant, sans référence directe à des mesures au sol, les estimations de précipitations par satellite et les réanalyses sont sujettes à des biais systématiques. Les étapes de la production des

Ens don- nées	Variabes	Résolution temporelle	Couverture temporelle	Résolution spatiale	Nombre de stations utilisées
ALL	Précipitations	Journalière	01/01/1981-31/12-2018	0.0375°x0.0375°	189
	Température maximale	Journalière	01/01/1961-31/12-2018	0.0375°x0.0375°	177
	Température minimale	Journalière	01/01/1961-31/12-2018	0.0375°x0.0375°	177
CLM	Précipitations	Journalière	01/01/1981-31/12-2018	0.0375°x0.0375°	25
	Température maximale	Journalière	01/01/1961-31/12-2018	0.0375°x0.0375°	25
	Température minimale	Journalière	01/01/1961-31/12-2018	0.0375°x0.0375°	25

TABLEAU 4.1 – Ensemble de données constituant la version 3 du produit de données combinées pour Madagascar.

jeux de données en points de grille comprennent généralement la réduction d'échelle spatiale des données de réanalyse pour les données de températures, la correction du biais des données de températures à échelle réduite et des données de précipitations estimées par satellite, et enfin la combinaison des données de stations avec les données ainsi corrigées.

L'idée générale est de quantifier le biais des données en points de grille aux emplacements des stations, en supposant que les données des stations représentent les mesures « vraies ». Ensuite, ces facteurs de biais sont interpolés sur les pixels des données de grilles en utilisant une interpolation par pondération de la distance inverse ; une interpolation locale est utilisée, pour éviter que des stations éloignées du pixel d'interpolation soient incluses, en fixant un rayon maximal d'influence, un nombre minimal et maximal de stations les plus proches à utiliser pour interpoler un pixel.

L'ensemble de données *ALL* a été généré en adoptant un processus d'interpolation locale imbriquée en fonction du rayon d'influence et du nombre minimum et maximum des stations voisines à utiliser pour interpoler un pixel. Deux simulations d'interpolation imbriquée ont été effectuées pour générer les données finales. La première simulation consiste à utiliser un rayon d'influence plus grand et un plus grand nombre de stations voisines pour interpoler un pixel, cela a pour effet d'améliorer les données combinées lorsque la densité des stations est faible. Pour la deuxième simulation, le rayon d'influence et le nombre de stations voisines sont réduits, ce qui évite un lissage excessif des valeurs autour des emplacements des stations. Les valeurs des données combinées aux emplacements des stations sont approximativement égales aux valeurs des stations correspondantes. Cela s'explique par le fait que la méthode considère les valeurs de stations comme les valeurs « vraies ». La méthode de combinaison permet de préserver la distribution spatiale des précipitations et des températures sur les zones où la densité de stations est faible.

Des mesures pluviométriques au sol provenant des sources diverses sont combinées avec les données de *CHIRP* pour produire le jeu de données de *CHIRPS*, couramment appelé *CHIRP* avec stations (*CHIRPS* = *CHIRP* + Stations), qui est la seconde version des jeux de données de *CHIRP* (*CHIRPS* v2.0). La méthode utilisée par *CHIRPS* pour combiner les données de station avec les données de *CHIRP* est une méthode d'interpolation basée sur une modification de la pondération inverse à la distance (<ftp://ftp.chg.ucsb.edu/pub/org/chg/products/CHIRPS-2.0/diagnostics/>). La différence entre la base de données combinées de la *DGM* utilisée ici et les données *CHIRPS* est le nombre de stations pluviométriques utilisées. On compte dans *CHIRPS* 468 stations disponibles dont 52 ayant au moins

4.1. Données de référence sur Madagascar

15 années de données disponibles (cf. tableau 4 p26, Rija 2019) contre 25 dans la base de données combinées de la DGM (Tableau 4.1).

Evaluation du produit de données combinées

Rija (2019) indique que l'on voit une faible mais légère augmentation sur les coefficients de corrélation et le coefficient d'efficacité de Nash-Sutcliffe. Les données combinées sont sous-estimées pendant la saison pluvieuse à cause d'un effet de lissage lors de l'interpolation. La détection des jours pluvieux pour les données combinées affiche une faible performance par rapport à CHIRPS, par contre, on constate une faible amélioration pour le taux de fausses alertes. Les données combinées de températures affichent une bonne performance avec des coefficients de corrélation supérieurs à 0.9 et des coefficients d'efficacité de Nash-Sutcliffe supérieurs à 0.8. Cependant, la méthode de combinaison tend à surestimer les températures minimales et sous-estimer les températures maximales.

4.1.5 Normales spatialisées de précipitations et de températures

Le cumul annuel moyen de précipitations sur Madagascar sur la période 1981-2010, obtenu à partir du produit de données combinées, est illustré en figure 5.5(a). Les valeurs mesurées dans les 25 stations synoptiques de référence (chiffres en Fig. 5.5(a)) sont bien en accord avec les valeurs du produit combiné qui utilise donc l'ensemble des stations ainsi que les informations satellitaires. On distingue bien un signal plus arrosé sur la façade Est exposée aux alizés, des hautes terres centrales subhumides, une côte nord-ouest relativement plus sèche, et un littoral sud-sud-ouest bien plus sec. Les températures annuelles moyennes à +2 m (Fig. 5.6(a)) font également apparaître des zones climatologiques : des hautes terres centrales plus fraîches, une côte ouest plus chaude avec un gradient de température nord-sud lié à l'ensoleillement, et une côte Est relativement plus fraîche.

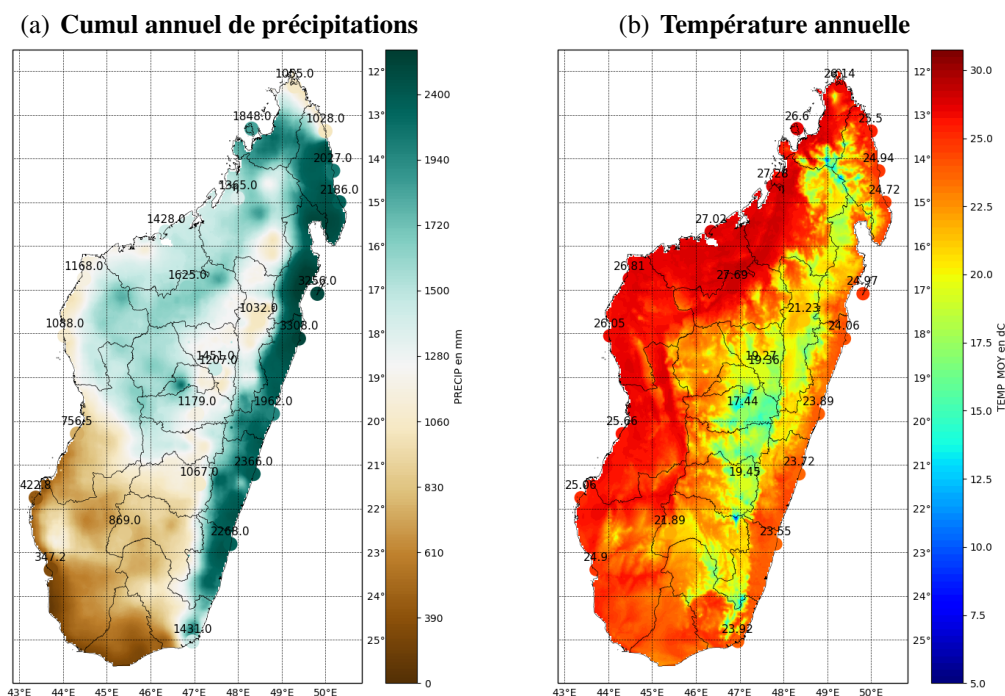


FIGURE 4.4 – (a) Cumul annuel moyen de précipitations (mm) et (a) température moyenne annuelle à +2 m (°C) observés sur Madagascar sur la période historique 1981-2010 obtenus à partir du produit de données combinées (Rija 2019) à la résolution de 4 km. Les nombres superposés sur le graphe indiquent, pour comparaison, les mesures relevées sur les 25 stations synoptiques de référence.

4.1.6 Zonage climatique

Un zonage climatique a été réalisé pour diviser Madagascar en plusieurs zones présentant les mêmes caractéristiques climatologiques (Fig. 4.5). Cette classification climatique a principalement pour but de faciliter la compréhension des signaux des tendances climatiques observées et des projections climatiques futures dans chaque zone climatique. Il convient de noter que Madagascar pourrait avoir de nombreuses zones microclimatiques selon les besoins spécifiques de l'application.

La répartition spatiale de la moyenne annuelle des précipitations et des températures moyennes entre 1981 et 2010, issues des données combinées (Fig. 4.4) indique que :

1. La côte Est de Madagascar est humide et reçoit annuellement plus de 2 000 mm de précipitations ; elle est chaude (températures moyennes annuelles comprises entre 23°C et 25°C). L'humidité de la côte Est présente un gradient nord-sud ; les précipitations sont moins importantes dans le sud-est que dans la région du nord-est, la région centre-est est la plus arrosée de l'île et reçoit annuellement plus de 3 000 mm de précipitations.
2. Les hautes terres centrales sont plus fraîches - les températures moyennes annuelles y sont inférieures à 22°C. On y trouve le minimum des températures moyennes de Madagascar (moins de 15°C). Les hautes terres centrales reçoivent annuellement 1 000 à 2 000 mm de précipitations.
3. La région nord-ouest est relativement plus chaude, avec une température moyenne annuelle supérieure à 26°C. Elle enregistre la température moyenne la plus haute (plus de 29°C) à Madagascar. Elle est plutôt sèche par rapport à la côte Est puisqu'elle reçoit annuellement 1 000 à 1 500 mm de précipitations.
4. La région extrême nord de Madagascar est également chaude et plus sèche qu'attendu ; le cumul annuel de précipitations y oscille autour de 1 000 mm. Les températures moyennes annuelles y sont comprises entre 25°C et 27°C.
5. Les régions sud et sud-ouest continentales sont beaucoup plus sèches (précipitations annuelles comprises entre 500 et 1 000 mm) que celles du nord. Les températures moyennes annuelles y varient entre 21°C et 25°C.
6. Le littoral sud-ouest est la partie la plus sèche de l'Île. Il reçoit annuellement moins de 500 mm de précipitations. Sa température moyenne annuelle est supérieure à 24°C.

Ainsi, sur la base des précipitations et des températures moyennes observées, six zones climatiques majeures se distinguent sur Madagascar (Fig. 4.5) :

- La Côte Est (climat tropical très humide à humide).
- Les Hautes Terres Centrales (climat tropical d'altitude).
- La région Nord-Ouest (climat tropical tempéré).
- La région Extrême Nord (climat tropical de transition entre humide et altitude).
- Les régions Sud et Sud-Ouest Continentales (climat tropical semi-aride).
- Le Littoral Sud-Ouest (climat tropical aride).

4.1. Données de référence sur Madagascar

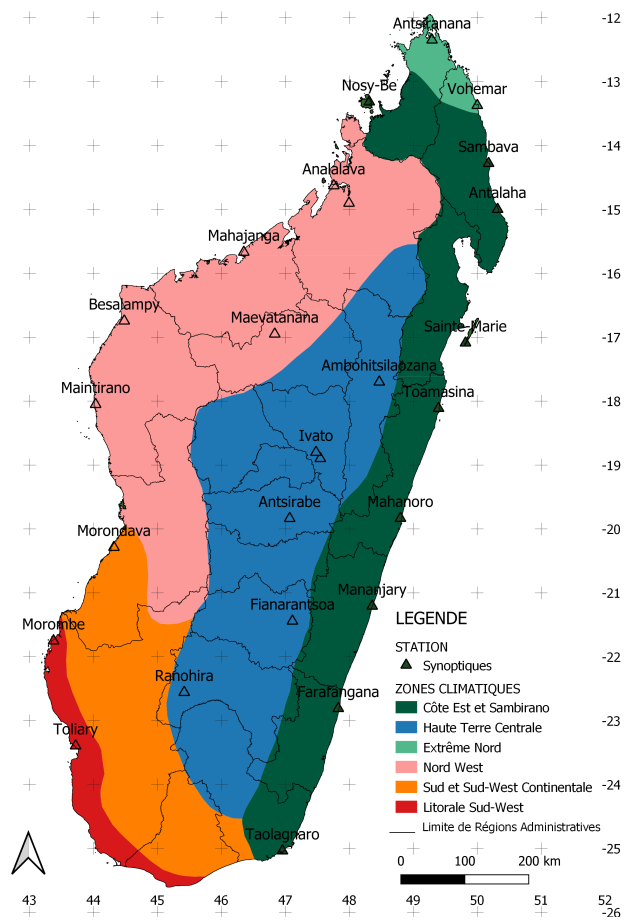


FIGURE 4.5 – Classification de Madagascar en 6 zones climatiques.

4.2 DONNÉES DE RÉFÉRENCE SUR LA RÉUNION

4.2.1 Caractéristiques climatiques et changement climatique observé

Le climat de La Réunion, située vers 55.5°E - 21.1°S, est tropical humide. Mais il se singularise surtout par de grandes variabilités liées à la géographie de l'île. L'influence du relief est tout aussi fondamentale que les effets de l'insularité et donne à l'île ses forts contrastes pluvieux et ses nombreux microclimats. Il existe deux saisons marquées à La Réunion : (i) la saison des pluies qui peut être définie entre janvier et mars, et (ii) la saison sèche, plus longue, qui débute au mois de mai pour s'achever au mois de novembre. Même en saison sèche, les précipitations restent importantes sur la partie Est de l'île et notamment sur les flancs du volcan. Avril et décembre sont des mois de transition, parfois très pluvieux mais pouvant également être très secs.

Les précipitations sont le phénomène météorologique le plus remarquable de La Réunion. Elles présentent une très grande variabilité spatio-temporelle. Ainsi, sur un mois, plusieurs mètres d'eau peuvent tomber sur la côte Est, alors que pas une goutte ne tombera sur la côte Ouest. Par ailleurs, pour un lieu donné, la pluie peut être absente pendant plusieurs mois et tomber ensuite en abondance sur une courte période à la suite du passage d'une dépression ou d'un cyclone. Qu'elles soient d'origine advective ou d'évolution diurne, les précipitations tendent à se concentrer sur les régions directement exposées à l'humidité océane apportée par les alizés de secteur est. On parle de région "au vent". A l'inverse, les régions "sous le vent", qui bénéficient de l'abri du relief, sont beaucoup plus sèches et les régimes de brise y sont prédominants. Notons que l'île possède tous les records mondiaux de pluie pour les périodes comprises entre 12 heures et quinze jours à l'exception du record sur 48h glissantes de 2489 mm détenu à présent par la station de Cherrapunji en Inde (2493 mm tombés les 15 et 16 juin 1995).

Sur la côte, les températures maximales varient entre 25 et 27°C l'hiver et 30 et 32°C l'été. C'est sur les côtes ouest et sud-ouest qu'elles sont les plus élevées. Quand on s'élève le long des pentes, ces températures diminuent régulièrement. À 1 500 m d'altitude, elles varient de 19 à 22 °C en été, et de 15 à 18°C en hiver. Les températures les plus froides sont, bien entendu, concentrées au niveau des plus hauts sommets : piton des Neiges, Grand Bénare et piton de la Fournaise. Pendant l'hiver, il fait en moyenne 2 à 4 °C sur les sommets et 8 à 10°C à la Plaine-des-Palmistes. La nuit, il n'est pas rare d'avoir des températures négatives dans les hauts. Durant l'été, il fait 8 à 10°C sur les sommets et 14 à 16°C à la Plaine-des-Palmistes. Plus on s'approche de la côte, plus ces températures augmentent. C'est sur les littoraux ouest et nord qu'elles sont les plus élevées, descendant rarement en dessous de 18°C au Port et à Saint-Denis.

On observe à La Réunion un réchauffement de l'ordre de 1°C en 54 ans (Fig. 4.6). La tendance observée est de +0.18°C par décennie mais le réchauffement s'est accéléré dans la dernière décennie. Il n'y a en revanche pas de tendance significative décelable sur l'évolution du cumul annuel de précipitations sur l'île ou sur la fréquence des événements fortement précipitants depuis 1961 (Fig. 4.7). Seule la région sud-ouest de l'île observe une baisse significative de ses précipitations annuelles d'environ -5% par décennie depuis 1961 (Fig. 4.8).

4.2.2 Stations de mesures climatologiquement exploitables

Le réseau de stations météorologiques de l'île de La Réunion est cartographié en figure 4.9.

Pour la pluviométrie, on peut retenir 78 postes de référence ayant des séries longues (plus de 30 ans) et homogénéisées. Pour la température il n'existe que 3 séries longues homogénéisées : GILLOT-AEROPORT, PLAINE DES CAFRES, PIERREFONDS-AEROPORT. Néanmoins, dans le cadre du

4.2. Données de référence sur La Réunion

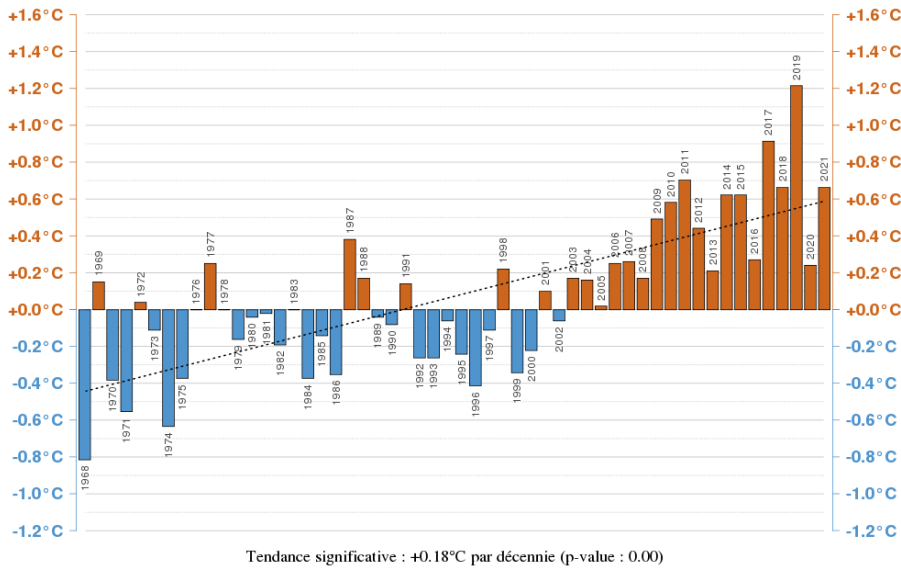


FIGURE 4.6 – Evolution temporelle des anomalies de température moyenne annuelle à +2 m (°C, par rapport à la moyenne sur la période historique 1981-2010) observées à La Réunion (moyenne sur 3 stations de référence) depuis 1968. La ligne tirée noire représente la tendance moyenne sur la période 1968-2021.

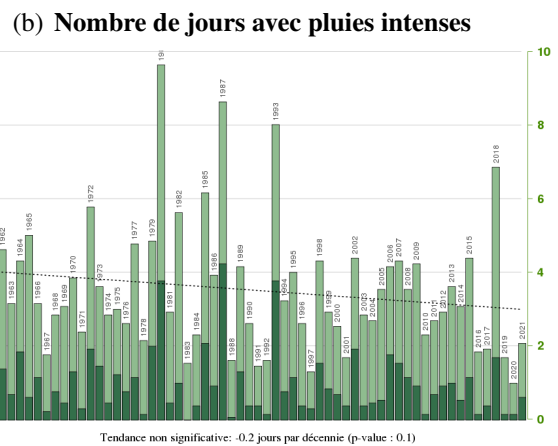
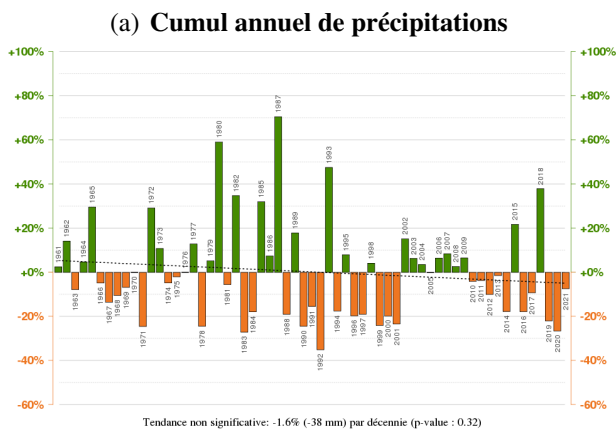


FIGURE 4.7 – Evolution temporelle (a) des anomalies du cumul annuel de précipitations (% par rapport à la moyenne sur la période historique 1981-2010) et (b) du nombre de jours de pluies intenses observés à La Réunion depuis 1961. Les anomalies du cumul annuel de précipitations (a). La ligne tirée noire en (b) représente la tendance moyenne sur la période 1961-2020.

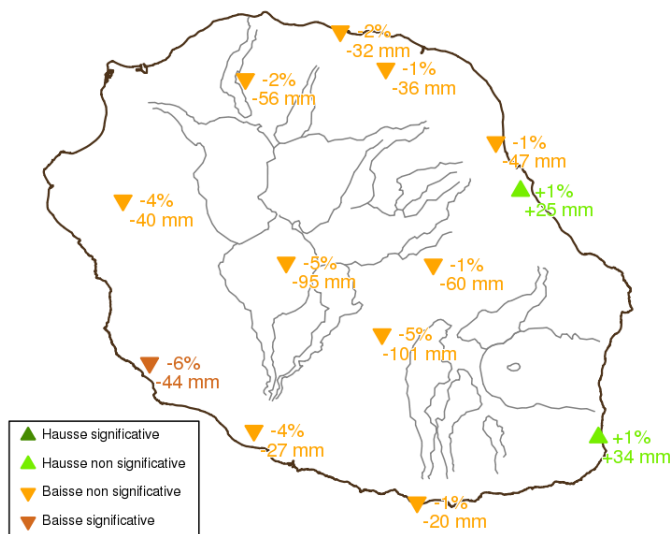


FIGURE 4.8 – Tendance du cumul annuel de précipitations par décennie (% par rapport à la moyenne sur la période historique 1981-2010) observé à La Réunion depuis 1961.

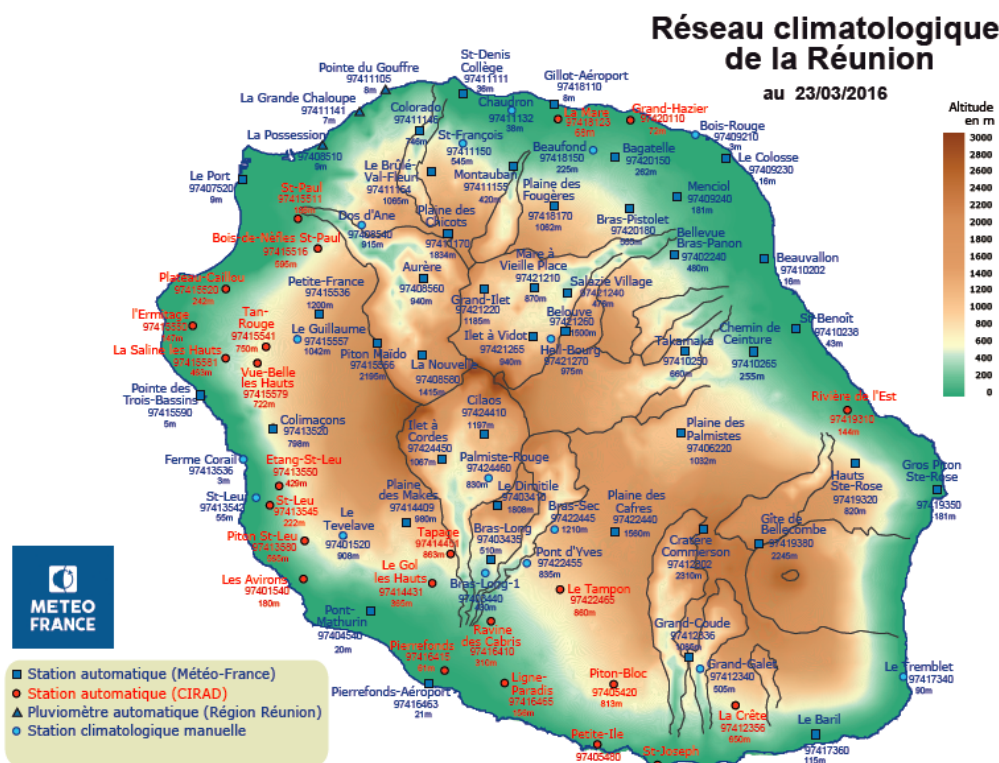


FIGURE 4.9 – Réseau des stations météorologiques de l’île de La Réunion.

changement climatique où la variable température évolue assez rapidement, 20 postes peuvent servir de référence à partir de 2000, ce qui constitue 15 ans de données homogénéisées sur la période 2000 – 2014 qui contient 5479 jours. Le jeu de données complet couvre la période de 2000 à aujourd’hui.

A partir de ces stations de mesures de référence, des jeux de données spatialisés sont créés pour la pluviométrie et la température en utilisant la technique de krigeage. Le krigeage est une technique géostatistique de modélisation spatiale qui permet, à partir de données dispersées, d’obtenir une représentation homogène des informations étudiées. Le krigeage nous permet, à l’aide de mesures obtenues en stations, d’estimer les valeurs hors station. Il est alors possible de créer une carte étendant les relevés à toute l’île considérée. Le krigeage a l’avantage de prendre en compte les distances entre les données (i.e. les stations de mesures), les distances entre les données et la cible (i.e. le point pour lequel on veut estimer la mesure) et la structure spatiale (grâce à l’analyse variographique).

4.2.3 Normales spatialisées de précipitations

Pour les précipitations, on réalise une spatialisation par krigeage simple des 78 pluviomètres. Le jeu de données complet couvre la période de 1981 à aujourd’hui. On interpole les observations de précipitations sur une grille régulière à 3 km de résolution (0.03°), correspondant à la distance effective moyenne entre 2 stations. Il s’agit d’une méthode de krigeage simple, en fonction de l’inverse de la distance. Le prédicteur altitude n’est pas pris en compte : il serait en effet insuffisant à lui seul (à compléter par la distance à la côte par exemple) et non pertinent au pas de temps quotidien à cause des fortes variabilités spatiales et temporelles des précipitations sur l’île.

La normale climatique annuelle de précipitations observée sur La Réunion sur la période 1981-2010 est illustrée en figure 4.11. Elle apparaît à la fois en isohyètes, ou lignes d’égale pluviométrie (Fig. 4.10(a)), et en points de grille de 3 km de résolution (Fig. 4.10(b)) pour contrôler la pertinence du produit spatialisé. Les phrases suivantes sont extraites de l’atlas climatique de la Réunion (Jumaux

et al. 2011). Conséquence de l’insularité, la carte des isohyètes annuelles (Fig. 4.10(a)) montre une grande dissymétrie entre l’est et l’ouest de La Réunion. Dans l’ouest, les précipitations sont peu abondantes. En revanche, plus on se décale vers l’est, plus la moyenne des pluies augmente, jusqu’à atteindre des valeurs dépassant 10 mètres par an, ce qui est exceptionnel au niveau mondial. C’est sur le littoral ouest qu’il pleut le moins (environ 500 mm par an). Par contre la pluviométrie augmente au fur et à mesure que l’on s’élève sur les pentes. On note ainsi, par exemple, un petit noyau pluvieux au niveau de la plaine des Makes (2 mètres par an). A l’est, deux zones sont particulièrement arrosées : la région de Takamaka (7 mètres par an) et tout l’est du volcan où l’on enregistre les valeurs les plus élevées (près de 11 mètres par an sur les hauts de Ste Rose). On remarque que, par effet de lissage, la spatialisation à 3 km de résolution diminue considérablement ce maximum de précipitations annuel (de 11 m à 9 m environ, Fig. 4.11). Les hauts reliefs de l’île, massifs du piton des Neiges et du piton de la Fournaise, sont la cause de cette dissymétrie est-ouest. Qu’elles soient d’origine advective ou d’évolution diurne, les précipitations tendent à se concentrer sur les régions directement exposées à l’humidité d’origine océanique apportées par les alizés de secteur est. On parle de régions “au vent”. A l’inverse, les régions “sous le vent”, qui bénéficient de l’abri du relief sont beaucoup plus sèches. D’autre part, pour un secteur donné, quand on s’élève du littoral au sommet de l’île, les foyers de précipitations les plus intenses se rencontrent aux altitudes intermédiaires, entre 1 000 et 2 000 mètres.

Ce produit spatialisé sera utilisé dans la suite du projet pour (i) comparer les sorties de modèle ALADIN aux normales pluviométriques et (ii) corriger les biais du modèle tout en réalisant une descente d’échelle à 3 km de résolution.

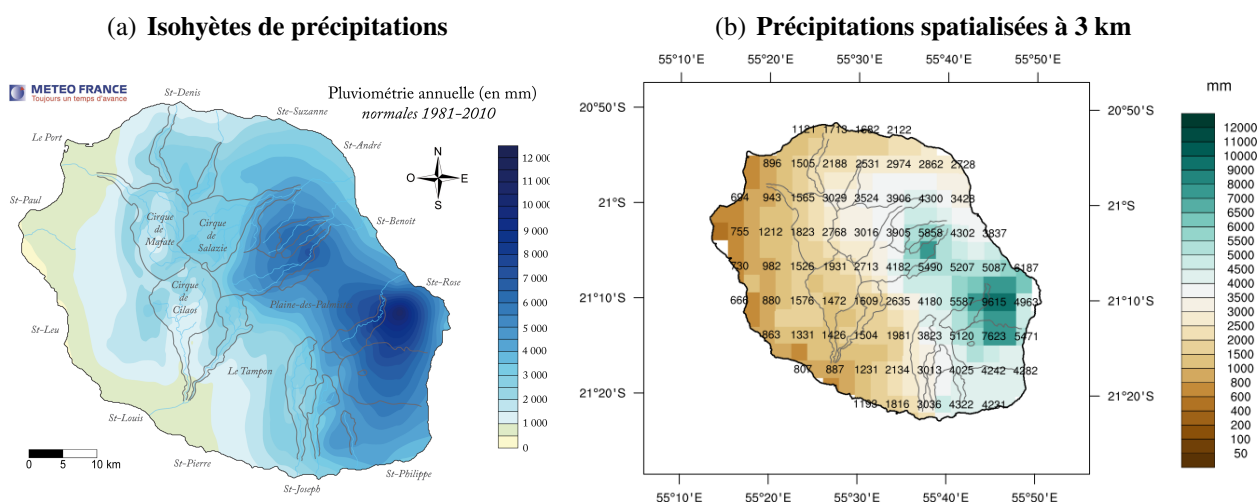


FIGURE 4.10 – Cumul annuel moyen de précipitations (mm) observé sur La Réunion (a) en isohyètes (source : Météo-France *Jumaux et al. 2011*) et (b) en points de grille à 3 km de résolution (produit spatialisé) sur la période 1981-2010.

A noter que d’autres paramètres météorologiques mesurés quotidiennement à Météo-France ont été spatialisés dans le cadre du projet BRIO : la force du vent à +10 m, le rayonnement global et l’humidité minimale et maximale à +2 m. Ils ont permis de calculer l’évapotranspiration potentielle (ETP) pour les applications en agriculture notamment.

4.2.4 Normales spatialisées de températures

Pour les températures (minimales et maximales), on dispose déjà de normales spatialisées sur la période 1991-2010 produites pour l’atlas climatique de La Réunion (Jumaux et al. 2011). Cette normale spatialisée a été obtenue en s’inspirant de la méthode Aurelhy (Douville 1992). A partir d’un modèle numérique de terrain à 250 m de résolution et en tenant compte de divers prédicteurs comme la distance à la côte, la pente ou l’exposition, les données des stations de référence de Météo-France (température mais aussi ensoleillement) ont été spatialisées sur l’ensemble de l’île : Bessafi et al. (2013) décrit précisément la méthode pour la variable rayonnement.

Pour obtenir les jeux de référence kriggés de température minimale et maximale à 0.03 degrés de résolution utilisés dans BRIO, on réalise une spatialisation des 20 postes par krigeage des écarts à la moyenne (1991-2010) en points stations, auquel on ajoute la normale spatialisée. Cela permet de prendre en compte le prédicteur altitude dans le jeu de données BRIO. La période couverte par le jeu de données s’étend de 2000 à aujourd’hui. Les variables spatialisées sont à la fois la température minimale et maximale, à partir de laquelle on peut déduire la température moyenne.

La normale climatique annuelle de température moyenne à +2 m est illustrée en figure 4.11(a). Les disparités traduisent parfaitement la corrélation qui existe entre l’altitude et la température (Jumaux et al. 2011). Les zones aux températures les plus basses se retrouvent aux altitudes les plus élevées (piton des Neiges, Grand Bénare, piton de La Fournaise...). C’est sur la zone littorale située entre le Port et et Pointe des Trois-Bassins que l’on observe les températures moyennes les plus élevées. Ce secteur est à l’abri des vents dominants et bénéficie aussi d’un très bon ensoleillement. On s’aperçoit que :

- L’Est est un peu plus frais que l’ouest, en moyenne de 2°C, à cause des alizés qui rafraîchissent la côte au vent (ventilation, nébulosité, précipitations).
- Les températures sont plus homogènes au niveau des côtes durant toute l’année, phénomène principalement dû aux brises et à l’océan qui contribuent à équilibrer les températures.

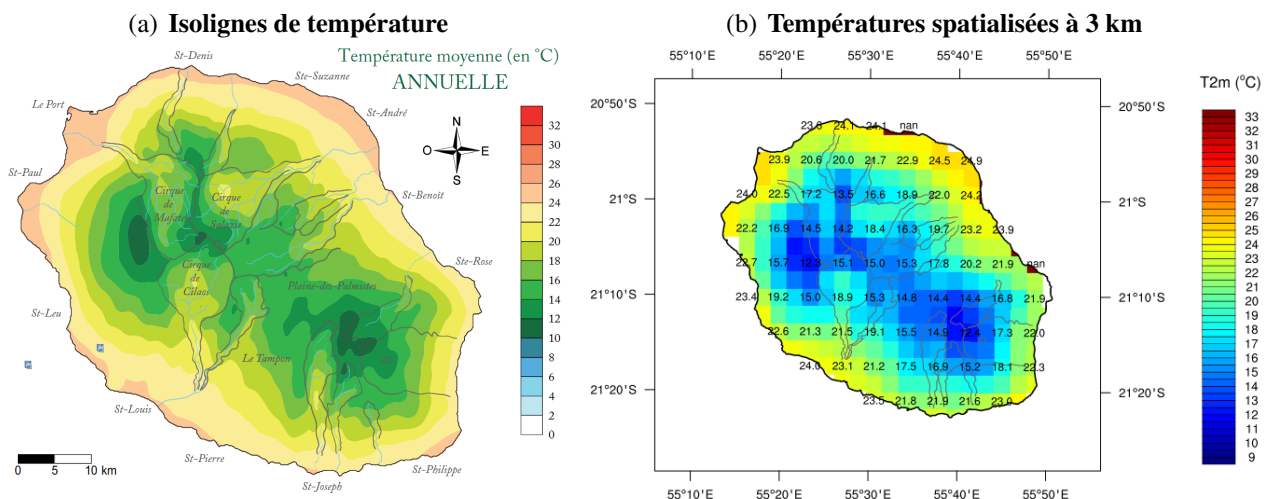


FIGURE 4.11 – Température moyenne annuelle à +2 m (°C) observée sur La Réunion sur la période 1981-2010 (a) en isolignes (source : Météo-France Jumaux et al. 2011) et (b) en points de grille à 3 km de résolution (produit spatialisé).

Ce produit spatialisé sera utilisé dans la suite du projet pour (i) comparer les sorties de modèle ALADIN aux normales de températures et (ii) corriger les biais du modèle (en température minimale et maximale) tout en réalisant une descente d’échelle à 3 km de résolution.

4.2.5 Zonage climatique

L'application des différentes méthodes de classification des postes a permis d'aboutir à un zonage pluviométrique en 10 régions, associées aux 5 zones de vigilance et séparées en 2 niveaux de hauteur délimités par 400 m d'altitude (Fig. 4.12).

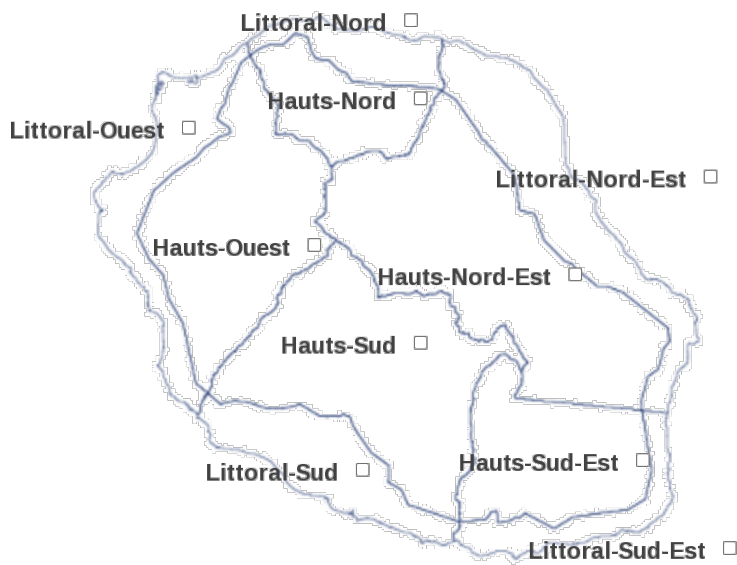


FIGURE 4.12 – *Classification de La Réunion en 10 zones climatiques pour la variable précipitations.*

4.3 DONNÉES DE RÉFÉRENCE SUR LA RÉPUBLIQUE DE MAURICE

4.3.1 Caractéristiques climatiques et changement climatique observé

Le climat de l'île Maurice, située vers 57.5°E - 20.3°S, est semblable à celui de La Réunion mais les précipitations sur les reliefs et la côte Est y sont moins abondantes car le relief y est moindre. Malgré sa position (environ 63.5°E; 19.6°S), la dernière île des Mascareignes, Rodrigues, bénéficie d'un climat tropical insulaire un peu plus sec du fait de sa très faible orographie mais se trouve plus fortement exposée aux cyclones tropicaux. Les îles d'Agalega et Saint Brandon sont situées plus près de l'équateur, à 10.5°S et 16.5°S respectivement.

Le réchauffement climatique est également en marche sur les îles de la République Mauricienne. Sur les 60 ans de la période 1961-2020, le réchauffement moyen observé est de l'ordre de 1.1°C sur Maurice (Fig. 4.13(a)), 1.5°C sur Rodrigues (Fig. 4.13(b)), 1.8°C sur Agalega (Fig. 4.13(c)) et 2.1°C sur Saint Brandon (Fig. 4.13(d)) par rapport à la moyenne sur la période de référence 1961-1990. La tendance observée sur Maurice est de +0.18°C par décennie comme sur La Réunion mais le réchauffement s'est accéléré dans la dernière décennie. Le réchauffement semble plus important en remontant vers l'équateur (Agalega puis Saint Brandon).

Le cumul annuel moyen de précipitations par rapport à la normale 1961-1990 est en baisse de 14% sur l'île Maurice (Fig. 4.14(a)), et de 5% sur Saint Brandon (Fig. 4.14(d)). Il n'y a en revanche pas de tendance significative décelable sur l'évolution du cumul annuel moyen de précipitations sur les îles d'Agalega et Rodrigues depuis le début des observations (Figs. 4.14(c), 4.14(b)).

4.3.2 Stations de mesures climatologiquement exploitables

Les stations de mesures exploitables pour les quatre îles habitées de la République de Maurice sont illustrées en figure 4.15. Sur Maurice, 23 stations manuelles conformes aux recommandations météorologiques standards sont exploitées par un personnel qualifié et leur qualité fait l'objet de contrôles réguliers (stations marquées d'un point bleu en figure 4.15(a)). Ce sont les stations de référence utilisées par le MMS. Depuis 2003, des stations automatiques (Automatic Weather Stations, AWS) sont venues compléter le réseau d'observations des précipitations. Les données de certaines de ces stations automatiques ont été considérées durant l'interpolation qui suit (points rouges en figure 4.15(a)). Elles ont permis de combler des données manquantes dans le réseau de référence, notamment en 2003 (problème technique pour 13 stations manuelles), et d'obtenir une plus fine résolution effective avec en moyenne une station tous les 4 kms environ. Sur Rodrigues, Saint Brandon et Agalega, les stations météorologiques sont également de bonne qualité et exploitées par un personnel qualifié. Sur Rodrigues, le réseau de mesures des précipitations est dense. Sur Agalega comme sur Saint Brandon, on dénombre une seule station de mesures pour tous les paramètres (précipitations, température et vent).

Les stations de mesures sont en moindre nombre pour le paramètre température. Leur densité est néanmoins suffisante pour mesurer les variations introduites par la topographie et l'exposition au vent et pour représenter ainsi les micro-climats des îles de la République mauricienne.

4.3.3 Complétion des données et interpolation à n km de résolution

Pour Rodrigues, les observations de l'aéroport de la Plaine Corail (effectuées uniquement les jours où des vols existent) ont été considérées, ainsi que celles de la station automatique installée à Citronnelles. Les valeurs manquantes de ces stations ont été complétées en considérant les mesures faites à la station météorologique de référence de Pointe Canon (Fig. 4.15(b)).

4.3. Données de référence sur la République de Maurice

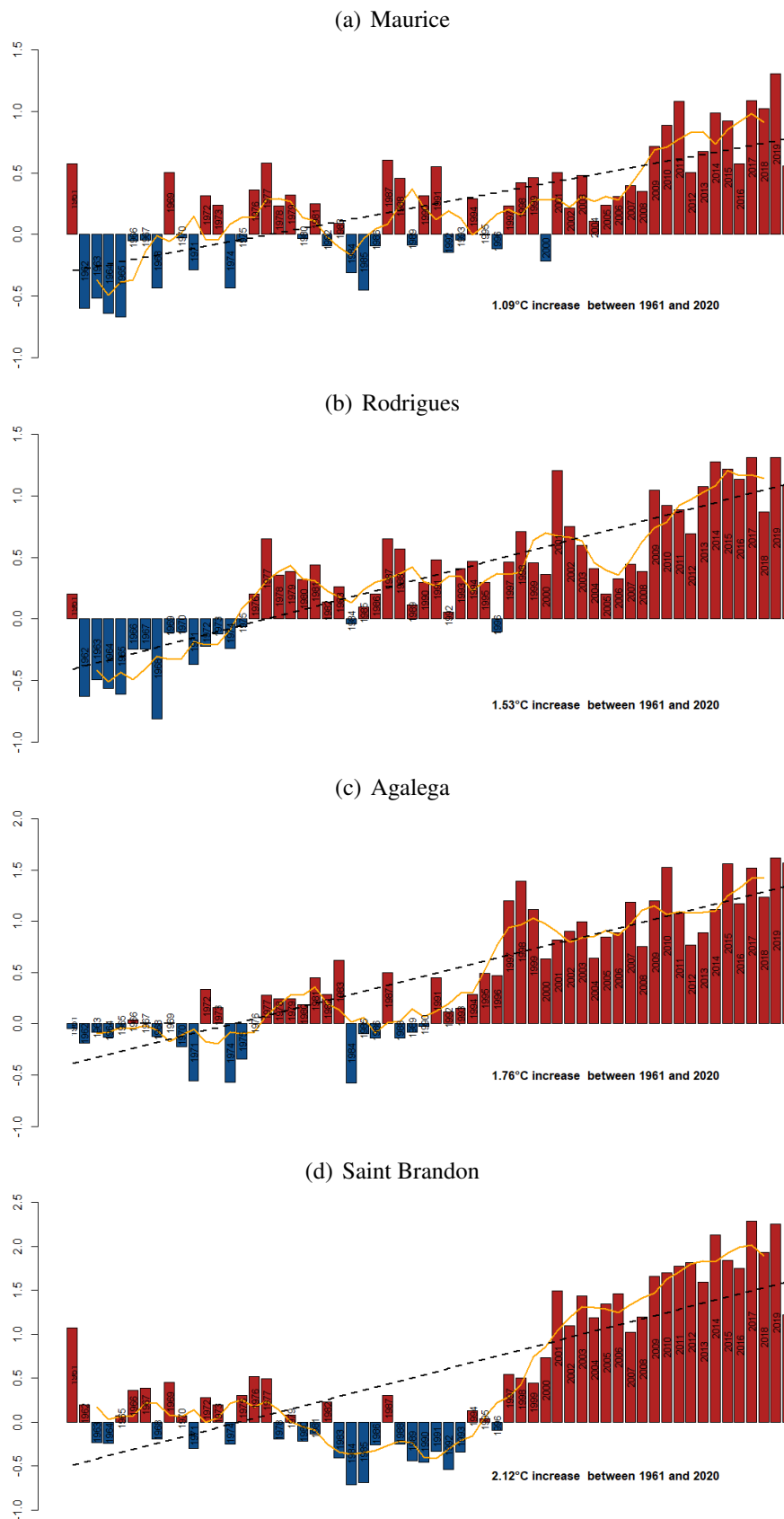


FIGURE 4.13 – Evolution temporelle des anomalies de la température maximale à +2 m en moyenne annuelle (°C par rapport à la moyenne sur la période de référence 1961-1990) observées à (a) Vacoas (Maurice), (b) Pointe Canon (Rodrigues), (c) Agalega et (d) Saint Brandon depuis 1961. La ligne tiretée noire représente la tendance moyenne sur la période entière.

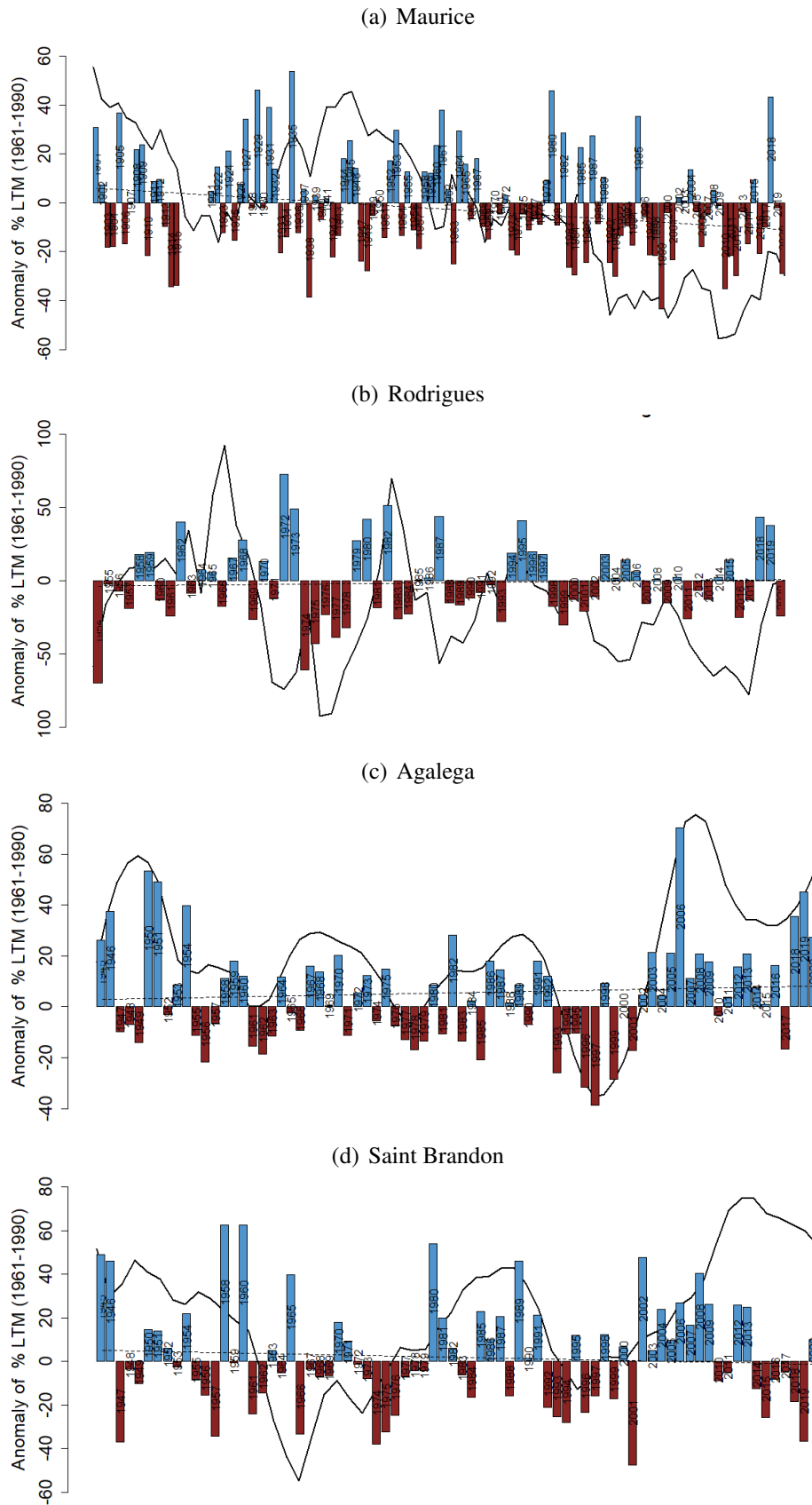


FIGURE 4.14 – Evolution temporelle des anomalies du cumul annuel de précipitations (% par rapport à la moyenne sur la période de référence 1961-1990) observées à (a) Vacoas (Maurice) depuis 1901, (b) Pointe Canon (Rodrigues) depuis 1954, (c) Agalega et (d) Saint Brandon depuis 1945. La ligne tiretée noire représente la tendance moyenne sur la période entière.

4.3. Données de référence sur la République de Maurice

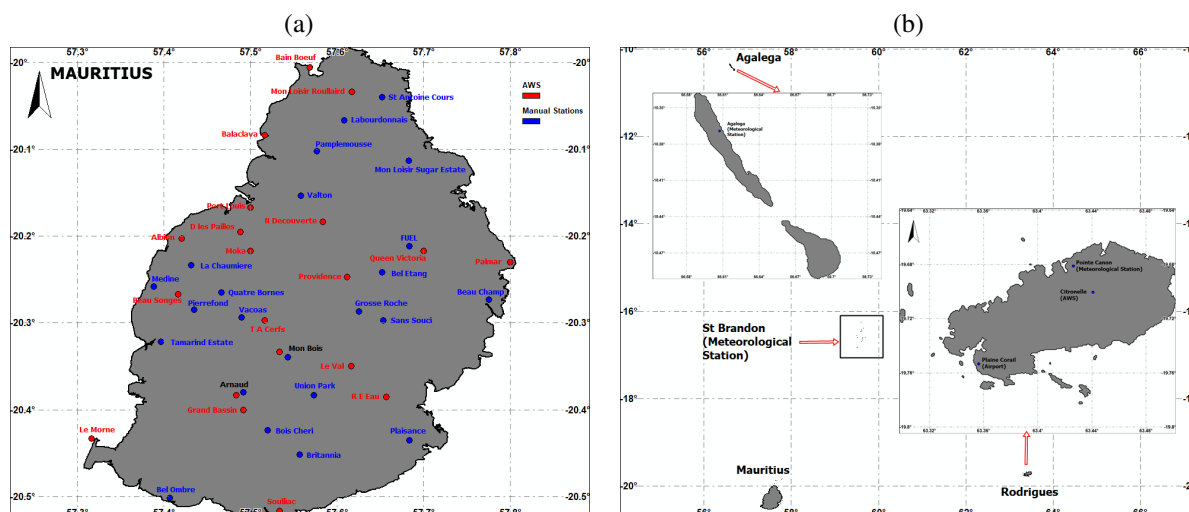


FIGURE 4.15 – Stations de mesures automatiques (en rouge) et manuelles (en bleu) climatologiquement exploitables sur (a) Maurice, et (b) Rodrigues, Saint Brandon et Agalega pour les précipitations et la température sur la période 1981-2010.

Une interpolation des données des stations exploitables (Fig. 4.15) est réalisée pour obtenir des produits d'observations en points de grille à la résolution de 4 km pour Maurice, 2 km pour Rodrigues, et 1 km pour Agalega et Saint Brandon (Fig. 4.16).

La méthode d'interpolation utilisée est une interpolation avec pondération inverse à la distance (Inverse Distance Weighted, **IDW**) avec un polynôme de degré 5. La technique de validation croisée "leave-one-out" a permis de contrôler l'erreur de prédiction dans les valeurs interpolées. On constate que l'erreur quadratique moyenne (**RMSE**) augmente avec le degré du polynôme (Fig. 4.17(a)) tandis que la distribution d'erreurs (Fig. 4.17(b)) diminue rapidement puis stagne. C'est pourquoi le degré 5 a été retenu : c'est un bon compromis entre un biais d'erreur d'estimation faible et un **RMSE** acceptable dans les résultats d'interpolation globaux.

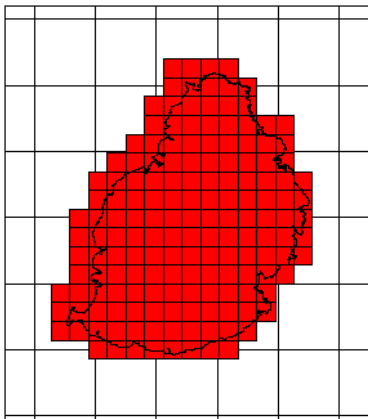
Contrôle de qualité du produit spatialisé en points de grille

Pour chaque paramètre, une carte en points de grille est produite quotidiennement puis les fichiers sont agrégés sur la période 1981-2010. L'interpolation des paramètres quotidiens permet un contrôle de qualité des données de stations. Les valeurs nulles erronées (false zeros) sont omises avant l'interpolation du jour. L'exemple en figure 4.18 montre le cas d'une valeur nulle erronée dans les relevés de précipitations sur Maurice et la correction qui a été apportée.

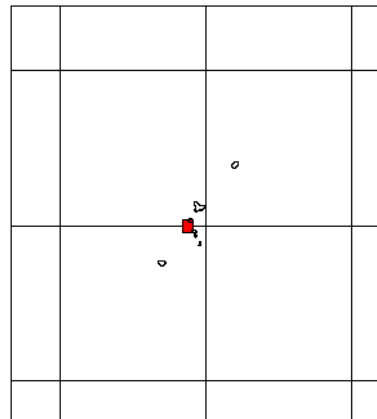
De la même manière des valeurs extrêmes isolées sont validées ou rejetées par l'expert climatologue. Les journées avec de fortes averses localisées, par exemple, sont identifiées - via un algorithme informatique - et analysées. Les valeurs douteuses qui ne sont pas associées à des phénomènes météorologiques plausibles sont rejetées. Un extrait de la liste des valeurs douteuses rejetées est visible dans le tableau 4.2 pour l'île Maurice. La figure 4.19 illustre la situation du 24 novembre 1981. La valeur extrême de 95 mm mesurée à la station de Bel Ombre pourrait sembler fautive à première vue mais une vue d'ensemble révèle qu'il a effectivement plu très fortement sur le secteur sud-ouest de l'île uniquement. Cette structure localisée de précipitations pourrait s'être produite suite à un développement nuageux convectif dû à un chauffage intense du sol combiné à des vents légers dominants de secteur nord-est. Ces conditions favorables sont typiques à cette période de l'année. La valeur de 95 mm est conservée car le phénomène météorologique qui a donné lieu à cette valeur peut être expliqué.

La figure 4.20 illustre la moyenne à long terme des précipitations cumulées annuelles du produit

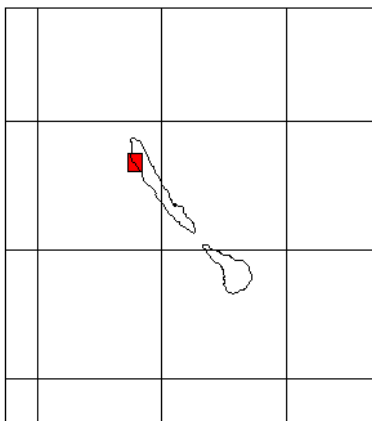
(a) Maurice (résolution 4 km)



(b) Saint Brandon (résolution 1 km)



(c) Agalega (résolution 1 km)



(d) Rodrigues (résolution 2 km)

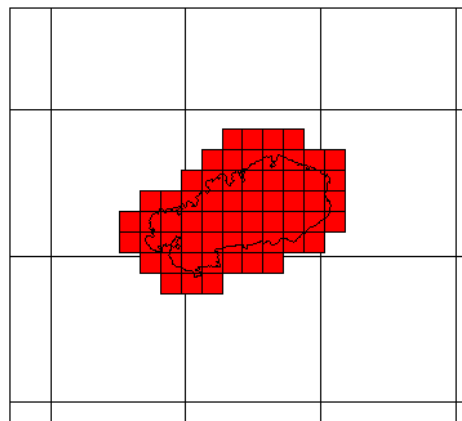


FIGURE 4.16 – Grille des produits d'observation obtenus par interpolation sur Maurice, Saint Brandon, Agalega et Rodrigues pour les précipitations et la température sur la période 1981-2010. La grille d'ALADIN à 12 km de résolution est dessinée en comparaison.

4.3. Données de référence sur la République de Maurice

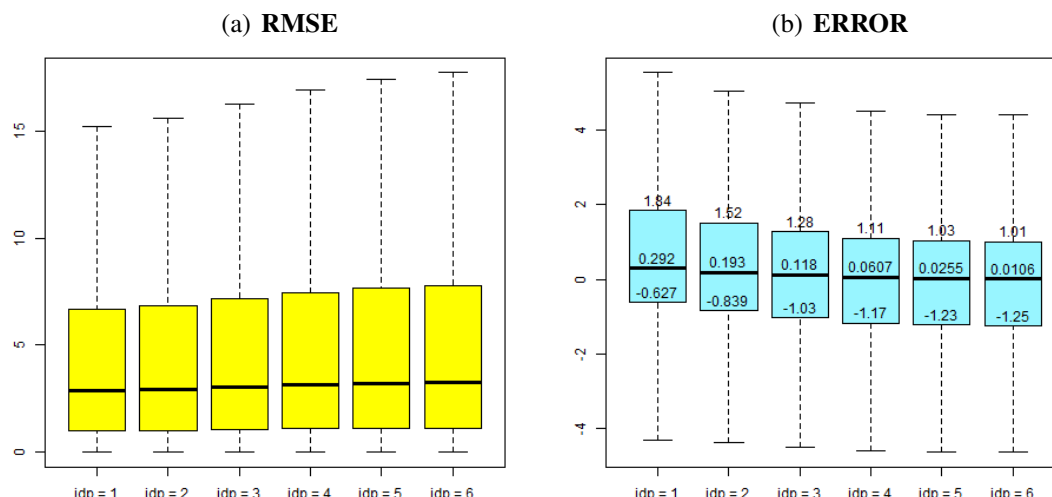


FIGURE 4.17 – (a) Erreur quadratique moyenne (RMSE) et (b) distribution d'erreur d'estimation en fonction du degré du polynôme utilisé dans l'interpolation avec pondération inverse à la distance (IDW).

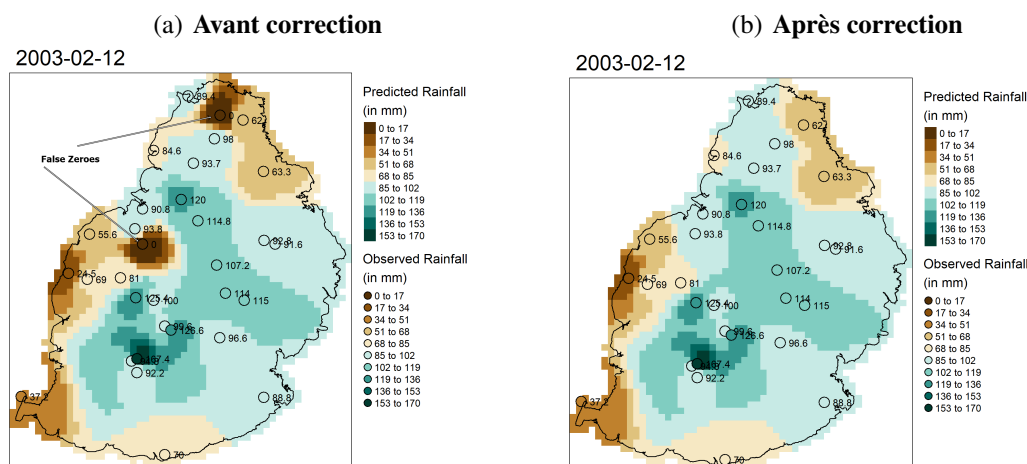


FIGURE 4.18 – Exemple d'une valeur nulle erronée dans les relevés de précipitations sur l'île Maurice le 12 décembre 2003 (a) et la correction apportée (b).

Date	Mimumum de précipitations	Maximum de précipitations	Station enregistrant le maximum de précipitations
1981-03-14	0	12.7	UNIONPARK
1981-03-17	0	24	BelOmbre
1981-03-29	0	13.9	ARNAUD
1981-07-11	0	27.9	BoisCheri
1981-08-22	0	13	BRITANNIA
1981-11-13	0	11.2	Medine
1981-11-24	0	95	BelOmbre
1981-12-01	0	18.6	PLAISANCE
1981-12-10	0	57.5	BRITANNIA

TABLEAU 4.2 – Extrait des valeurs quotidiennes de précipitations extrêmes localisées qui ont été rejetées dans le produit final de précipitations en points de grille de l'île Maurice.

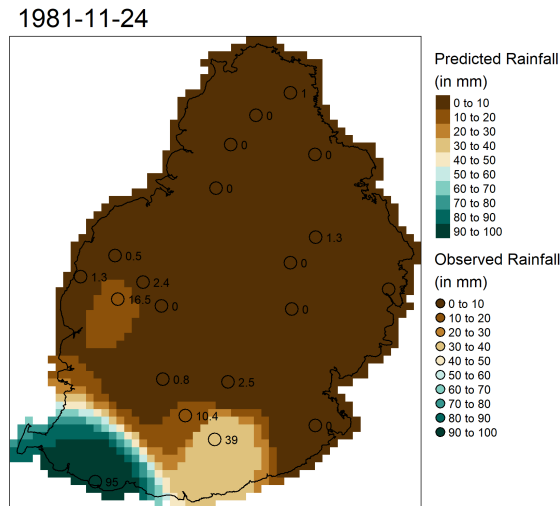


FIGURE 4.19 – Situation pluvieuse du 24 novembre 1981 sur l’île Maurice.

en points de grille finalisé obtenu par interpolation des précipitations quotidiennes pour l’île Maurice. Les valeurs en chaque station manuelle correspondent bien à celles du produit interpolé (elles ont la même couleur que l’arrière-plan). Quelques incohérences existent pour les stations automatiques AWS à cause des manques de données dans leurs relevés (avant 2003). Cela prouve que la procédure d’interpolation est bien efficace.

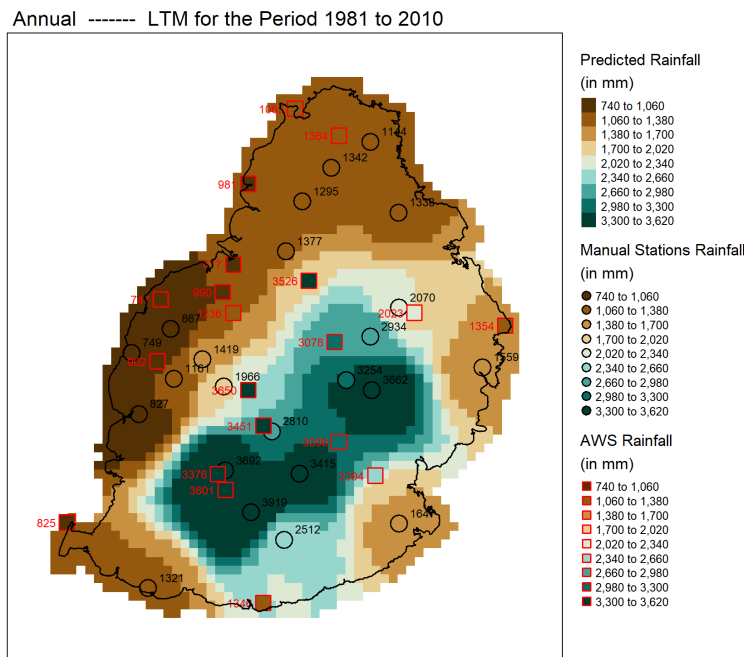


FIGURE 4.20 – Cumul annuel moyen de précipitations (mm) à l’île Maurice en points de grille à 1 km de résolution sur la période 1981-2010, superposé aux valeurs relevées à chaque station automatique AWS (carrés rouges) et manuelle (ronds noirs).

Pour davantage de détails le lecteur pourra se référer au rapport interne de l’expert du MMS (Veerabadren 2021), notamment pour le krigeage des températures (variogramme et carte de résidus pour contrôler la qualité du produit spatialisé).

4.3.4 Normales spatialisées de précipitations et de températures

Le cumul annuel moyen de précipitations sur Maurice sur la période 1981-2010 est illustré en figure 4.21(a). On distingue bien un signal plus arrosé sur la façade Est exposée aux alizés, par rapport à la côte Ouest relativement plus sèche, et de plus fortes précipitations sur les reliefs centraux. Les températures annuelles moyennes à +2 m (Fig. 4.21(b)) font également apparaître des zones climatiques : plus frais à l'intérieur des terres sur les reliefs, une côte ouest relativement plus chaude que la côte Est.

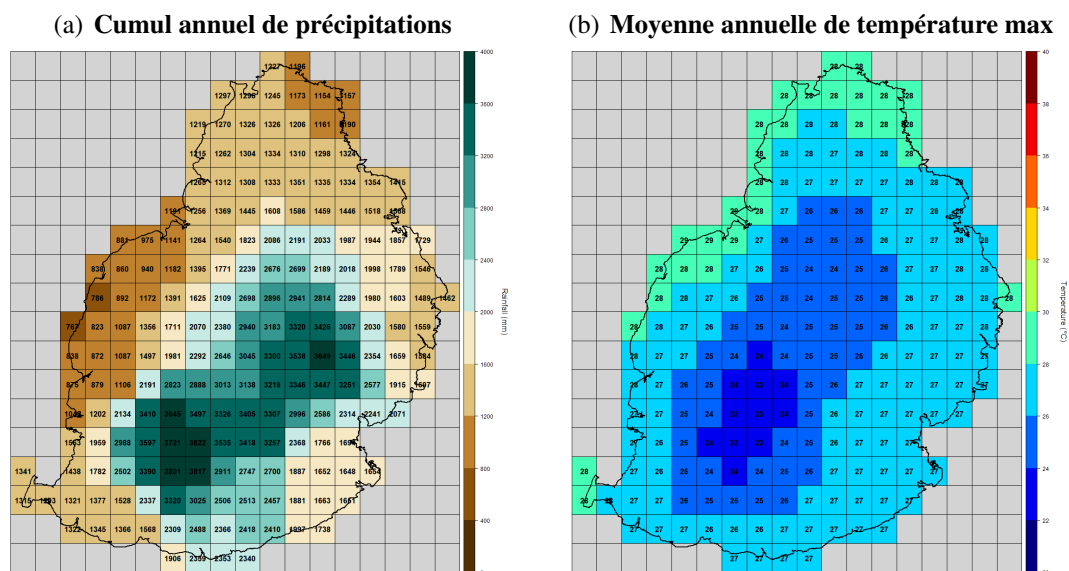


FIGURE 4.21 – (a) Cumul annuel moyen de précipitations (mm) et (b) moyenne annuelle de la température maximale à +2 m (°C) sur Maurice sur la période historique 1981-2010, obtenus par interpolation à 4 km de résolution des données des stations d'observations exploitables (Fig. 4.15(a)).

Les cumuls annuels moyens de précipitations sur la période 1981-2010 pour les autres îles de Maurice (en points de station, i.e. sans interpolation) sont illustrés en figure 4.22. Pour davantage de détails le lecteur pourra se référer au rapport interne de l'expert du MMS (Veerabadren 2021), notamment pour la climatologie des précipitations et températures moyennes mois par mois, en été/hiver, ou encore pour l'évolution chronologique des précipitations et températures (minimales et maximales) année après année sur quelques stations des îles de la République Mauricienne depuis le début des mesures.

La variable vent de surface (mesurée à +10 m) a aussi été analysée et une climatologie a pu être réalisée sur les quatre îles Mauriciennes (Veerabadren 2021).

4.3.5 Zonage climatique

Un zonage climatique a été réalisé pour diviser l'île Maurice en 11 zones présentant les mêmes caractéristiques climatologiques en terme de précipitations. Il est illustré en figure 4.23(a). Le zonage a été obtenu via des méthodes combinées de classification hiérarchique et de classification K-means (K représentant le nombre de groupes dans les données) en utilisant pour distances les corrélations de Pearson. Ce zonage met en évidence une dépendance de la distribution des précipitations avec l'altitude et avec l'exposition aux alizés.

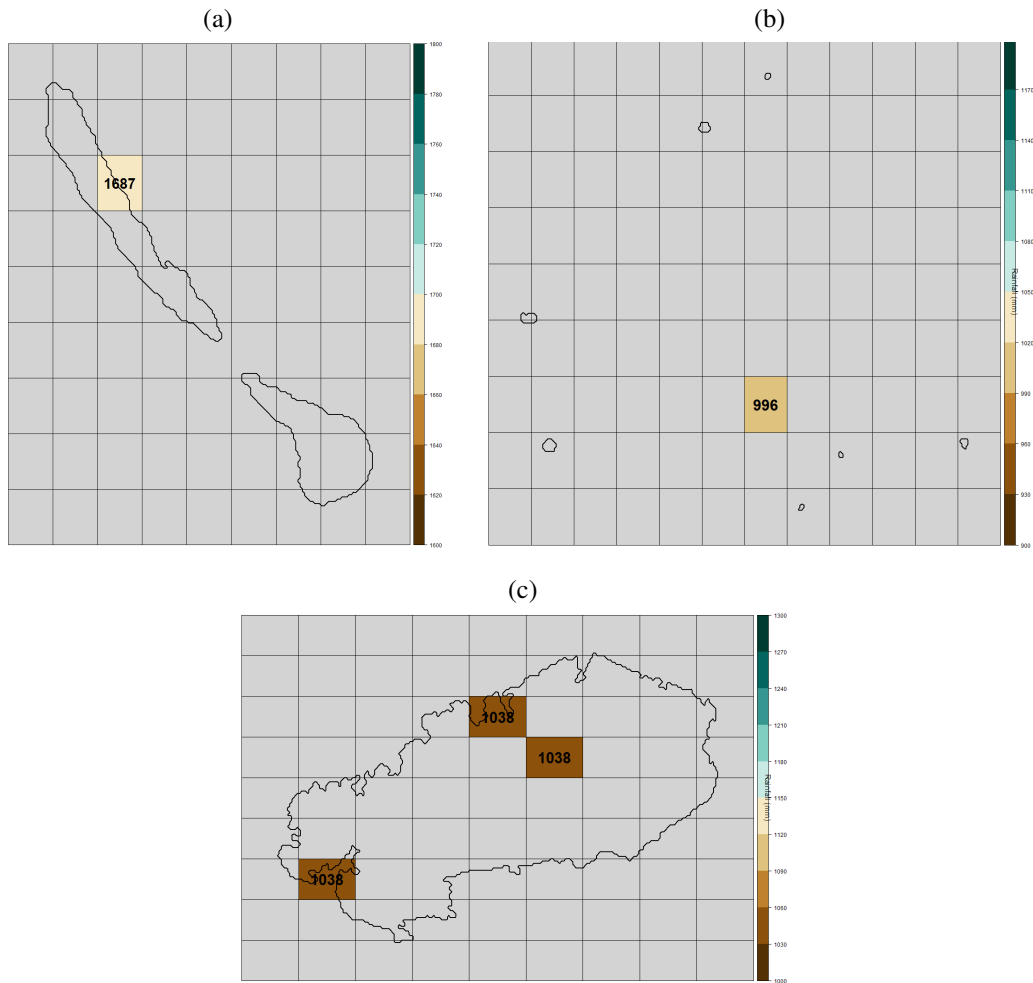


FIGURE 4.22 – Cumul annuel moyen de précipitations relevé à (a) Agalega, (b) Saint Brandon et (c) Rodrigues sur la période 1981-2010, sur les stations d’observations exploitables.

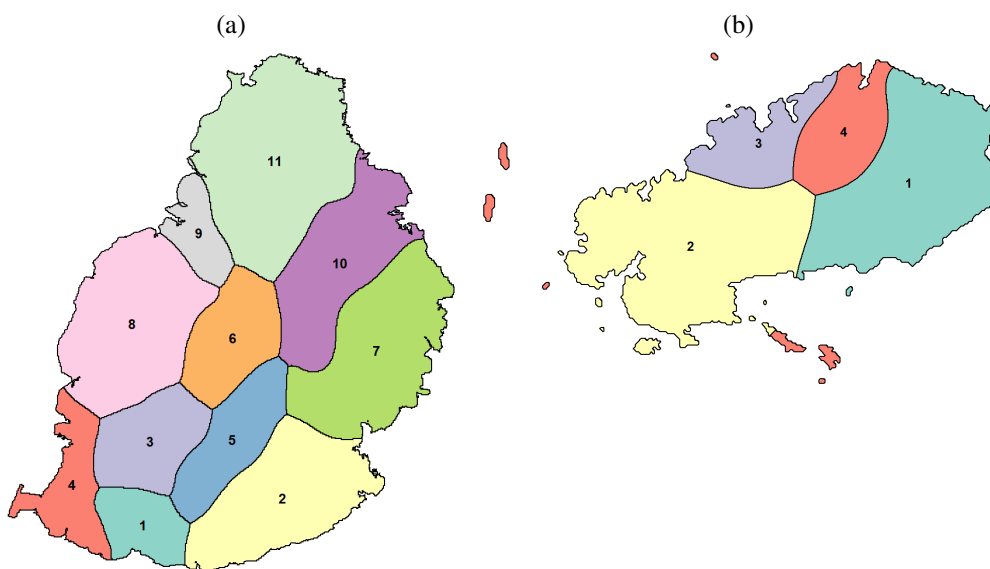


FIGURE 4.23 – Classifications en zones climatiques pour la variable précipitations pour (a) l’île Maurice (11 zones) et (b) l’île Rodrigues (4 zones).

4.4 DONNÉES DE RÉFÉRENCE SUR L'ARCHIPEL DES COMORES

4.4.1 Caractéristiques climatiques et changement climatique observé

L'archipel des Comores est situé à l'entrée Nord du canal de Mozambique entre 10.5°-13.5°S et 43°-45.5°E. Il est constitué de la Grande-Comore, Mohéli et Anjouan (Union des Comores) et de Mayotte (Fig. 4.26). L'archipel bénéficie d'un climat tropical maritime, caractérisé par deux saisons bien distinctes en fonction des précipitations. Une saison chaude et humide répartie entre novembre et avril, et une saison sèche entre mai et novembre. Pendant la saison chaude et humide, les facteurs qui influencent le climat de l'archipel sont les suivants :

- Les systèmes dépressionnaires du bassin sud-ouest de l'océan Indien qui peuvent évoluer en tempêtes ou cyclones tropicaux et passer à moins de 500 km de l'archipel (Fig. 4.25).
- La formation fréquente de systèmes convectifs parfois profonds associés à des anomalies de température de surface de la mer.
- La présence de la zone de convergence intertropicale (ZCIT) généralement entre janvier et février.
- L'influence du régime des vents de mousson soufflant dans le secteur nord-ouest principalement à l'entrée nord du canal de Mozambique.

Pendant la saison sèche et fraîche, la ZCIT migre vers l'hémisphère nord, le temps est généralement beau et dominé par un régime d'alizés (flux de secteur sud-est). Comme les autres îles étudiées, le réchauffement climatique touche l'archipel des Comores (Figs. 4.24, 4.25) avec une augmentation moyenne de la température de +0.19°C par décennie de 1961 à 2021 (soit +1.12°C sur la période entière). On note également une tendance à la baisse des précipitations entre 1981 et 2010 sur la majorité des stations (ex. Pamandzi, Fig. 4.24(b)). La baisse de 2% enregistrée sur le cumul moyen des précipitations des deux stations de Mayotte (Pamandzi et Coconi) sur une plus longue période de 1961-2021 n'est cependant pas significative.

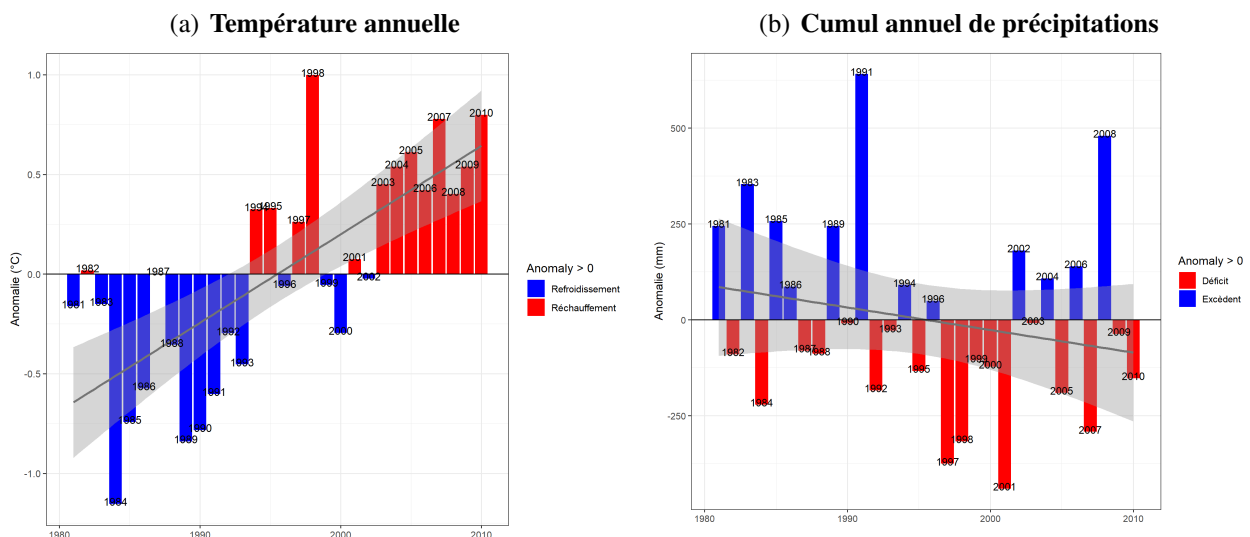


FIGURE 4.24 – Evolution temporelle des anomalies (a) de la température moyenne annuelle à +2 m (°C) et (b) du cumul annuel de précipitations (mm) observées à Pamandzi, Mayotte, sur la période historique 1981-2010. Les anomalies sont calculées relativement à la moyenne de la période 1981-2010.

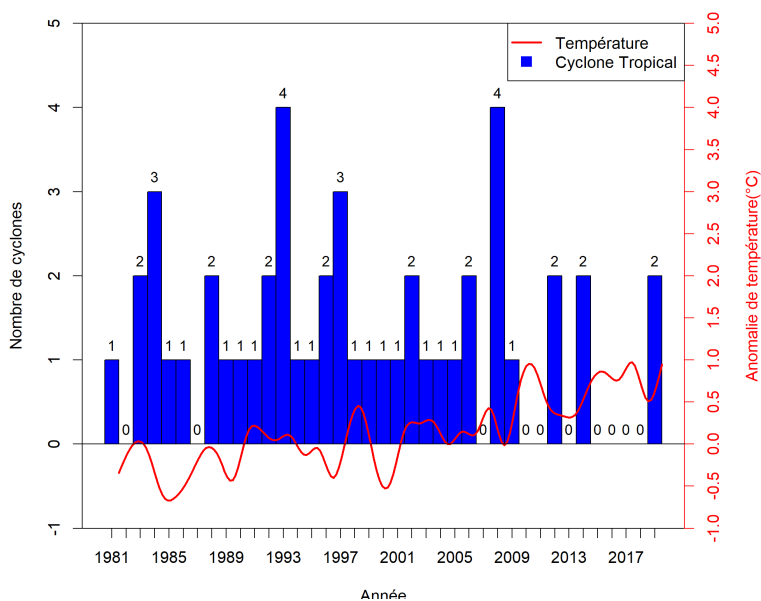


FIGURE 4.25 – Evolution temporelle des anomalies de température moyenne annuelle à +2 m (°C) observées à Moroni, capitale de l'Union des Comores, depuis 1981 (courbe rouge). Les anomalies sont calculées relativement à la moyenne sur la période historique 1981-2010. Le diagramme bleu dénombre les systèmes cycloniques observés dans un rayon de 500 km autour de Moroni.

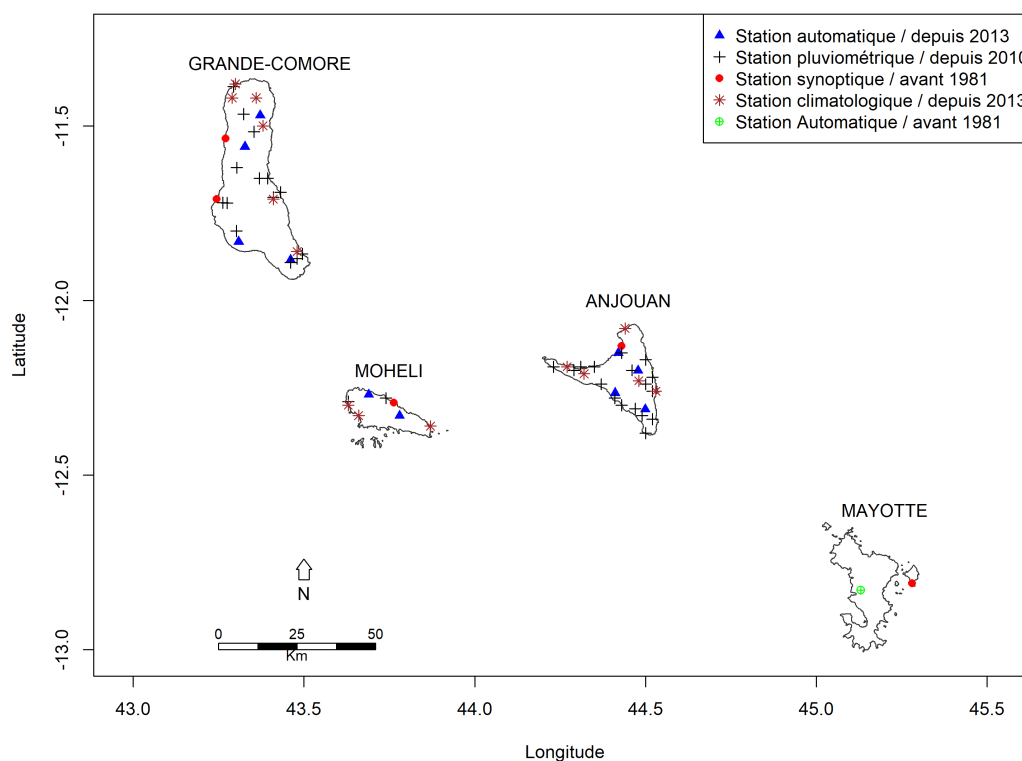


FIGURE 4.26 – Réseau de stations météorologiques de l'archipel des Comores.

4.4.2 Stations de mesures climatologiquement exploitables

Le réseau de stations météorologiques de l'archipel des Comores est cartographié en figure 4.26. La disponibilité des données a été évaluée sur la période 1981-2010 pour les variables précipitations et températures minimale et maximale (Fig. 4.27). Seules 5 stations synoptiques et la station automatique de Coconi ont des données en début de période (Fig. 4.26, points rouges et point vert). La station automatique de Coconi ne mesure que les précipitations sur cette période (la mesure de température a été rajoutée très récemment sur cette station). Chacune des stations présente plus de 60% de données (Fig. 4.27) et est donc climatologiquement exploitable après complétion (voir paragraphe suivant). Au final on retient donc 6 stations de référence pour les précipitations : Hahaya (altitude : 28 m), Moroni (altitude : 19 m), Bandar (altitude : 109 m), Ouani (altitude : 23 m), Coconi (altitude : 96 m) et Pamandzi (altitude : 7 m) (Fig. 4.27(a)) ainsi que les 5 stations de Hahaya, Moroni, Bandar, Ouani et Pamandzi pour la température (Fig. 4.27(b)).

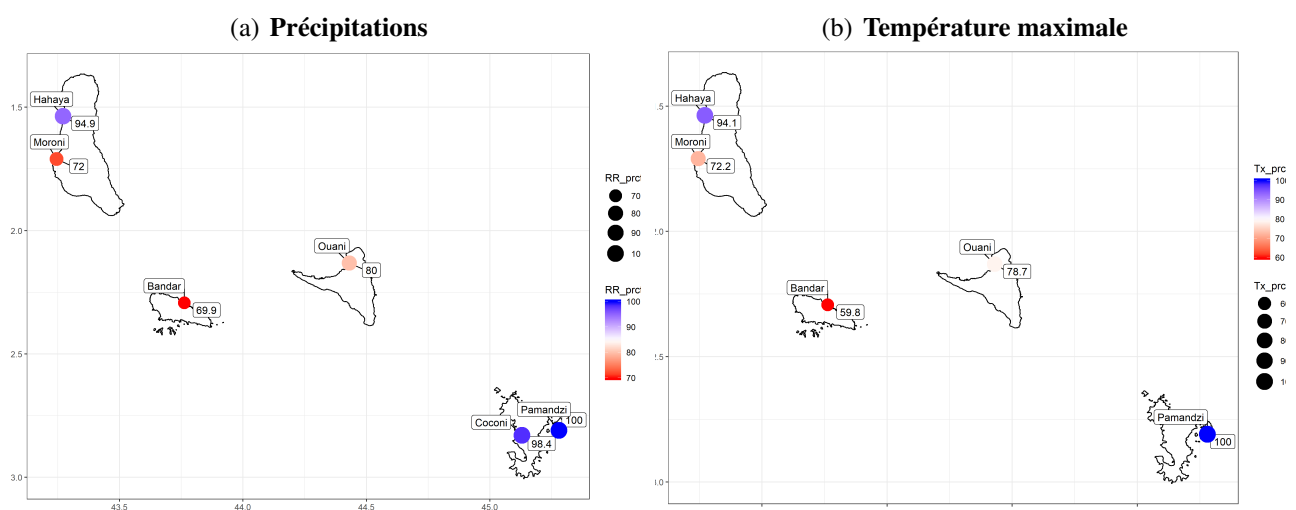


FIGURE 4.27 – Sélection des stations de mesures climatologiquement exploitables sur l'archipel des Comores en fonction du taux de données disponibles (en %) pour la période 1981-2010 pour les variables (a) précipitations (RR) et (b) température maximale (Tx).

4.4.3 Complétion des données

Méthode de complétion des données

Les stations de mesures disponibles étant trop éloignées les unes des autres, on ne peut pas se contenter de compléter les données d'une station donnée à l'aide de la station la plus proche ayant des données à la date concernée. Les données utilisées pour compléter les données manquantes viennent des réanalyses ERA5 (Hersbach et al. 2019) à la résolution de 31 km (0.28°) accessibles sur le site du programme européen de surveillance de la Terre nommé Copernicus (ou GMES pour Global Monitoring for Environment and Security) : <https://cds.climate.copernicus.eu/#!/search?text=ERA5&type=dataset>. La méthode utilisée est décrite en figure 4.28. Elle consiste à calculer la fonction de répartition cumulative (ECDF pour Empirical Cumulative Distribution Function) pour les variables précipitations et températures, à la fois pour les mesures en station et pour les données ERA5 sur le point de grille le plus proche. Il s'agit ensuite de faire une règle de 3 à la date manquante en faisant le rapport des quantiles des deux distributions associés à la valeur de la série ERA5 pour la date concernée.

ECDF : Fonction de distribution cumulative empirique

Données d'entrées avec R : données d'observation (Obs) et données de réanalyse (Rea)



```
Obs = c( Obs_1, Obs_2,....., Obs_n, Obs_n+1 )
Rea = c( Rea_1, Rea_2,....., Rea_n, Rea_n+1, Rea_n+2 )
```

Commandes R : pour l'estimation des valeurs manquantes

```
qx = ecdf (Rea)(Rea_i)
print (qx)
Val.manq = quantile(Obs, probs = qx)
print (Val.manq)
```

Exemple

Observation	Réanalyse
Obs ₁	Rea ₁
Obs ₂	Rea ₂
Obs ₃	Rea ₃
NA	Rea ₄
Obs ₅	Rea ₅
Obs ₆	Rea ₆

Dans cet exemple :
Rea_i = Rea₄

Obs: données d'observation

Rea: données de réanalyse (ERA5 dans notre cas)

qx: fonction ECDF

Rea_i: valeur du modèle correspondante au nⁱème valeur manquante de l'observation

Val.manq: valeur manquante de l'observation estimée

NA: donnée(s) manquante(s)

FIGURE 4.28 – Méthode de complétion des données utilisée pour les stations de l'archipel des Comores sur la période 1981-2010.

Séries complétées et vérification

Les séries de précipitations ainsi complétées sont illustrées en figure 4.29. Ce type de graphique permet de vérifier que les périodes complétées présentent des valeurs réalistes et des variations semblables par rapport aux autres stations de l'archipel des Comores. Il en est de même pour les séries de températures (Figs. 4.30, 4.31).

4.4.4 Normales de précipitations et de températures en points stations

L'archipel bénéficie d'un cumul annuel moyen de précipitations de 1558 mm (Fig. 4.32(a)) et d'une température annuelle moyenne de 26.4°C (Fig. 4.32(b)) sur la période 1981-2010.

4.4. Données de référence sur l'archipel des Comores

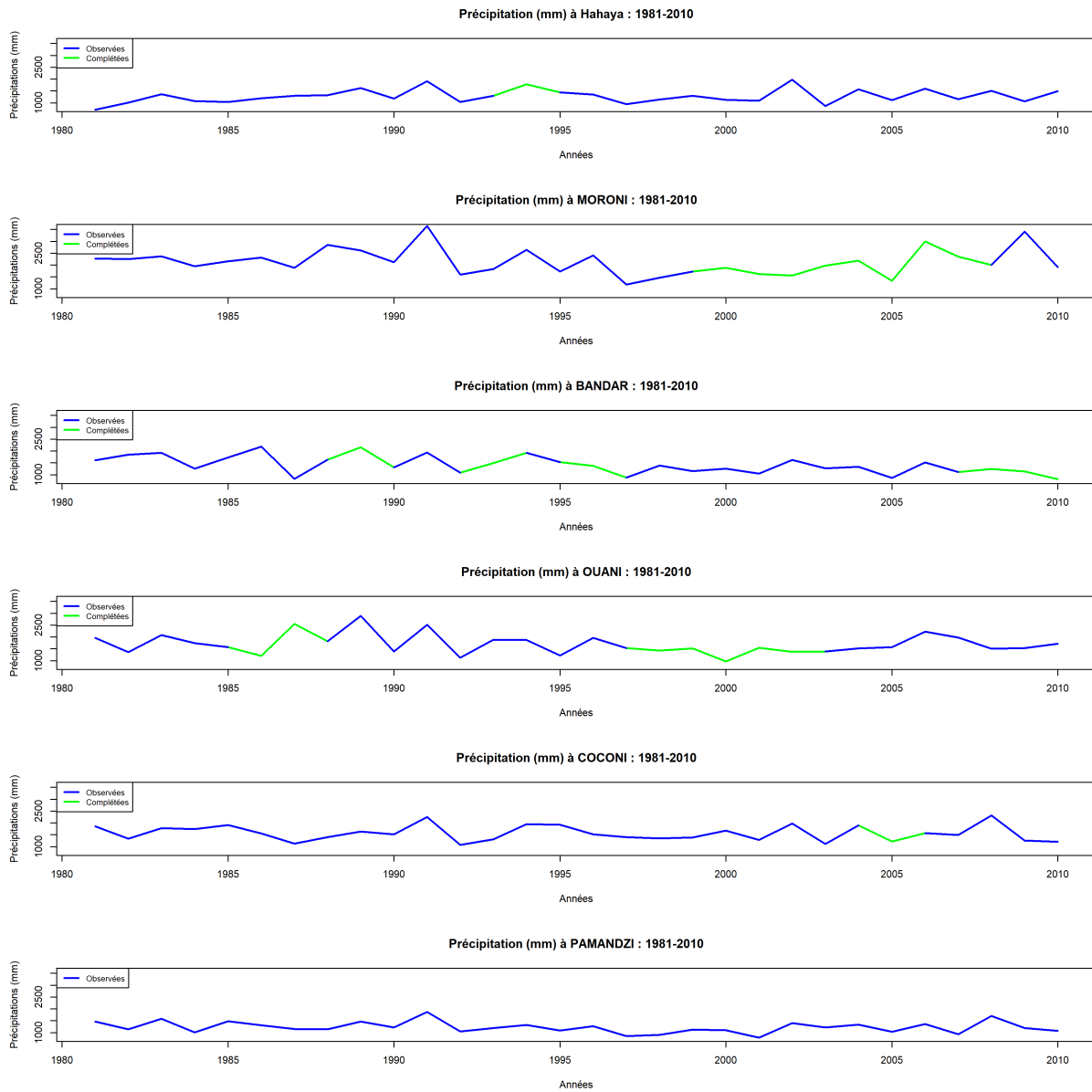


FIGURE 4.29 – *Séries de données de précipitations complétées (trait vert) pour 6 stations de l'archipel des Comores sur la période 1981-2010.*

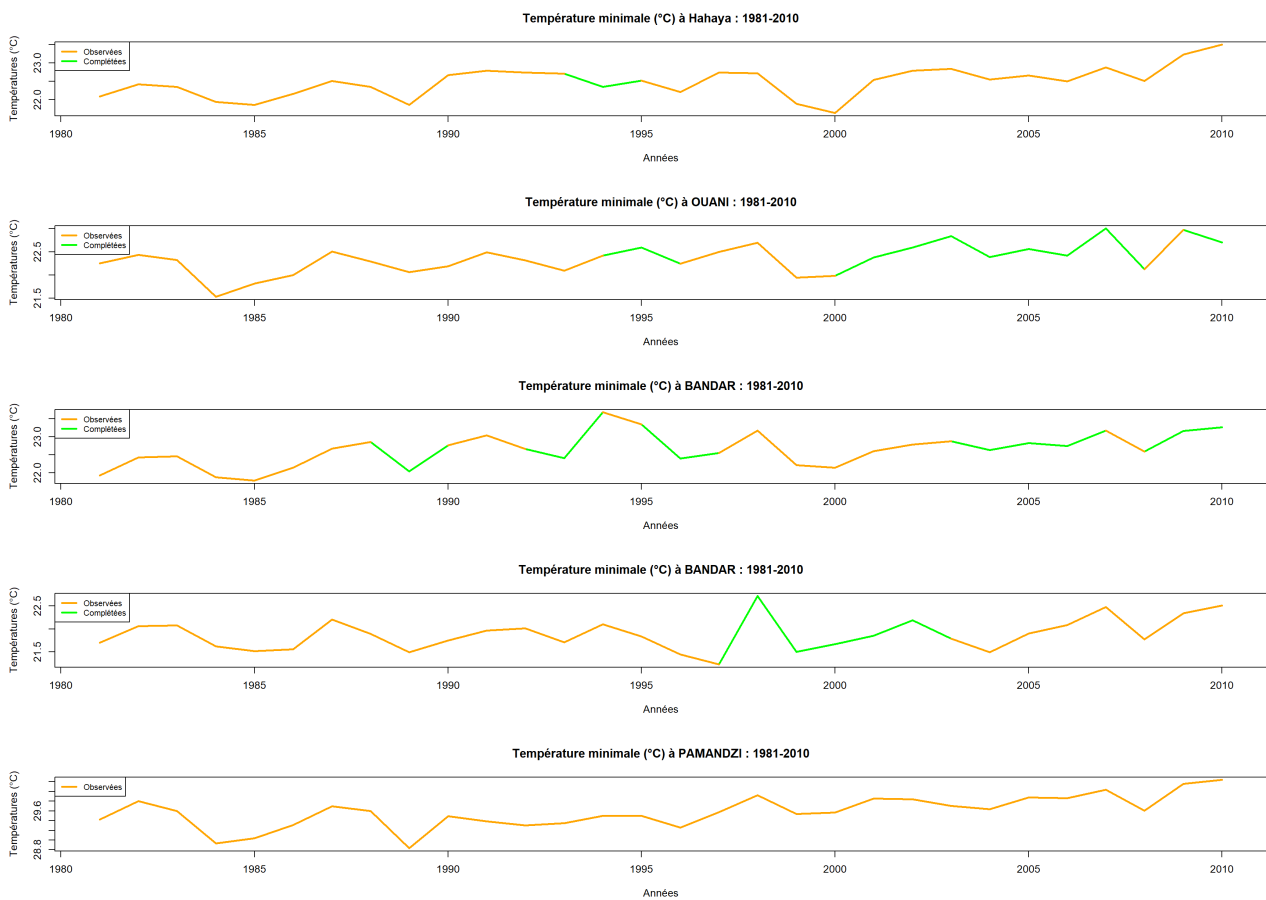


FIGURE 4.30 – Séries de données de températures minimales complétées (trait vert) pour 5 stations de l'archipel des Comores sur la période 1981-2010.

4.4. Données de référence sur l'archipel des Comores



FIGURE 4.31 – Séries de données de températures maximales complétées (trait vert) pour 5 stations de l'archipel des Comores sur la période 1981-2010.

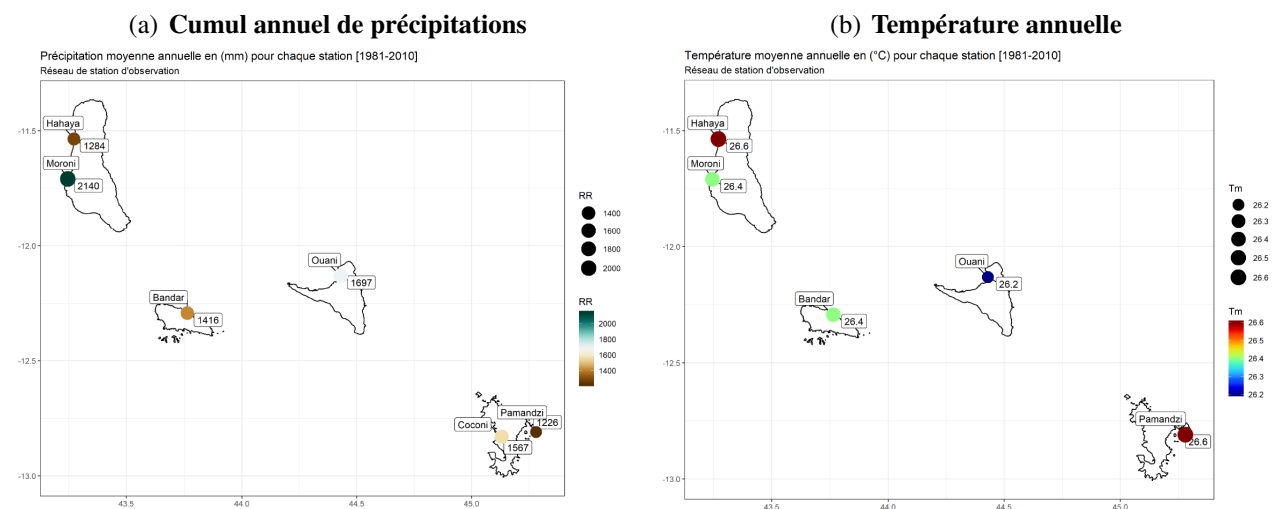


FIGURE 4.32 – (a) Cumul annuel moyen de précipitations (mm) et (b) température moyenne annuelle à +2 m (°C) sur les stations synoptiques de référence de l'archipel des Comores pour la période historique 1981-2010.

4.5 DONNÉES DE RÉFÉRENCE SUR L'ARCHIPEL DES SEYCHELLES

4.5.1 Caractéristiques climatiques et changement climatique observé

L'archipel principal des Seychelles contient 115 îles et s'étend sur un territoire marin de plus d'un million de km². D'origine granitique ou corallienne, ces îles sont reliées entre elles par un haut fond, appelé plateau des Seychelles. L'archipel principal des Seychelles, situé vers 4.5°S-55.5°E inclut trois îles principales : Mahé, Praslin et la Digue. Le climat y est équatorial et se compose de deux saisons. La transition de la saison humide vers la saison sèche se produit entre mars et avril, avec des vents calmes. Bien que les Seychelles contribuent très peu à la déforestation et à la consommation d'énergies fossiles, l'archipel n'est pas épargné par les effets néfastes du changement climatique. La température moyenne de l'air en surface a augmenté de façon continue : 0.3°C en 15 ans (Fig. 4.33). En 2020, l'anomalie de température s'élevait à 0.8°C au-dessus de la normale, un record absolu depuis le début des mesures en 1972, excédant le record précédent de 0.6°C en 2019. Ces relevés sont en accord avec les tendances mondiales.

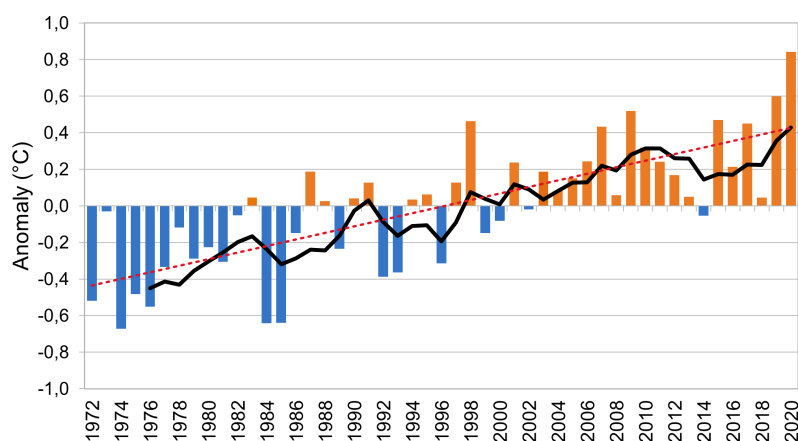


FIGURE 4.33 – Evolution temporelle des anomalies de température moyenne annuelle à +2 m (°C) observées sur l'aéroport International des Seychelles (île de Mahé) depuis 1972. Les anomalies sont calculées relativement à la moyenne sur la période historique 1981-2010. La ligne noire représente la moyenne glissante sur 5 ans.

Les précipitations aux Seychelles ne sont pas uniformément distribuées dans l'année. Les relevés historiques ne montrent pas de tendance à long terme dans les cumuls de précipitations annuelles (Fig. 4.34), mais une légère décroissance des cumuls en saison des pluies (non illustré). Les événements fortement précipitants sont associés à une variabilité interannuelle forte. Les précipitations intenses et les inondations deviennent plus dévastatrices et fréquentes aux Seychelles, coûtant aux habitants leur travail et leur maison et affectant l'économie. Les précipitations massives de janvier 2013 aux Seychelles ont causé inondations sévères et glissements de terrain pour un coût total de 104 millions de roupies seychelloises (SR) ou 8.4 millions de dollars US, équivalent à 0.77% du produit intérieur brut du pays (DaLA 2013). Les côtes des îles de Mahe, Praslin et La Digue subissent l'érosion ; des vagues plus fortes et plus longues altèrent la stabilité des côtes. Les fermiers se plaignent de l'intrusion régulière d'eau saline liée à la montée du niveau marin.

4.5.2 Stations de mesures climatologiquement exploitables

On compte 43 stations météorologiques au total sur l'archipel principal des Seychelles dont une station sur Praslin et une sur La Digue. La plupart ne mesurent que les précipitations. Le réseau de stations de l'île de Mahé est cartographié en figure 4.35. Le jeu de données de référence utilisé dans BRIO s'appuie sur les postes de référence ayant des séries longues (plus de 30 ans) et homogénéisées (triangles rouge en figure 4.35). Les relevés couvrent la période 1972-aujourd'hui.

4.5. Données de référence sur l'archipel des Seychelles

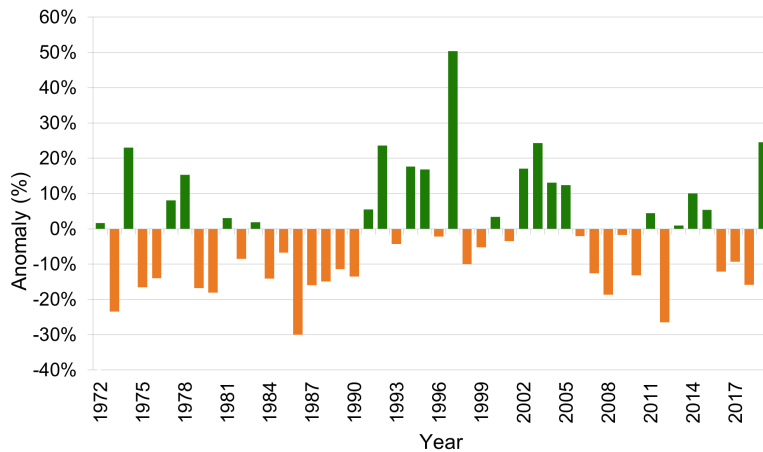


FIGURE 4.34 – Evolution temporelle du cumul annuel de précipitations (mm) observé sur l'aéroport International des Seychelles (île de Mahé) depuis 1972. Les anomalies sont calculées relativement à la moyenne sur la période historique 1981-2010.

Pour la pluviométrie, on compte 14 postes de référence sur Mahé et 1 sur Praslin qui peut représenter le climat de la Digue également, puisque les deux îles sont très proches et possèdent la même climatologie. Dans les analyses climatiques qui suivront, les résultats seront présentés pour Mahé et Praslin mais ceux de Praslin pourront être dupliqués à La Digue (même point de grille dans le modèle de climat utilisé). Pour la température il n'existe qu'un seul poste de référence, situé à l'aéroport International des Seychelles (île de Mahé), avec des relevés fiables depuis 1972. L'installation récente de stations automatiques sur Mahé devrait permettre d'augmenter la densité du réseau d'observations de température dans les années à venir.

4.5.3 Normales spatialisées de précipitations

Pour les précipitations, on procède comme sur La Réunion. On spatialise par krigeage simple les 14 pluviomètres de l'île de Mahé. Le jeu de données complet pour les besoins du projet BRIO couvre la période 1981-2014. On interpole les observations de précipitations sur une grille régulière à 2 km de résolution, correspondant à la distance moyenne effective entre 2 stations. La normale climatique annuelle de précipitations de l'île de Mahé sur la période 1981-2010 est illustrée en points de grille sur la figure 4.36.

4.5.4 Zonage climatique

Une analyse en composantes principales des postes a permis d'aboutir à un zonage pluviométrique en 4 régions pour l'île principale de Mahé (Fig. 4.37). La zone 1 représente l'Anse Forbans, la zone 2 le Niol, la zone 3 Belombre et la zone 4 La Gogue. L'analyse en composantes principales est détaillée dans le rapport de l'expert Seychellois.

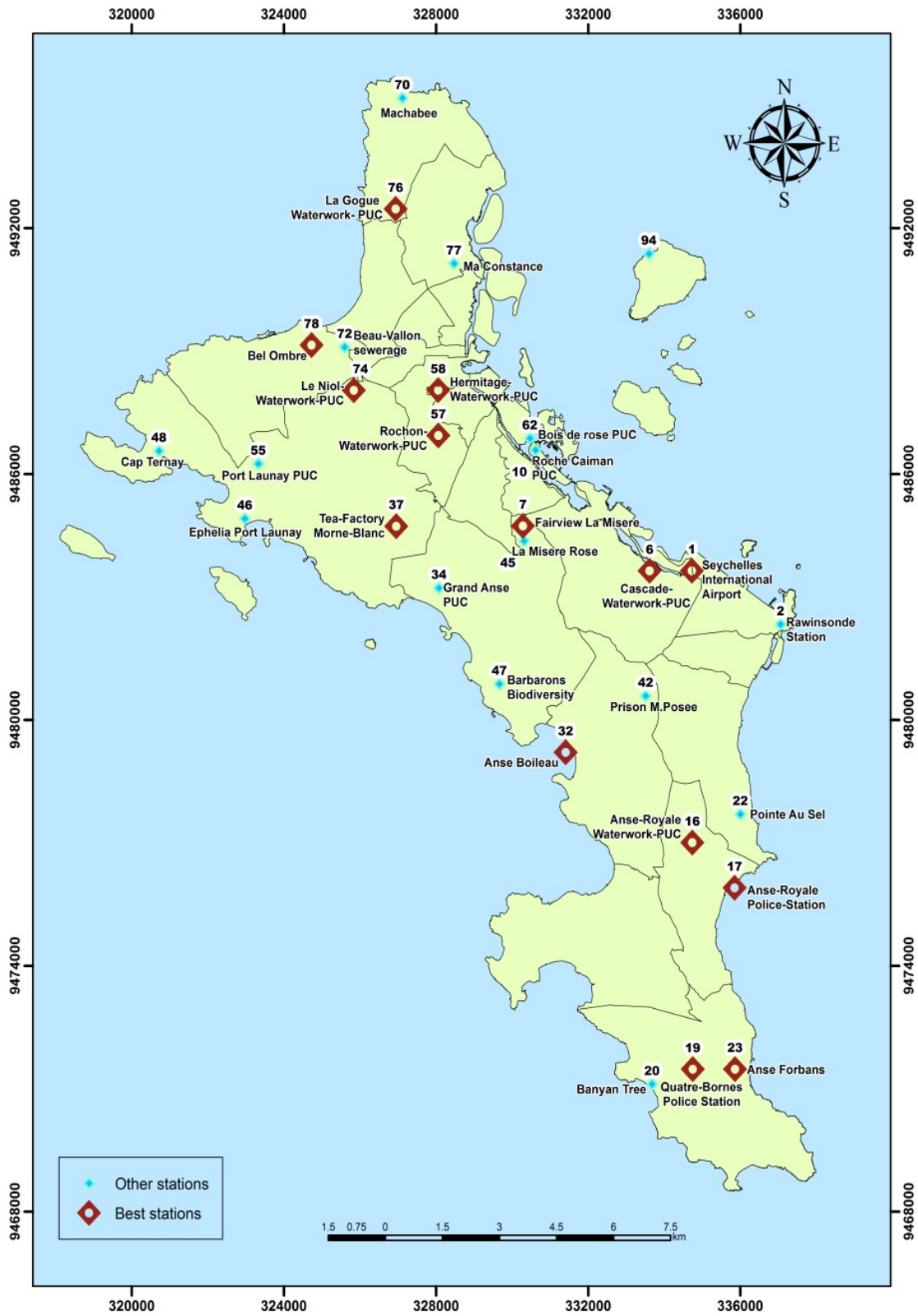


FIGURE 4.35 – Réseau de stations météorologiques de l'île principale des Seychelles, Mahé.

4.5. Données de référence sur l'archipel des Seychelles

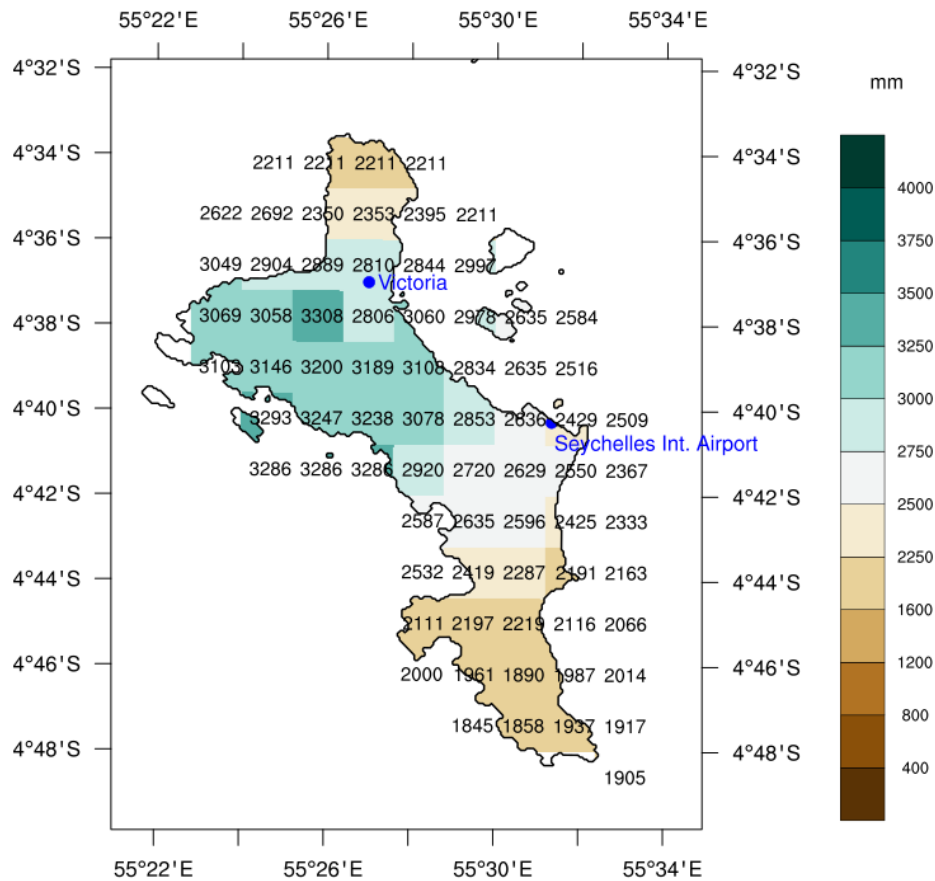


FIGURE 4.36 – Cumul annuel moyen de précipitations (mm) observé sur l'île principale des Seychelles, Mahé, en points de grille à 2 km de résolution durant la période historique 1981-2010.

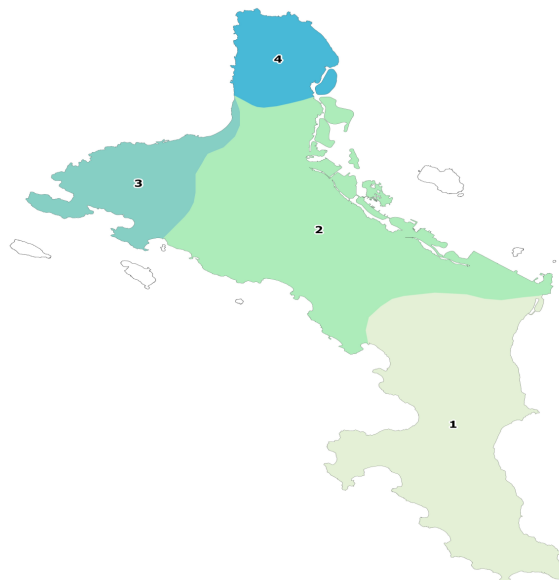


FIGURE 4.37 – Classification de l'île principale des Seychelles, Mahé, en 4 zones climatiques pour la variable précipitations.

Chapitre 5

Correction des biais du modèle sur les îles

SOMMAIRE

5.1 CORRECTION DE BIAIS : MÉTHODES ET EXPLICATIONS	97
5.1.1 Méthode Delta (ou méthode de perturbation)	97
5.1.2 Correction de biais	97
5.1.3 Correction de biais quantile-quantile	98
5.1.4 Spécificités des méthodes de correction de biais	100
5.1.5 Correction de biais CDF-t	100
5.2 CORRECTION DES BIAIS SUR LA PÉRIODE HISTORIQUE ET FUTURE	102
5.2.1 Correction des biais sur Madagascar - période historique	102
5.2.2 Correction des biais sur Madagascar - période future	102
5.2.3 Correction des biais sur La Réunion - période historique	107
5.2.4 Correction des biais sur Maurice - période historique	109
5.2.5 Correction des biais sur Rodrigues - période historique	110
5.2.6 Correction des biais sur Agalega - période historique	111
5.2.7 Correction des biais sur Saint Brandon - période historique	112
5.2.8 Correction des biais sur l'archipel des Comores - période historique	113
5.2.9 Correction des biais sur l'archipel des Comores - période future	116
5.2.10 Correction des biais sur l'archipel des Seychelles - période historique	119
5.2.11 Correction des biais sur l'archipel des Seychelles - période future	121
5.2.12 Correction des biais d'intensité cyclonique	122

CE chapitre aborde la notion de correction de biais du modèle régional **ALADIN** sur l'ensemble des îles des pays partenaires qui présentent des jeux de données climatiques sur la période passée. Les corrections seront calibrées sur la période de référence 1981-2010 puis appliquées aux projections 2015-2100 pour les trois scénarios climatiques **SSP1-2.6**, **SSP2-4.5** et **SSP5-8.5**. Ces corrections de biais permettent de faire de la descente d'échelle en passant de la résolution d'**ALADIN** à celle des produits spatialisés de référence. Suivant les pays ou la variable climatique, la correction de biais pourra aussi avoir lieu en points de station. Les biais d'intensité cyclonique seront également corrigés.

5.1 CORRECTION DE BIAIS : MÉTHODES ET EXPLICATIONS

Le biais d'un modèle de climat n'est généralement pas un problème lorsque l'on souhaite simplement calculer les changements relatifs entre un horizon futur et la période de référence simulés par le modèle en question dans un scénario d'émission donné. En effet, on suppose généralement que le biais du modèle est identique pour les deux périodes et donc qu'il disparaît lorsqu'on calcule le changement relatif, c'est-à-dire un delta, entre la période de référence simulée et le futur simulé.

Toutefois, les sorties brutes (sans calcul de delta) – historiques et futures – d'un modèle de climat ne peuvent être utilisées directement pour des études d'impact à l'échelle locale. Ceci en raison de deux problèmes principaux : elles sont biaisées par rapport aux observations et leur échelle spatiale est trop grossière pour certaines applications, comme expliqué en section 2.1.4. Pour les précipitations, les modèles simulent la quantité totale de précipitations dans l'atmosphère, qui tombe sur une cellule entière de la grille, tandis que l'observation mesure seulement la quantité qui tombe sur le capteur à un emplacement précis de station. Les sorties brutes des modèles climatiques doivent donc être débiaisées à l'aide de jeux de données observées de référence pour le climat passé, présentés en section 4. Si la grille des données de référence est plus fine que celle du modèle, cela permet d'affiner la résolution des données simulées.

Deux techniques de post-traitement existent pour ajuster les données d'un modèle de climat : (a) soit une perturbation des séries observées (méthode Delta), (b) soit une correction de biais des simulations historiques ; la technique de correction de biais possédant elle-même diverses variantes. Le choix de l'approche parmi ces deux possibilités a été guidé par la qualité du résultat. Nous reprendrons les explications de [Charron \(2016\)](#).

5.1.1 Méthode Delta (ou méthode de perturbation)

Cette méthode consiste à perturber les données climatiques observées en fonction du changement climatique simulé par le modèle. Ceci permet d'utiliser directement les observations (qui ne sont pas biaisées) et de les modifier par une correction qui prend en compte le changement climatique. Le changement relatif simulé par le modèle est d'abord calculé entre la période de référence et future (Fig. 5.1(a) haut) et ce changement (delta) est ensuite appliqué à la série temporelle observée (Fig. 5.1(a) bas). Cette méthode peut se faire en utilisant deux approches : en calculant un changement moyen sur l'ensemble de la distribution des observations ou en utilisant les quantiles de la distribution. Cette dernière permet d'utiliser un facteur de correction différent pour les queues de distribution, de sorte qu'il est possible d'en changer les extrémités différemment du reste de la distribution. Un point important ici est que cette technique est appliquée à des horizons temporels spécifiques tels que les périodes de 30 ans, et non pas à l'ensemble de la série temporelle.

5.1.2 Correction de biais

Les méthodes de correction de biais sont basées sur la comparaison entre les données simulées et observées sur une période passée. L'écart entre les deux est considéré comme le biais ou l'erreur du modèle. La correction de biais va permettre de rendre la distribution statistique des données quotidiennes du modèle identique à la distribution observée en chaque point. Cette méthode utilise un réglage ou une correction de la série temporelle simulée au complet (périodes de référence et future) au moyen d'un facteur de biais ou de correction, tel que les données de la période de référence simulée et les observations deviennent plus équivalentes. Le facteur de correction est premièrement calculé à partir d'une comparaison entre la période de référence simulée et les données observées sur la même période, par exemple 1961-1990 (Fig. 5.1(b) haut). La correction est ensuite appliquée sur

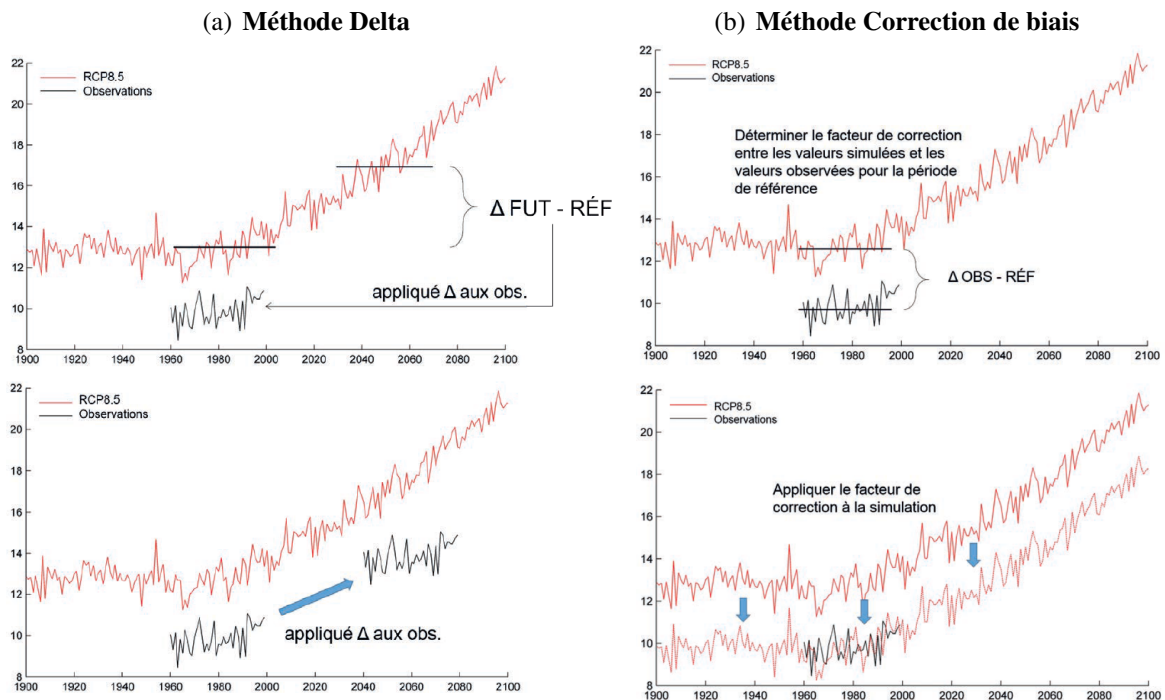


FIGURE 5.1 – Exemples des méthodes de post-traitement par (a) delta et (b) correction de biais. (a) Le changement relatif entre la période de référence et la période future est calculé (haut) et appliqué à la série temporelle observée (bas). (b) Le changement relatif entre les valeurs de référence et les observations est calculé (haut) et ce biais est retiré de la série temporelle simulée complète (bas).

la série temporelle complète (Fig. 5.1(b) bas). Tout comme la méthode de delta, cette technique peut être basée sur une correction moyenne ou sur les quantiles. Par contre, contrairement à la méthode de perturbation, où la correction est appliquée sur un horizon temporel donné, le biais ici peut être retiré de la série temporelle complète.

Nous allons décrire à présent deux techniques de calibration statistique que nous avons utilisées comme méthodes de correction de biais : quantile-quantile et CDF-t, qui est une version améliorée de cette dernière.

5.1.3 Correction de biais quantile-quantile

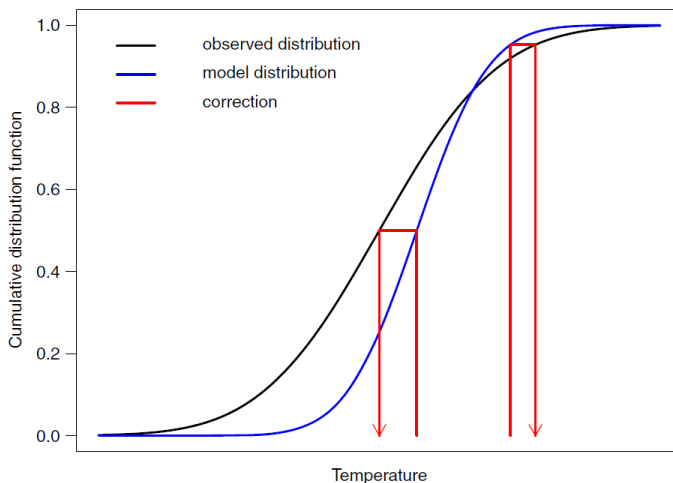


FIGURE 5.2 – Schéma des corrections de biais par quantile quantile. La valeur simulée, qui est un quantile de la distribution de la simulation (bleue), est remplacée par la valeur équivalente au même quantile dans la distribution observée (noire). Source : figure 2 de Maraun (2016).

La méthode de correction quantile-quantile, ou quantile mapping, est reconnue comme une méthode plus robuste que la méthode de perturbation Delta (Déqué et al. 2007). Elle consiste à estimer la correction en fonction des quantiles de la distribution de probabilité de la variable en question. Lors de la phase de calage, la fonction de densité de probabilité cumulée (CDF) d'une variable de la simulation historique est calée sur celle des observations, comme le montre la figure 5.2 (ici l'exemple porte sur la température). Plus précisément, les fonctions de correction ramènent les quantiles des données simulées par le modèle pour le temps présent vers les quantiles observés sur une période concomitante. Une fois estimée, la fonction de correction est appliquée à la variable issue des simulations de climat futur (Fig. 5.3) qui peut finalement être prise en compte dans des études d'impact. La correction peut avoir lieu en points stations ou en points de grille.

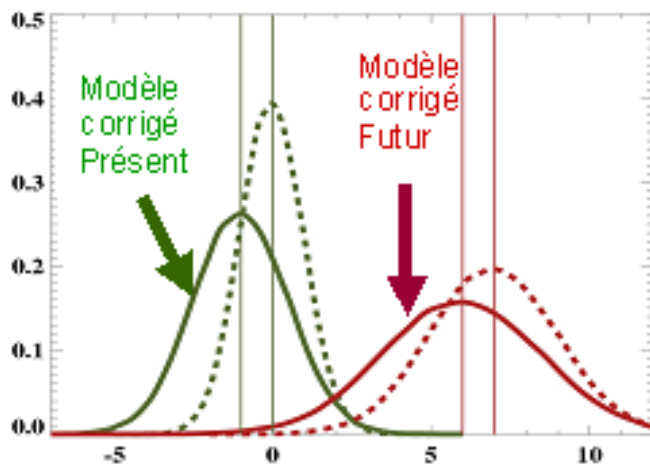


FIGURE 5.3 – Illustration des distributions de probabilité (PDF) historique (en vert) et future (en rouge) de la température minimale simulée par un modèle en France avant (pointillés) et après (traits continus) correction de ses biais sur une station en métropole. En abscisse figurent les valeurs en température et en ordonnée les probabilités ou quantiles. Source : [DRIAS http://www.drias-climat.fr/accompagnement/sections/63](http://www.drias-climat.fr/accompagnement/sections/63).

L'opération s'effectue en quatre étapes, que ce soit pour la variable précipitations ou température :

1. Si l'on travaille en points de grille, on projette (par interpolation) les données simulées historiques sur la même grille que celle des données d'observation de référence pour une période commune (ici 1981-2010).
2. Pour chaque point de la grille d'observation, on calcule les fonctions de densité de probabilité cumulée (CDF) des deux séries temporelles (simulée et observée). La fonction de densité de probabilité cumulée (CDF) d'une série revient à calculer l'ordre de quantile de chaque valeur de la distribution. Dans le passé on utilisait un découpage de la distribution en centiles (pas de 1%) mais cela est désormais fait de façon continue, avec un traitement néanmoins spécifique pour les queues de distribution.
3. Pour chaque point de la grille d'observation, on calcule le coefficient de correction $Corr_k$ à chaque ordre k de quantile ($0 \leq k \leq 1$), selon les formules suivantes :
 - Pour la variable précipitations : $Corr_k(i) = \frac{Q_{k_{OBS}}(i)}{Q_{k_{MOD}}(i)}$ si $Q_{k_{MOD}}(i) \neq 0$, et $Corr_k(i) = 0$ si $Q_{k_{MOD}}(i) < 0.1$ (les journées de précipitations inférieures à 0.1 mm dans le modèle sont ainsi considérées comme des journées non pluvieuses).
 - Pour la variable température : $Corr_k(i) = Q_{k_{OBS}}(i) - Q_{k_{MOD}}(i)$.

Où $Q_{k_{MOD}}(i)$ est la valeur au point i du quantile modèle d'ordre k et $Q_{k_{OBS}}(i)$ la valeur du quantile d'observation correspondant.

4. La fonction de transfert consiste à appliquer les coefficients de correction ainsi calculés aux séries quotidiennes simulées par le modèle (historique et future). Pour le futur, on cherche à

quel ordre k correspond la valeur du jour de la projection dans la distribution **CDF** passée puis on corrige cette valeur avec le coefficient $Corr_k(i)$. Les variables précipitations et température corrigées du jour j au point i sont alors données par les formules suivantes :

- Pour la variable précipitations : $RR_{corr}(i, j) = RR(i, j) \times Corr_k(i)$.
- Pour la variable température : $tas_{corr}(i, j) = RR(i, j) + Corr_k(i)$.

On fixe l'ordre de quantile à 0.999 et 0.001 pour les valeurs extrêmes d'ordres de quantile, i.e. au-delà du dernier quantile estimé et en deçà du premier, on applique une correction constante estimée sur le quantile extrême correspondant (0.999 ou 0.001).

Cette méthode permet de corriger les plus gros défauts des modèles notamment en termes d'intensité des phénomènes extrêmes ou de fréquence de jours pluvieux.

5.1.4 Spécificités des méthodes de correction de biais

- La méthode repose sur une hypothèse forte selon laquelle la fonction de transfert calibrée sur une période du passé reste valable dans le futur, i.e. les erreurs du modèle pour la correction quantile-quantile sont considérées invariantes entre le futur et le passé. Cette hypothèse de stationnarité n'est pas démontrable.
- On considère que le modèle est capable de prédire la distribution des variables climatiques mais pas la valeur exacte de chaque quantile et qu'il ne simule pas une variable physique mais un rang dans sa propre échelle de valeurs (Déqué et al. 2007).
- Tous les traitements sont faits point de grille par point de grille ou en points stations.
- Dans sa version de base, la méthode corrige chaque variable (température, précipitations...) indépendamment des autres. L'interdépendance entre variables n'est donc pas préservée.
- C'est une méthode qui est adaptée pour l'étude des extrêmes, pour évaluer les fréquences de dépassements de seuils en certains points, car la correction à apporter à la valeur simulée tient compte de sa fréquence d'occurrence (événement plus ou moins rare).
- En outre cette technique a l'avantage de présenter une bonne cohérence temporelle permettant, par exemple, l'étude de périodes de sécheresse ou de nombre de jours consécutifs de fortes précipitations ou de fortes/faibles températures. Toutefois, elle ne permet pas de corriger les défauts que peuvent présenter les simulations en termes de variabilité aux pas de temps longs (variabilité interannuelle par exemple) comme celles d'ALADIN.

Dans sa version de base, la méthode corrige chaque variable (température, précipitation...) indépendamment des autres. Cependant, le biais de précipitations n'est pas forcément le même les jours avec vent et sans vent, avec vent de secteur Est ou de secteur Ouest. Aussi, de même qu'on applique une correction différente chaque saison, on peut définir des familles de temps local à partir d'une classification des variables météorologiques de chaque station. Pour chaque famille, on utilise une correction différente. Nous procéderons ainsi en section 6.7 pour concevoir un prototype de descente d'échelle statistique des précipitations en points de grille sur La Réunion.

5.1.5 Correction de biais CDF-t

La méthode **CDF-t** pour "Cumulative Distribution Function - Transform" (Michelangeli et al. 2009, Vrac et al. 2012) a été développée par l'institut IPSL. Elle permet de générer les fonctions de répartition d'une variable climatique locale en climat futur à partir des fonctions de répartition de cette même variable observée dans le climat de référence et estimée par les simulations climatiques pour les périodes historique et future. C'est une version améliorée de la méthode quantile quantile puisqu'elle

tient compte des évolutions dans le temps de la fonction de distribution simulée de la variable à corriger, ce qui est indispensable dans le cadre du réchauffement climatique pour une variable comme la température (translation des courbes PDF vers des valeurs plus élevées) ou pour tenir compte de l'augmentation des valeurs extrêmes de précipitations. Le calcul des coefficients de correction au point de grille i ($Corr_k(i)$) sur la période passée est identique à la méthode quantile-quantile détaillée ci-dessus. Mais pour appliquer un coefficient de correction dans le futur, on cherche à quel ordre k correspond la valeur du jour de la projection dans la distribution CDF future (et non passée) puis on corrige cette valeur avec le coefficient $Corr_k(i)$.

L'algorithme de correction de biais CDF-t a ainsi été retenu pour corriger les séries chronologiques quotidiennes parce qu'il préserve explicitement les changements relatifs dans les quantiles du modèle, tout comme un autre algorithme nommé "quantile delta mapping" (Cannon et al. 2015). Les corrections de biais ont été appliquées en points stations pour les plus petites îles comme les Comores, Mayotte, Agalega, St Brandon et Praslin, ou sur l'aéroport de Mahé (unique station de température de référence des Seychelles). Pour calculer les facteurs de correction, nous avons utilisé des fenêtres glissantes de 3 mois centrées sur le mois à corriger, avec une profondeur de 30 ans de données (période glissante dans le futur). C'est-à-dire que pour corriger les précipitations quotidiennes sur les journées de décembre comprises entre les années 1981 à 2014, les coefficients $Corr_k(i)$ en chaque point de grille i ont été calculés à partir de (i) la distribution CDF des données quotidiennes de précipitations observées sur les mois de novembre, décembre et janvier de la période 1981-2010, et (ii) la distribution CDF des données quotidiennes de précipitations simulées sur les mois de novembre, décembre et janvier de la période 1981-2010. Dans le futur, on procède par périodes glissantes de 30 ans à partir de 2030 et jusqu'à 2085. Par exemple, pour corriger les précipitations quotidiennes sur les journées de mars 2060 au point de grille i , on cherche à quel ordre k correspond la valeur du jour de la projection dans la distribution CDF future des données simulées sur les mois de février, mars, avril de la période 1945-2074 puis on corrige cette valeur avec le coefficient $Corr_k(i)$. Des périodes de 30 ans fixes (2015-2044 et 2071-2100) sont utilisées pour corriger les données des années antérieures à 2030 ou postérieures à 2085. Cette méthode permet de prendre en compte l'évolution temporelle des fonctions de distribution simulées par le modèle entre période future et historique et ainsi de mieux corriger les queues de distribution.

5.2 CORRECTION DES BIAIS SUR LA PÉRIODE HISTORIQUE ET FUTURE

Les corrections de biais du modèle **ALADIN** sur la période historique 1981-2014 sont calibrées sur la période de référence des jeux de données (1981-2014 pour les précipitations, parfois moins pour les températures en fonction des pays) puis appliquées aux projections 2015-2100 sur chacun des scénarios. Lorsque l'on trace la climatologie, on se focalise généralement sur la période 1981-2010, parfois moins pour les températures (si les données de référence ne commencent qu'en 2000 comme à La Réunion).

5.2.1 Correction des biais sur Madagascar - période historique

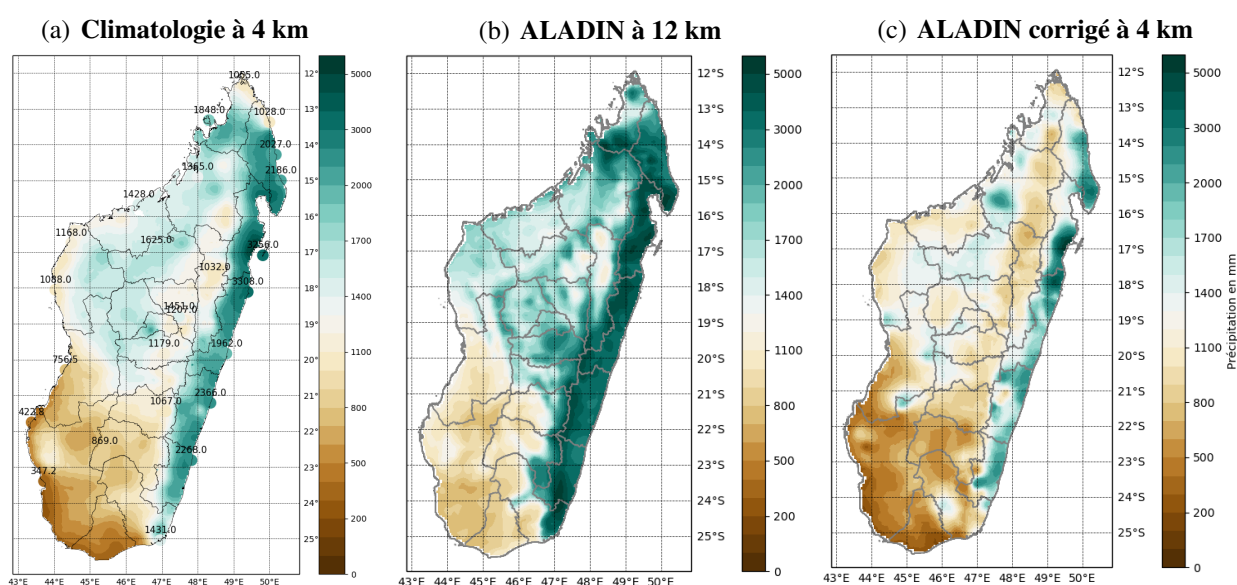


FIGURE 5.4 – Cumul annuel moyen de précipitations (mm) sur Madagascar sur la période historique 1981-2010 dans (a) le produit de données combinées de référence (*Rija 2019*) à 4 km de résolution, (b) la sortie brute du modèle régional **ALADIN** à 12 km de résolution, et (c) le modèle **ALADIN** après correction des biais à la résolution de 4 km. Les nombres superposés sur le graphe (a) indiquent les mesures relevées sur les 25 stations synoptiques de référence.

On note la bonne représentation spatiale des précipitations dans **ALADIN** avec une surestimation maximale de 4 m (côte Est) avant correction des biais (Fig. 5.4(b))

Les anomalies sont relativement faibles après correction des biais ce qui montre une très bonne correction spatiale des précipitations sur Madagascar avec une sous-estimation maximale de 300 mm sur la côte Est (Fig. 5.5(c)).

On note la bonne représentation spatiale globale des températures dans **ALADIN** mais une nette sous-estimation atteignant -6°C en altitude avant correction des biais (Fig. 5.6(b)). Après correction des biais, les anomalies par rapport à la climatologie de référence sont relativement faibles (Fig. 5.6(d)) et montrent une très bonne correction spatiale des températures d'**ALADIN** sur Madagascar avec une sous-estimation maximale de -0.6°C .

5.2.2 Correction des biais sur Madagascar - période future

Les figures 5.7 et 5.8 montrent l'évolution temporelle des précipitations annuelles et des températures moyennes annuelles de chaque zone climatique de Madagascar sur la période historique

5.2. Correction des biais sur la période historique et future

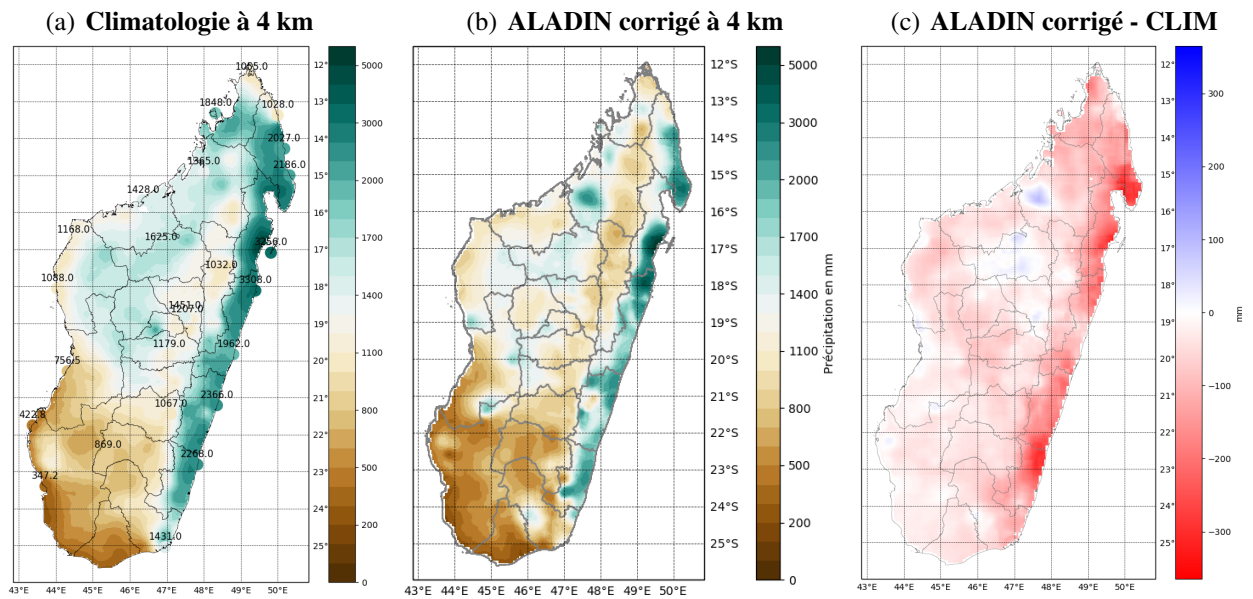


FIGURE 5.5 – Cumul annuel moyen de précipitations (mm) sur Madagascar sur la période historique 1981-2010 dans (a) le produit de données combinées de référence (Rija 2019) à 4 km de résolution, et (b) le modèle régional ALADIN après correction des biais à la résolution de 4 km; (c) illustre la différence entre (b) et (a), c'est-à-dire le biais résiduel après correction.

(1960-2015) et future (2015-2100) pour les trois scénarios climatiques. Les corrections de biais permettent de corriger les surestimations de précipitations d'ALADIN (près de 1000 mm sur l'extrême nord, Fig. 5.7(d)) et les sous-estimations de températures moyennes (1°C à 4°C selon les zones).

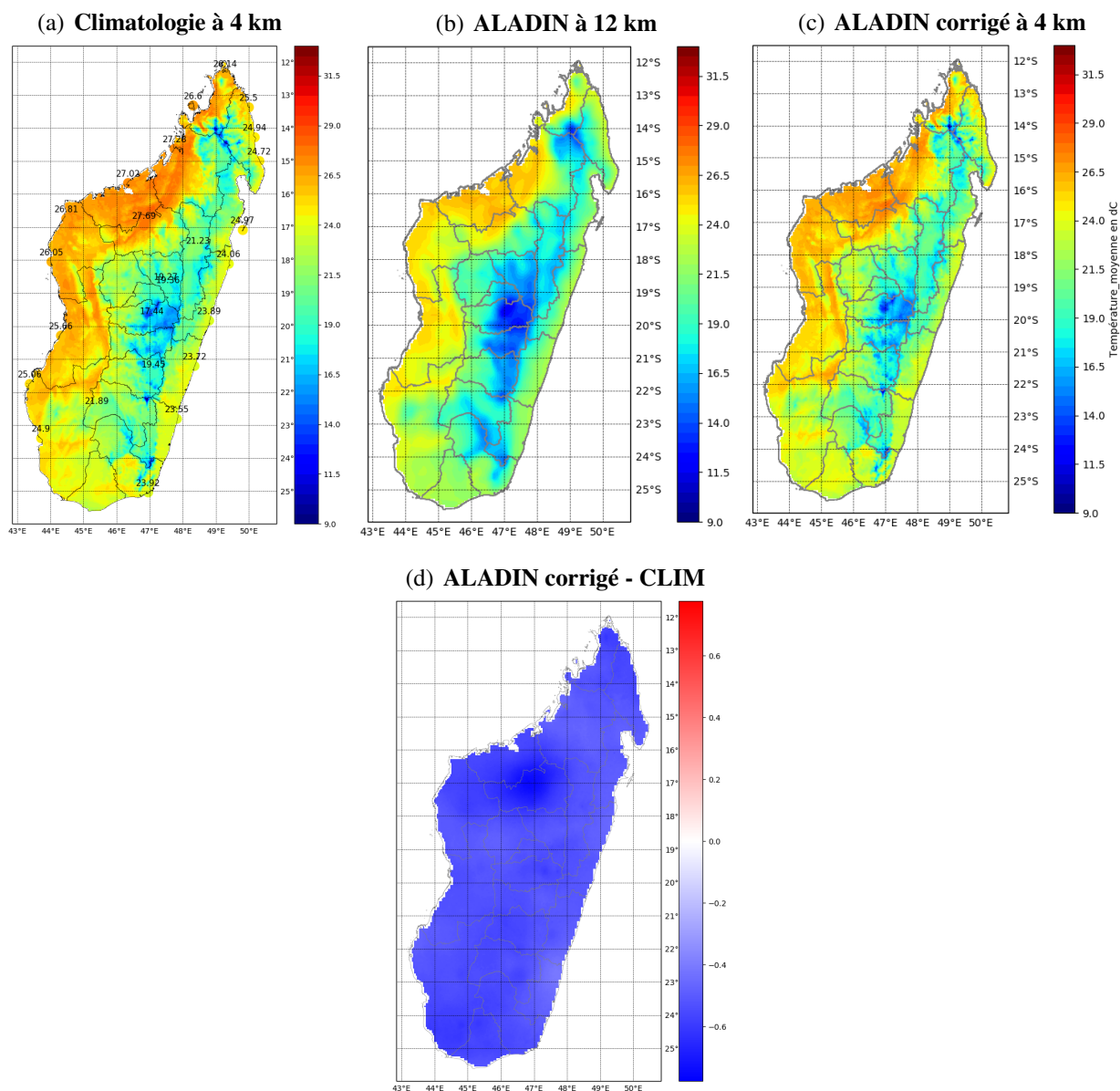


FIGURE 5.6 – Température moyenne annuelle à +2 m ($^{\circ}\text{C}$) sur Madagascar sur la période historique 1981-2010 dans (a) le produit de données combinées de référence (Rija 2019) à 4 km de résolution, (b) la sortie brute du modèle régional ALADIN à 12 km de résolution, et (c) le modèle ALADIN après correction des biais à la résolution de 4 km. (c) illustre la différence entre (c) et (a), c'est-à-dire le biais résiduel après correction (en $^{\circ}\text{C}$). Les nombres superposés sur le graphe (a) indiquent les mesures relevées sur les 25 stations synoptiques de référence.

5.2. Correction des biais sur la période historique et future



FIGURE 5.7 – Evolution temporelle sur la période 1981-2100 du cumul annuel de précipitations (mm) sur les 6 zones climatiques de Madagascar selon le modèle régional *ALADIN* pour 3 scénarios *SSP*. Les données d'observation sont en noir, l'historique modèle en gris, et les simulations du modèle pour 3 scénarios en couleurs. Les lignes continues (tiretées) indiquent les valeurs du modèle après (avant) corrections de biais.

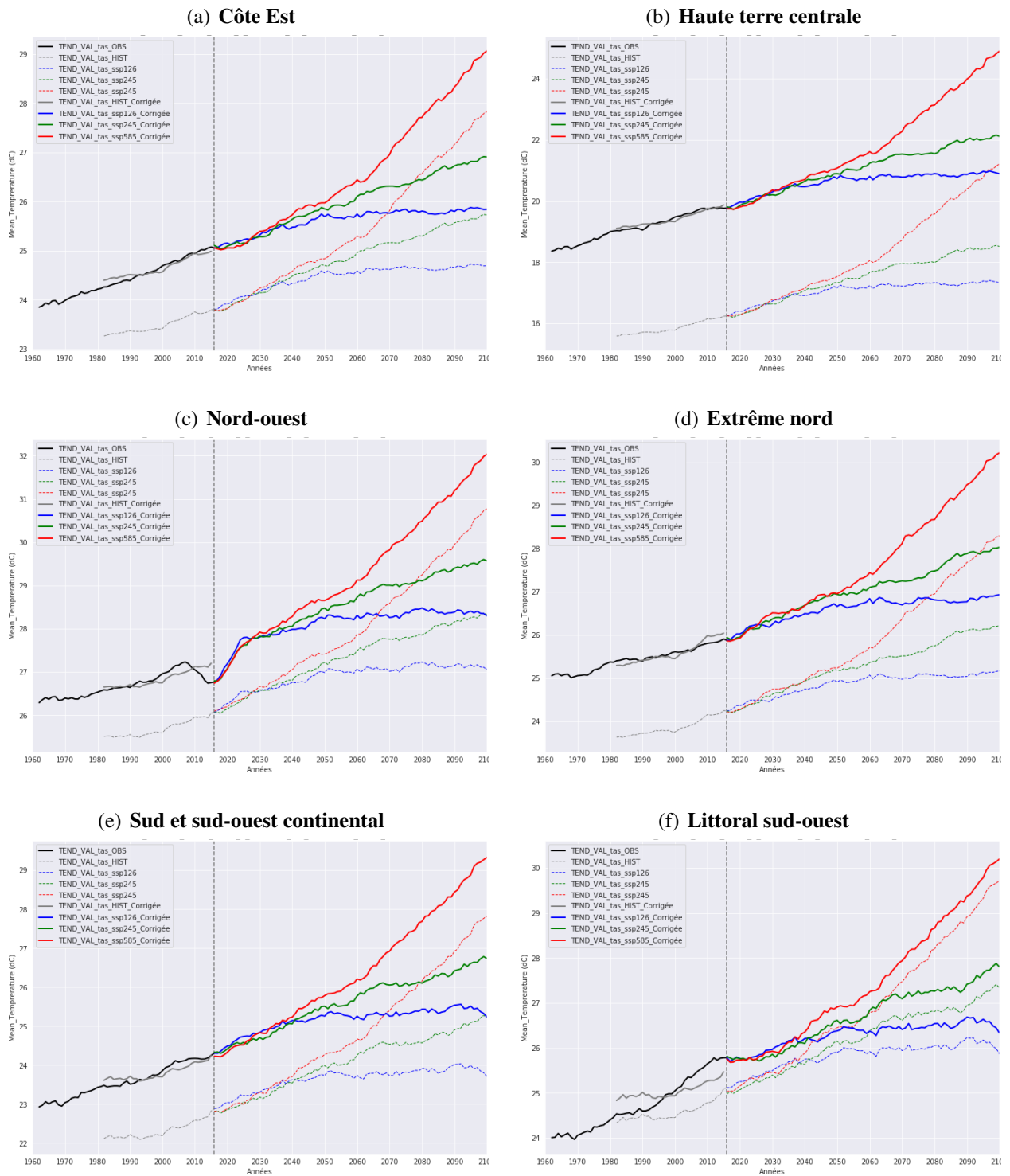


FIGURE 5.8 – Evolution temporelle sur la période 1981-2100 de la température moyenne annuelle à +2 m (°C) sur les 6 zones climatiques de Madagascar selon le modèle régional ALADIN pour 3 scénarios SSP. Les données d'observation sont en noir, l'historique modèle en gris, et les simulations du modèle pour 3 scénarios en couleurs. Les lignes continues (tiretées) indiquent les valeurs du modèle après (avant) corrections de biais.

5.2.3 Correction des biais sur La Réunion - période historique

La figure 5.9 montre des corrections de biais annuels de précipitations allant jusque 2.4 m sur La Réunion (Fig. 5.9(a) versus Fig. 5.9(c)). Grâce à la haute résolution du modèle de climat et à sa meilleure représentation du relief de La Réunion, **ALADIN** parvient à prendre en compte l'influence de l'orographie sur la distribution des précipitations : elles sont plus élevées dans les hauteurs de l'île (Fig. 5.9(a)).

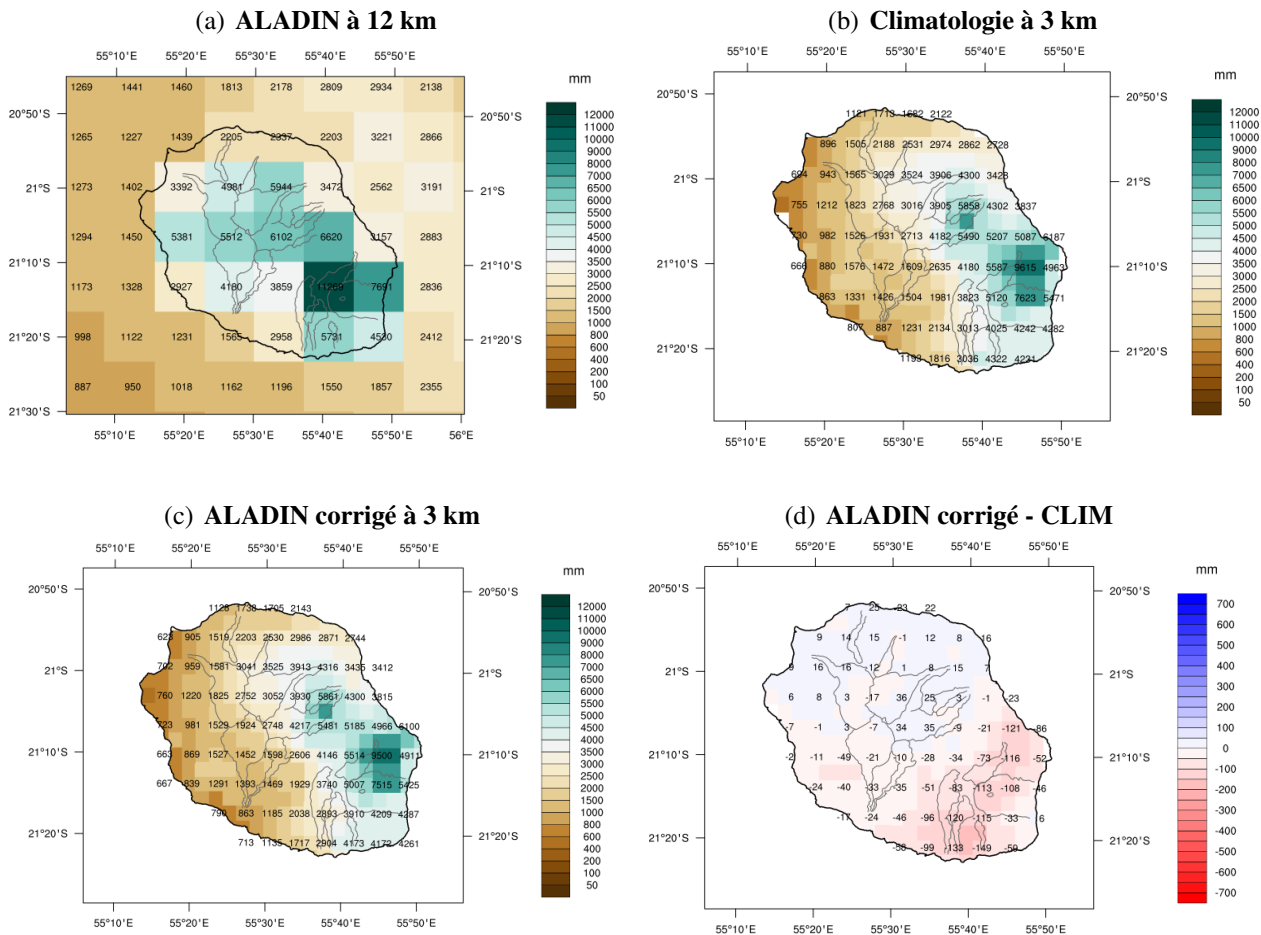


FIGURE 5.9 – Cumul annuel moyen de précipitations (mm) sur La Réunion sur la période historique 1981-2010 dans (a) la sortie brute du modèle **ALADIN** à 12 km de résolution, (b) la climatologie de référence, (c) le modèle **ALADIN** après correction des biais à la résolution de 3 km; (d) illustre la différence entre (c) et (b), c'est-à-dire le biais résiduel après correction. Les nombres superposés sur les graphes indiquent les valeurs en chaque point de grille.

ALADIN rend également compte de l'influence de l'orographie de l'île sur la distribution des températures : elles y sont minimales dans les hauteurs (Fig. 5.10(a)). Les corrections de biais annuels de températures atteignent 4°C sur La Réunion (Fig. 5.10(a) versus Fig. 5.10(c)). Après correction de biais, les résidus annuels moyens sont nuls (Fig. 5.10(d)).

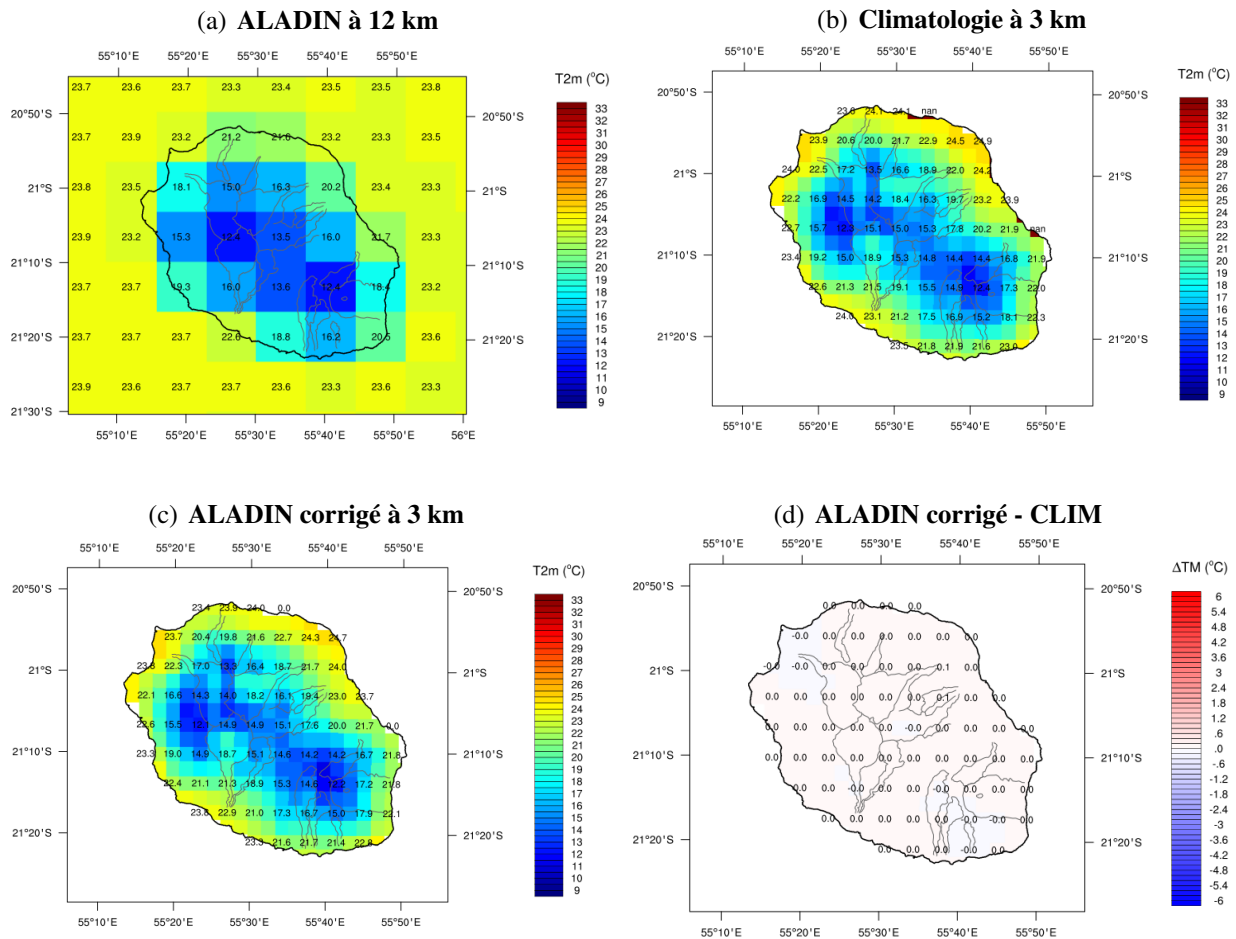


FIGURE 5.10 – Températures moyennes annuelles à +2 m (°C) sur La Réunion sur la période historique dans (a) la sortie brute du modèle ALADIN à 12 km de résolution (période 1981-2010), (b) la climatologie de référence (période 2000-2010), (c) le modèle ALADIN après correction des biais à la résolution de 3 km (période 1981-2010); (d) illustre pour la période de référence 2000-2014 la différence entre (c) et (b), c'est-à-dire le biais résiduel après correction. Les nombres superposés sur les graphes indiquent les valeurs en chaque point de grille.

5.2.4 Correction des biais sur Maurice - période historique

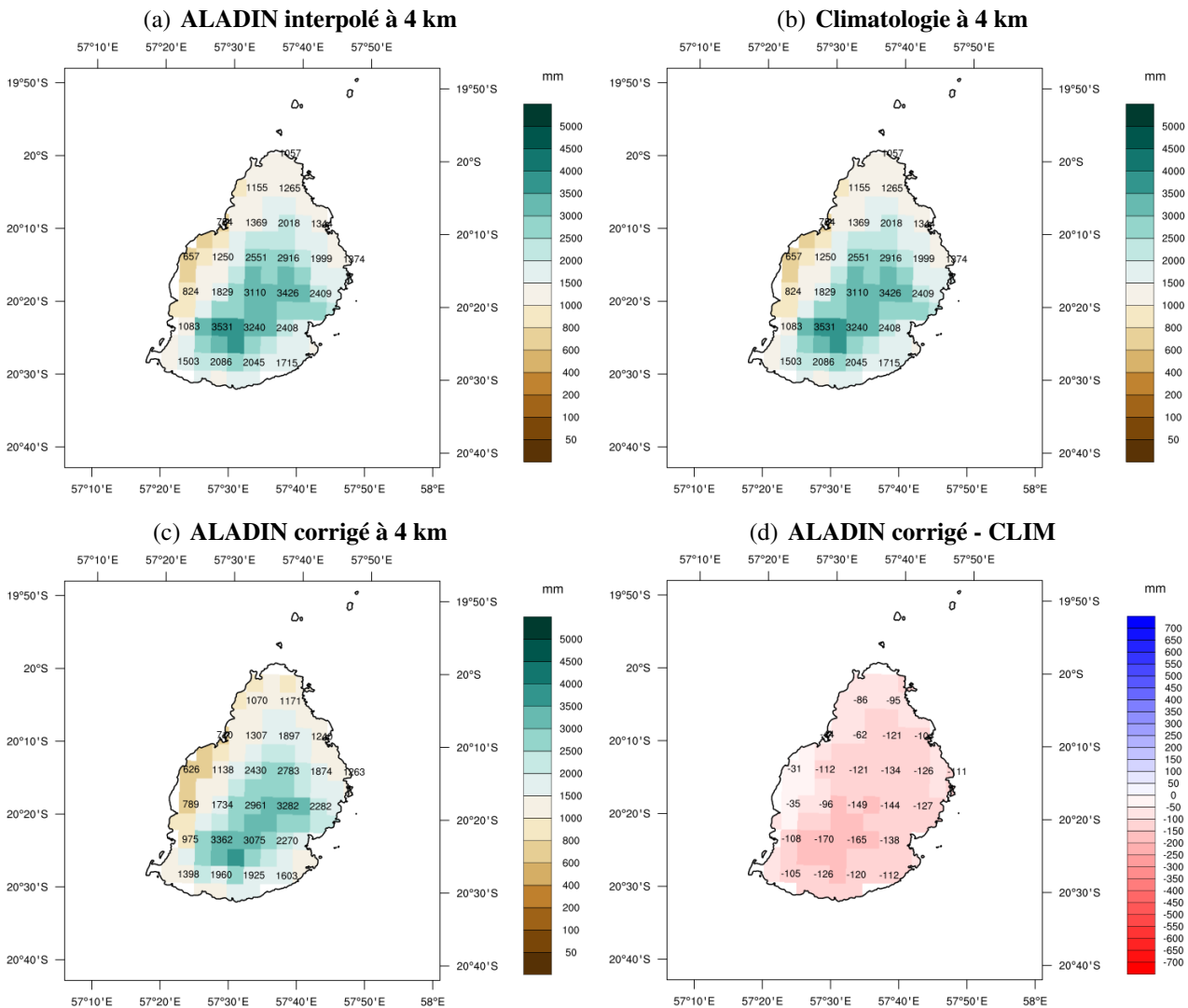


FIGURE 5.11 – Cumul annuel moyen de précipitations (mm) sur l'île Maurice sur la période historique 1981-2010 dans (a) le modèle ALADIN après interpolation à la résolution de 4 km, (b) la climatologie de référence, et (c) le modèle ALADIN après correction des biais à la résolution de 4 km; (d) illustre la différence entre (c) et (b), c'est-à-dire le biais résiduel après correction. Les nombres superposés sur les graphes indiquent les valeurs en chaque point de grille.

La figure ?? rend compte de l'étape intermédiaire d'interpolation du modèle à la grille des observations (4 km ici) avant correction des données. Comme pour Madagascar, on voit que le modèle a un biais froid de température sur l'ensemble de l'île Maurice (non illustré) et surestime les précipitations sur la côte (Fig. ??), en comparaison du jeu de référence (Figs. ??, 5.11(b)). La correction de biais permet de corriger ce défaut du modèle (vraisemblablement dû à un relief trop marqué notamment sur la côte) avec un biais résiduel faible (Fig. 5.11(d)).

5.2.5 Correction des biais sur Rodrigues - période historique

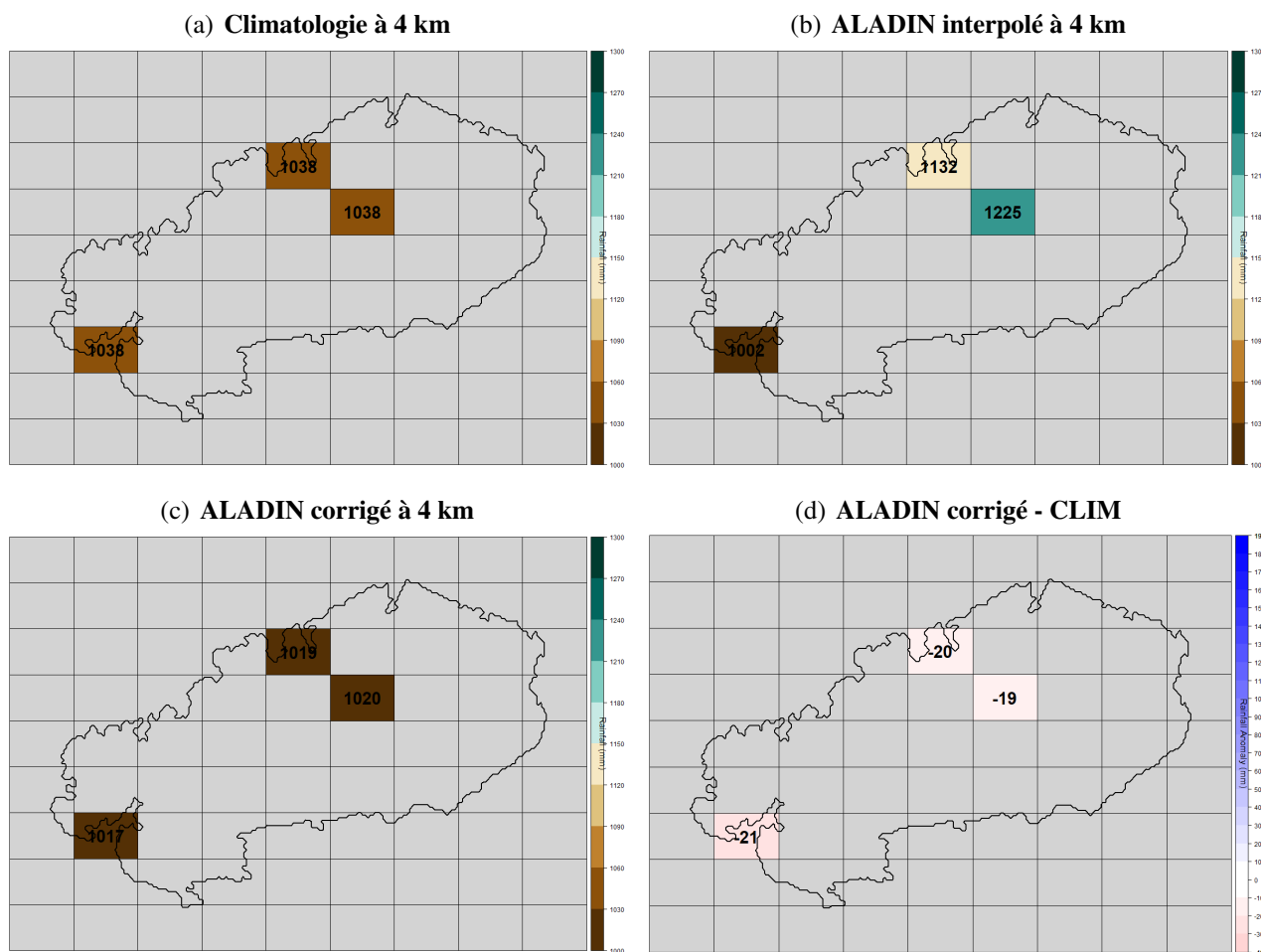


FIGURE 5.12 – Cumul annuel moyen de précipitations (mm) sur l'île Rodrigues sur la période historique 1981-2010 dans (a) la climatologie de référence, (b) le modèle ALADIN après interpolation à la résolution de 4 km, et (c) le modèle ALADIN après correction des biais à la résolution de 4 km; (d) illustre la différence entre (c) et (a), c'est-à-dire le biais résiduel après correction. Les nombres superposés sur les graphes indiquent les valeurs en chaque point de grille.

5.2.6 Correction des biais sur Agalega - période historique

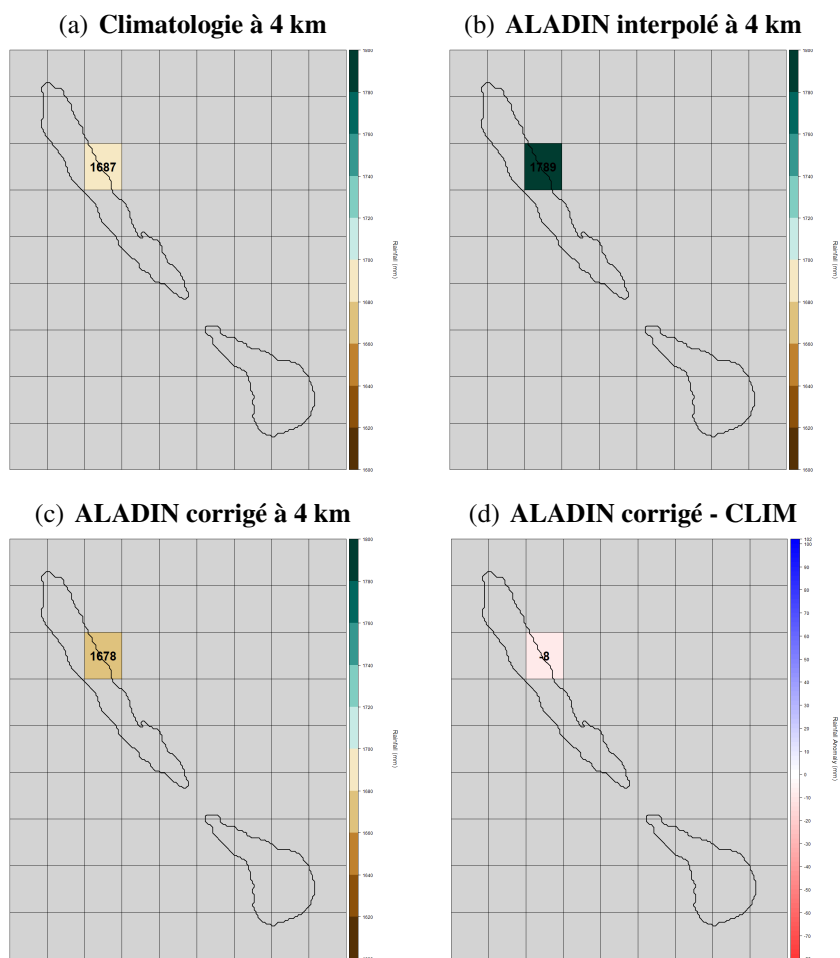


FIGURE 5.13 – Cumul annuel moyen de précipitations (mm) sur Agalega sur la période historique 1981-2010 dans (a) la climatologie de référence, (b) le modèle *ALADIN* après interpolation à la résolution de 4 km, et (c) le modèle *ALADIN* après correction des biais à la résolution de 4 km; (d) illustre la différence entre (c) et (a), c'est-à-dire le biais résiduel après correction. Les nombres superposés sur les graphes indiquent les valeurs en chaque point de grille.

5.2.7 Correction des biais sur Saint Brandon - période historique

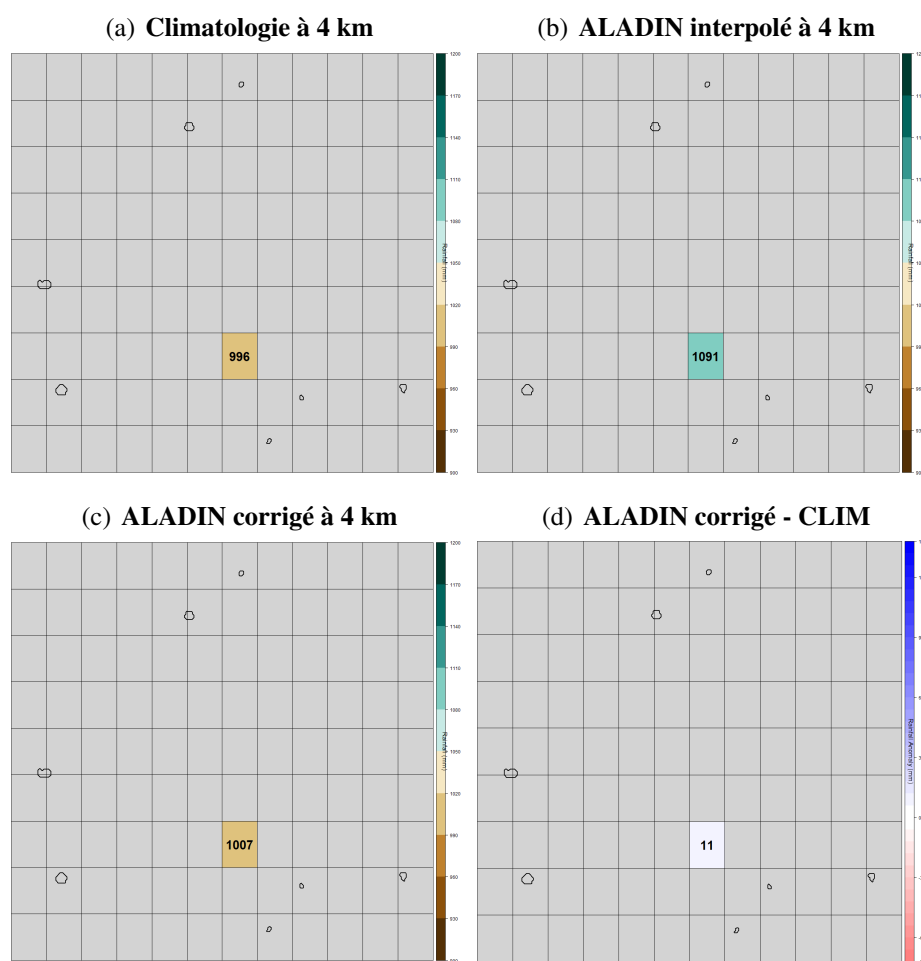


FIGURE 5.14 – Cumul annuel moyen de précipitations (mm) sur Saint Brandon sur la période historique 1981-2010 dans (a) la climatologie de référence, (b) le modèle *ALADIN* après interpolation à la résolution de 4 km, et (c) le modèle *ALADIN* après correction des biais à la résolution de 4 km; (d) illustre la différence entre (c) et (a), c'est-à-dire le biais résiduel après correction. Les nombres superposés sur les graphes indiquent les valeurs en chaque point de grille.

5.2.8 Correction des biais sur l'archipel des Comores - période historique

Sur les Comores, on note un décalage spatial des précipitations et de la température dans **ALADIN** par rapport au signal simulé en mer (Fig. 5.15). Cela provient vraisemblablement de la représentation spectrale du relief dans **ALADIN** avec un relief exagéré sur le pourtour du littoral. D'où l'idée de réaliser une correction en points de station avec un décalage spatial entre le point de grille corrigé et la station de référence (Fig. 5.16). Par exemple, avant de procéder à la correction de biais de température sur la station de Hahaya, on y affecte le signal de température du modèle lu en mer à l'ouest de la ville, car cette valeur en mer, sans orographie du modèle, représente mieux la valeur de référence de la station (Fig. 5.17(a)). Un autre exemple est donné pour la correction des biais de précipitations sur Ouani (Fig. 5.17(b)). On procède ainsi pour les 5 ou 6 (suivant le paramètre) stations de l'archipel des Comores (Fig. 5.16).

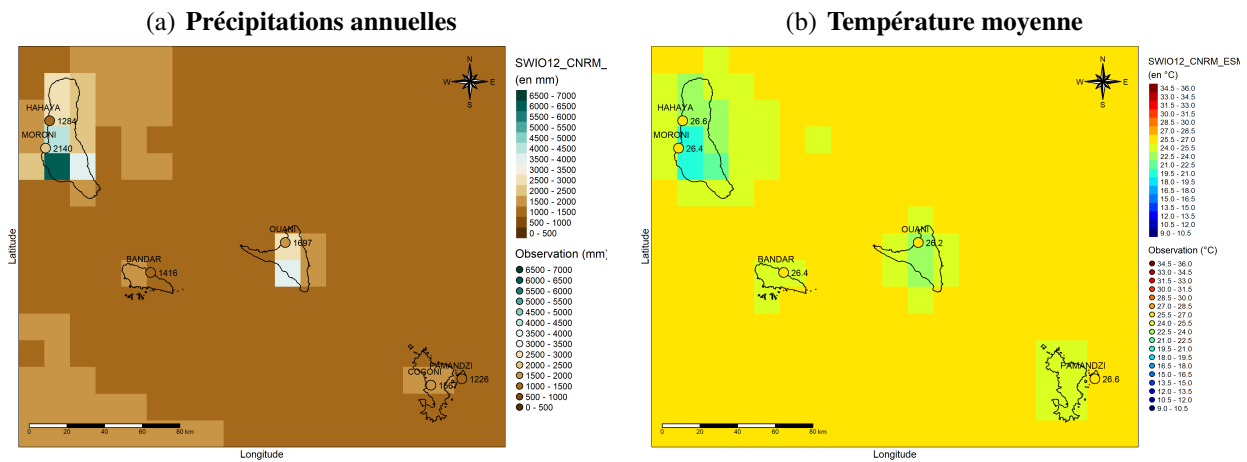


FIGURE 5.15 – (a) Cumul annuel moyen de précipitations (mm) et (b) température moyenne annuelle à +2 m (°C) sur l'archipel des Comores pendant la période historique 1981-2010 en sortie brute du modèle **ALADIN** à 12 km de résolution. Les nombres superposés sur le graphe associés aux points de couleur indiquent les mesures relevées sur les 5 ou 6 stations synoptiques de référence.

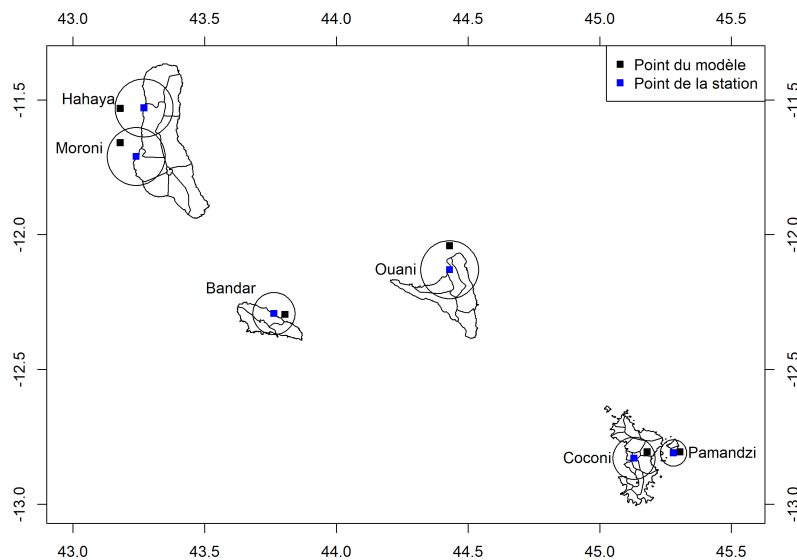


FIGURE 5.16 – Décalage spatial entre points de grille modèle et stations de référence pour la correction des biais sur l'archipel des Comores.

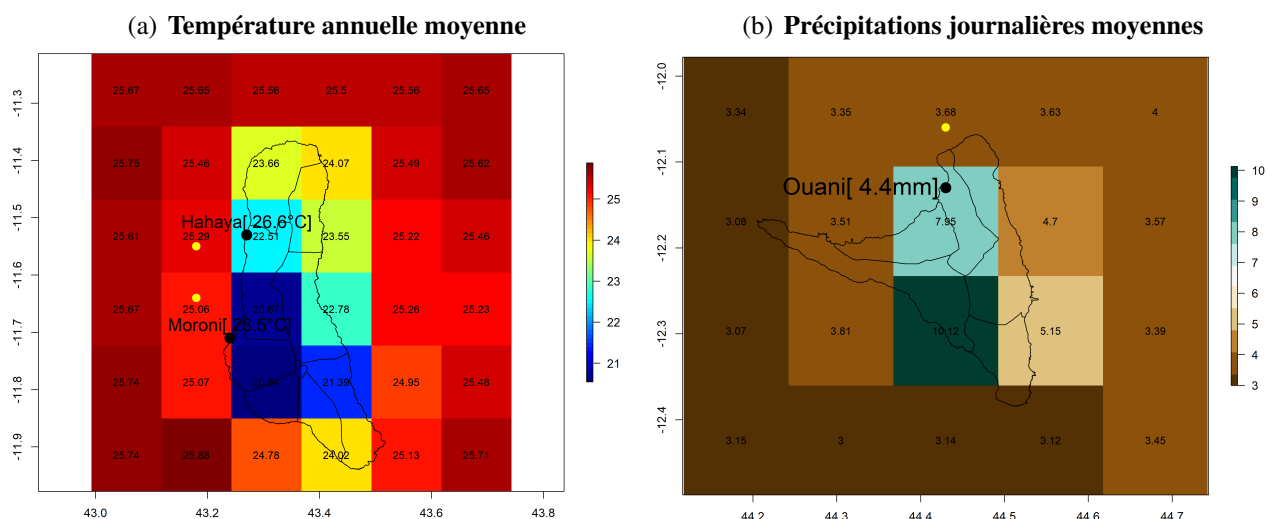


FIGURE 5.17 – Illustration de la raison du décalage spatial entre points de grille et stations de référence pour la correction des biais (a) de température moyenne annuelle à +2 m ($^{\circ}\text{C}$) sur Hahaya et Moroni et (b) de précipitations journalières moyennes sur Ouani (mm).

La figure 5.18 montre les fonctions de distribution cumulée (CDF) des précipitations pour chacune des 3 stations des Comores avant et après correction des biais du modèle. On voit très bien l'apport de la correction de biais notamment sur la station de HAHAYA où la courbe de distribution du modèle (en rouge) est ramenée vers celle des données observées (en noir), principalement pour les cumuls annuels de précipitations inférieurs à 100 mm. La plus grande correction de biais de température (presque 4°C) a lieu sur la station de Ouani (Fig. 5.19).

5.2. Correction des biais sur la période historique et future

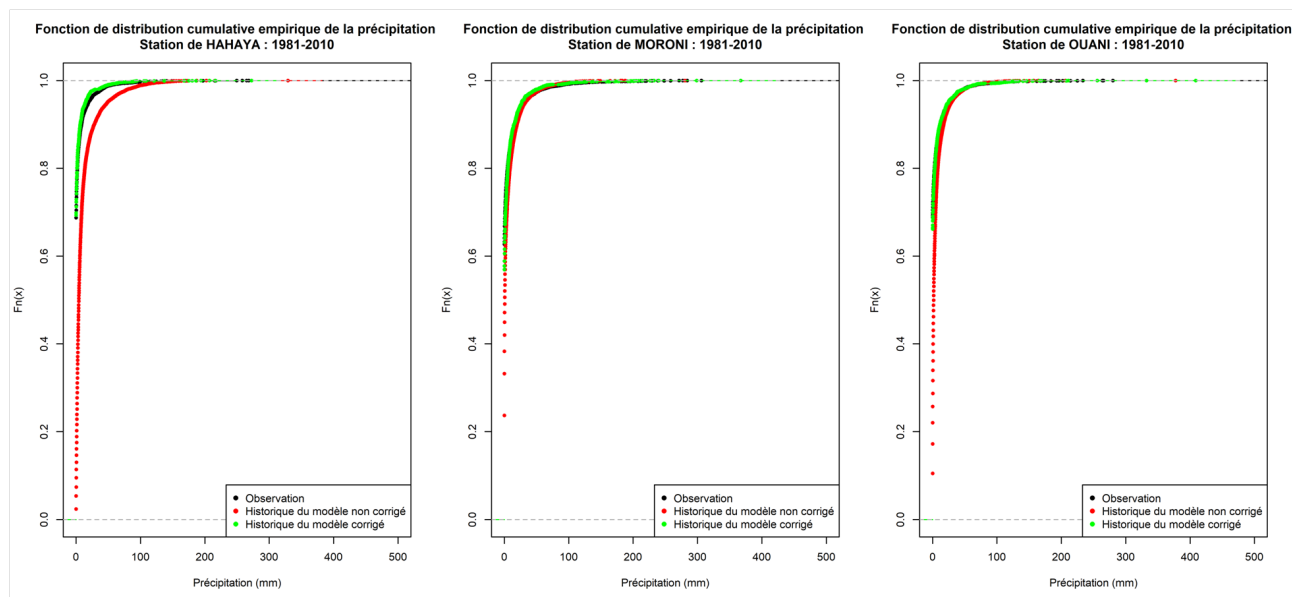


FIGURE 5.18 – Fonctions de distribution cumulée (CDF) des précipitations annuelles moyennes (mm) pour chacune des 3 stations des Comores sur la période historique 1981-2010 : comparaison entre l'observation en noir (climatologie de référence), la sortie brute du modèle ALADIN (en rouge), et le modèle ALADIN corrigé (en vert).

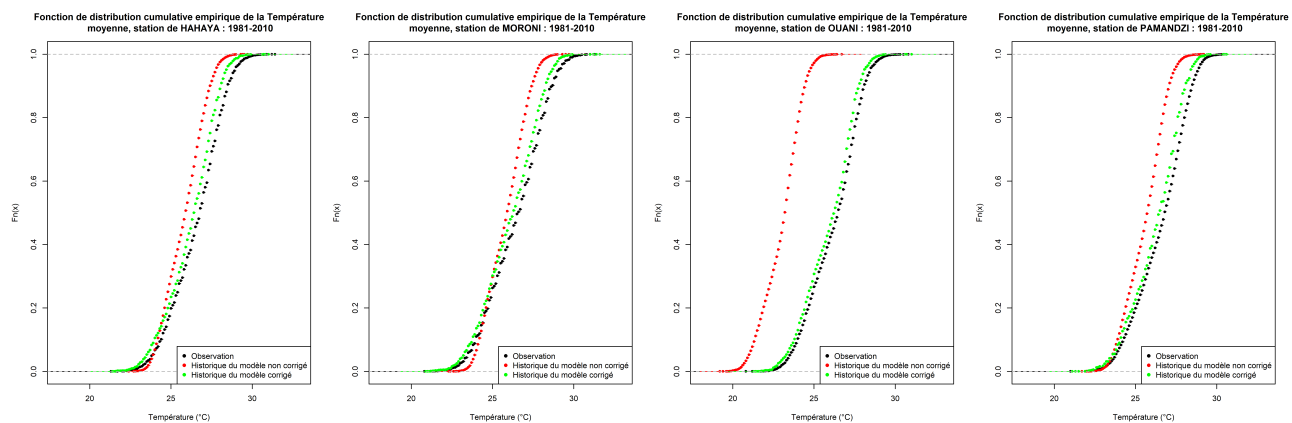


FIGURE 5.19 – Fonctions de distribution cumulée (CDF) des températures moyennes annuelles à +2 m (°C) pour chacune des 4 stations de référence de l'archipel des Comores sur la période historique 1981-2010 : comparaison entre l'observation en noir (climatologie de référence), la sortie brute du modèle ALADIN (en rouge), et le modèle ALADIN corrigé (en vert).

5.2.9 Correction des biais sur l'archipel des Comores - période future

Les valeurs du cumul annuel de précipitations (Fig. 5.20) et de la température moyenne annuelle à +2 m (Fig. 5.21) simulées par **ALADIN** sont tracées avant et après correction des biais sur l'ensemble de la période 1981-2010 et pour les trois scénarios climatiques.

5.2. Correction des biais sur la période historique et future

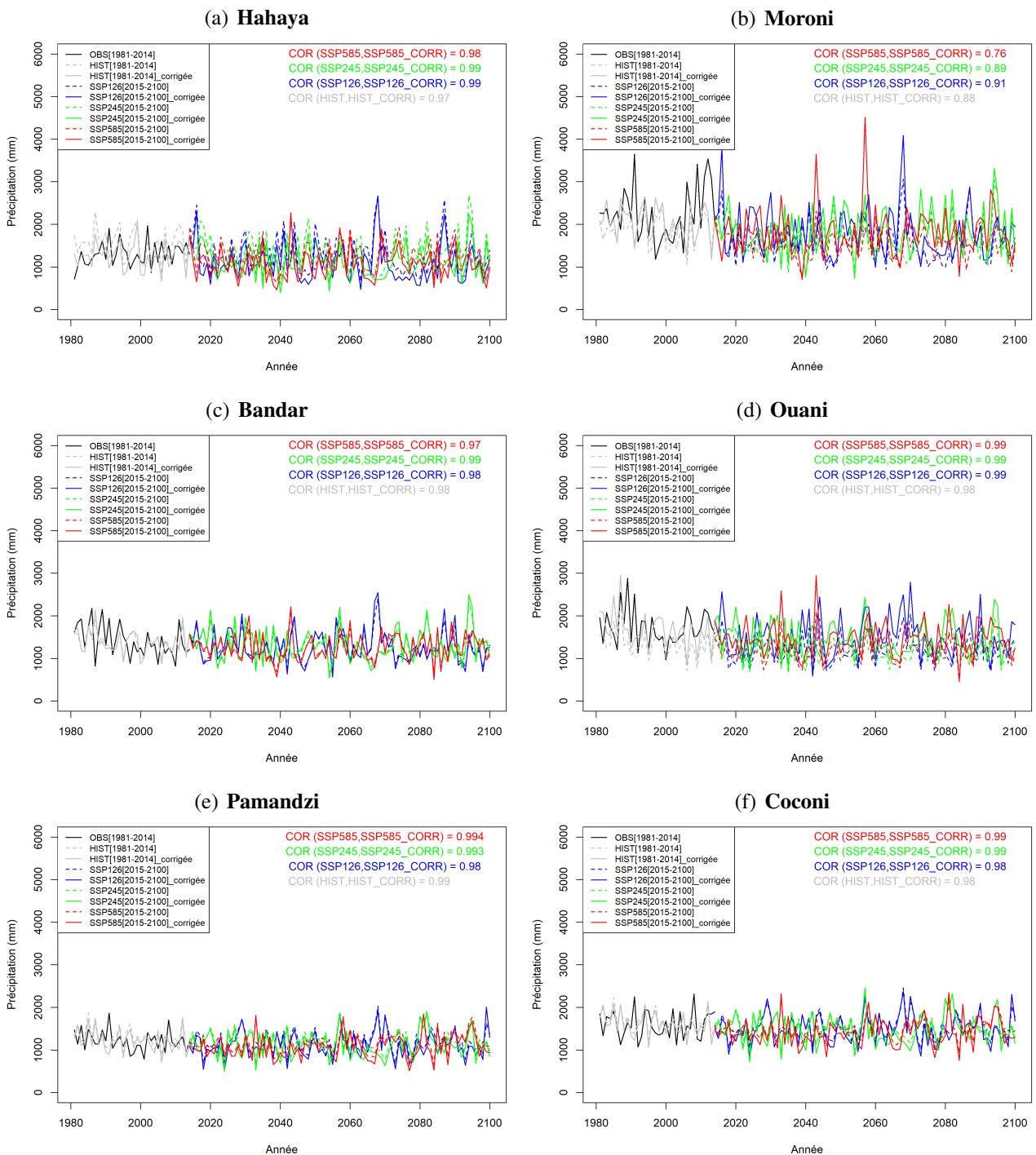


FIGURE 5.20 – Evolution temporelle du cumul annuel de précipitations (mm) simulé par le modèle *ALADIN* sur la période 1981-2100 pour 3 scénarios *SSP* et sur les 6 stations de l'archipel des Comores. Les données d'observation sont en noir, l'historique modèle en gris, et les simulations du modèle pour 3 scénarios en couleurs. Les lignes continues (tiretées) indiquent les valeurs du modèle après (avant) corrections de biais.

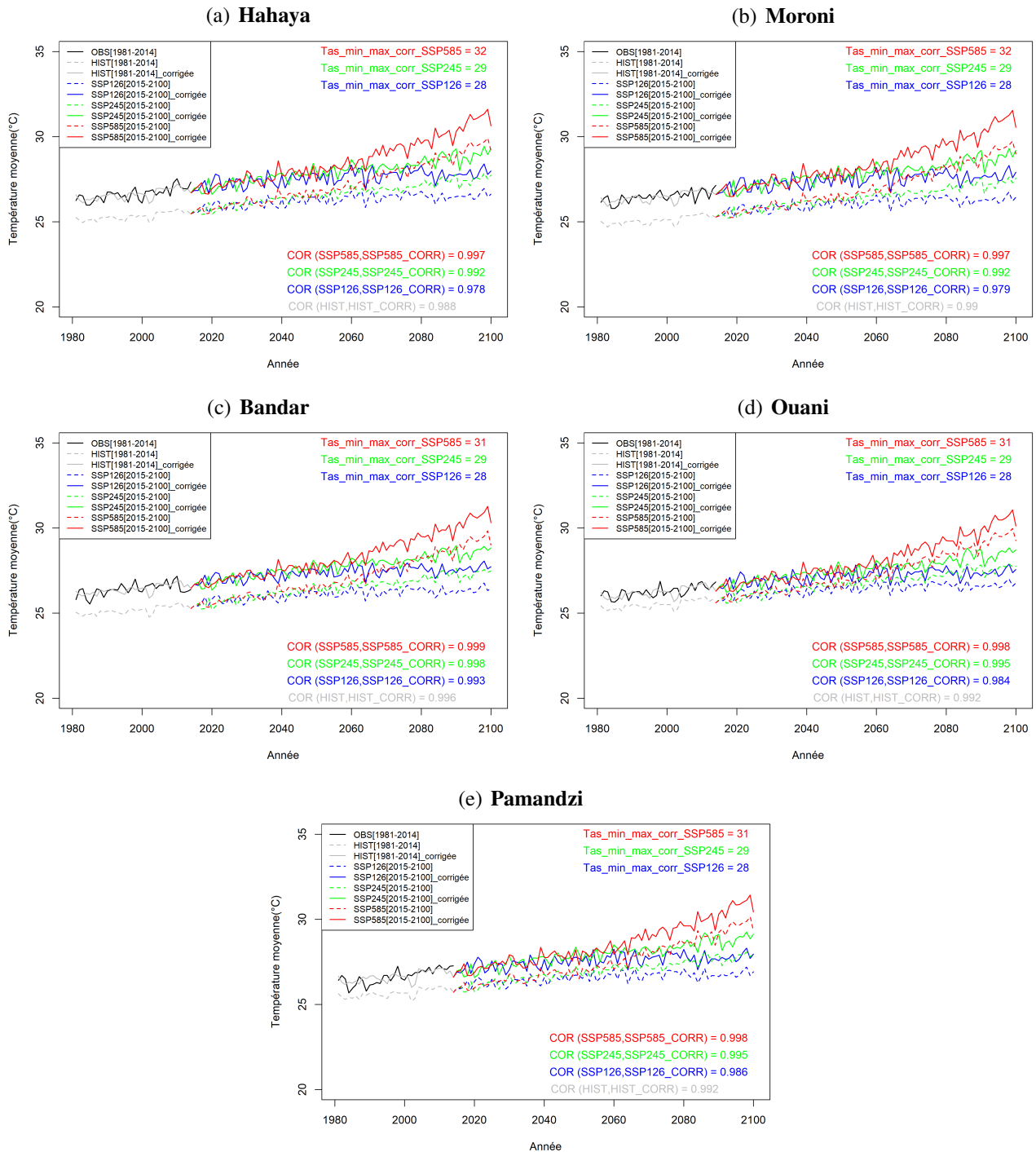


FIGURE 5.21 – Evolution temporelle de la température moyenne annuelle à +2 m (°C) simulée par le modèle ALADIN sur la période 1981-2100 pour 3 scénarios SSP et sur les 5 stations de l'archipel des Comores. Les données d'observation sont en noir, l'historique modèle en gris, et les simulations du modèle pour 3 scénarios en couleurs. Les lignes continues (tiretées) indiquent les valeurs du modèle après (avant) corrections de biais.

5.2.10 Correction des biais sur l'archipel des Seychelles - période historique

Le cumul moyen de précipitations annuelles simulé par [ALADIN](#) sur la période historique 1981-2010 est assez réaliste sur les Seychelles (Fig. [5.22\(a\)](#) versus Fig. [5.22\(b\)](#)). La correction de biais permet de mieux prendre en compte les différences de précipitations nord/sud de la relativement - comparé à la maille d'ALADIN - petite île de Mahé (figure [5.22\(d\)](#) conforme à la climatologie de l'île en figure [5.22\(b\)](#)).

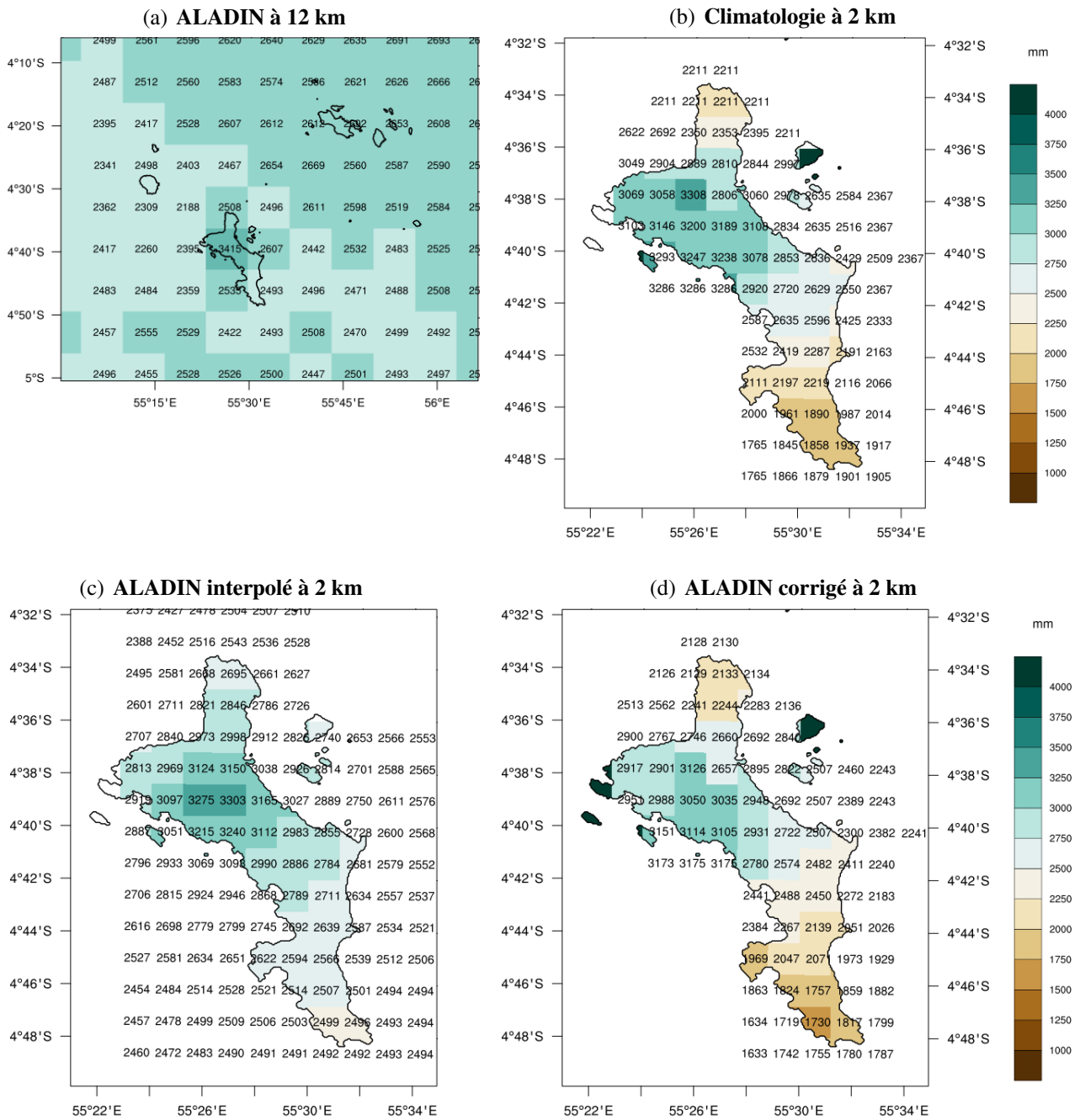


FIGURE 5.22 – Cumul annuel moyen de précipitations (mm) sur l'île principale de Mahé, Seychelles, sur la période historique 1981-2010 dans (a) la sortie brute du modèle ALADIN à 12 km de résolution, (b) la climatologie de référence, (c) le modèle ALADIN après interpolation à la résolution de 2 km, et (d) le modèle ALADIN après correction des biais à la résolution de 2 km. Les nombres superposés sur les graphes indiquent les valeurs en chaque point de grille.

5.2.11 Correction des biais sur l'archipel des Seychelles - période future

La correction des biais de température a été réalisée sur la seule station de référence des Seychelles, l'aéroport international (Fig. 5.23).

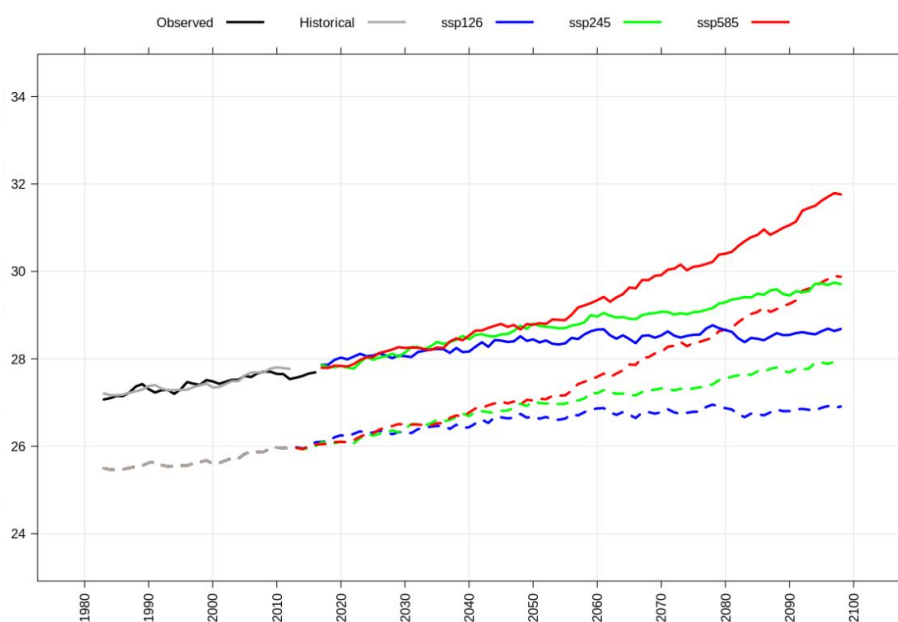


FIGURE 5.23 – Evolution temporelle sur la période 1981-2100 de la température moyenne annuelle à +2 m (°C) simulée par le modèle *ALADIN* pour 3 scénarios *SSP* sur la station de référence de l'archipel des Seychelles (aéroport). Les données d'observation sont en noir, et les simulations d'*ALADIN* sont en gris pour l'historique et en couleurs pour les 3 scénarios. Les lignes continues (tiretées) indiquent les valeurs du modèle après (avant) corrections des biais.

5.2.12 Correction des biais d'intensité cyclonique

Le biais positif d'**ALADIN** en intensité, identifié en figure 3.5, a été corrigé grâce aux observations de référence (Best track). L'histogramme des vents maximaux en figure 5.24 montre la répartition des systèmes par intensité dans le modèle **ALADIN** après cette correction en intensité. On constate une bien meilleure reproduction de la distribution observée (Best track). Cette méthode de correction a également été appliquée au modèle **ARPEGE** stréché (non illustré) pour que sa distribution historique reflète la distribution de référence. Ces corrections de biais ont été appliquées sur les périodes futures simulées par les deux modèles (3 scénarios dans le cas d'**ALADIN**), en partant de l'hypothèse de stationnarité des biais d'intensité entre passé et futur. Les projections climatiques de l'activité cyclonique pourront ainsi être abordées en section 6.3.

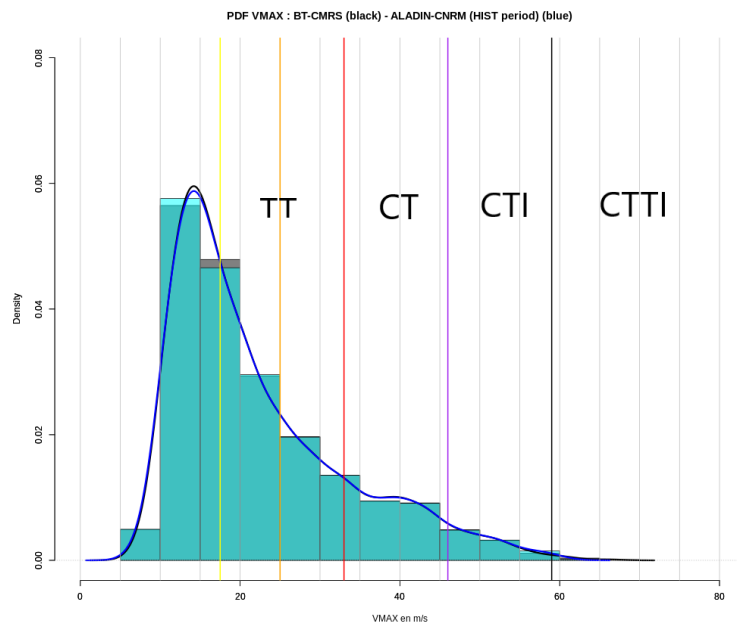


FIGURE 5.24 – Histogramme montrant la distribution des systèmes par seuil d'intensité (vent maximal par pas de 1 m.s^{-1}) dans le modèle **ALADIN** (cyan) et dans la **Best track** (gris).

Chapitre 6

Diagnostic du changement climatique dans le bassin SOOI

SOMMAIRE

6.1 PROJECTIONS CLIMATIQUES DE TEMPÉRATURES ET PRÉCIPITATIONS (NON CORRIGÉES)	125
6.1.1 Projections des températures sur le bassin SOOI	125
6.1.2 Projections des températures sur des îles du bassin SOOI	125
6.1.3 Projections des précipitations sur le bassin SOOI	130
6.1.4 Projections des précipitations trimestrielles sur le bassin SOOI en scénario SSP5-8.5	132
6.1.5 Projections des précipitations sur des îles du bassin SOOI	133
6.1.6 Comparaison des projections de précipitations brutes et corrigées sur La Réunion en scénario SSP5-8.5	135
6.2 APPORT DE LA HAUTE RÉOLUTION SUR LE SIGNAL DU CHANGEMENT CLIMATIQUE (NON CORRIGÉ)	136
6.2.1 Cas des précipitations sur les îles à fort relief	136
6.2.2 Cas des températures sur les îles à fort relief	136
6.3 PROJECTIONS CLIMATIQUES DE L'ACTIVITÉ CYCLONIQUE (CORRIGÉES EN INTENSITÉ)	141
6.3.1 Evolution en fréquence de l'activité cyclonique	141
6.3.2 Evolution spatiale de l'activité cyclonique	143
6.3.3 Evolution de la position du maximum d'intensité cyclonique	143
6.3.4 Messages clés sur l'évolution de long terme	143
6.4 PROJECTIONS CLIMATIQUES DE TEMPÉRATURES ET PRÉCIPITATIONS SUR LES ÎLES (CORRIGÉES)	145
6.4.1 Projections des précipitations à Madagascar	145
6.4.2 Projections des précipitations à La Réunion	152
6.4.3 Projections des précipitations sur les îles de la République de Maurice	158
6.4.4 Projections des précipitations sur l'archipel des Comores	164
6.4.5 Projections des précipitations sur l'archipel des Seychelles	165
6.4.6 Projections des températures à Madagascar	168
6.4.7 Projections des températures à La Réunion	170
6.4.8 Projections des températures sur les îles de la République de Maurice	174
6.4.9 Projections des températures sur l'archipel des Comores	174
6.4.10 Projections des températures sur l'archipel des Seychelles	174
6.5 INDICATEURS CLIMATIQUES	178
6.5.1 Indicateurs climatiques sur Madagascar	178
6.5.2 Indicateurs climatiques sur La Réunion	179

6.5.3	Indicateurs climatiques sur les îles de la République de Maurice	181
6.5.4	Indicateurs climatiques sur l'archipel des Comores	182
6.5.5	Indicateurs climatiques sur l'archipel des Seychelles	182
6.6	QUANTIFICATION DE L'INCERTITUDE DU CHANGEMENT CLIMATIQUE (CMIP6)	185
6.6.1	Projections CMIP6 des températures et précipitations annuelles sur le bassin	185
6.6.2	Positionnement des modèles utilisés dans le panache CMIP6	185
6.6.3	Cartes d'anomalies de précipitations CMIP6 sur la zone COI	190
6.6.4	Projections CMIP6 de la température moyenne sur les îles	192
6.6.5	Projections CMIP6 des précipitations annuelles sur les îles	194
6.7	PROTOTYPE DE DESCENTE D'ÉCHELLE STATISTIQUE SUR LA RÉUNION	197
6.7.1	Méthode innovante de descente d'échelle statistique	197
6.7.2	Descente d'échelle statistique pour les précipitations	198
6.7.3	Descente d'échelle statistique pour la température	204

CETTE partie vise à caractériser – à partir du jeu de simulations régionales **ALADIN** et globales **CMIP6** - les effets du changement climatique dans l'océan Indien et sur les territoires insulaires de la **COI**, en examinant l'évolution des principales variables climatiques (température et précipitations) à la fois dans leur tendances moyennes mais également dans leur comportements extrêmes avec le calcul d'indicateurs climatiques (vagues de chaleur, sécheresses, précipitations intenses, etc.). Un grand échantillon de simulations globales **CMIP6** permettra de quantifier l'incertitude liée aux modèles de climat utilisés et de mettre en perspective les résultats issus des simulations **ALADIN**. Nous identifierons un ou deux autres modèles globaux **CMIP6** intéressants pour forcer **ALADIN** et augmenter l'échantillon de simulations régionales. Enfin, un prototype de descente d'échelle statistique sur La Réunion à partir des simulations globales **CMIP6** sera proposé pour démontrer la possibilité de mieux quantifier l'incertitude du changement climatique à l'échelle d'un petit territoire insulaire.

6.1 PROJECTIONS CLIMATIQUES DE TEMPÉRATURES ET PRÉCIPITATIONS (NON CORRIGÉES)

6.1.1 Projections des températures sur le bassin SOOI

La figure 6.1 illustre le changement de température annuelle moyenne par rapport à la période de référence 1981-2010 pour deux scénarios climatiques ([SSP1-2.6](#) et [SSP5-8.5](#)) et deux horizons temporels : milieu (2041-2070) et fin (2071-2100) de siècle. Ces cartes sont calculées à la résolution de 12 km par différence entre le futur et le passé des valeurs en chaque point de grille du modèle, sans appliquer de correction de biais préalable (cette correction n'étant possible que sur les terres habitées où l'on dispose de jeux de données d'observation).

Dans le scénario climatique [SSP1-2.6](#), la température est prévue augmenter de $+1^{\circ}\text{C}$ à $+2^{\circ}\text{C}$ sur l'ensemble du bassin d'ici le milieu du siècle et cette hausse n'augmente guère en fin de siècle (Fig. 6.1(a) versus 6.1(b)). L'augmentation de température est de $+3^{\circ}\text{C}$ à $+5^{\circ}\text{C}$ à l'horizon de fin de siècle dans le scénario climatique [SSP5-8.5](#), avec une nette accélération du réchauffement en milieu de siècle. Quelque soit le scénario, on note que le réchauffement est plus conséquent sur les masses continentales comme la Grande Île de Madagascar et le continent Africain, tandis que les petites îles, sous influence océanique, bénéficient de l'inertie de l'océan qui se réchauffera sur des délais plus longs. Cette figure montre que l'on peut encore limiter le réchauffement de surface dans notre bassin à $+2^{\circ}\text{C}$ par rapport à la période de référence 1981-2010, en adoptant dès aujourd'hui des politiques de réduction de gaz à effet de serre drastiques pour s'aligner sur le scénario optimiste [SSP1-2.6](#).

6.1.2 Projections des températures sur des îles du bassin SOOI

La figure 6.2 illustre un exemple d'anomalies de température prévues sur une île du bassin, celle de la Grande Comore.

Des augmentations de températures de valeurs comparables à celles prévues sur la Grande Comore sont attendues sur les autres états insulaires de la [COI](#), comme l'île Maurice ou l'archipel des Seychelles : autour de $+1^{\circ}\text{C}$ à $+1.5^{\circ}\text{C}$ en [SSP1-2.6](#) (Figs. 6.3(b), 6.4(b)) et de $+3^{\circ}\text{C}$ à $+4^{\circ}\text{C}$ en [SSP5-8.5](#) à l'horizon de fin de siècle (Figs. 6.3(f), 6.4(f)).

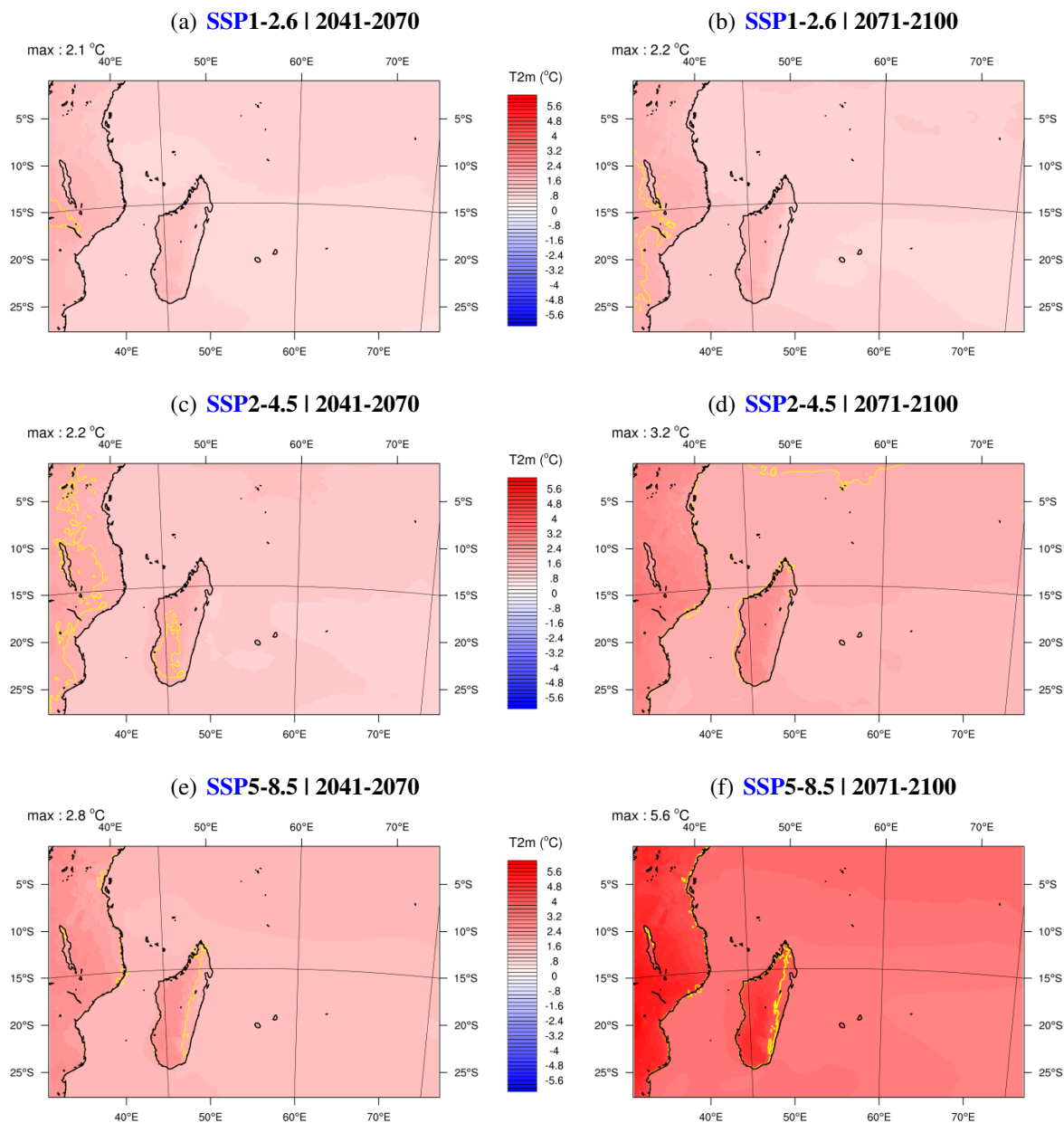


FIGURE 6.1 – Anomalies de température moyenne annuelle à +2 m (en °C par rapport à 1981-2010) sur la zone océan Indien selon le modèle régional ALADIN pour trois scénarios climatiques (*SSP1-2.6* en haut, *SSP2-4.5* au milieu et *SSP5-8.5* en bas) et deux horizons temporels (milieu de siècle à gauche et fin de siècle à droite). Les contours jaunes représentent les isolignes +2°C et +4°C (en gras).

6.1. Projections climatiques de températures et précipitations (non corrigées)

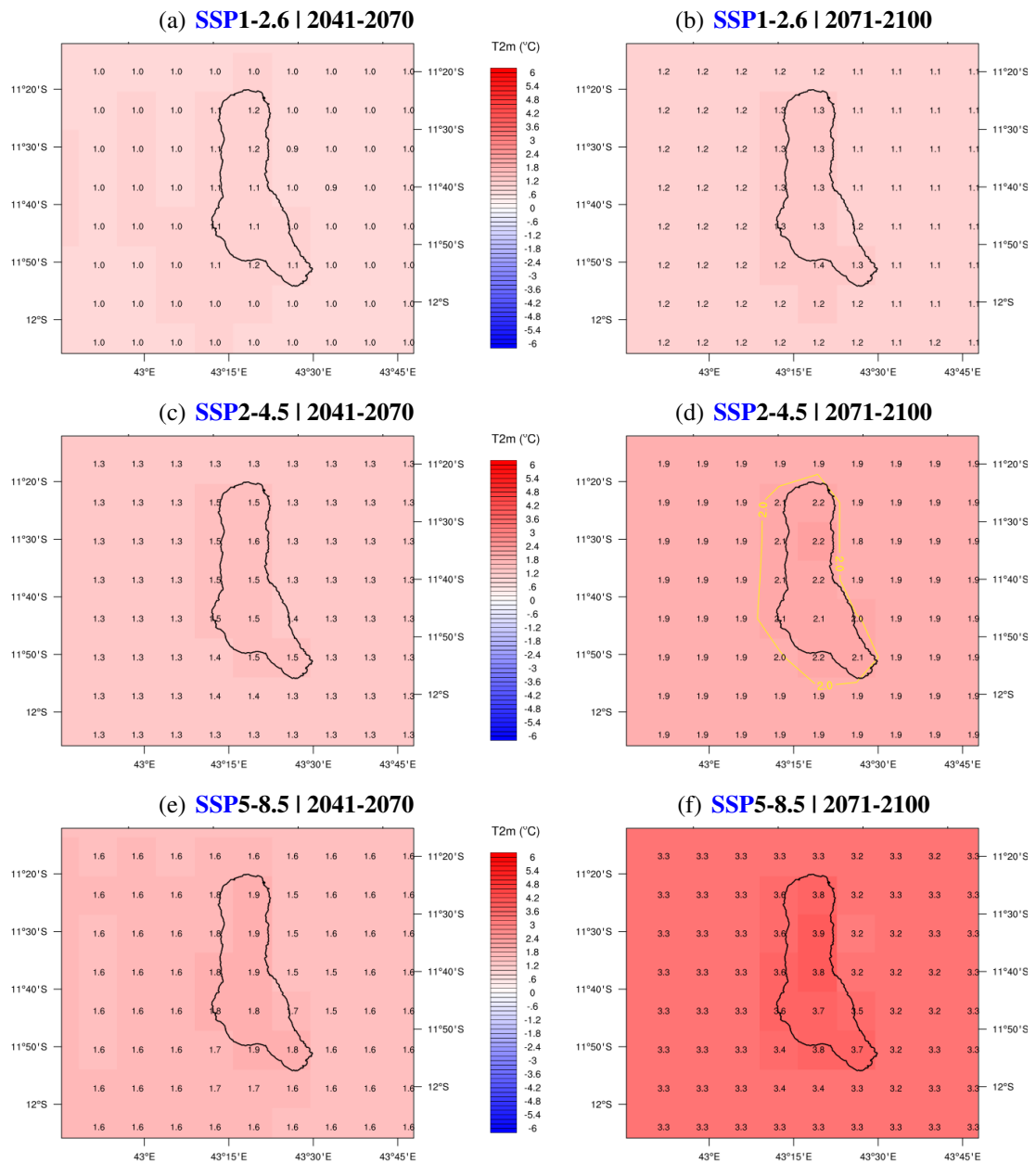


FIGURE 6.2 – Anomalies de température moyenne annuelle à +2 m (en °C par rapport à 1981-2010) sur la Grande Comore selon le modèle régional ALADIN pour trois scénarios climatiques (*SSP1-2.6* en haut, *SSP2-4.5* au milieu, et *SSP5-8.5* en bas) et deux horizons temporels (milieu de siècle à gauche et fin de siècle à droite). Les nombres superposés sur les graphes indiquent les valeurs en chaque point de grille.

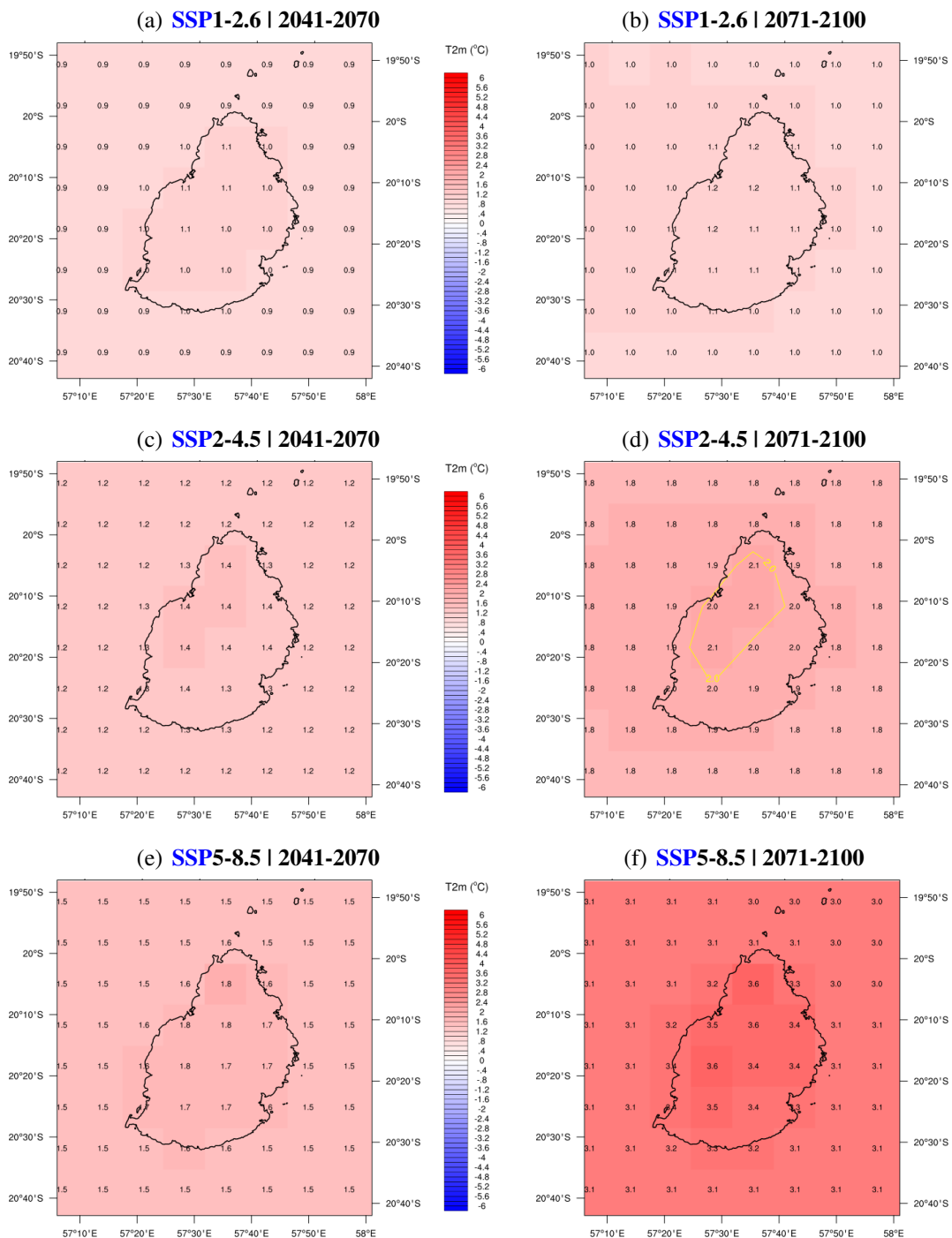


FIGURE 6.3 – Similaire à la figure 6.2 mais sur l'île Maurice.

6.1. Projections climatiques de températures et précipitations (non corrigées)

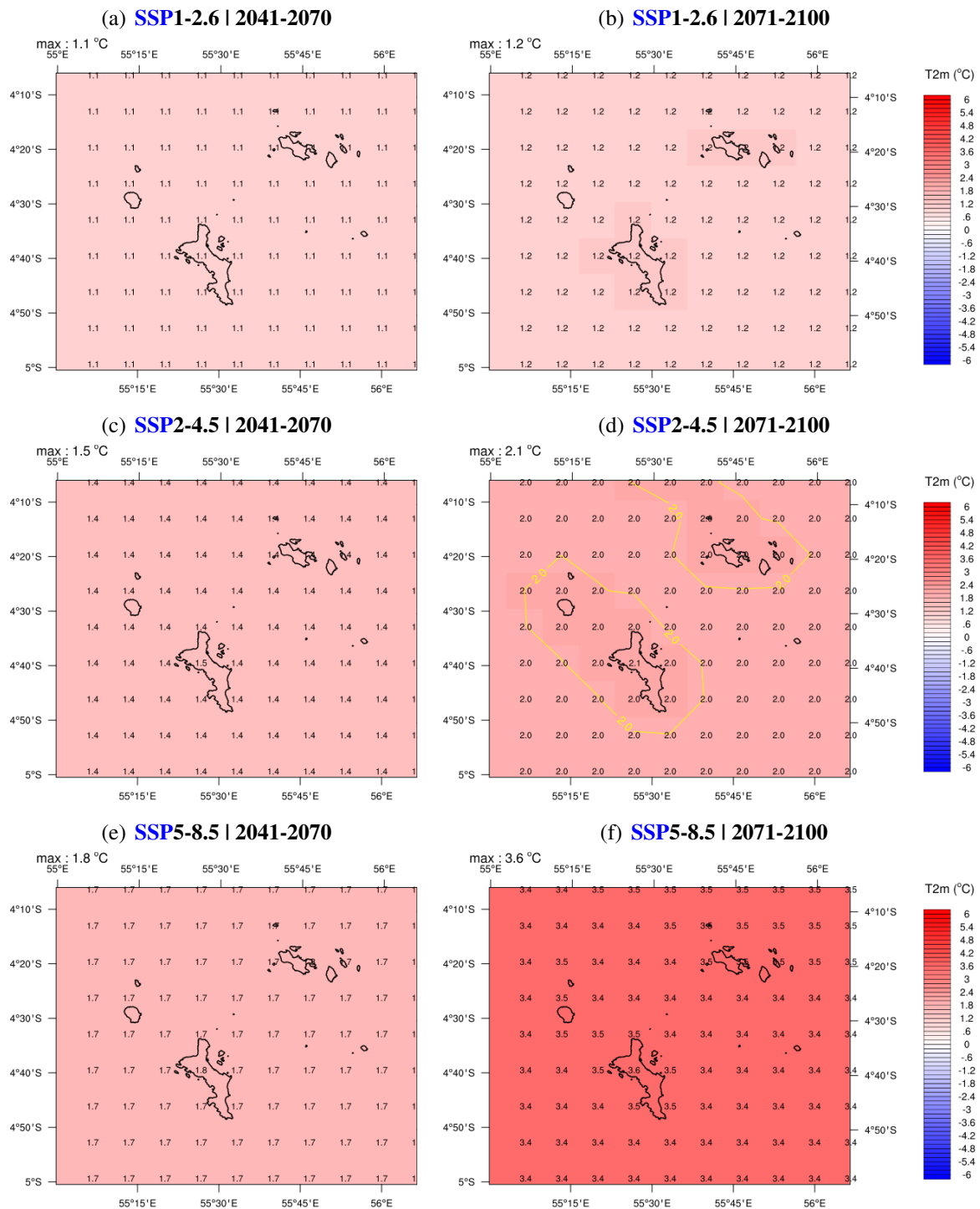


FIGURE 6.4 – Similaire à la figure 6.2 mais sur l'archipel principal des Seychelles.

6.1.3 Projections des précipitations sur le bassin SOOI

La figure 6.5 illustre le changement du cumul annuel de précipitations par rapport à la période de référence 1981-2010 pour deux scénarios climatiques (SSP1-2.6 et SSP5-8.5) et deux horizons temporels : milieu (2041-2070) et fin (2071-2100) de siècle.

Dans le scénario climatique SSP1-2.6, une légère baisse des précipitations moyennes annuelles est anticipée (−5% à −10%) globalement sur le bassin, à part sur le canal du Mozambique où les précipitations pourraient augmenter, vraisemblablement en lien avec l'activité cyclonique (à analyser). On remarque une augmentation des précipitations dans la zone des Mascareignes à l'horizon de fin de siècle dans le scénario SSP5-8.5 mais ce signal sera à analyser dans la nouvelle simulation SSP5-8.5 où il risque d'être modifié.

6.1. Projections climatiques de températures et précipitations (non corrigées)

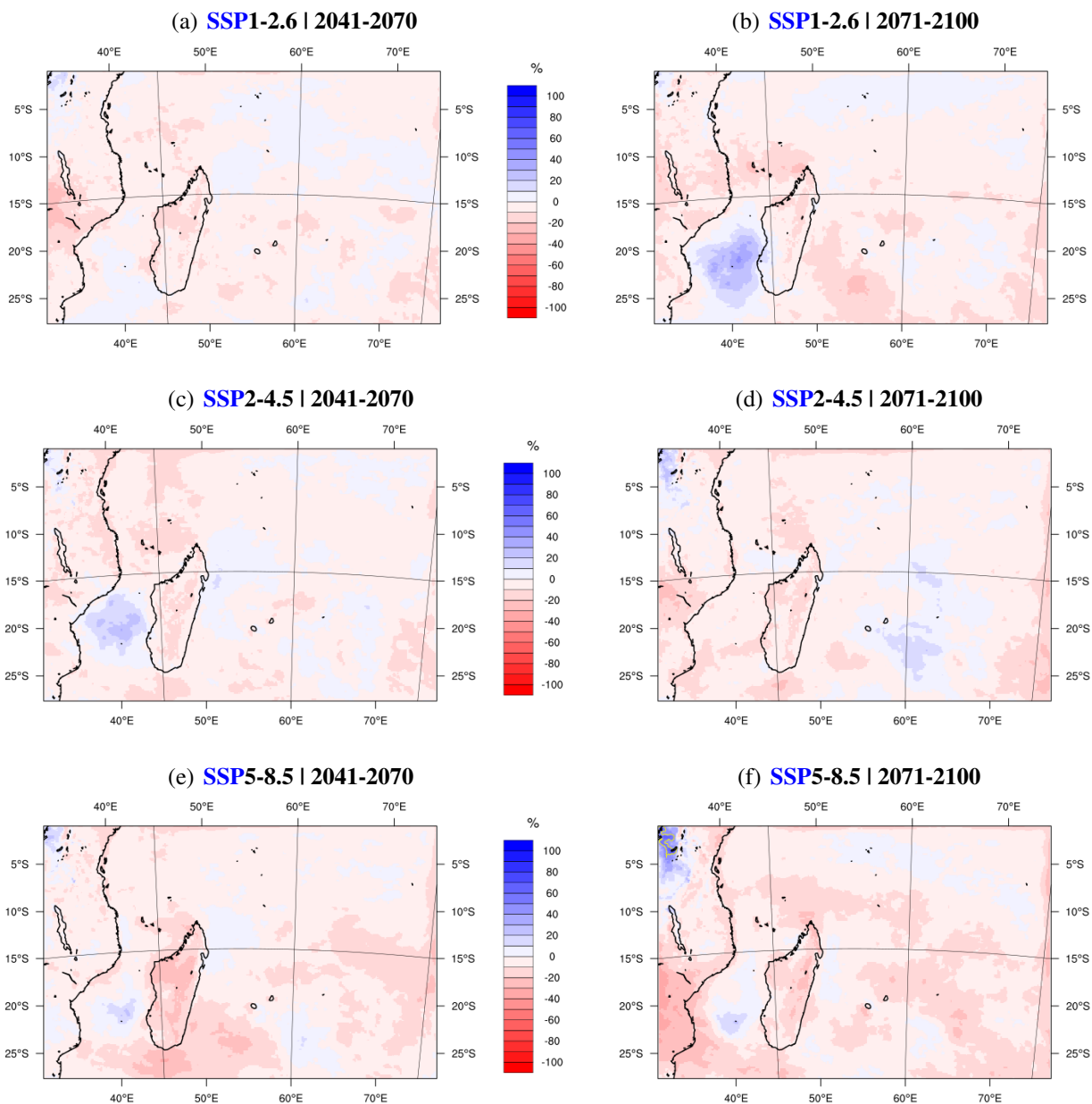


FIGURE 6.5 – Anomalies (en % par rapport à la normale 1981-2010) du cumul annuel de précipitations sur la zone océan Indien selon le modèle régional *ALADIN* pour trois scénarios climatiques (*SSP1-2.6* en haut, *SSP2-4.5* au milieu, et *SSP5-8.5* en bas) et deux horizons temporels (milieu de siècle à gauche et fin de siècle à droite). Les contours jaunes représentent l'isoline +50%.

6.1.4 Projections des précipitations trimestrielles sur le bassin SOOI en scénario SSP5-8.5

La figure 6.6 se focalise sur le changement du cumul moyen de précipitations dans chaque trimestre de l'année pour le scénario climatique SSP5-8.5 et l'horizon temporel de fin de siècle (2071-2100) pour illustrer les forts contrastes saisonniers. On note à la fois une augmentation des précipitations au premier semestre de l'année (Figs. 6.6 (a) et (b)) et une nette diminution au second semestre (Figs. 6.6 (c) et (d)), confirmant une augmentation des extrêmes (fortes précipitations et sécheresses).

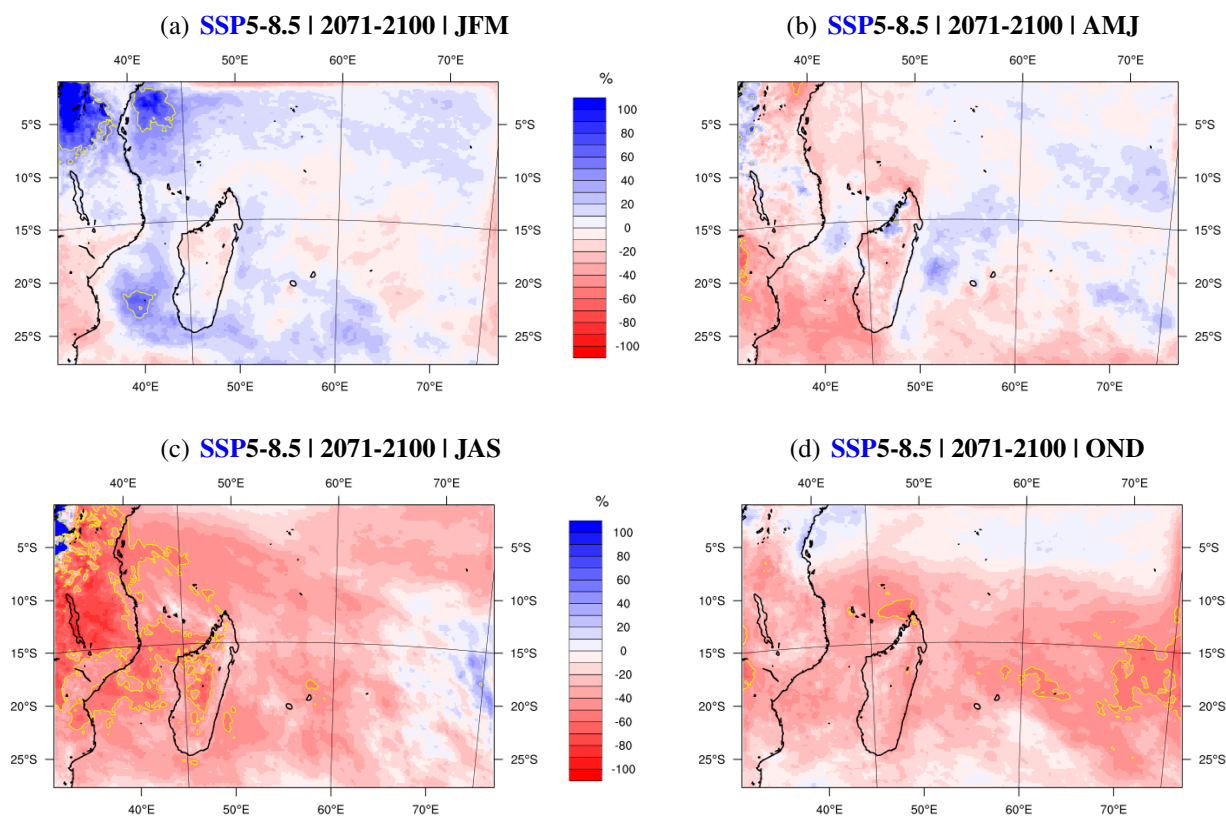


FIGURE 6.6 – Anomalies (en % par rapport à la normale 1981-2010) du cumul trimestriel moyen de précipitations sur la zone océan Indien selon le modèle régional ALADIN pour le scénario climatique SSP5-8.5 à l'horizon de fin de siècle. Les contours jaunes représentent les isolignes -50% et $+50\%$.

6.1.5 Projections des précipitations sur des îles du bassin SOOI

La figure 6.7 illustre un exemple d'anomalies de cumul annuel de précipitations prévues sur l'archipel des Comores. On note la variabilité des précipitations pour un même scénario selon les horizons temporels. Une tendance à l'assèchement est néanmoins prévue en scénario **SSP5-8.5** quelque soit l'horizon temporel. Selon les deux scénarios climatiques **SSP1-2.6** et **SSP5-8.5**, l'île de la Grande Comore verrait une baisse de ses précipitations moyennes annuelles de -10% à -20% d'ici la fin du siècle.

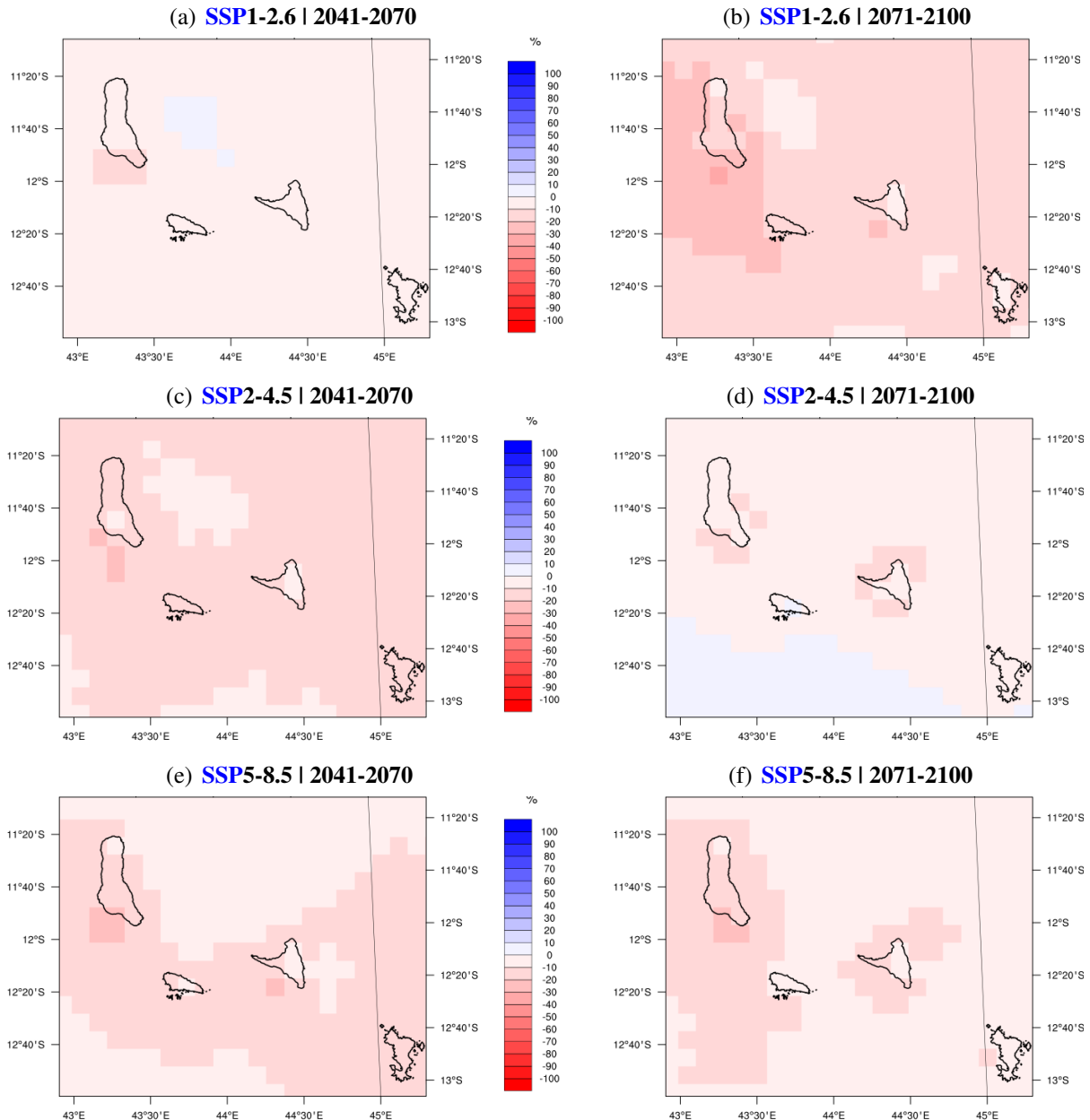


FIGURE 6.7 – Anomalies (en % par rapport à la normale 1981-2010) du cumul annuel de précipitations sur l'archipel des Comores selon le modèle régional **ALADIN** pour trois scénarios climatiques (**SSP1-2.6** en haut, **SSP2-4.5** au milieu, et **SSP5-8.5** en bas) et deux horizons temporels (milieu de siècle à gauche et fin de siècle à droite). Les contours jaunes représentent l'isoline $+50\%$.

Sur les îles sœurs, il n'y a pas de modification significative à attendre en terme de moyenne annuelle du cumul de précipitations pour les scénarios **SSP1-2.6** ou **SSP2-4.5** à l'horizon de milieu ou fin de siècle (Figs. 6.8 (b)-(d)). En revanche, une baisse des précipitations annuelles moyennes de

plus de 10% par rapport à leur valeur de référence historique est attendue dans le scénario **SSP5-8.5** (Figs. 6.8 (e)-(f)).

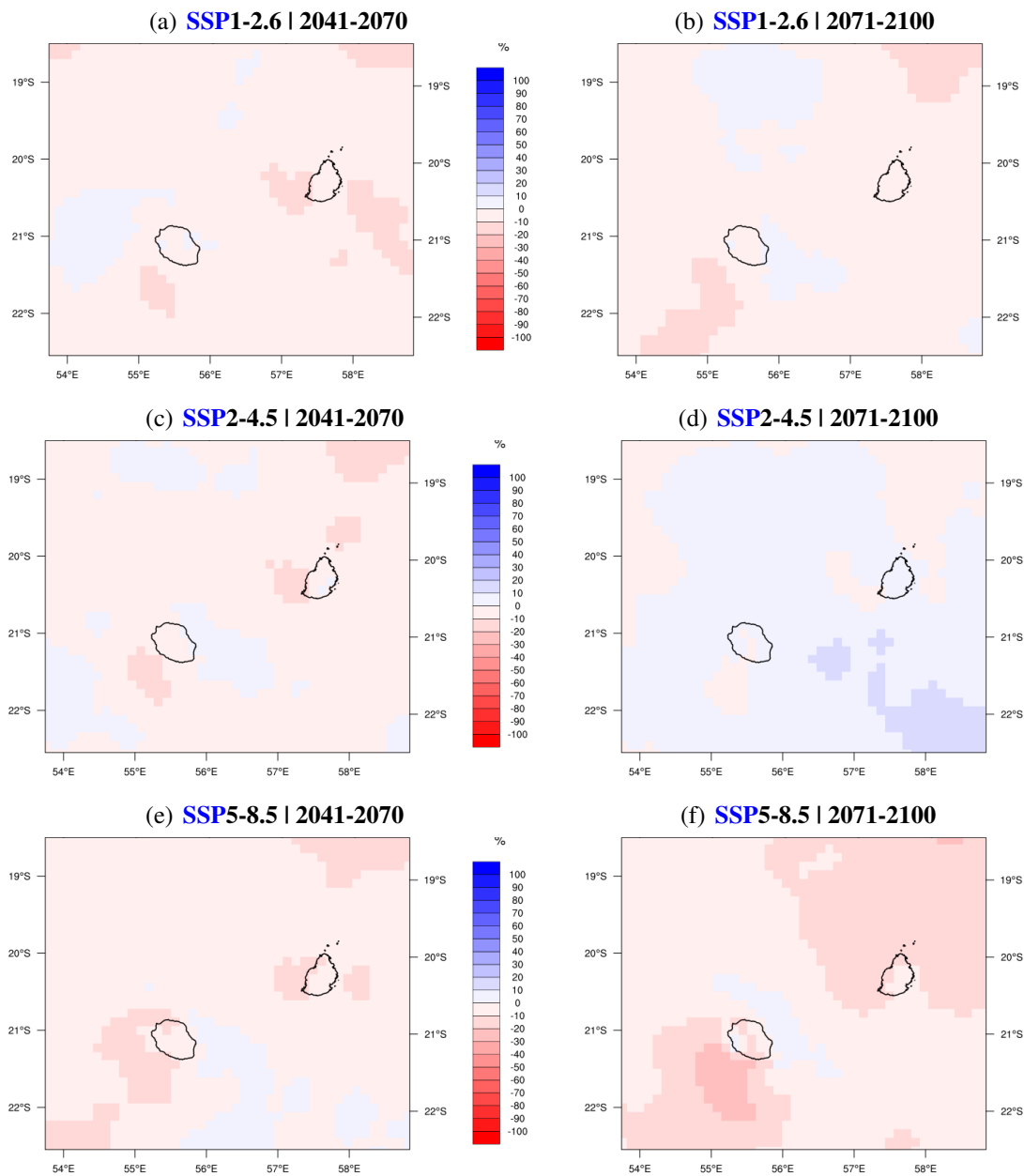


FIGURE 6.8 – *Similaire à la figure 6.7 mais sur les îles sœurs Maurice et La Réunion.*

6.1.6 Comparaison des projections de précipitations brutes et corrigées sur La Réunion en scénario SSP5-8.5

La figure 6.9 illustre l'apport de la correction de biais sur les signaux d'anomalies de précipitations par rapport à la période de référence dans le scénario SSP5-8.5 : les précipitations sont sensiblement corrigées à la baisse dans l'ouest de l'île, zone sèche sous le vent. Dans ce scénario, les précipitations diminueraient de 10% à 15% d'ici la fin du siècle sur l'ensemble de l'île (Fig. 6.9(d)). Dans la prochaine section, nous illustrerons les signaux du changement climatique après correction des biais du modèle sur les diverses îles où des jeux de référence sont disponibles (section 4) et non plus en mer.

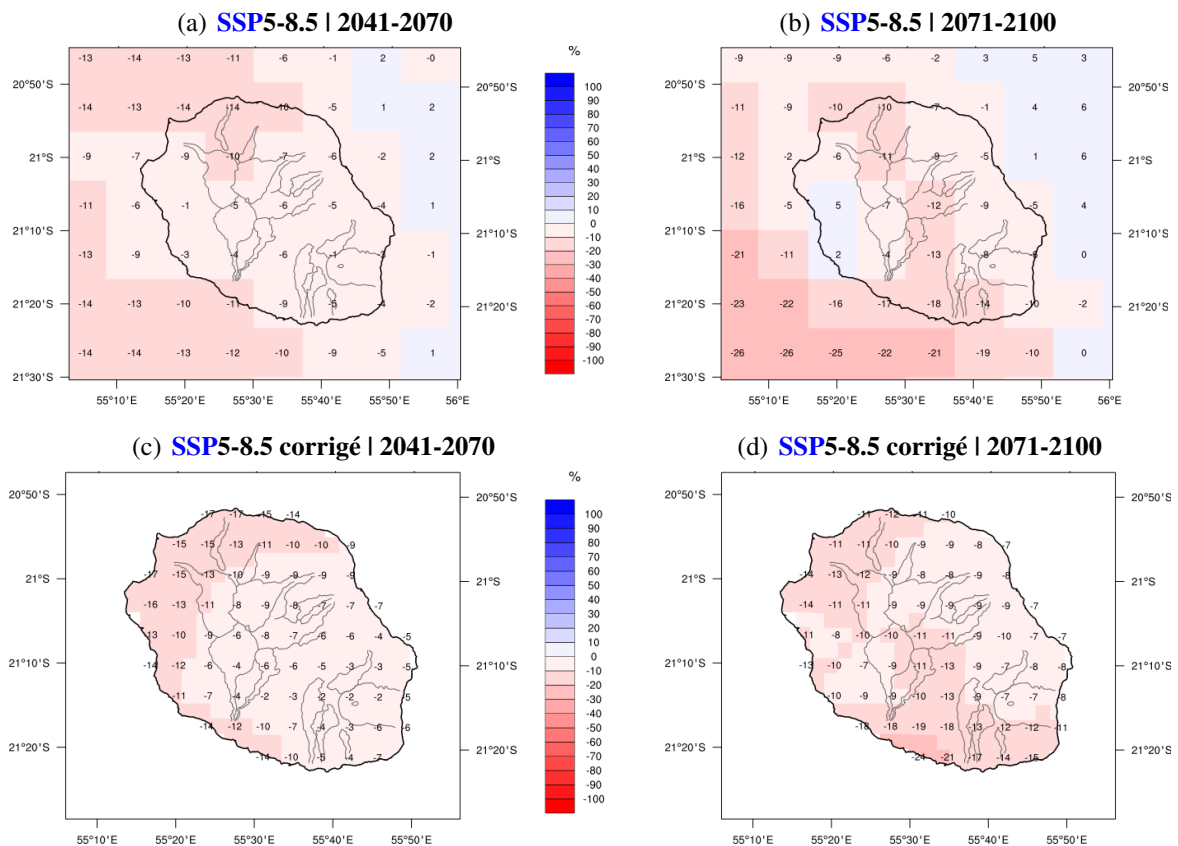


FIGURE 6.9 – Anomalies (en % par rapport à la normale 1981-2010) du cumul annuel de précipitations sur La Réunion selon le modèle régional ALADIN avant (en haut) et après (en bas) correction des biais du modèle.

6.2 APPORT DE LA HAUTE RÉOLUTION SUR LE SIGNAL DU CHANGEMENT CLIMATIQUE (NON CORRIGÉ)

6.2.1 Cas des précipitations sur les îles à fort relief

L'apport de la haute résolution sur le signal du changement climatique pour les îles à fort relief est illustré pour la distribution spatiale des précipitations prévues dans le scénario extrême SSP585 par comparaison entre les sorties brutes de modèle CNRM-ESM2-1 et ALADIN (en soustrayant la période future à la période historique) pour Madagascar (Fig. 6.10), l'archipel des Mascareignes (Fig. 6.11) et l'archipel des Comores (Fig. 6.12). Les conclusions seront à revoir une fois la simulation modifiée. Ces figures illustrent une nouvelle fois l'apport de la haute résolution.

6.2.2 Cas des températures sur les îles à fort relief

Dans le cas de la température (Figs. 6.13, 6.14 et 6.15), on voit que le modèle ALADIN suit davantage sont coupleur, i.e. que la haute résolution a moins d'impact sur ce paramètre qui varie sur une échelle spatiale plus grande.

6.2. Apport de la haute résolution sur le signal du changement climatique (non corrigé)

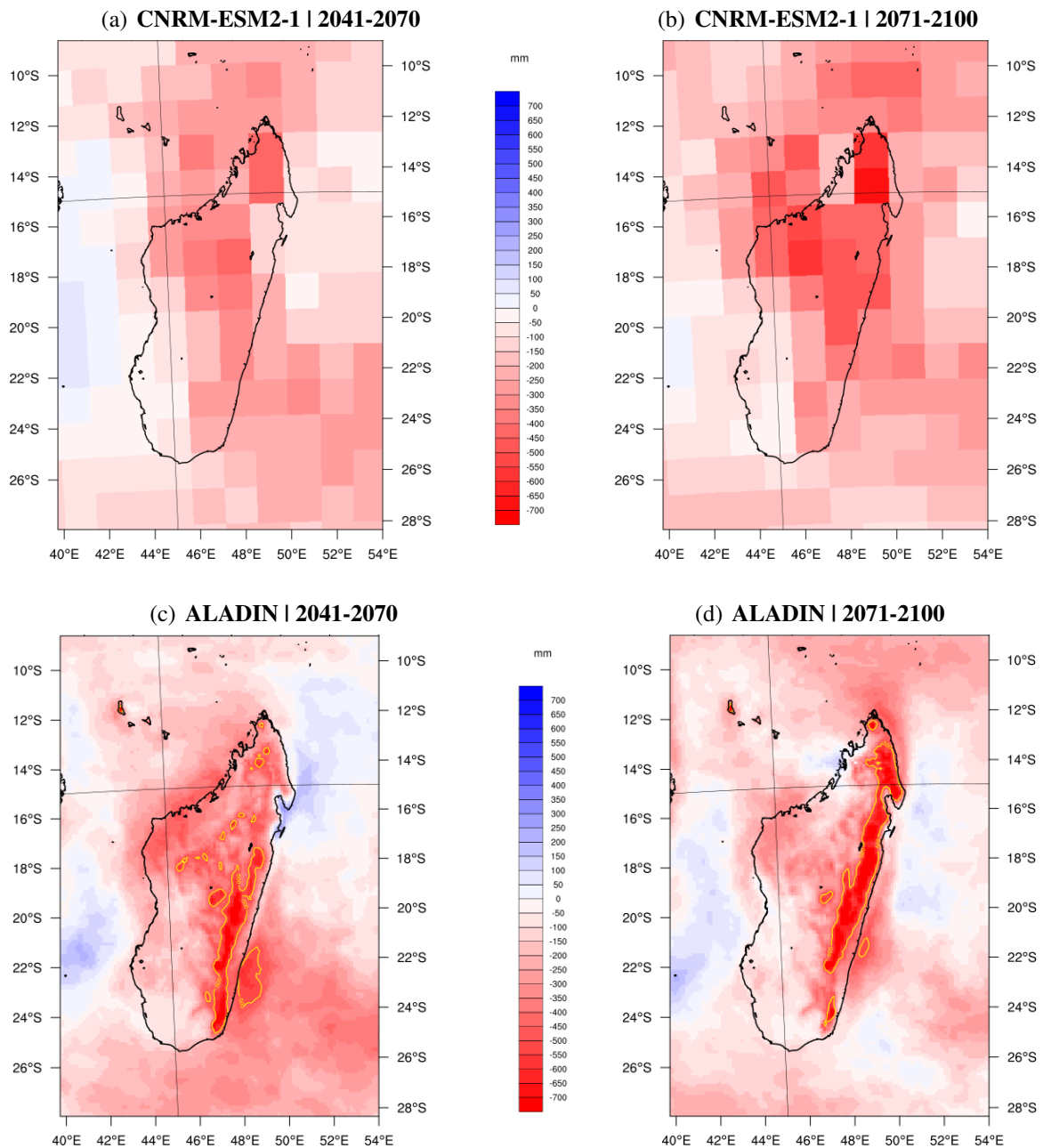


FIGURE 6.10 – Anomalies (en mm par rapport à la normale 1981-2010) du cumul annuel moyen de précipitations sur Madagascar selon les modèles *CNRM-ESM2* (en haut) et *ALADIN* (en bas) pour deux horizons temporels (milieu de siècle à gauche et fin de siècle à droite) en scénario *SSP5-8.5*. Les contours jaunes représentent l'isoline -500 mm.

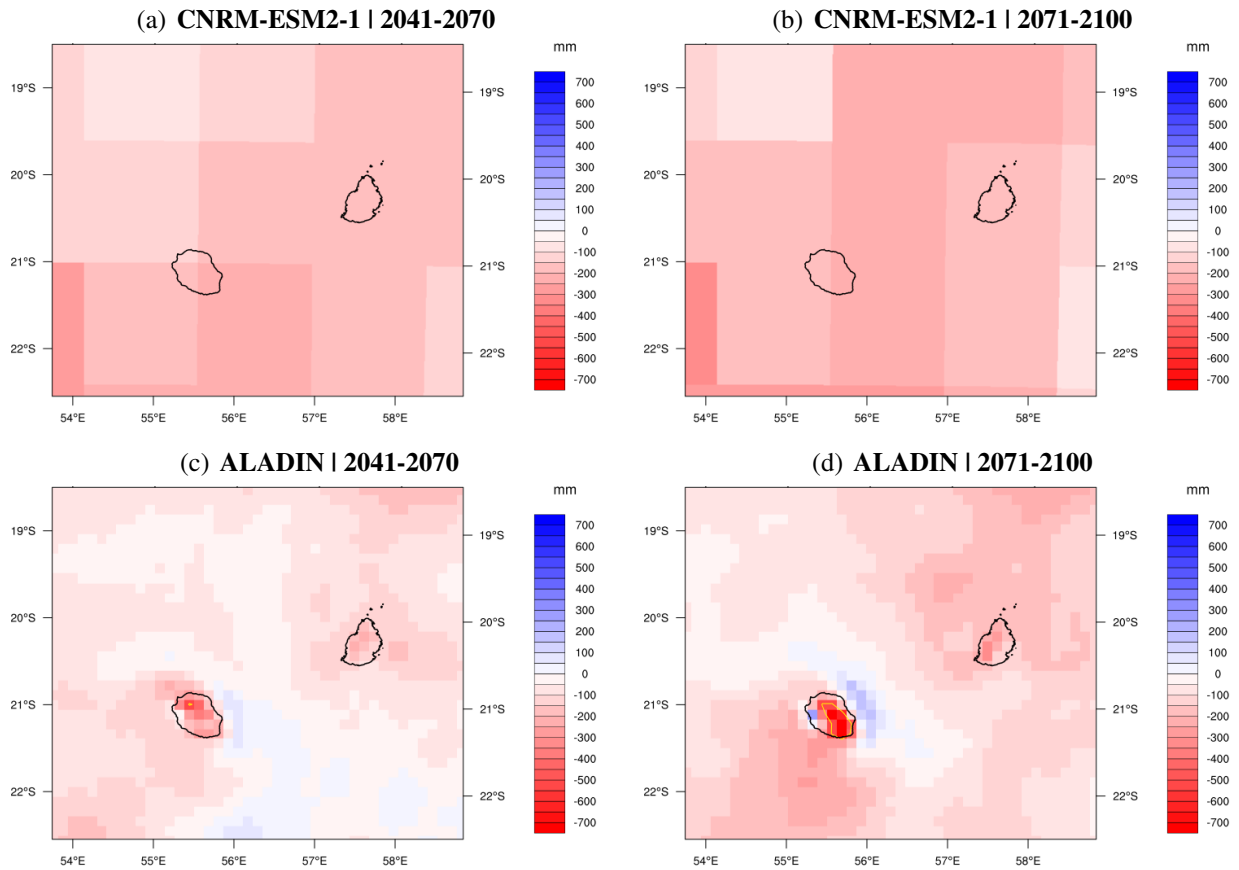


FIGURE 6.11 – Similaire à la figure 6.10 mais sur l'archipel des Mascareignes.

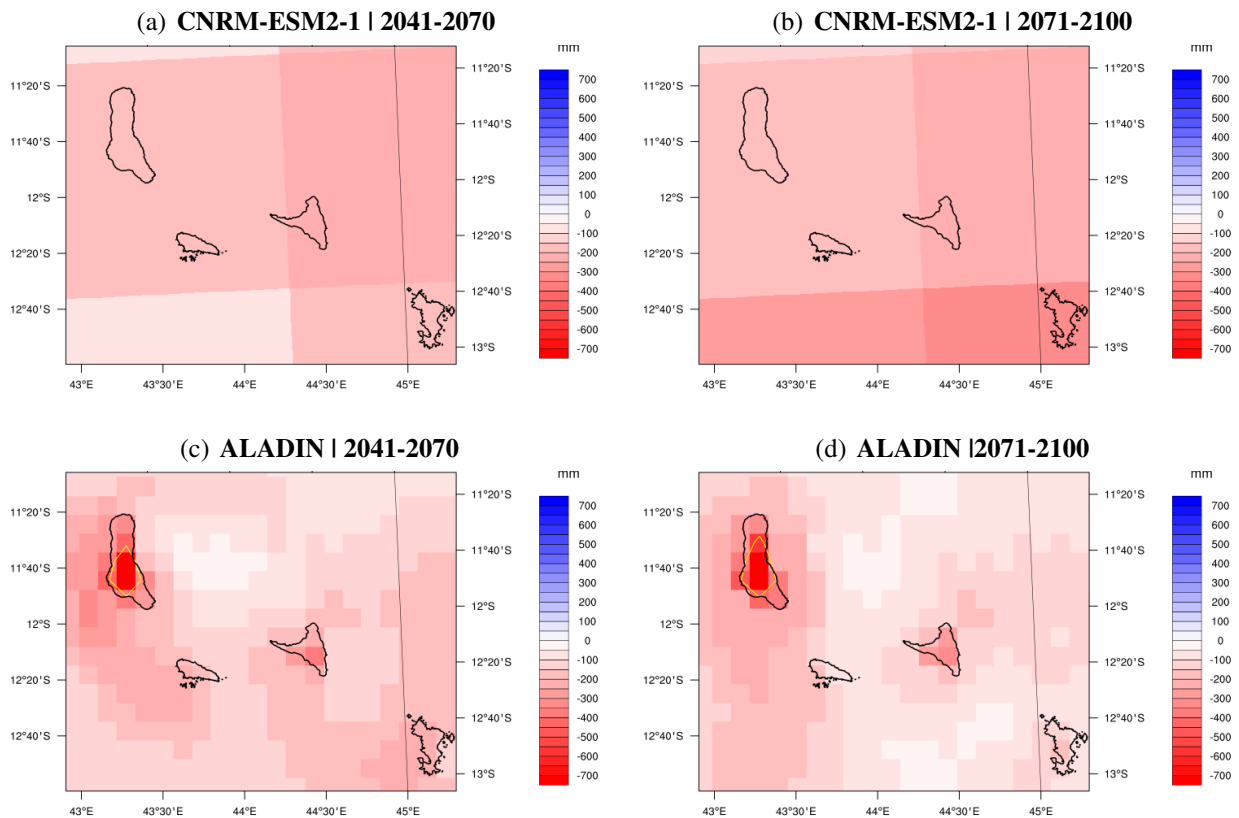


FIGURE 6.12 – Similaire à la figure 6.10 mais sur l'archipel des Comores.

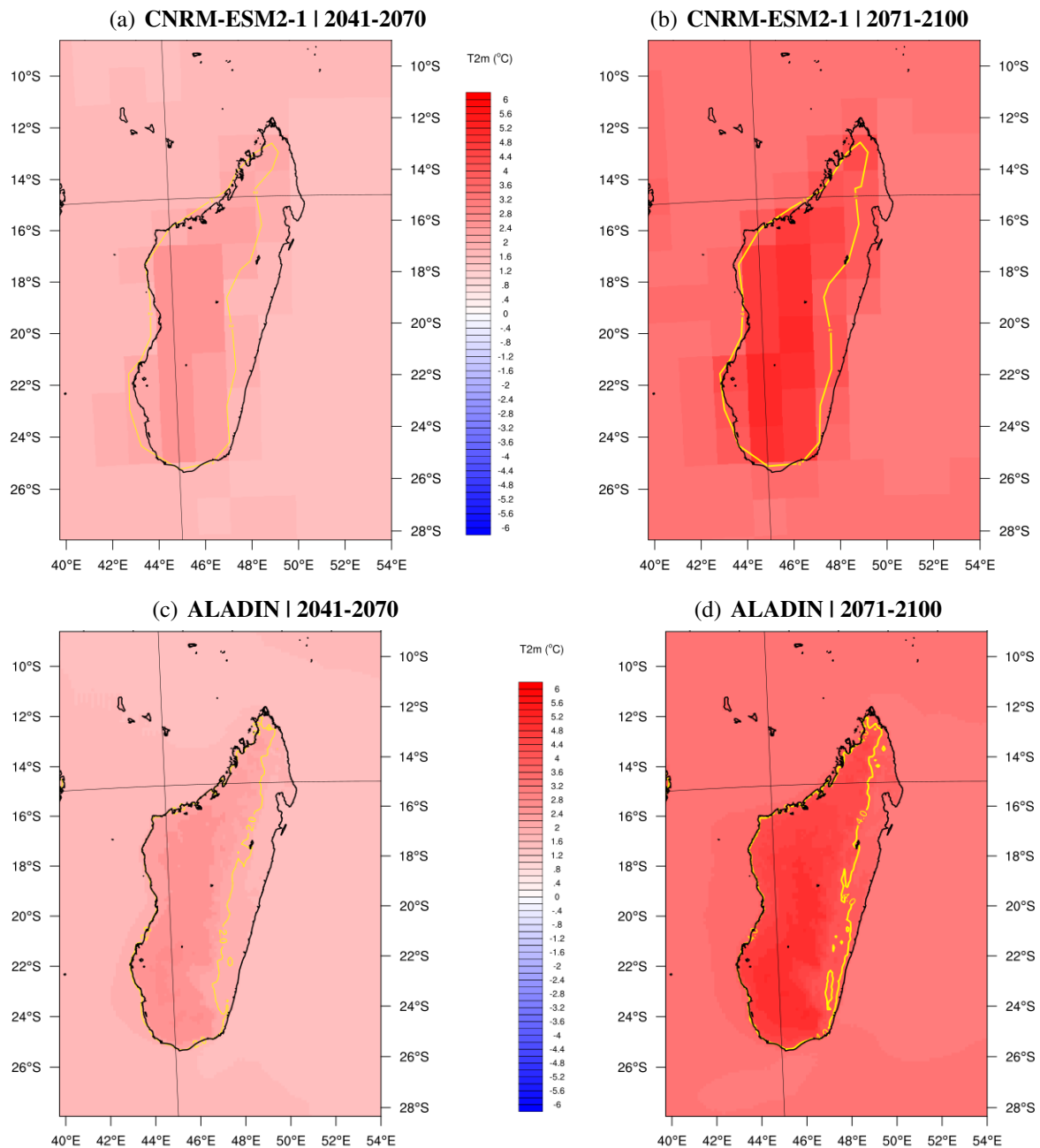


FIGURE 6.13 – Anomalies de température moyenne annuelle à +2 m (en °C par rapport à 1981-2010) sur Madagascar selon les modèles *CNRM-ESM2* (en haut) et *ALADIN* (en bas) en scénario *SSP5-8.5* pour deux horizons temporels (milieu de siècle à gauche et fin de siècle à droite). Les contours jaunes représentent les isolignes +2 et +4°C.

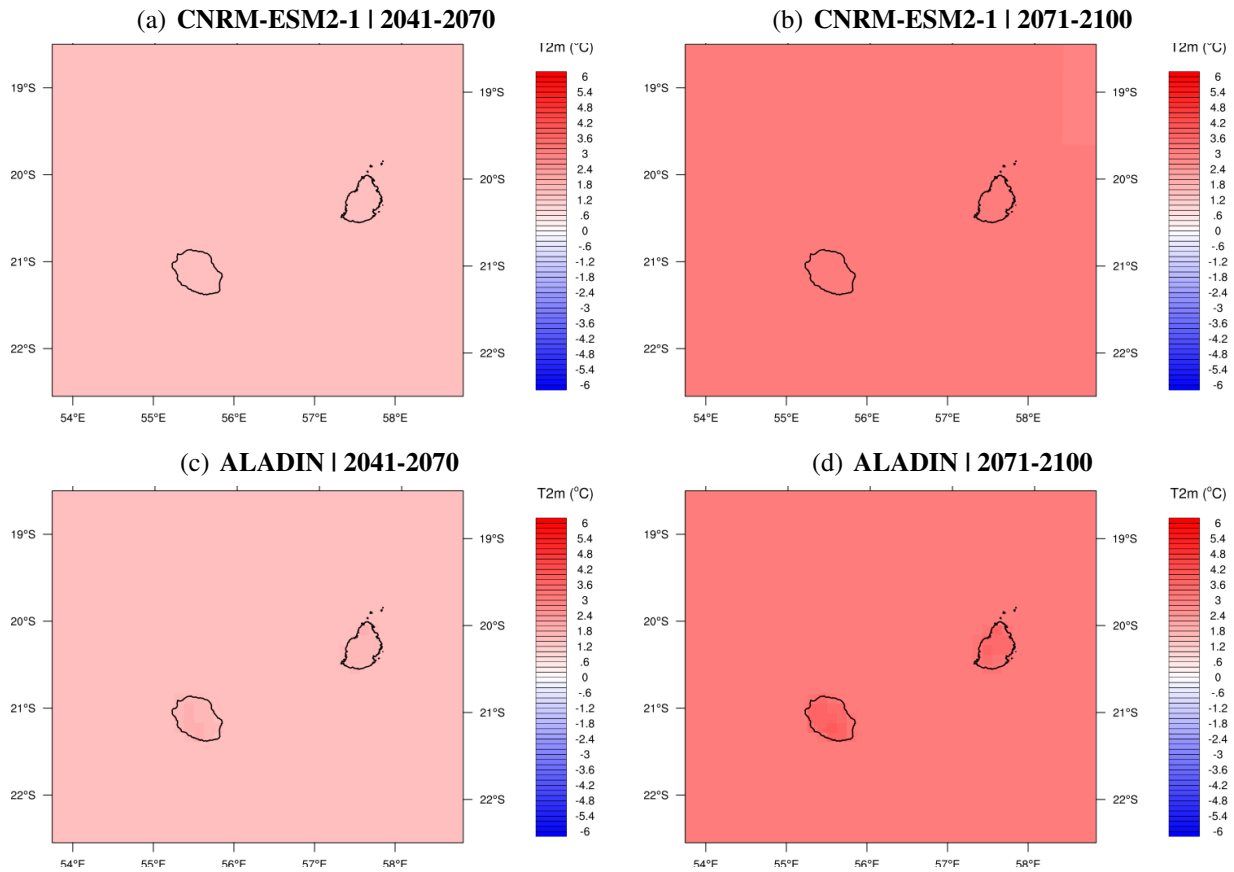


FIGURE 6.14 – Similaire à la figure 6.13 mais sur l'archipel des Mascareignes.

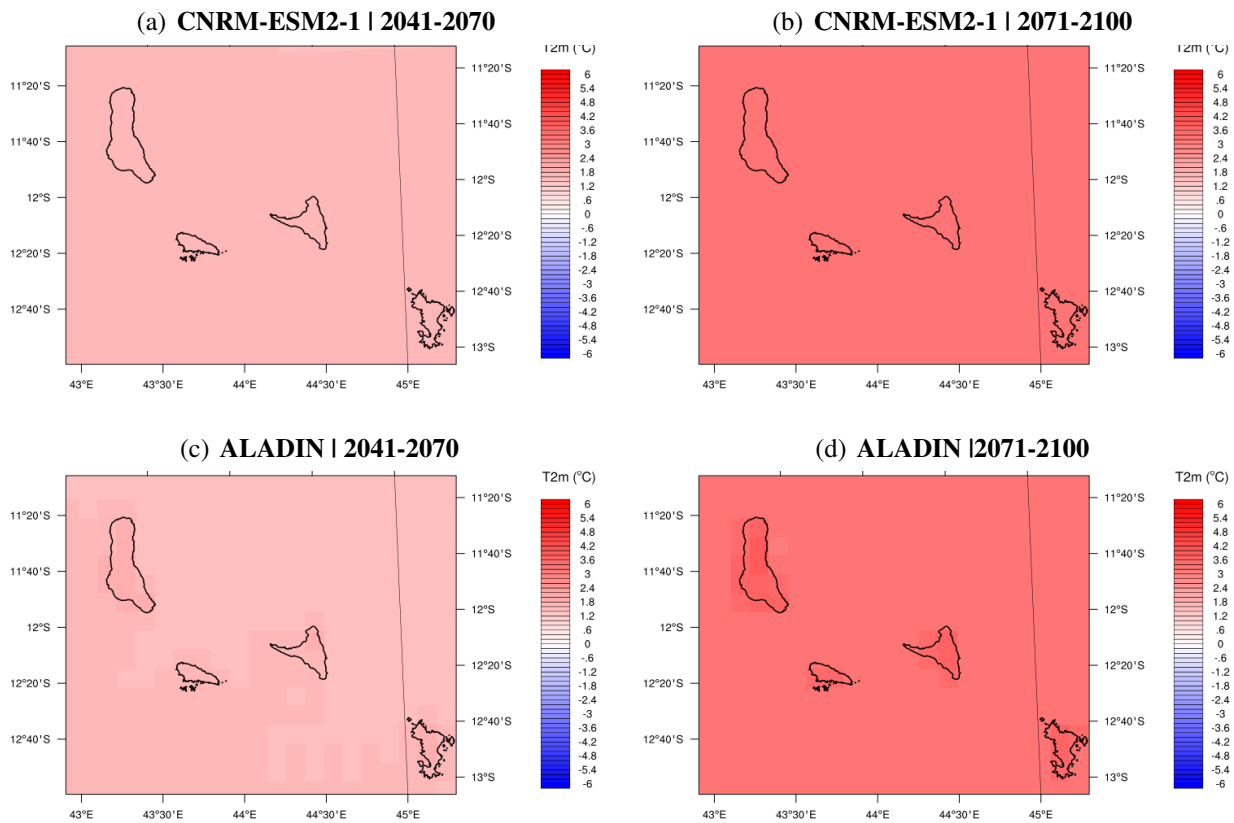


FIGURE 6.15 – Similaire à la figure 6.13 mais sur l'archipel des Comores.

6.3 PROJECTIONS CLIMATIQUES DE L'ACTIVITÉ CYCLONIQUE (CORRIGÉES EN INTENSITÉ)

Face à la grande incertitude qui existe sur l'évolution de l'activité cyclonique, nous augmentons notre jeu de données **BRIO** en incluant la simulation **ARPEGE** étiré ou "stréché" de ReNovRisk-Cyclones décrite en section 2.4.

6.3.1 Evolution en fréquence de l'activité cyclonique

Une fois les corrections de biais en intensité réalisées sur la période 1981-2100 (e.g., Fig. 5.24), on peut s'intéresser à l'évolution future de la fréquence des systèmes dépressionnaires par seuil d'intensité. Pour cela, on compte dans chaque intervalle de vent de 5 m.s^{-1} le nombre d'instances de systèmes (par pas de 6 h) durant 34 ans en fin de siècle (2066-2099) et durant la période historique de 34 ans. La différence des valeurs entre période future et historique est affichée dans les histogrammes de la figure 6.16 pour les 3 scénarios **SSP**. La simulation **ARPEGE-str** pour le scénario **RCP8.5** vient compléter le diagnostic sur l'évolution en fréquence de l'activité cyclonique en fin de siècle (Fig. 6.17).

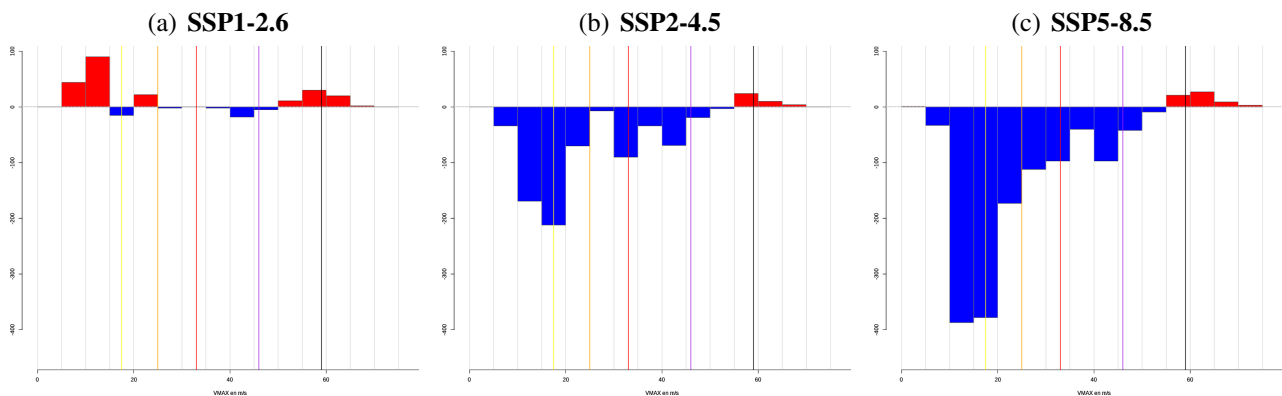


FIGURE 6.16 – Evolution de la fréquence des systèmes cycloniques du bassin sud-ouest de l'océan Indien par seuil de vent dans les simulations **ALADIN** sur la période future 2066-2099 pour 3 scénarios (a) **SSP1-2.6**, (b) **SSP2-4.5**, et (c) **SSP5-8.5**. Les résultats sont affichés après correction des biais en intensité et relativement à la période de référence 1981-2014. En rouge une augmentation du nombre, en bleu une diminution.

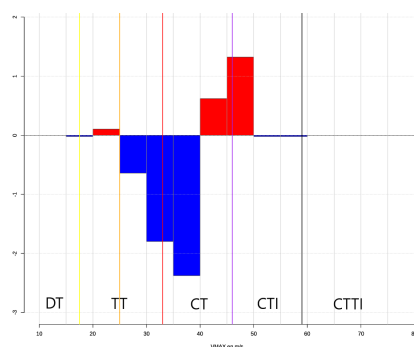


FIGURE 6.17 – Similaire à la figure 6.16 mais pour le modèle **ARPEGE-str**, le scénario **RCP8.5** et la période 2047-2093

Les figures 6.16 et 6.17 montrent un signal robuste de diminution du nombre de systèmes dépressionnaires, plus prononcé dans le cas du scénario **SSP5-8.5** (simulation **ALADIN**) ou **RCP8.5** (simulation **ARPEGE-str**). L'évolution de la densité des systèmes cycloniques (Fig. 6.18) confirme ce signal. En revanche, le nombre de systèmes intenses ou très intenses sera probablement constant ou en hausse en fin de siècle (Figs. 6.18(c), 6.18(d), 6.16, 6.17).

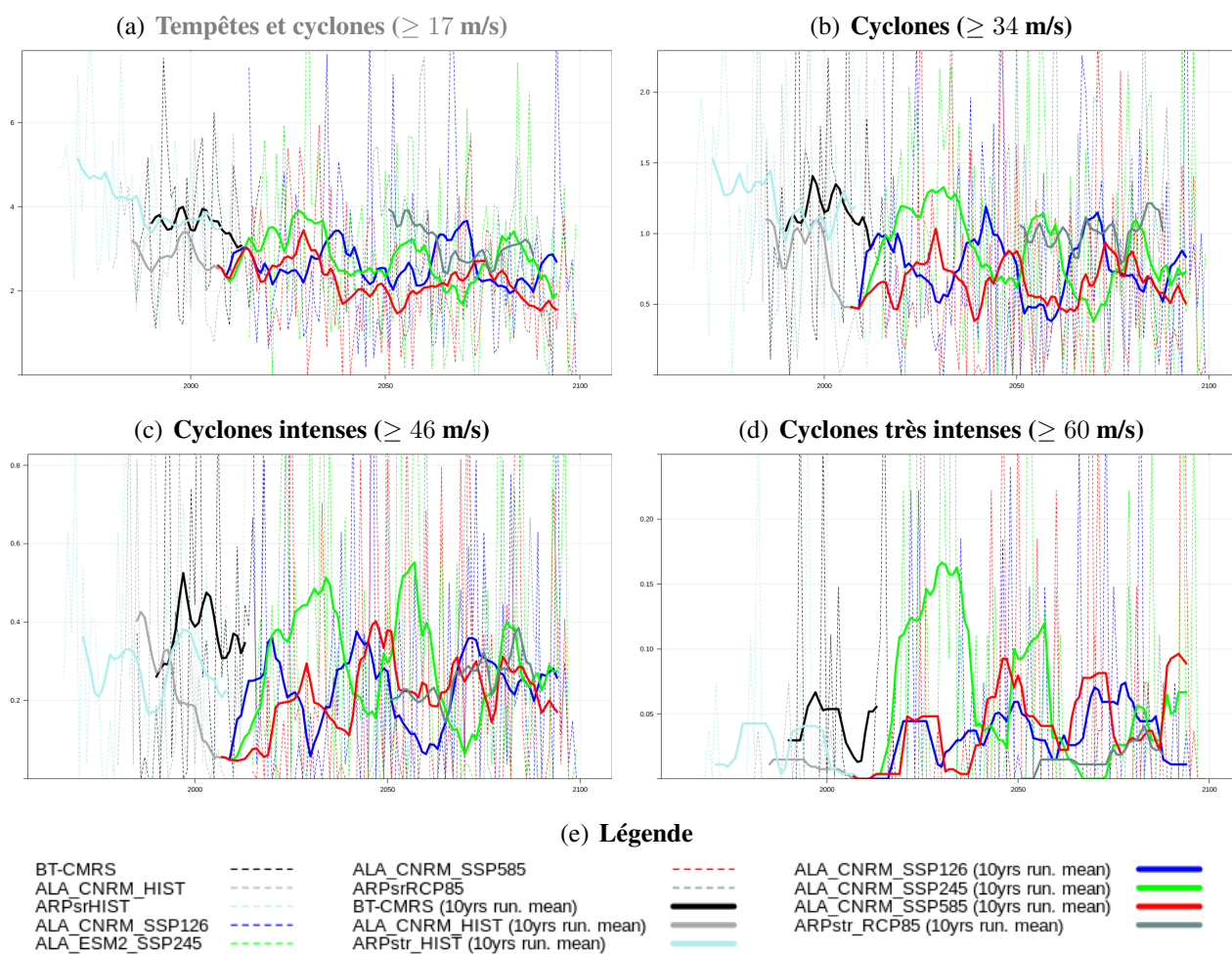


FIGURE 6.18 – Evolution chronologique sur la période 1965-2100 de la densité des systèmes cycloniques par catégorie d'intensité (a) à (d) dans les simulations *ALADIN* (3 scénarios *SSP*) et *ARPEGE-str* (scénario *RCP8.5*). Les résultats sont affichés après correction des biais en intensité des deux modèles. La densité est calculée sur la zone $[5^{\circ}S - 30^{\circ}S; 30^{\circ}E - 65^{\circ}E]$. Des moyennes glissantes de 10 ans (courbes en traits continus) sont appliquées pour lisser la variabilité interannuelle (courbes pointillées).

6.3.2 Evolution spatiale de l'activité cyclonique

La figure 6.19 montre l'évolution, dans les simulations ALADIN, des trajectoires des systèmes cycloniques à divers stades d'intensité et après correction des biais d'intensité de la distribution. Il est difficile de se prononcer sur l'évolution spatiale de l'activité cyclonique en raison du fort biais spatial constaté dans les simulations des modèles ALADIN et ARPEGE-str sur la période de référence, biais qui n'a pas pu être corrigé. Nous pouvons noter que l'activité cyclonique future ne semble pas grandement modifiée sur la zone des Comores, quel que soit le scénario (Fig. 6.19).

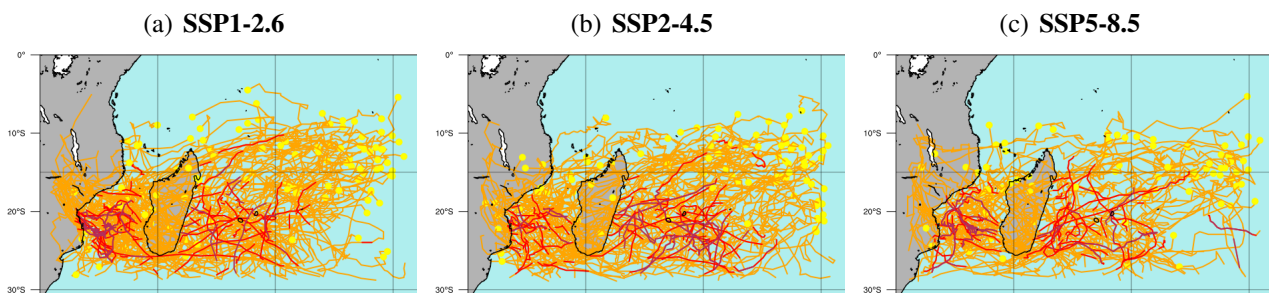


FIGURE 6.19 – Trajectoires des systèmes tropicaux du bassin sud-ouest de l'océan Indien dans les simulations ALADIN sur la période future 2066-2100 pour 3 scénarios (a) SSP1-2.6, (b) SSP2-4.5, et (c) SSP5-8.5, après correction des biais en intensité. En orange les systèmes au stade de tempête, en rouge ceux au stade de cyclone, et en pourpre les cyclones intenses et très intenses. Un rond jaune matérialise le début de chaque trajectoire.

6.3.3 Evolution de la position du maximum d'intensité cyclonique

En observation, nous avons vu une tendance à l'extension des tropiques et à la migration vers le pôle de la position du maximum d'intensité cyclonique (section 2.2). Cette tendance se poursuivra probablement au cours du siècle d'après l'ensemble des projections régionales (Fig. 6.20). Cela se traduira par un risque accru de passage d'un système dévastateur sur les îles Mascareignes. Notons que la migration est plus franche en scénario SSP5-8.5 et dans la simulation ARPEGE-str à cause d'un biais initial de la position des systèmes tropicaux vers le sud plus important dans ALADIN.

6.3.4 Messages clés sur l'évolution de long terme

Les simulations régionales disponibles montrent une probable diminution du nombre total de systèmes dépressionnaires dans le sud-ouest de l'océan Indien, un nombre de systèmes intenses ou très intenses constant ou en hausse, et une probable augmentation du maximum d'intensité cyclonique. En outre, la bande de latitude où l'on observe actuellement les maximums d'intensité cyclonique devrait migrer vers le sud, se traduisant par un risque accru de passage d'un système dévastateur sur les îles sœurs.

En outre, selon la relation physique de Clausius-Clapeyron, l'air peut contenir 7% de plus de vapeur d'eau par degré de réchauffement. Quand la vapeur d'eau se condense en pluie, la quantité qui précipite au sol peut augmenter dans les mêmes proportions. Dans le contexte du réchauffement climatique, on peut donc s'attendre à une intensification des précipitations au sein des systèmes dépressionnaires tropicaux au cours du 21^{ème} siècle.

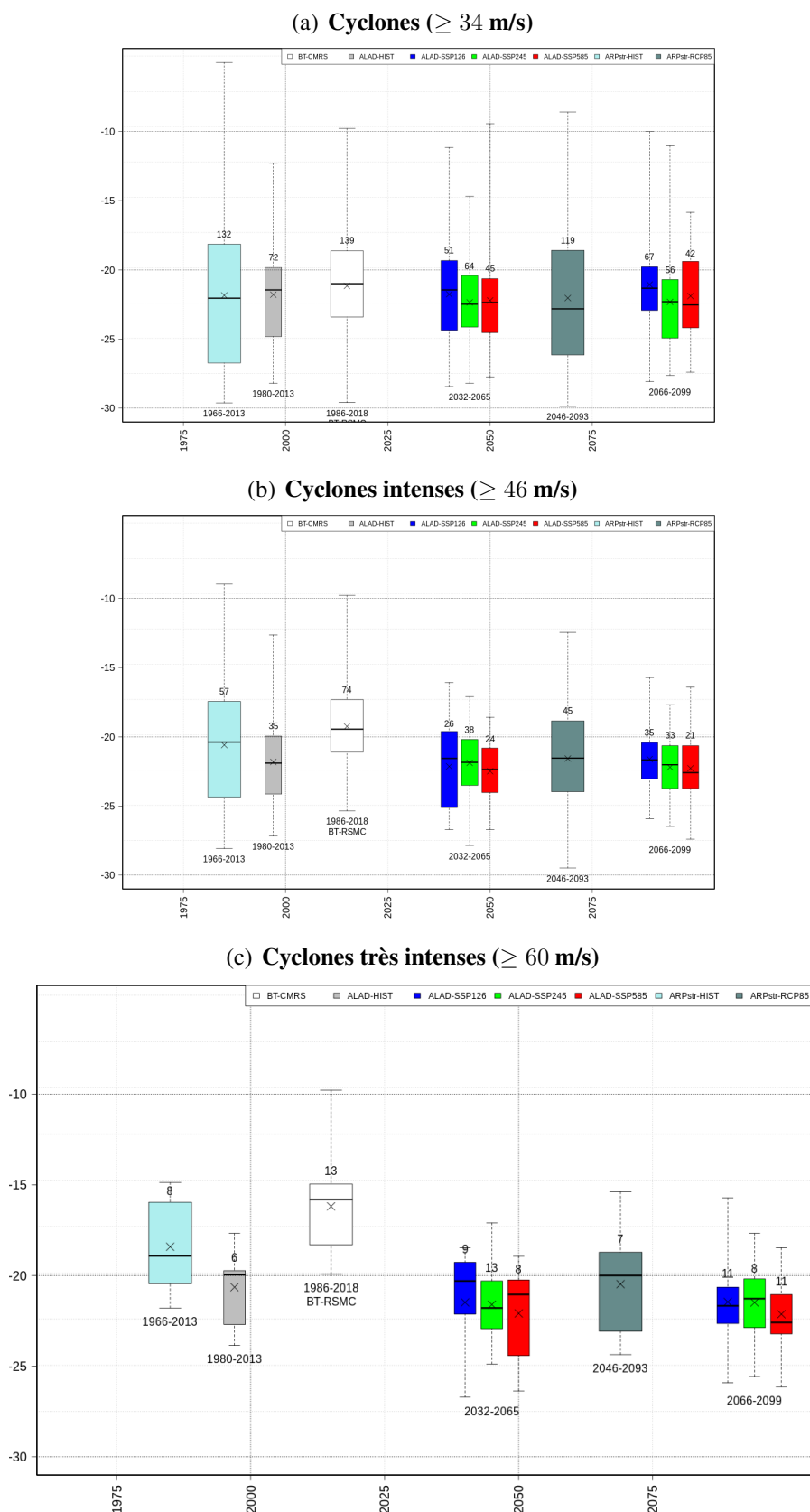


FIGURE 6.20 – Evolution de la latitude du maximum d'intensité cyclonique sur la période 1965-2100 par catégorie d'intensité ((a) à (c)) dans les simulations *ALADIN* (3 scénarios *SSP*) et *ARPEGE-str* (scénario *RCP8.5*). Les valeurs de la Best track sont affichées pour référence. Les modèles ont été préalablement corrigés de leurs biais en intensité. Les boîtes à moustaches mettent en valeur la médiane C50 (trait), la moyenne (croix), les 1^{er} et 3^{ème} quartiles i.e. les centiles C25 et C75 (contours des boîtes), et les valeurs minimales et maximales.

6.4 PROJECTIONS CLIMATIQUES DE TEMPÉRATURES ET PRÉCIPITATIONS SUR LES ÎLES (CORRIGÉES)

6.4.1 Projections des précipitations à Madagascar

La figure 6.21 montre l'évolution temporelle sur la période 1981-2100 des anomalies de précipitations annuelles (par rapport à la normale climatique 1981-2010) pour chaque zone climatique de Madagascar et selon les trois scénarios climatiques. Une baisse générale des précipitations annuelles est attendue, sauf dans les deux zones "sud et sud-ouest continental" et "littoral sud-ouest". Le modèle ALADIN anticipe aussi une accentuation de l'amplitude de la variabilité interannuelle des précipitations, sauf dans l'extrême nord où la variabilité historique était déjà très élevée. Les extrêmes seront plus importants : des années avec des cumuls de pluie plus faibles (risque sécheresse) versus plus élevés (risque inondation) que dans le passé. C'est dans le scénario SSP5-8.5 que la baisse des précipitations annuelles moyennes sera la plus prononcée sur la Grande Île, atteignant -10% à -20%, avec des extrêmes à presque -30% sur la haute terre centrale en milieu de siècle (Fig. 6.22).

Les cumuls trimestriels indiquent un retard de démarrage de la saison des pluies avec un trimestre OND plus sec que la normale historique hormis sur le littoral sud-ouest dans le scénario SSP1-2.6 (Figs. 6.23, 6.24, 6.25, 6.26). Les déficits atteignent -10% à -30% selon l'horizon et la localité en scénario SSP1-2.6 (Figs. 6.23, 6.24). Aucune région de la Grande Île ne sera épargnée en fin de siècle pour le scénario SSP5-8.5 avec des déficits de -20% à -50% (Fig. 6.26). La bordure littorale de la côte Est semble plus arrosée au trimestre AMJ quelque soit le scénario, probablement sous l'influence d'alizés plus forts et/ou plus fréquents que la normale. C'est en saison sèche, quand les cumuls de pluie sont les plus bas, que le signal du changement climatique est plus contrasté selon le scénario : une moitié ouest du pays anormalement arrosée en scénario SSP1-2.6 en début de siècle (Fig. 6.23) et dans une moindre mesure en fin de siècle (Fig. 6.24, comme pour le scénario SSP2-4.5 non illustré), tandis que des déficits de précipitations de -20% à -80% sont attendus dans le scénario SSP5-8.5 (Figs. 6.25, 6.26).

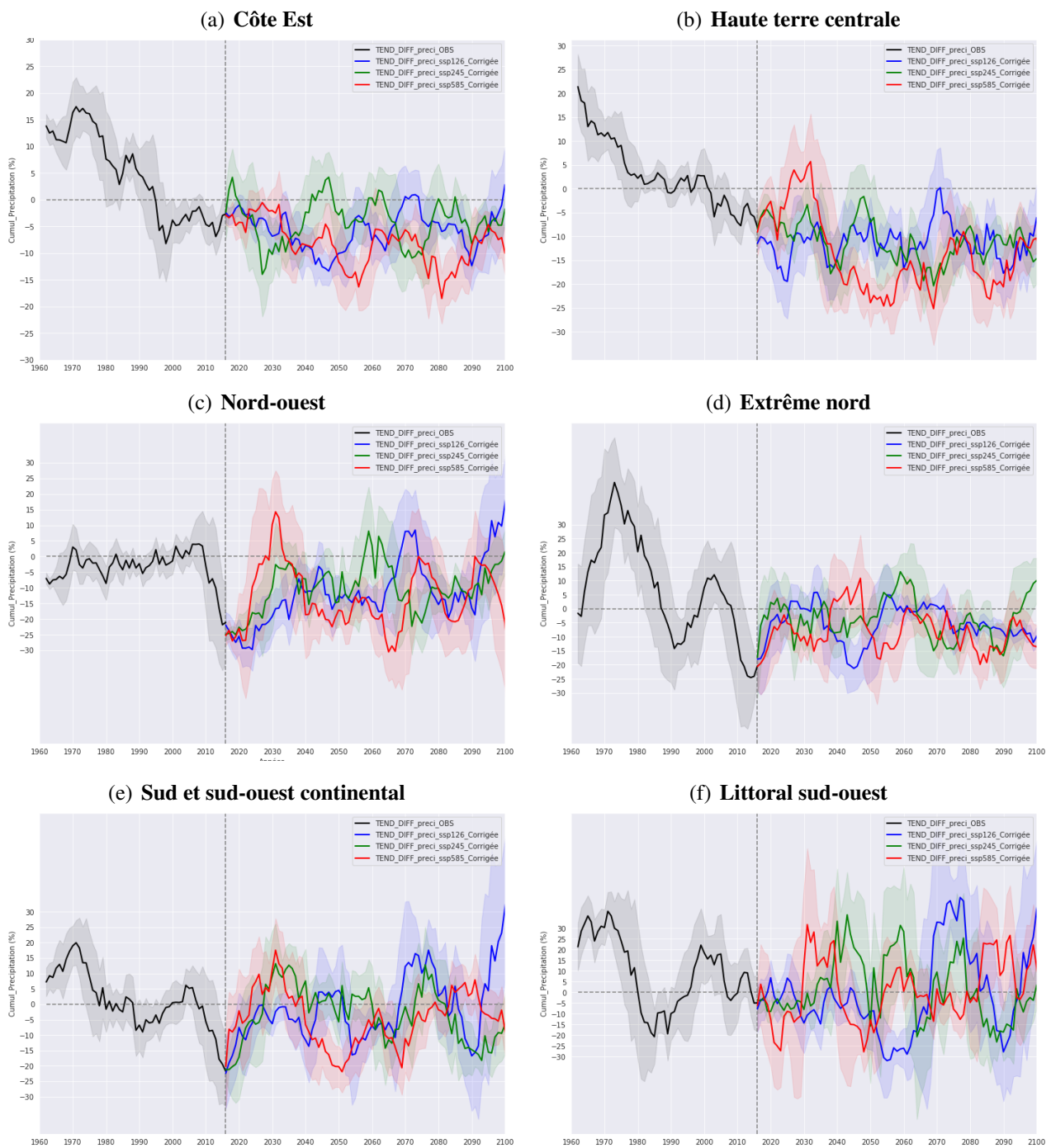


FIGURE 6.21 – Evolution temporelle sur la période 1981-2100 des anomalies (en % par rapport à la normale 1981-2010) du cumul annuel de précipitations sur les 6 zones climatiques de Madagascar selon le modèle régional ALADIN pour 3 scénarios SSP, après correction des biais. Les données d'observation sont en noir, l'historique modèle en gris, et les simulations du modèle pour 3 scénarios en couleurs. La ligne horizontale tirée situe la moyenne de référence 1981-2010.

6.4. Projections climatiques de températures et précipitations sur les îles (corrigées)

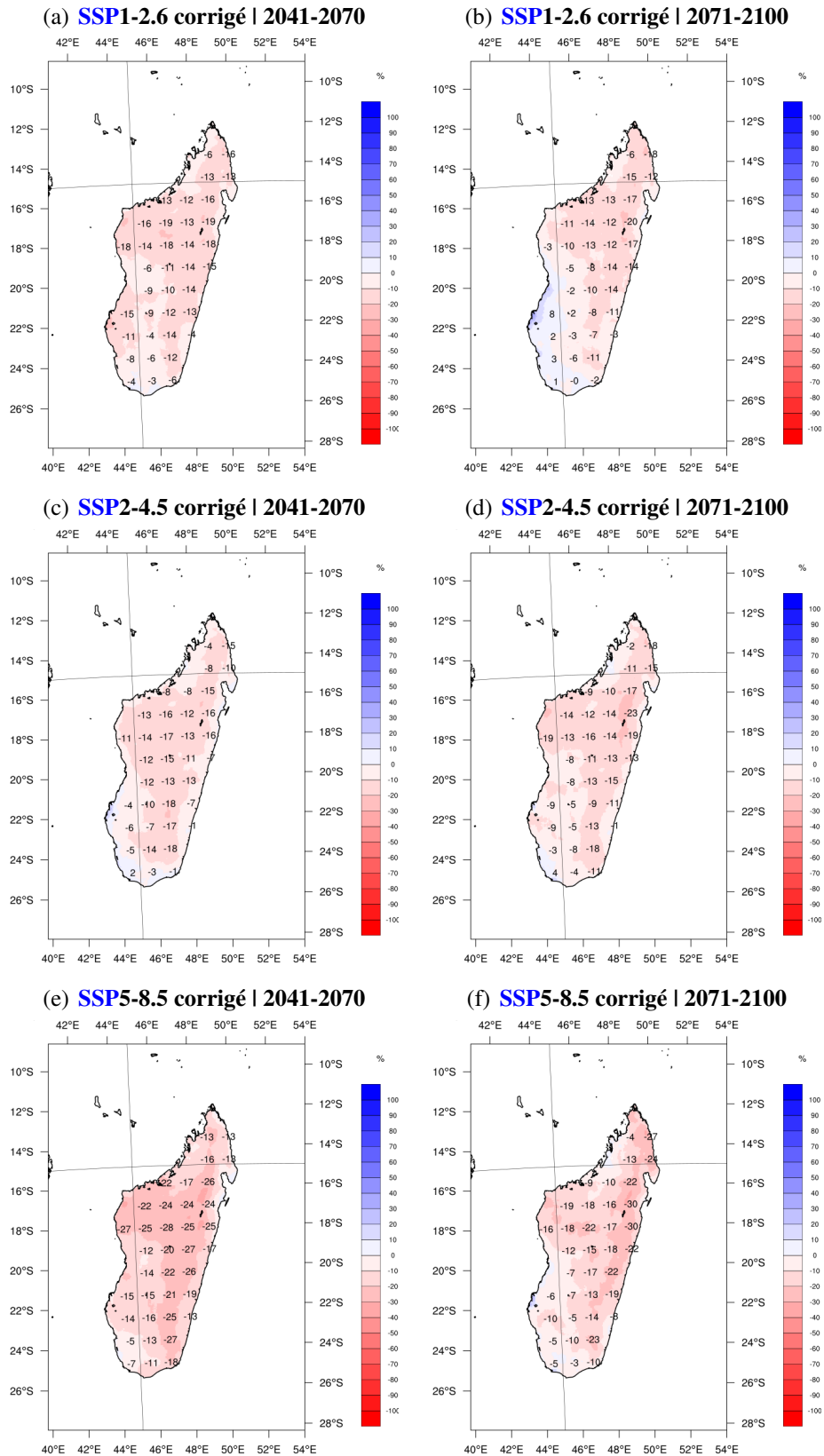


FIGURE 6.22 – Anomalies (en % par rapport à la normale 1981-2010) du cumul annuel de précipitations sur Madagascar selon le modèle régional ALADIN pour trois scénarios climatiques (*SSP1-2.6* en haut, *SSP2-4.5* au milieu, et *SSP5-8.5* en bas) et deux horizons temporels (milieu de siècle à gauche et fin de siècle à droite), après correction des biais.

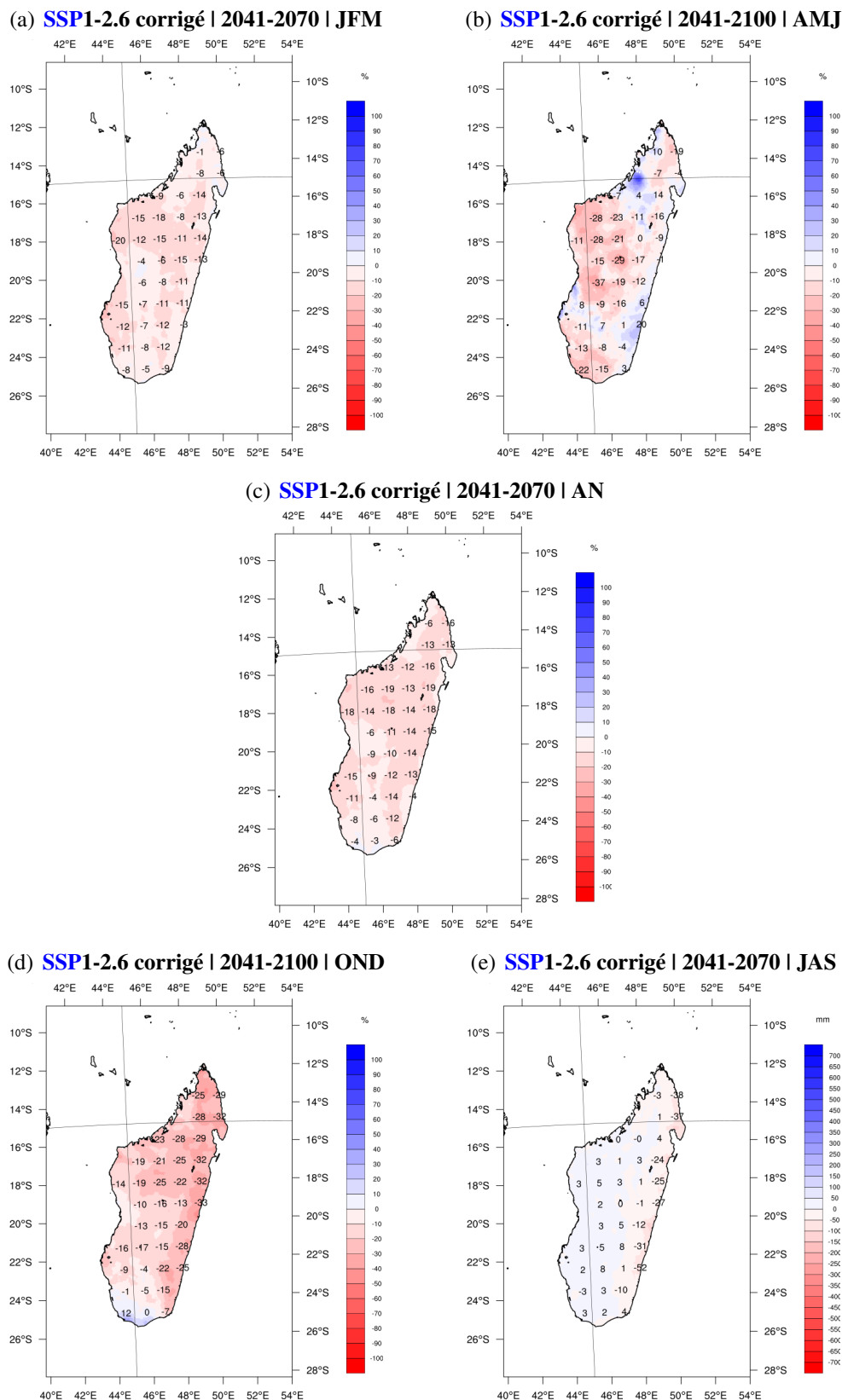


FIGURE 6.23 – Anomalies (en % ou en mm par rapport à la normale 1981-2010) des cumuls moyens de précipitations sur l’année (centre) et sur 4 trimestres de l’année (dans le sens des aiguilles d’une montre d’en haut à gauche vers en bas à gauche) sur Madagascar selon le modèle régional ALADIN pour le scénario SSP1-2.6 en milieu de siècle, après correction des biais. Les anomalies sont exprimées en % sauf pour la saison sèche JAS.

6.4. Projections climatiques de températures et précipitations sur les îles (corrigées)

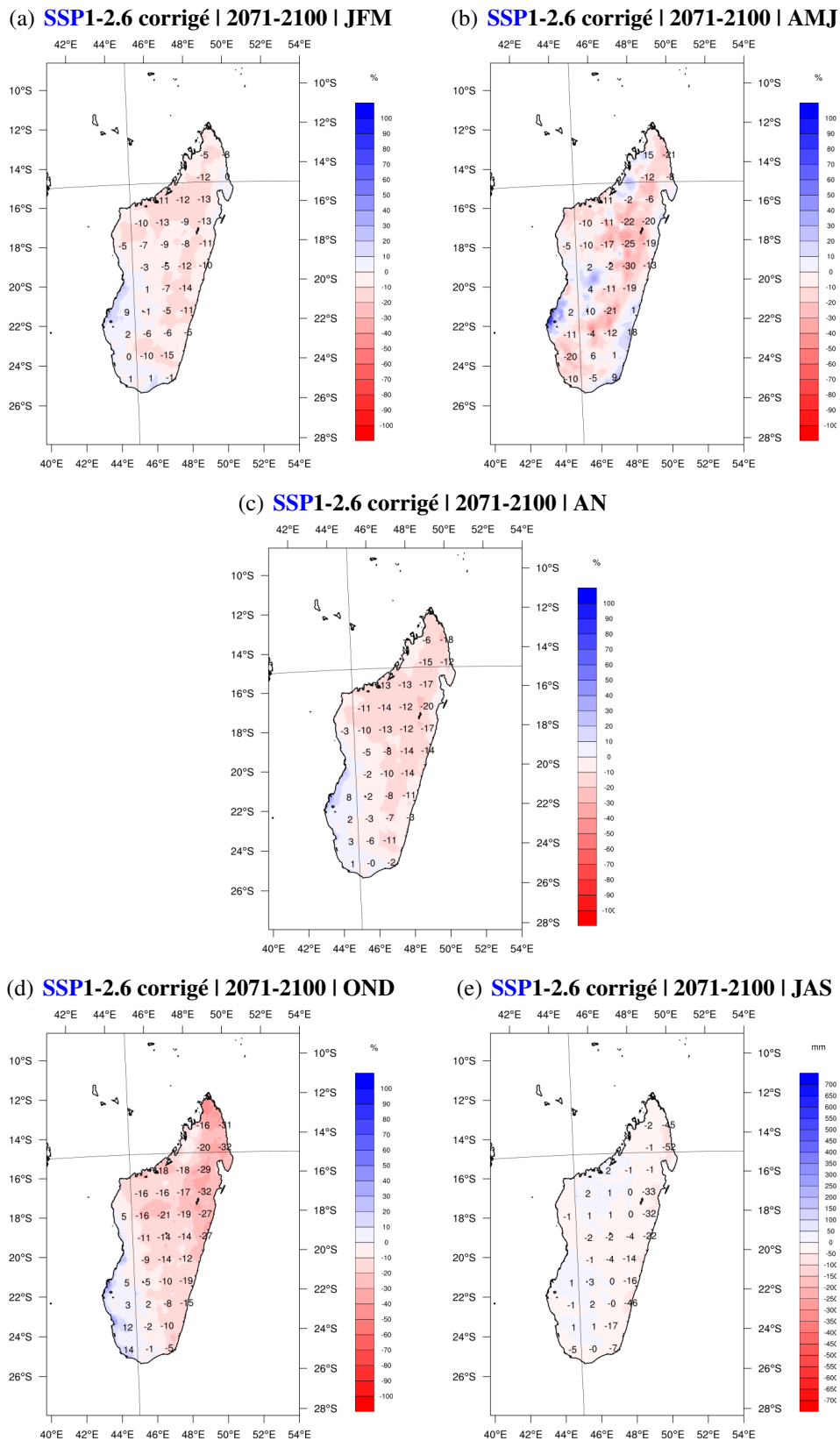


FIGURE 6.24 – Similaire à la figure 6.23 mais pour la fin de siècle. Les anomalies sont exprimées en % sauf pour la saison sèche *JAS*.

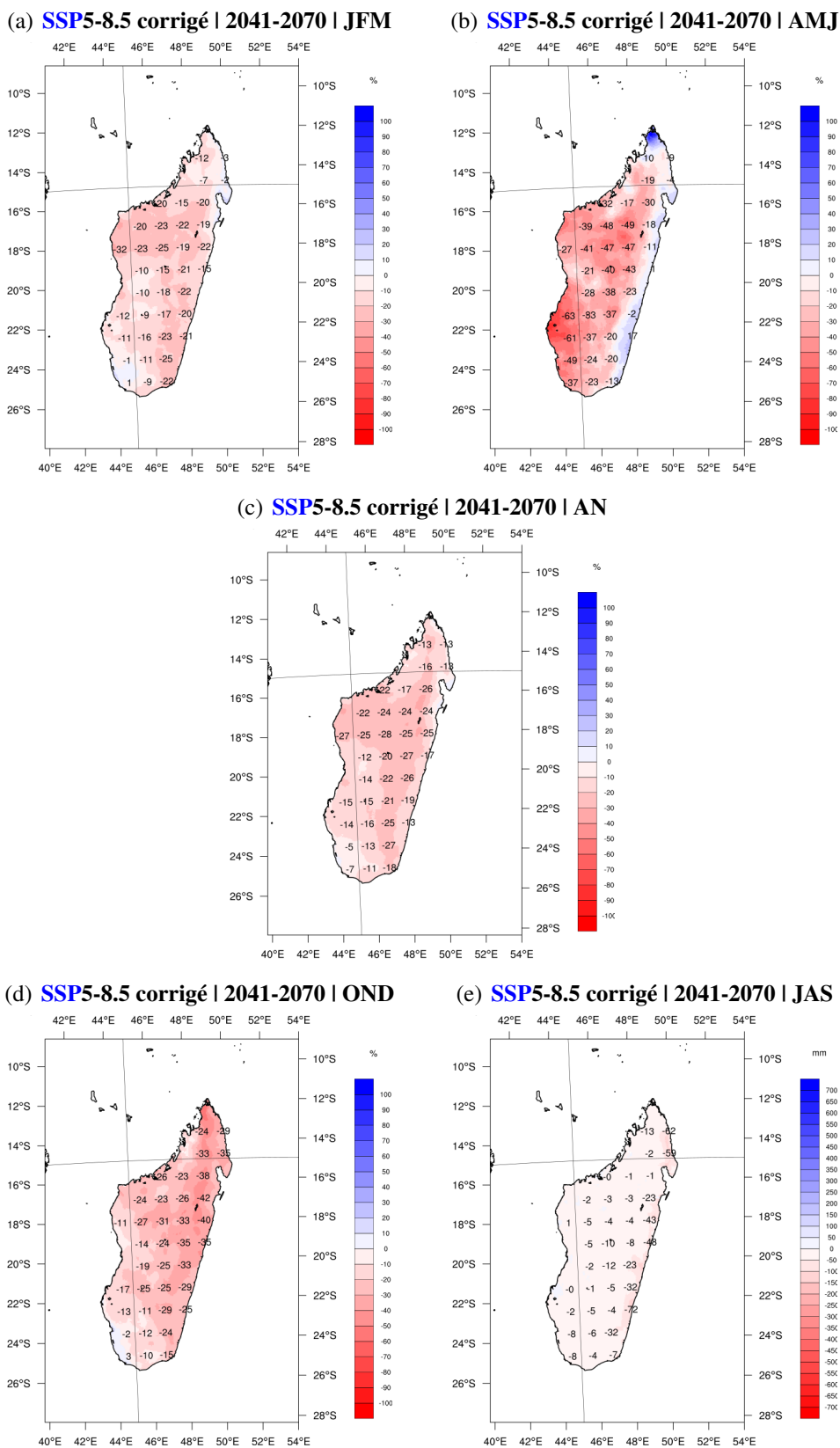


FIGURE 6.25 – Similaire à la figure 6.23 mais pour le scénario SSP5-8.5 en milieu de siècle. Les anomalies sont exprimées en % sauf pour la saison sèche JAS.

6.4. Projections climatiques de températures et précipitations sur les îles (corrigées)

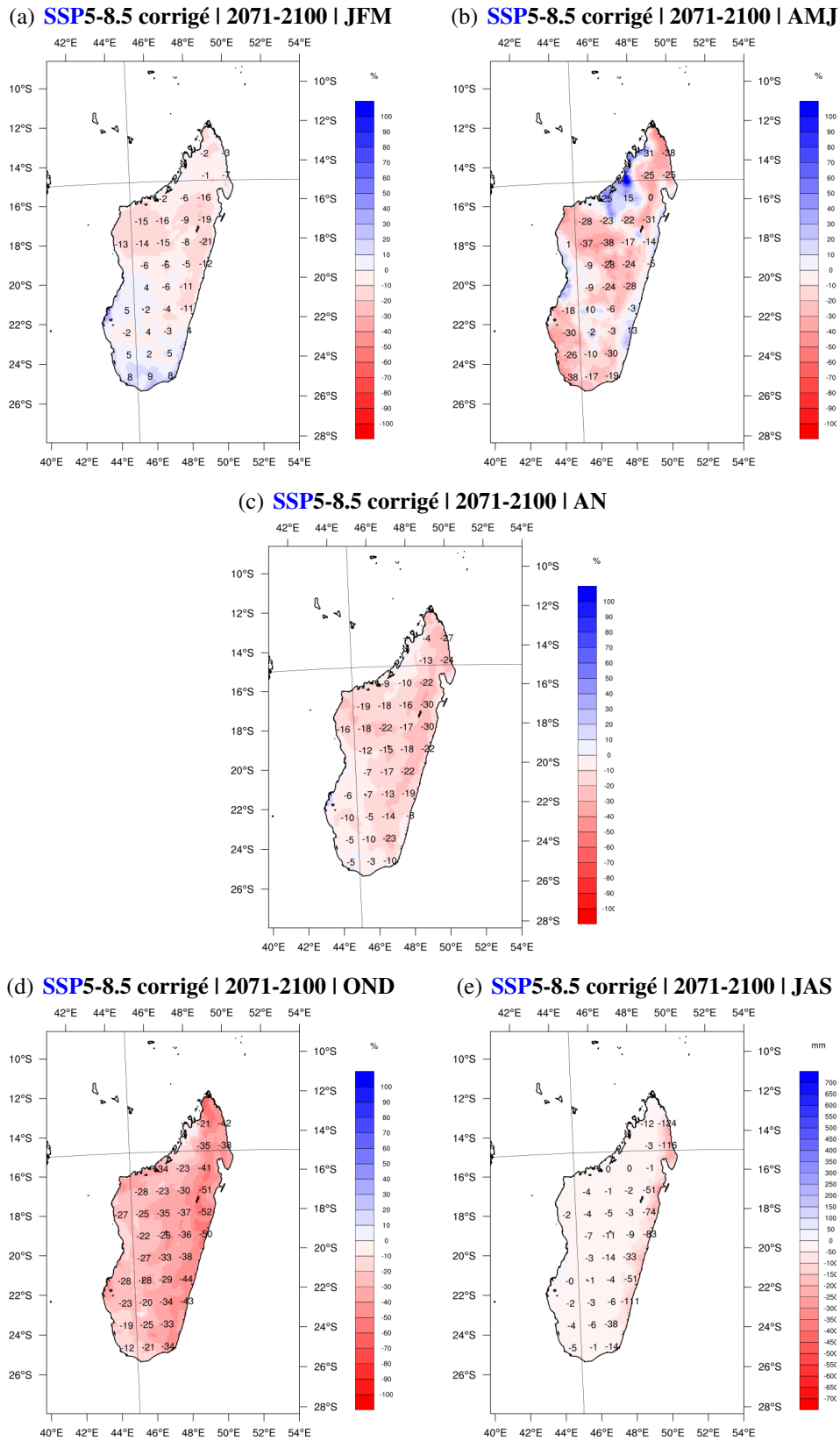


FIGURE 6.26 – Similaire à la figure 6.25 mais pour la fin de siècle. Les anomalies sont exprimées en % sauf pour la saison sèche *JAS*.

6.4.2 Projections des précipitations à La Réunion

Sur La Réunion, il n'y a pas de modification significative à attendre en terme de moyenne annuelle du cumul de précipitations pour les scénarios **SSP1-2.6** ou **SSP2-4.5** (Figs. 6.27 (a)-(d)) hormis dans l'ouest de l'île à certains horizons selon le scénario (Figs. 6.27 (b)-(c)). En revanche, une baisse nette des précipitations annuelles moyennes est attendue dans le scénario **SSP5-8.5** (Figs. 6.27 (e)-(f)).

C'est au pas de temps saisonnier que les cumuls de précipitations subiront des modifications plus franches sous l'effet du changement climatique. Les cumuls de précipitations trimestriels montrent pour chaque scénario des nettes variations par rapport à ce que nous avons connu dans la période historique de référence. Nous l'illustrons ici pour les deux scénarios extrêmes **SSP1-2.6** (Fig. 6.28 en milieu de siècle et Fig. 6.29 en fin de siècle) et **SSP5-8.5** (Fig. 6.30 en milieu de siècle et Fig. 6.31 en fin de siècle). Une diminution nette du cumul de précipitations sur la saison sèche (juillet-août-septembre) est à attendre dans tous les scénarios en milieu et fin de siècle (Figs. 6.28(e), 6.29(e), 6.30(e), 6.31(e), non illustré pour le scénario médian **SSP2-4.5**). En scénario pessimiste, la baisse des précipitations pourrait atteindre 25 à 45% en fin de siècle sur cette saison selon les secteurs de l'île (Fig. 6.31(e)). Une baisse sensible de 10 à 40% des précipitations sur le dernier trimestre de l'année (**OND**) présage un allongement de la saison sèche avec un probable retard de démarrage de la saison des pluies (Figs. 6.28(d), 6.29(d), 6.30(d), 6.31(d)). L'augmentation des cumuls de précipitations en coeur de saison des pluies (**JFM**) - jusqu'à environ 10% - présage d'événements précipitants plus nombreux ou vraisemblablement plus intenses, selon la relation de Clausius-Clapeyron qui permettra à l'air réchauffé de contenir plus de vapeur d'eau.

En conclusion, il faut s'attendre à une amplification des événements extrêmes dans le futur (sécheresses et inondations) en fréquence et en sévérité, et particulièrement en scénario **SSP5-8.5**, ainsi qu'à une saison des pluies décalée qui commencera tardivement et sera vraisemblablement plus courte.

6.4. Projections climatiques de températures et précipitations sur les îles (corrigées)

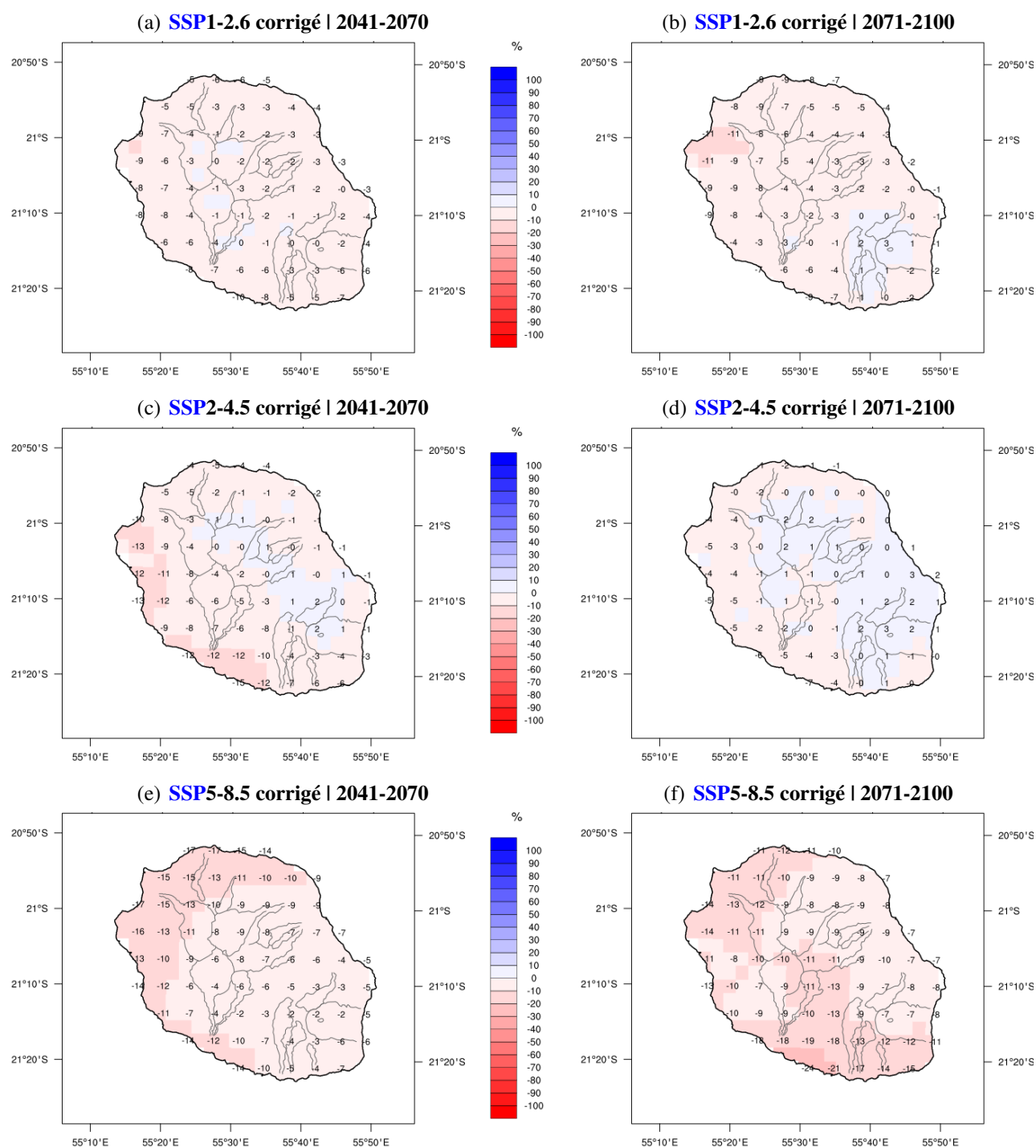


FIGURE 6.27 – Anomalies (en % par rapport à la normale 1981-2010) du cumul annuel de précipitations sur La Réunion selon le modèle régional *ALADIN* pour trois scénarios climatiques (*SSP1-2.6* en haut, *SSP2-4.5* au milieu, et *SSP5-8.5* en bas) et deux horizons temporels (milieu de siècle à gauche et fin de siècle à droite), après correction des biais. Les anomalies sont exprimées en % sauf pour la saison sèche *JAS*.

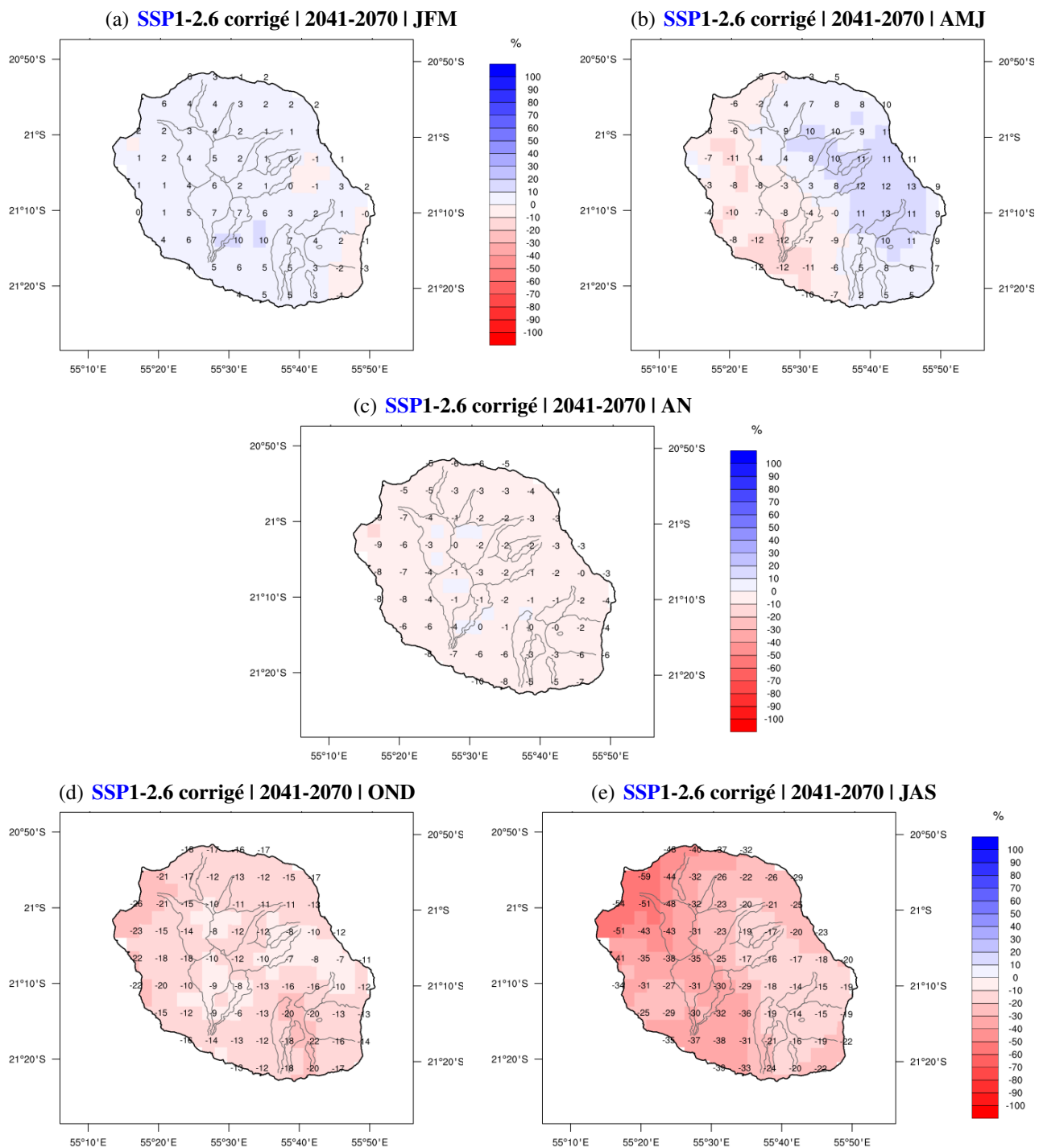


FIGURE 6.28 – Anomalies (en % par rapport à la normale 1981-2010) des cumuls moyens de précipitations sur l'année (centre) et sur 4 trimestres de l'année (dans le sens des aiguilles d'une montre d'en haut à gauche vers en bas à gauche) sur La Réunion selon le modèle régional ALADIN pour le scénario SSP1-2.6 en milieu de siècle, après correction des biais.

6.4. Projections climatiques de températures et précipitations sur les îles (corrigées)

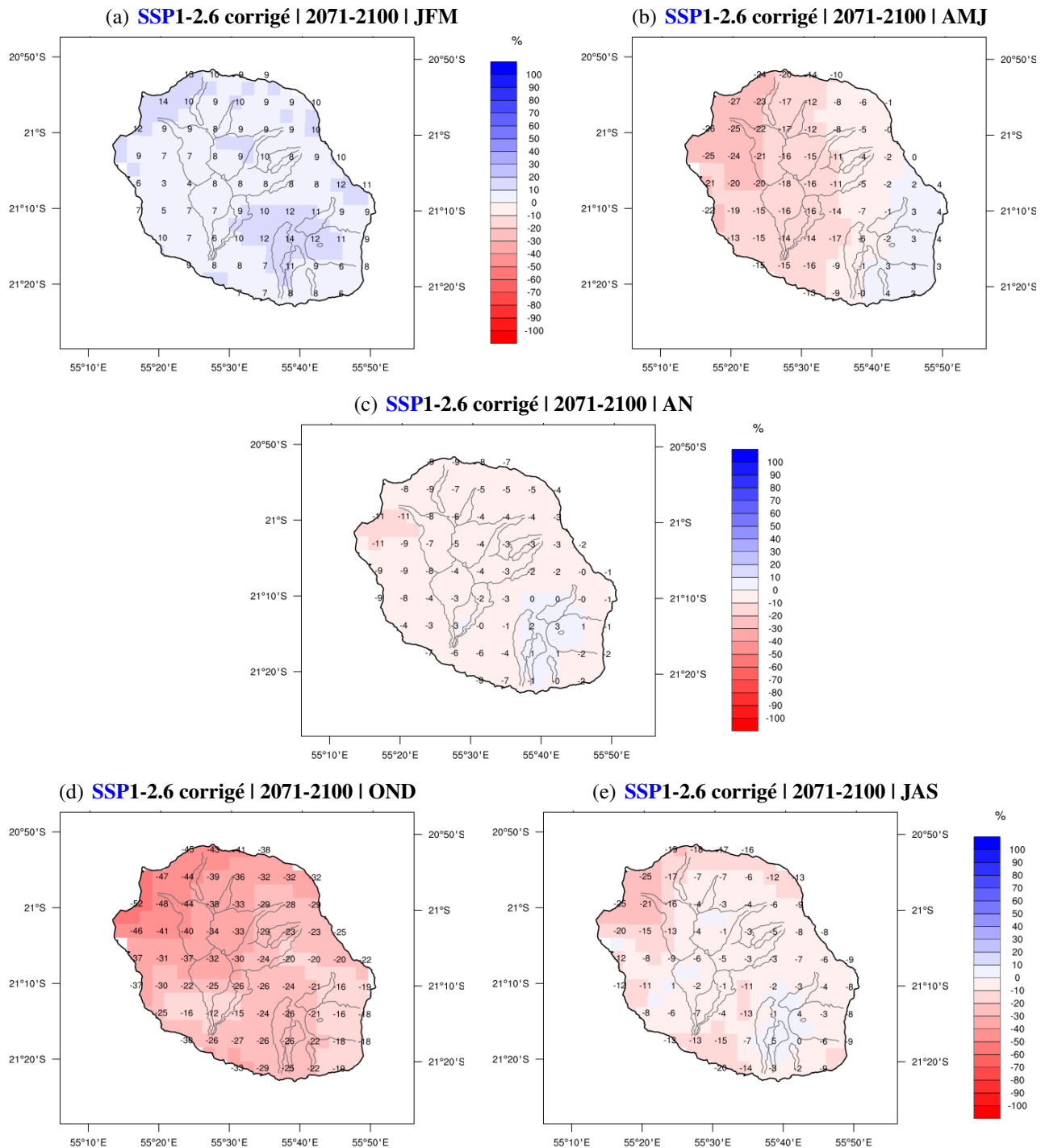


FIGURE 6.29 – Similaire à la figure 6.28 mais pour la fin de siècle.

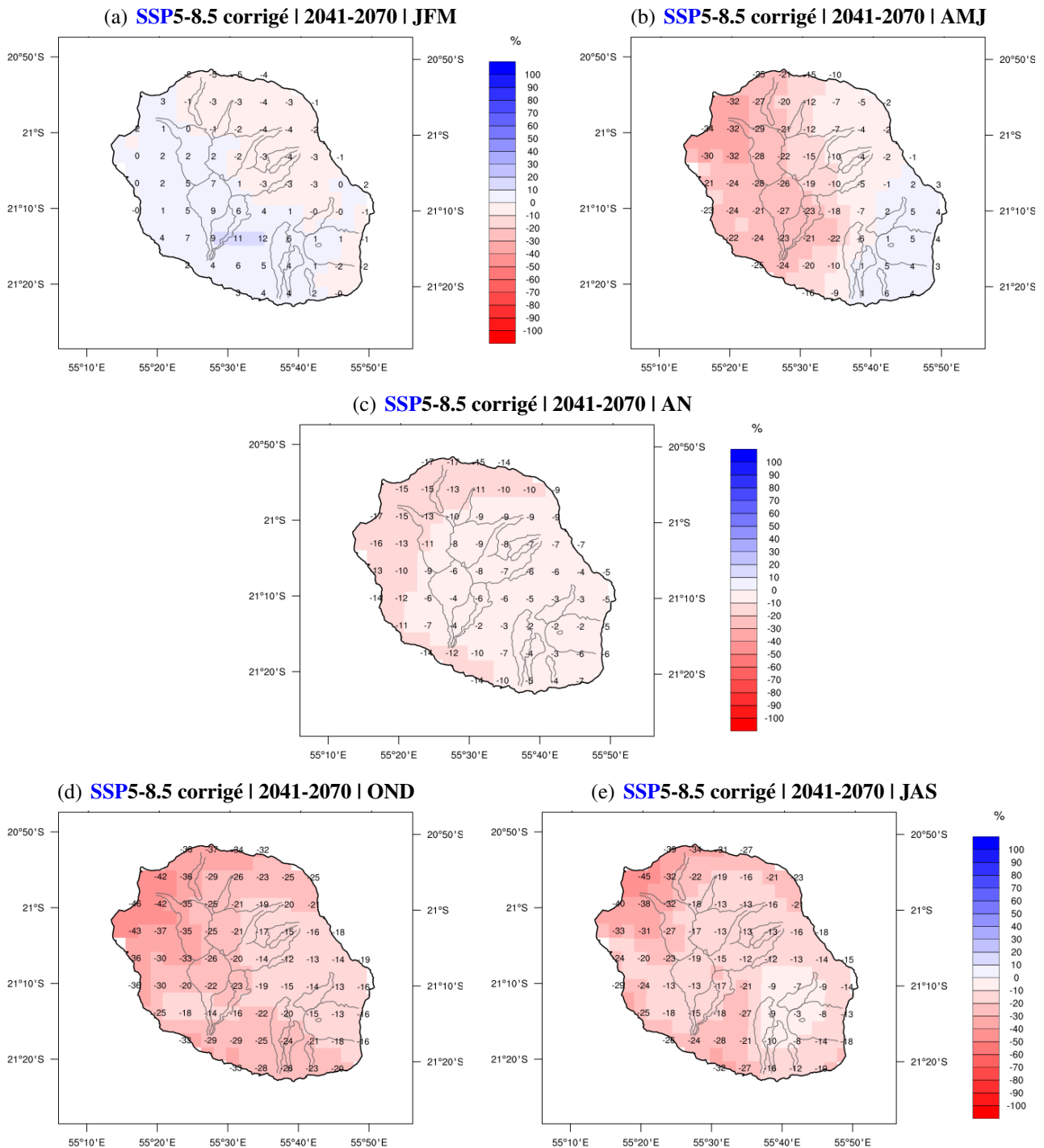


FIGURE 6.30 – Similaire à la figure 6.28 mais pour le scénario SSP5-8.5 en milieu de siècle.

6.4. Projections climatiques de températures et précipitations sur les îles (corrigées)

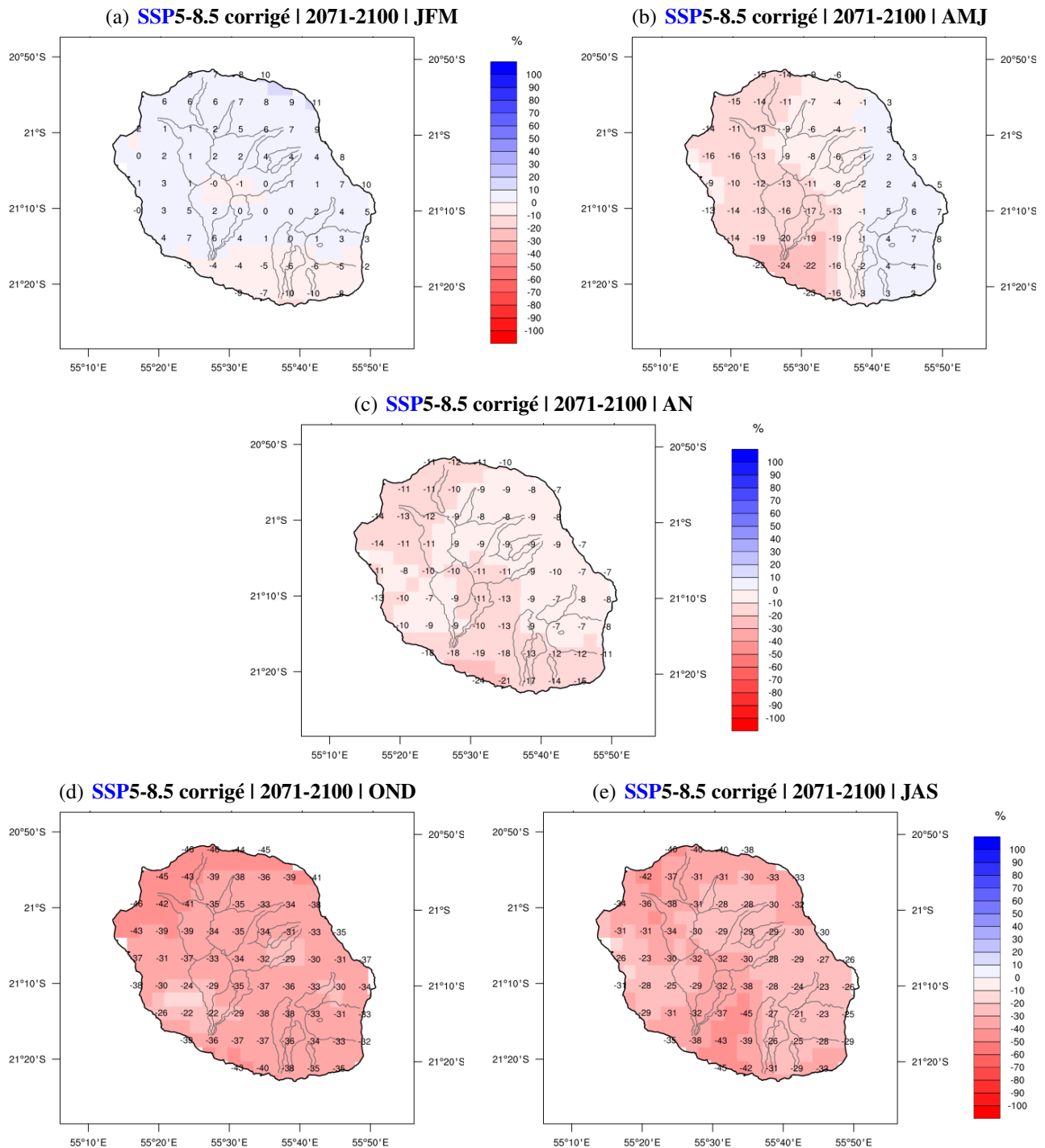


FIGURE 6.31 – Similaire à la figure 6.28 mais pour le scénario SSP5-8.5 en fin de siècle.

6.4.3 Projections des précipitations sur les îles de la République de Maurice

Quelque soit le scénario, les évolutions climatiques prévoient une accentuation de l'amplitude de la variabilité interannuelle des précipitations, c'est-à-dire des extrêmes plus importants (Fig. 6.32) : des années avec des cumuls de pluie plus faibles que dans le passé (sécheresses) et des années avec de plus fortes précipitations (et sujettes aux inondations). Ceci est visible sur l'ensemble des îles de la République Mauricienne, et même sur l'ensemble des îles de la COI.

Sur l'île Maurice, il n'y a pas de modification significative à attendre en terme de moyenne annuelle du cumul de précipitations pour les trois scénarios pour le milieu et la fin du siècle (Fig. 6.33). Le signal de grande échelle donné par le modèle global CNRM-ESM2-1 est en effet plus faible (cf diagnostics du changement climatique avant correction des biais en section 6.1.5). En revanche, une baisse significative des précipitations moyennes autour de 10% par rapport aux valeurs climatologiques de référence est attendue au dernier trimestre de l'année, en particulier sur la partie nord-ouest de l'île (Fig. 6.34). Cette baisse est plus prononcée dans les scénarios SSP1-2.6 et SSP5-8.5 et pourrait localement dépasser 20% sur la côte ouest. Pour plus de détails, le lecteur pourra se reporter aux graphiques et cartes offertes sur le portail régional du changement climatique.

Sur l'île Rodrigues (Fig. 6.35), une légère hausse des précipitations annuelles est attendue en milieu et fin de siècle sauf en scénario SSP5-8.5 où une baisse d'environ 10% est simulée en fin de siècle (Fig. 6.35(f)). Mais comme sur l'île Maurice, le déficit en précipitations sera marqué durant le dernier trimestre de l'année, quelque soit le scénario et l'horizon temporel (Fig. 6.36), et particulièrement en scénario SSP5-8.5.

Les résultats pour les îles de Saint Brandon et Agalega sont illustrés pour divers niveaux de réchauffement dans les infographies de synthèse en section 8 (Fig. 8.2 pour les anomalies de précipitations annuelles, Fig. 8.3 pour les anomalies de précipitations au 1^{er} semestre et Fig. 8.4 pour les anomalies de précipitations au 2nd semestre).

6.4. Projections climatiques de températures et précipitations sur les îles (corrigées)

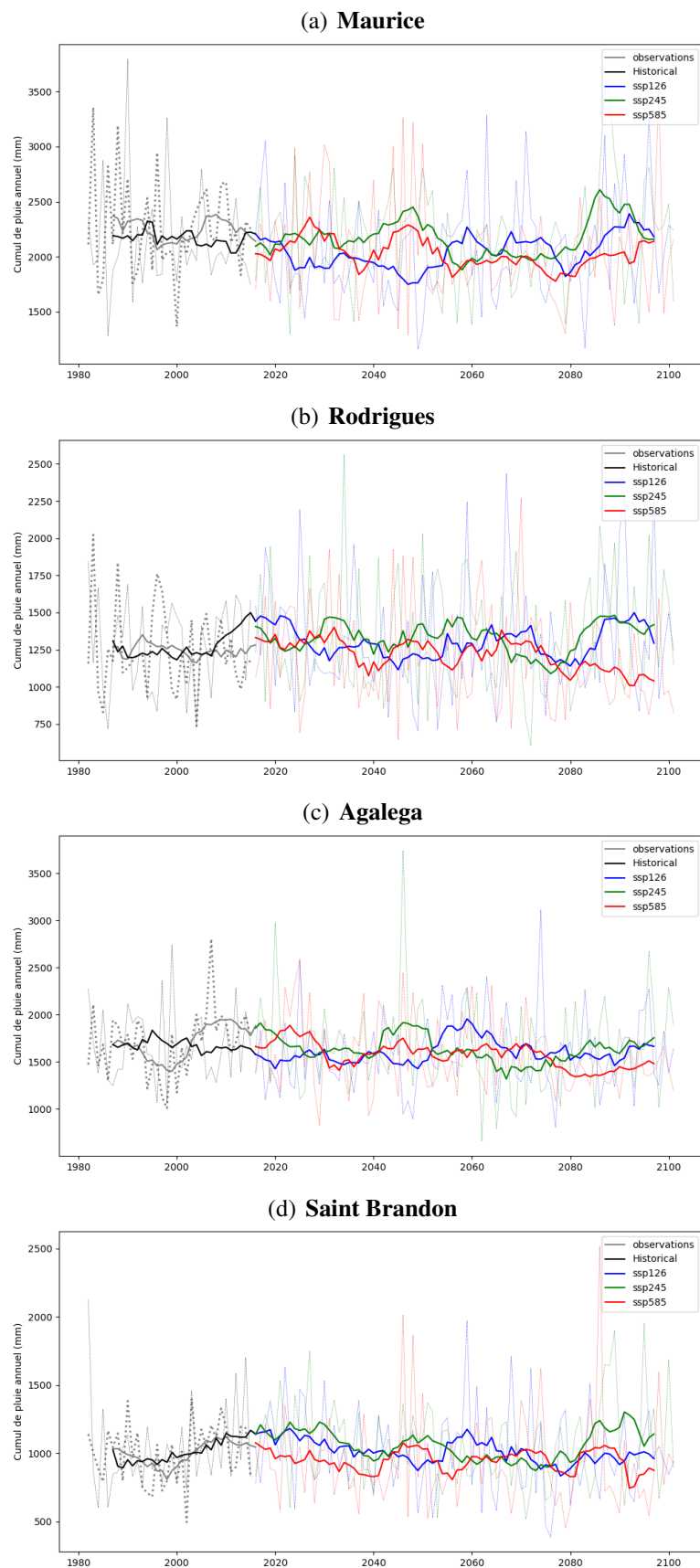


FIGURE 6.32 – Evolution temporelle sur la période 1981-2100 du cumul annuel de précipitations (mm) sur les îles de la République Mauricienne selon le modèle régional ALADIN pour 3 scénarios SSP, après correction des biais. Les données d'observation sont en gris, l'historique modèle en noir, et les simulations du modèle pour 3 scénarios en couleurs. Les lignes continues représentent la moyenne glissante sur 10 ans; les lignes plus fines en pointillés représentent les données annuelles.

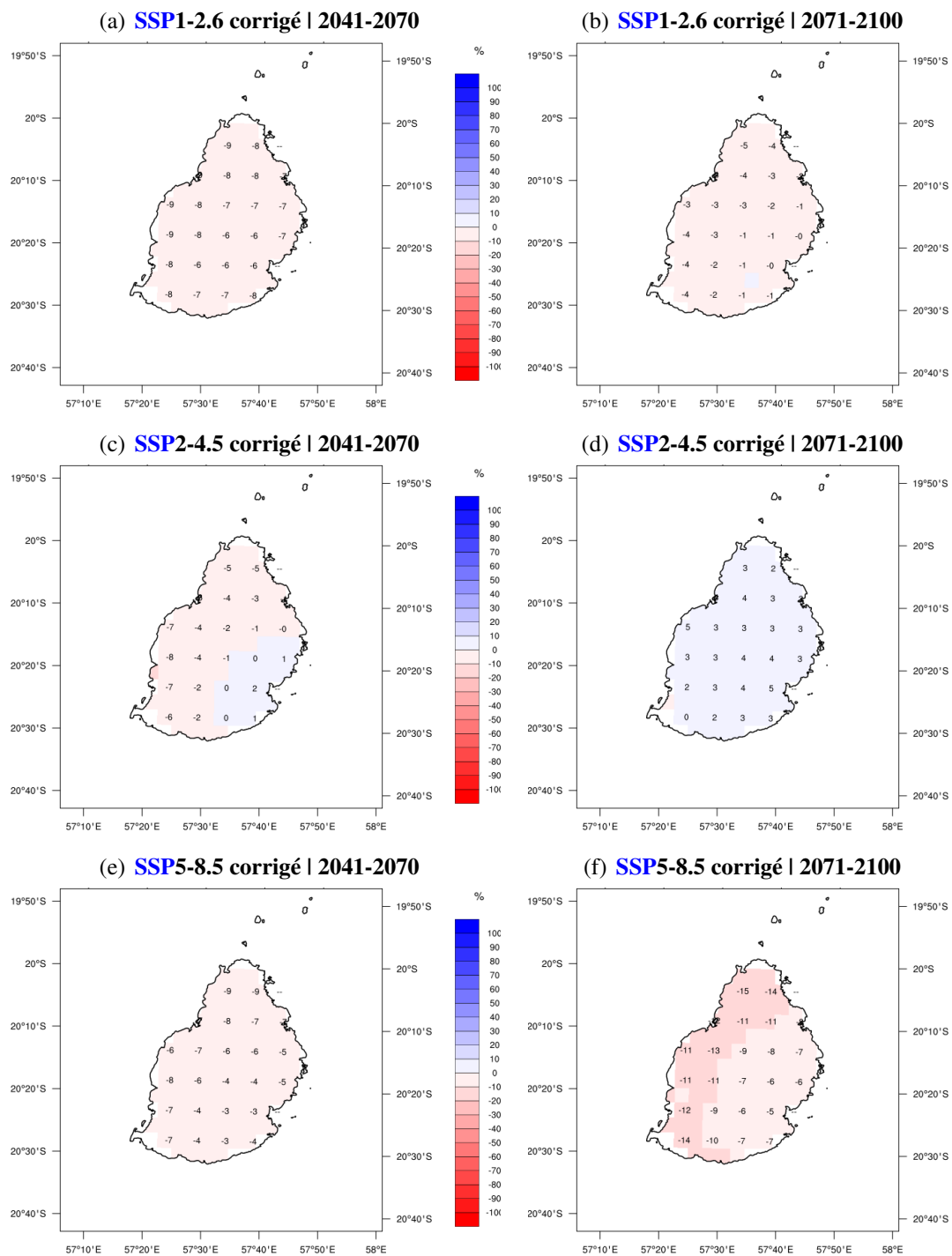


FIGURE 6.33 – Anomalies (en % par rapport à la normale 1981-2010) du cumul annuel de précipitations sur l'île Maurice selon le modèle régional ALADIN pour trois scénarios climatiques (*SSP1-2.6* en haut, *SSP2-4.5* au milieu, et *SSP5-8.5* en bas) et deux horizons temporels (milieu de siècle à gauche et fin de siècle à droite), après correction des biais.

6.4. Projections climatiques de températures et précipitations sur les îles (corrigées)

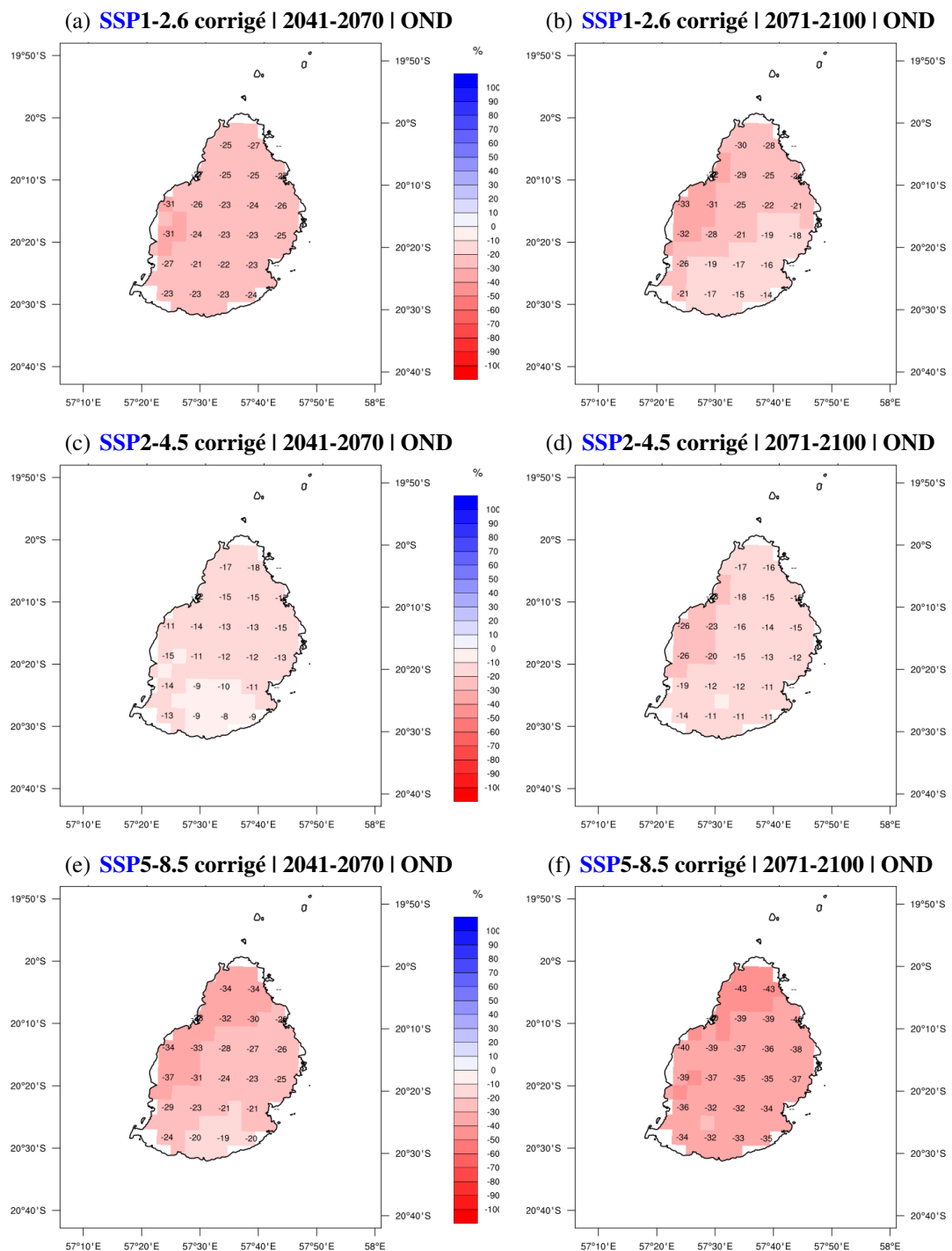


FIGURE 6.34 – Similaire à la figure 6.33 mais pour les anomalies (en % par rapport à la normale 1981-2010) du cumul de précipitations sur le trimestre *OND*.

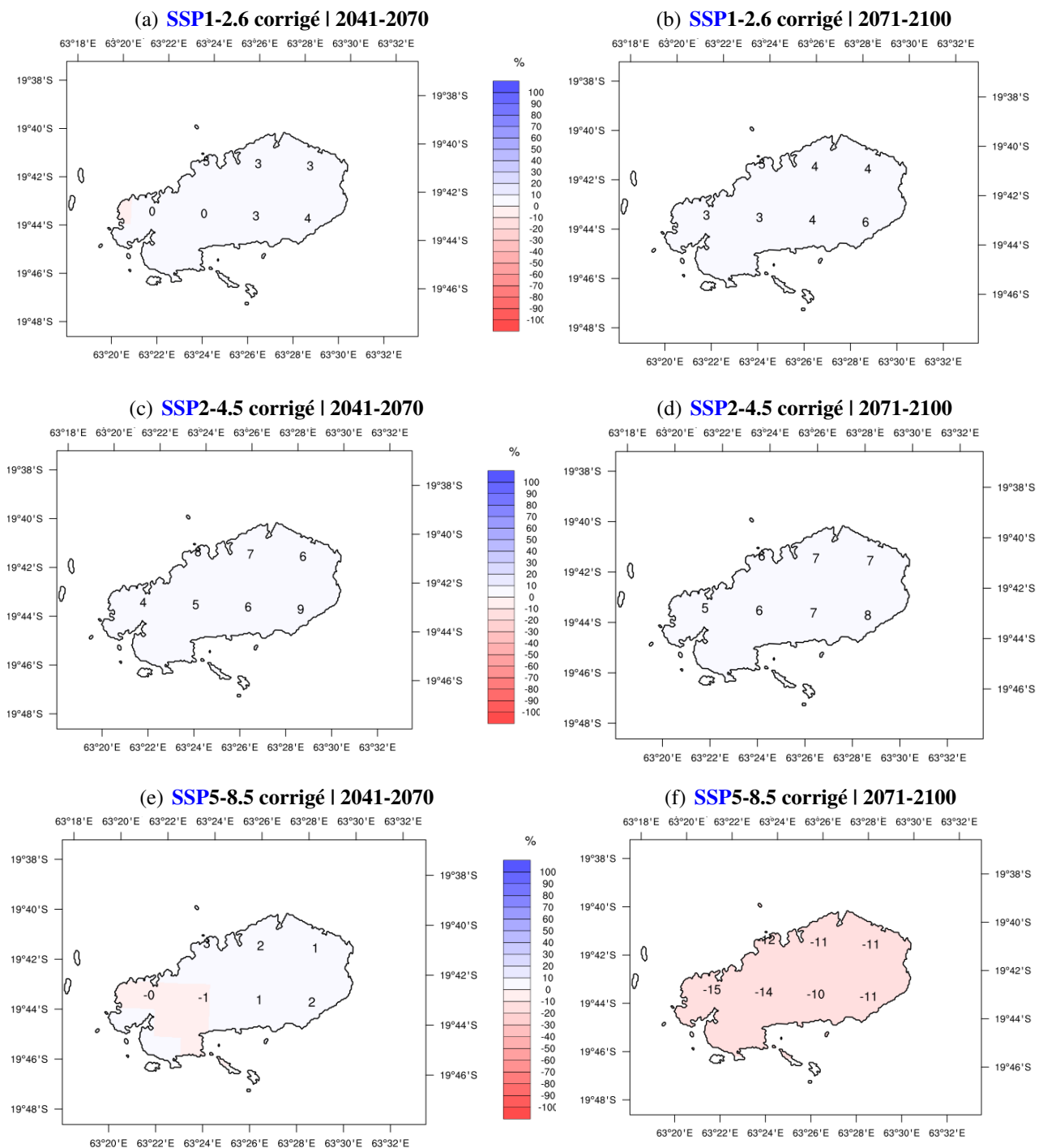


FIGURE 6.35 – Anomalies (en % par rapport à la normale 1981-2010) du cumul annuel de précipitations sur Rodrigues selon le modèle régional *ALADIN* pour trois scénarios climatiques (*SSP1-2.6* en haut, *SSP2-4.5* au milieu, et *SSP5-8.5* en bas) et deux horizons temporels (milieu de siècle à gauche et fin de siècle à droite), après correction des biais.

6.4. Projections climatiques de températures et précipitations sur les îles (corrigées)

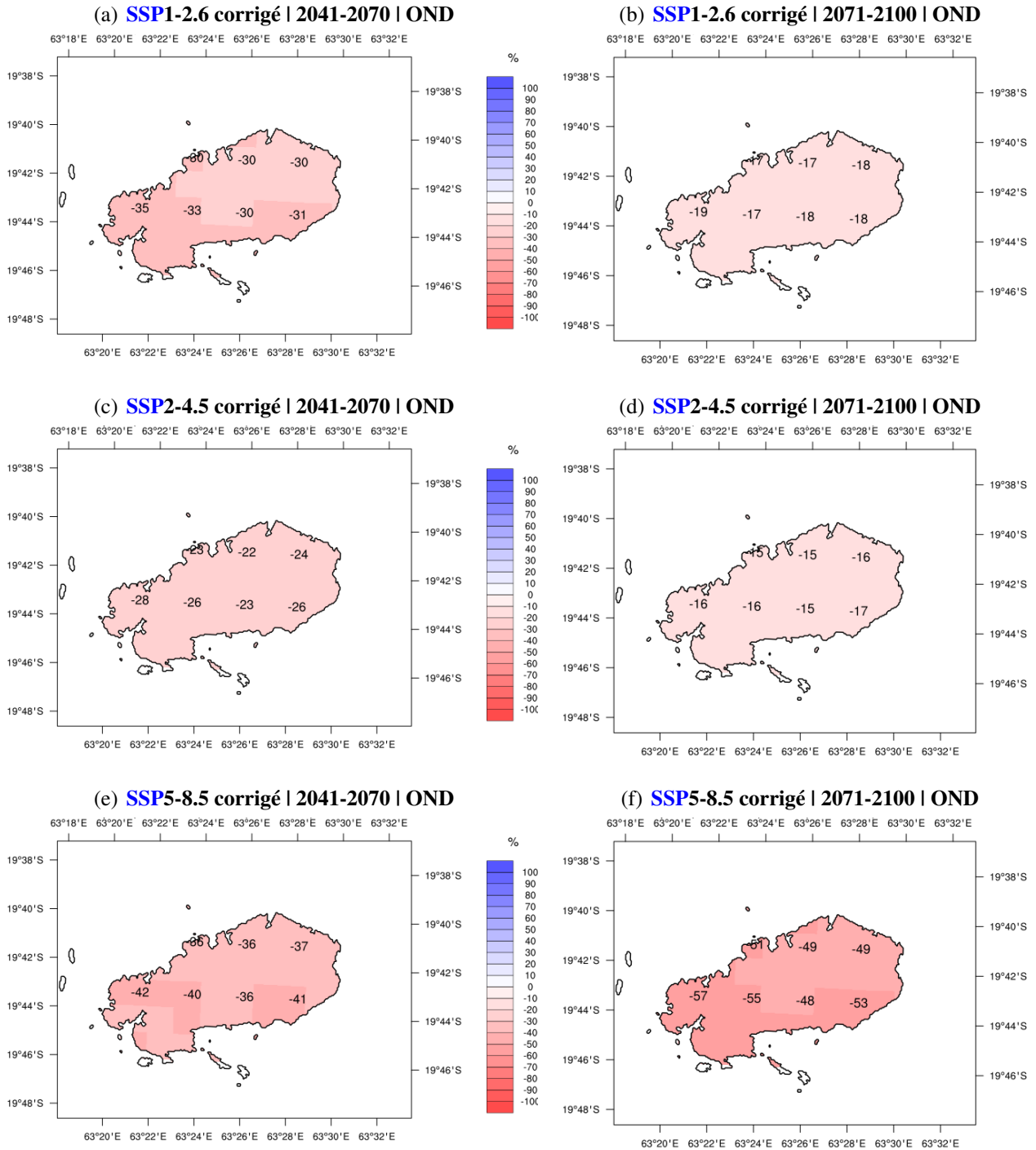


FIGURE 6.36 – Similaire à la figure 6.35 mais pour les anomalies (en % par rapport à la normale 1981-2010) du cumul de précipitations sur le trimestre *OND*.

6.4.4 Projections des précipitations sur l'archipel des Comores

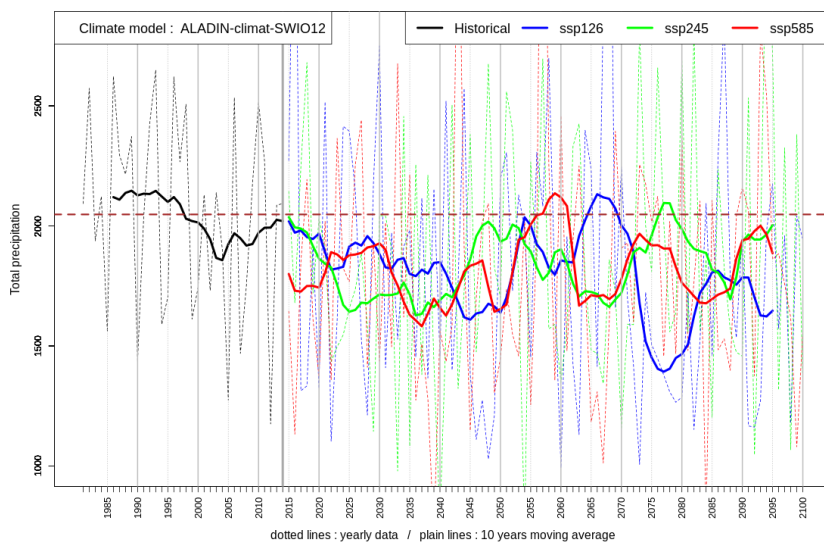


FIGURE 6.37 – Evolution temporelle sur la période 1981-2100 du cumul annuel de précipitations (mm) sur Moroni, Comores, selon le modèle régional *ALADIN* pour 3 scénarios *SSP* après correction des biais. Les lignes continues représentent la moyenne glissante sur 10 ans.

6.4.5 Projections des précipitations sur l'archipel des Seychelles

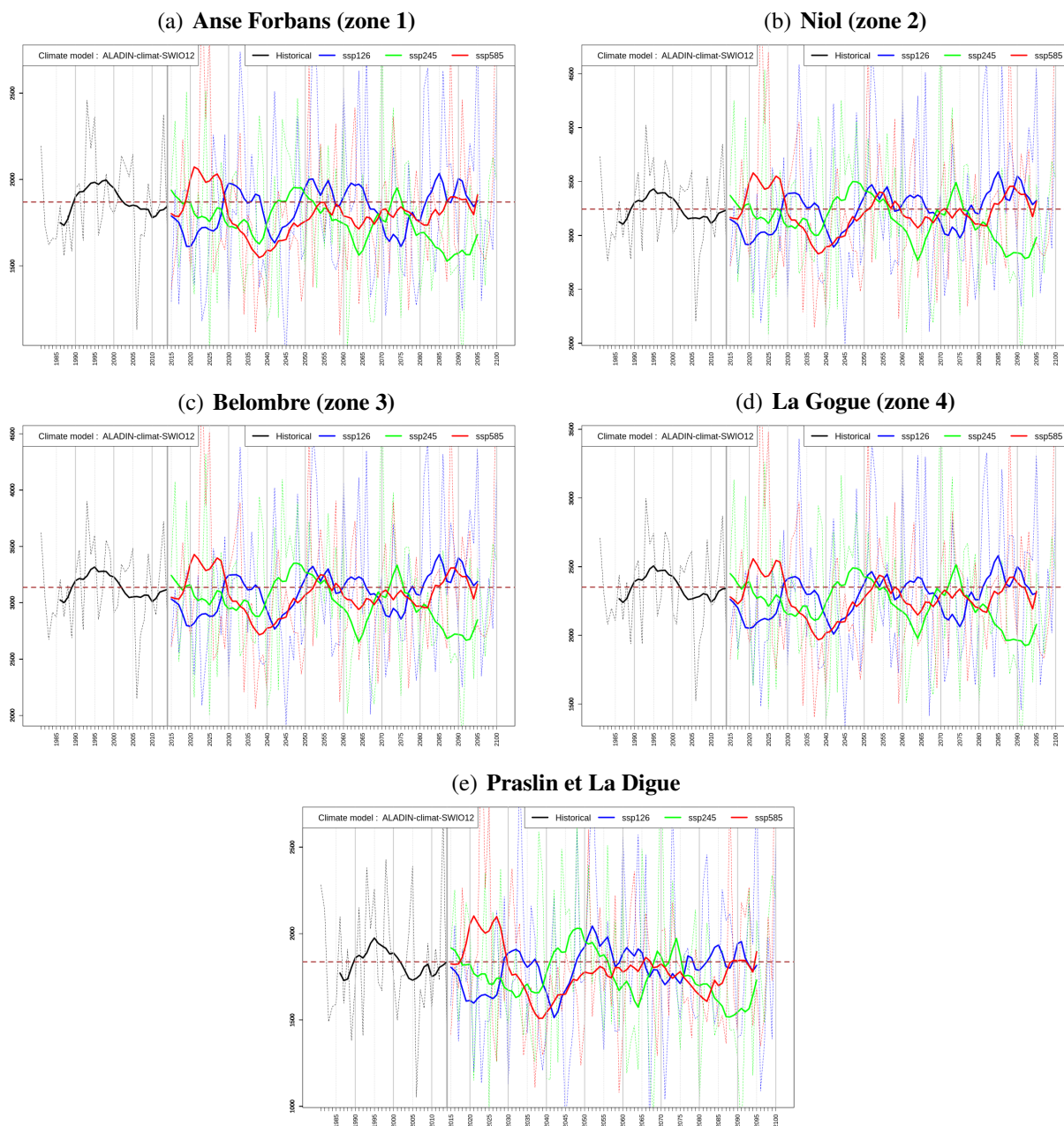


FIGURE 6.38 – Evolution temporelle sur la période 1981-2100 du cumul annuel de précipitations (mm) sur les 4 zones climatiques de l'île principale des Seychelles, Mahé, et sur Praslin et La Digue, selon le modèle régional *ALADIN* pour 3 scénarios *SSP*, après correction des biais. Les zones climatiques sont indiquées en figure 4.37.

Rappelons que 4 zones climatologiques ont été définies sur l'île de Mahé en section 4.5. Les évolutions du cumul annuel moyen de précipitations sur des périodes de 30 ans par rapport à la période passée 1981-2010 ne sont pas significatives, ni sur les 4 zones climatiques de Mahé ni sur Praslin, mis à part pour l'horizon de fin de siècle en scénario *SSP2-4.5* où une baisse des précipitations annuelles est à attendre autour de -6% à -9% (Fig. 6.39). Bien qu'il n'y ait pas de tendance significative sur l'évolution future de la moyenne des précipitations annuelles, le modèle *ALADIN* simule de fortes variations interannuelles des cumuls de précipitations jusqu'en fin de siècle, quelque soit le scénario climatique (Fig. 6.38). Les transitions entre années extrêmes sont rapides et franches et se

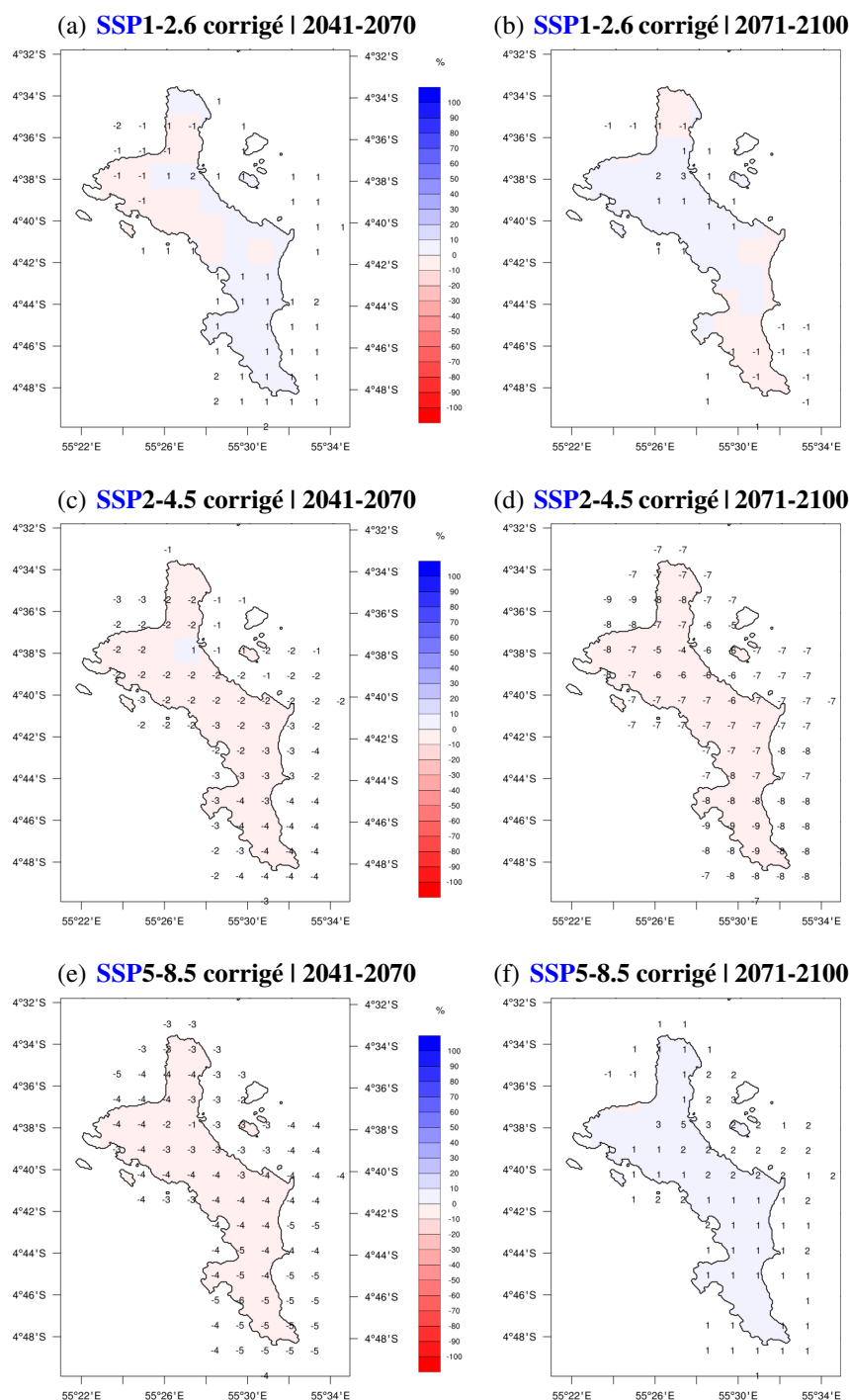


FIGURE 6.39 – Anomalies (en % par rapport à la normale 1981-2010) du cumul annuel moyen de précipitations sur l'île principale des Seychelles, Mahé, selon le modèle régional ALADIN pour trois scénarios climatiques (SSP1-2.6 en haut, SSP2-4.5 au milieu, et SSP5-8.5 en bas) et deux horizons temporels (milieu de siècle à gauche et fin de siècle à droite), après correction des biais. Les valeurs des anomalies non nulles sont superposées aux cartes.

6.4. Projections climatiques de températures et précipitations sur les îles (corrigées)

succèdent des années anormalement sèches puis anormalement pluvieuses et vice versa. Les extrêmes de précipitations (sécheresse et records de pluie) sont amenés à s'amplifier en fréquence et en intensité (voir aussi les indicateurs climatique en section 6.5). L'évolution du cumul moyen de précipitations saisonnier sera significatif en saison des pluies **JFM** (légère augmentation des précipitations) et en saison sèche **JAS** (légère diminution des précipitations) sur l'ensemble des îles de Mahé, Praslin et La Digue, aggravant ainsi les contrastes saisonniers actuels (non illustré).

6.4.6 Projections des températures à Madagascar

La figure 6.40 montre l'évolution temporelle des anomalies de températures moyennes annuelles de chaque zone climatique de Madagascar sur la période 1981-2100 pour les trois scénarios SSP après correction des biais d'ALADIN. Le modèle prévoit entre 2050 à 2100 une augmentation (par rapport à la période historique 1981-2010) de l'ordre de : 1.5°C pour le scénario SSP1-2.6, de 1.5°C à 3°C pour le scénario SSP2-4.5 et de 1.5°C à 5°C pour le scénario pessimiste SSP5-8.5. C'est sur la côte Est que le réchauffement climatique sera le moins prononcé.

6.4. Projections climatiques de températures et précipitations sur les îles (corrigées)

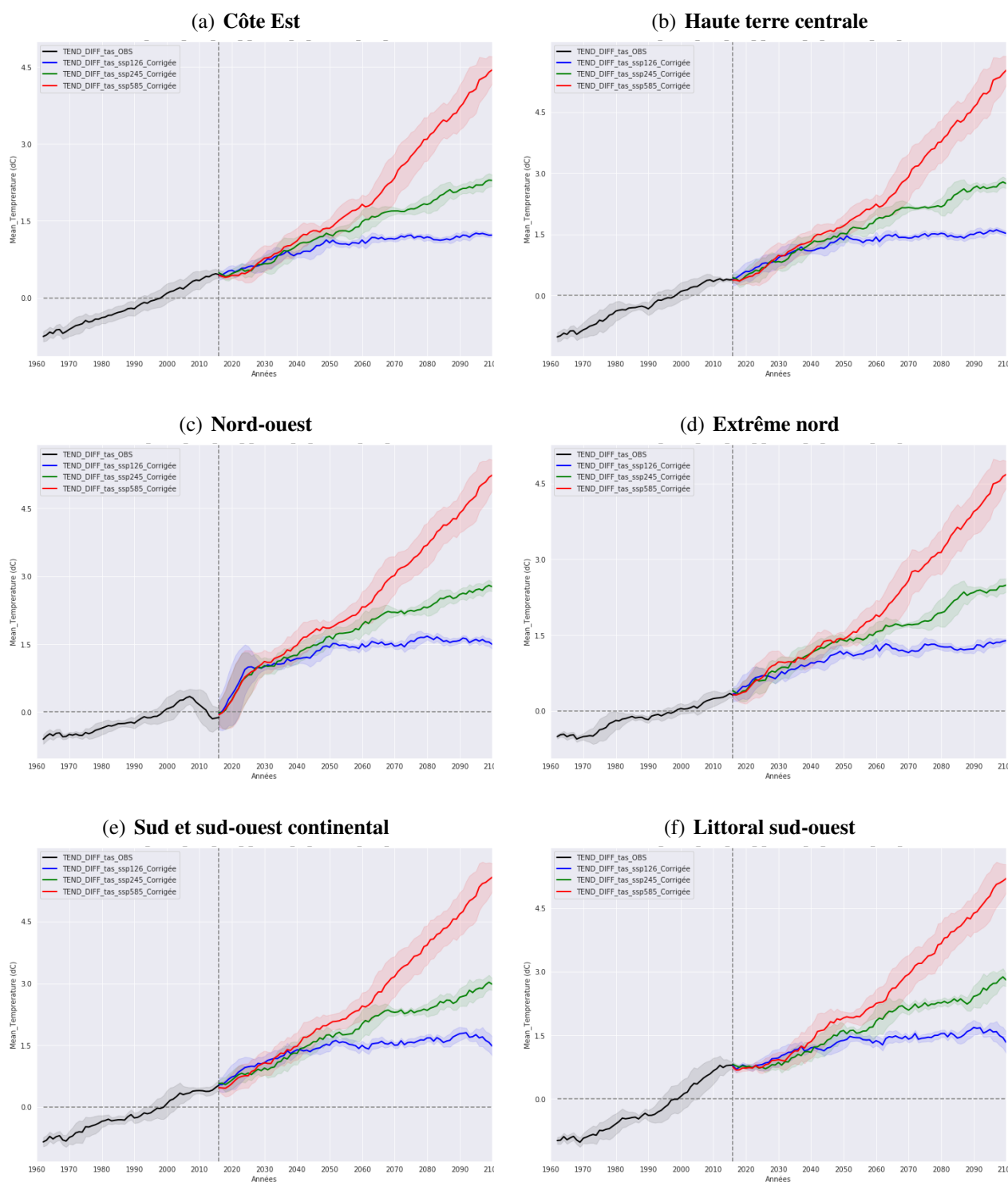


FIGURE 6.40 – Evolution temporelle sur la période 1981-2100 des anomalies de température moyenne annuelle à +2 m ($^{\circ}\text{C}$) sur les 6 zones climatiques de Madagascar selon le modèle régional ALADIN pour 3 scénarios SSP, après correction des biais. Les données d'observation sont en noir, l'historique modèle en gris, et les simulations du modèle pour 3 scénarios en couleurs. La ligne horizontale tiretée situe la moyenne de référence 1981-2010.

6.4.7 Projections des températures à La Réunion

La correction de biais en température d'ALADIN a peu d'influence sur le signal du changement climatique vu en section 6.1 car la température a bien moins de variabilité spatio-temporelle que les précipitations. Les augmentations de températures moyennes par rapport à la période de référence 1981-2010 prévues par ALADIN sur La Réunion sont les suivantes :

- En milieu de siècle (2041-2070) :
 - autour de +1°C à +1.2°C en SSP1-2.6 (Fig. 6.41(a)).
 - autour de +1.3°C à +1.6°C en SSP2-4.5 (Fig. 6.41(c)).
 - autour de +1.7°C à +1.9°C en SSP5-8.5 (Fig. 6.41(e)).
- à l'horizon de fin de siècle (2071-2100) :
 - autour de +1.1°C à +1.3°C en SSP1-2.6 (Fig. 6.41(b)).
 - autour de +1.9°C à +2.3°C en SSP2-4.5 (Fig. 6.41(d)).
 - autour de +3.4°C à +4.1°C en SSP5-8.5 (Fig. 6.41(f)). En pourcentage relatif, c'est une augmentation de 15 à 32% qui est attendue (non illustré).

. On note que sur la côte ouest, ce sont les températures minimales ou nocturnes (T_N) qui augmenteront davantage, tandis que sur les hauts et l'intérieur de l'île ce sont les températures maximales ou diurnes (T_X) qui subiront le plus d'augmentation (non illustré). Les différences d'augmentation entre T_X et T_N peuvent atteindre +/-0.5°C par endroits.

En terme de saisonnalité, c'est durant le coeur de saison chaude (JFM), quand les températures sont déjà à leur maximum, que les températures augmenteront le plus (Fig. 6.42) par rapport à la période de référence. Des épisodes de fortes chaleurs sont donc à attendre (voir section 6.5).

L'augmentation des températures ne sera pas uniforme sur l'île. Quelque soit le scénario, le réchauffement augmente graduellement avec l'altitude depuis la côte vers le centre de l'île, comme illustré par les gradients visibles sur les isolignes d'anomalies de températures à l'horizon de fin de siècle (Fig. 6.43). Les différences de réchauffement entre la côte et le centre varient de 0.2°C en scénario SSP1-2.6 à 0.8°C en scénario SSP5-8.5.

6.4. Projections climatiques de températures et précipitations sur les îles (corrigées)

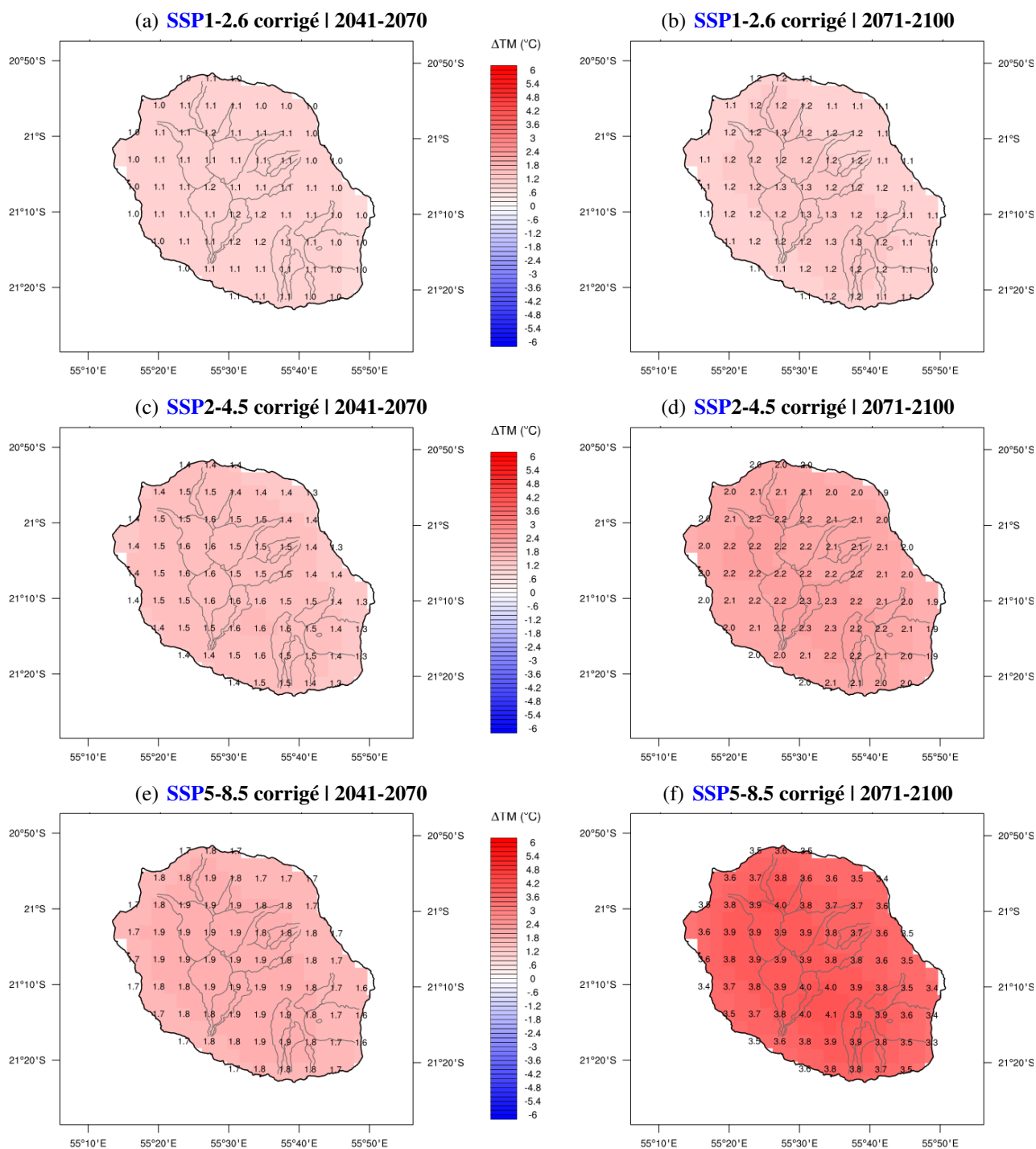


FIGURE 6.41 – Anomalies de température moyenne annuelle à +2 m (en °C par rapport à 1981-2010) sur La Réunion selon le modèle régional *ALADIN* pour trois scénarios climatiques (*SSP1-2.6* en haut, *SSP2-4.5* au milieu, et *SSP5-8.5* en bas) et deux horizons temporels (milieu de siècle à gauche et fin de siècle à droite), après correction des biais.

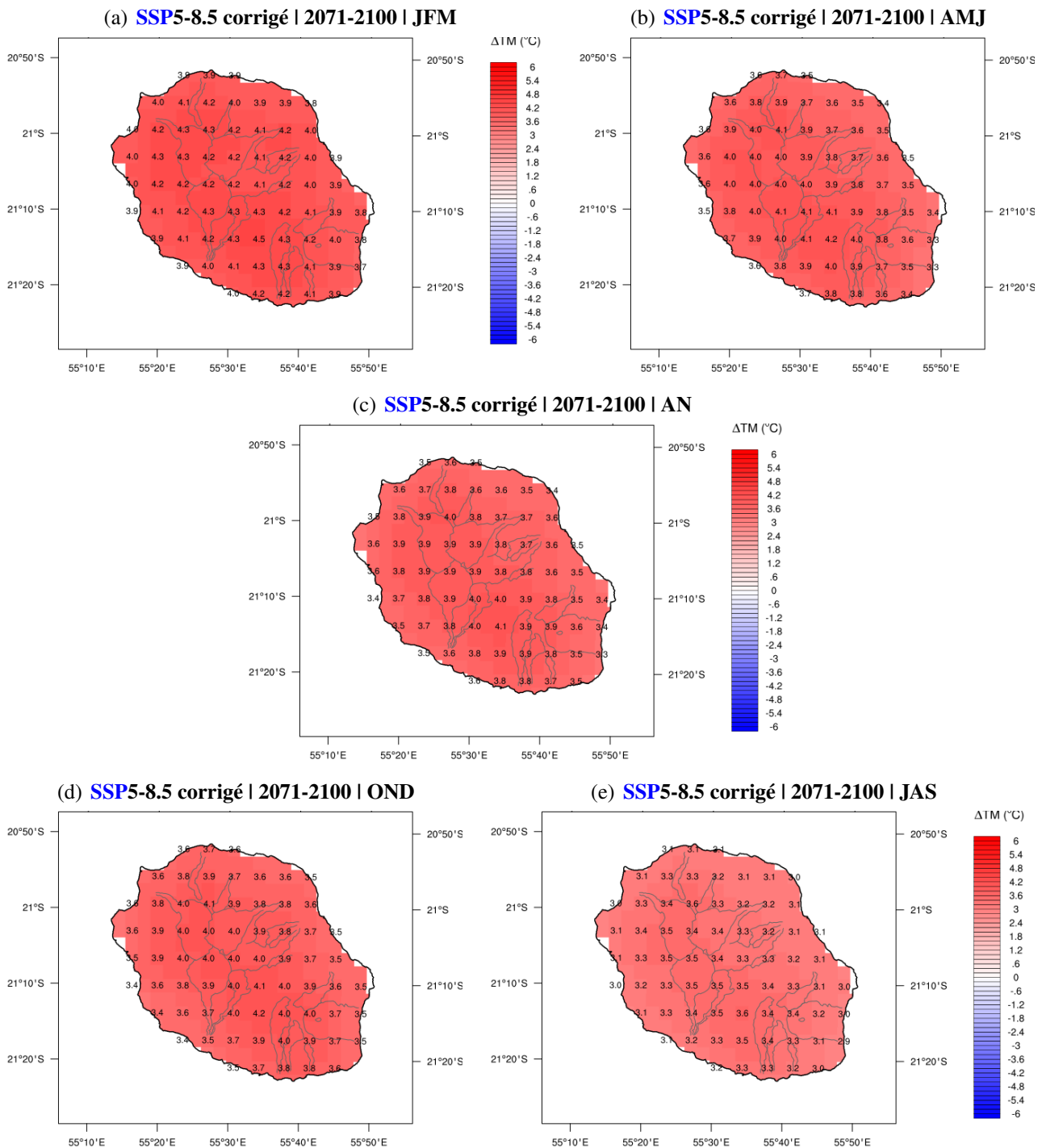


FIGURE 6.42 – Anomalies de température moyenne à +2 m (en °C par rapport à 1981-2010) sur l'année et sur 4 trimestres de l'année sur La Réunion selon le modèle régional *ALADIN* pour le scénario *SSP5-8.5* en fin de siècle, après correction des biais.

6.4. Projections climatiques de températures et précipitations sur les îles (corrigées)

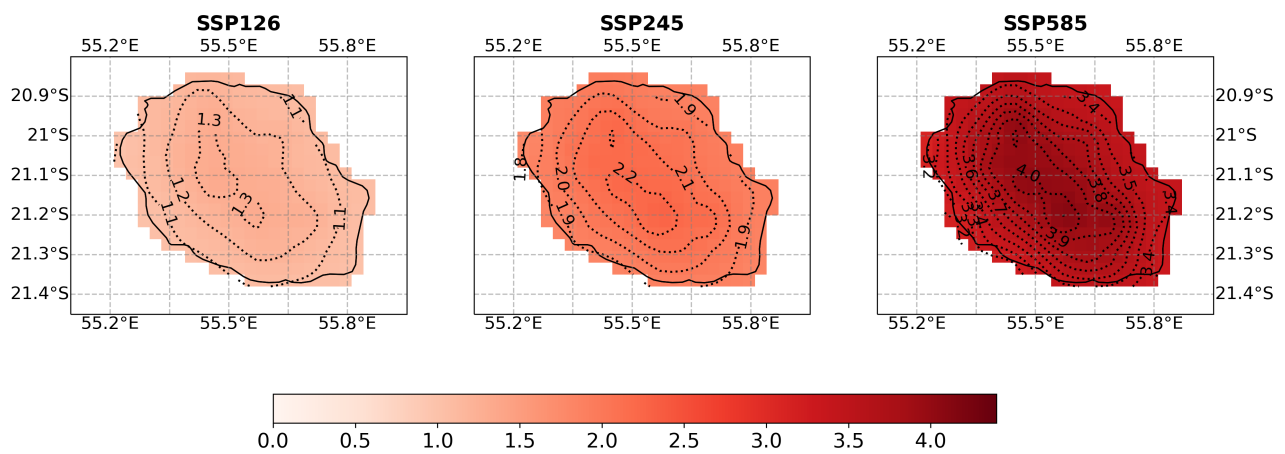


FIGURE 6.43 – Isolignes des anomalies de température moyenne annuelle à +2 m (en °C par rapport à 1981-2010) sur l'île de La Réunion selon le modèle régional *ALADIN* à l'horizon 2071-2100 pour trois scénarios climatiques *SSP*, après correction des biais. Source : Kevin Lamy, projet *MACATIA*.

6.4.8 Projections des températures sur les îles de la République de Maurice

L'évolution des températures moyennes sur les 4 îles de la République de Maurice et sous 3 scénarios d'émission de gaz à effet de serre est visible en figure 6.44. Le modèle ALADIN prévoit entre 2050 à 2100 une augmentation (par rapport à la période historique 1981-2010) de l'ordre de :

- Maurice (Fig. 6.44(a)) :
 - +1.5°C en SSP1-2.6.
 - +1.5°C à +2.5°C en SSP2-4.5.
 - +1.5°C à +4.0°C en SSP5-8.5.
- Rodrigues (Fig. 6.44(b)) :
 - +1.0°C en SSP1-2.6.
 - +1.0°C à +2.0°C en SSP2-4.5.
 - +1.0°C à +3.5°C en SSP5-8.5.
- Agalega (Fig. 6.44(c)) :
 - +1.3°C en SSP1-2.6.
 - +1.3°C à +2.0°C en SSP2-4.5.
 - +1.3°C à +3.8°C en SSP5-8.5.
- Saint Brandon (Fig. 6.44(d)) :
 - +1.1°C en SSP1-2.6.
 - +1.1°C à +2.1°C en SSP2-4.5.
 - +1.1°C à +3.5°C en SSP5-8.5.

6.4.9 Projections des températures sur l'archipel des Comores

L'évolution des températures moyennes pour chacune des stations de l'archipel des Comores et sous 3 scénarios d'émission de gaz à effet de serre est visible en figure 5.21, après correction des biais (traits continus). C'est Moroni qui subit la plus forte hausse des températures, quelque soit le scénario (Fig. 6.45). Sur les 5 stations de l'archipel des Comores (Hahaya, Moroni, Bandar, Ouani, Pamandzi), le modèle ALADIN prévoit entre 2050 à 2100 les augmentations de températures suivantes (par rapport à la période historique 1981-2010) :

- autour de +1.0°C en SSP1-2.6.
- autour de +1.0°C à +2.0°C en SSP2-4.5.
- autour de +1.0°C à +4.5°C en SSP5-8.5.

6.4.10 Projections des températures sur l'archipel des Seychelles

Les projections de l'évolution de la température moyenne annuelle sur la station de référence des Seychelles (aéroport de Mahé) indiquent une tendance claire au réchauffement quelque soit le scénario d'émission de gaz à effet de serre (Fig. 6.46). ALADIN anticipe que l'augmentation de température sera la même à l'horizon 2050 pour les trois scénarios ; ensuite l'augmentation deviendra nulle pour le scénario SSP1-2.6, constante pour le scénario SSP2-4.5 et croissante pour le scénario SSP5-8.5 jusqu'en fin de siècle. On note l'existence d'une variabilité interannuelle de la température moyenne qui reste conforme à la période historique (pas d'augmentation de variabilité, contrairement aux précipitations).

6.4. Projections climatiques de températures et précipitations sur les îles (corrigées)

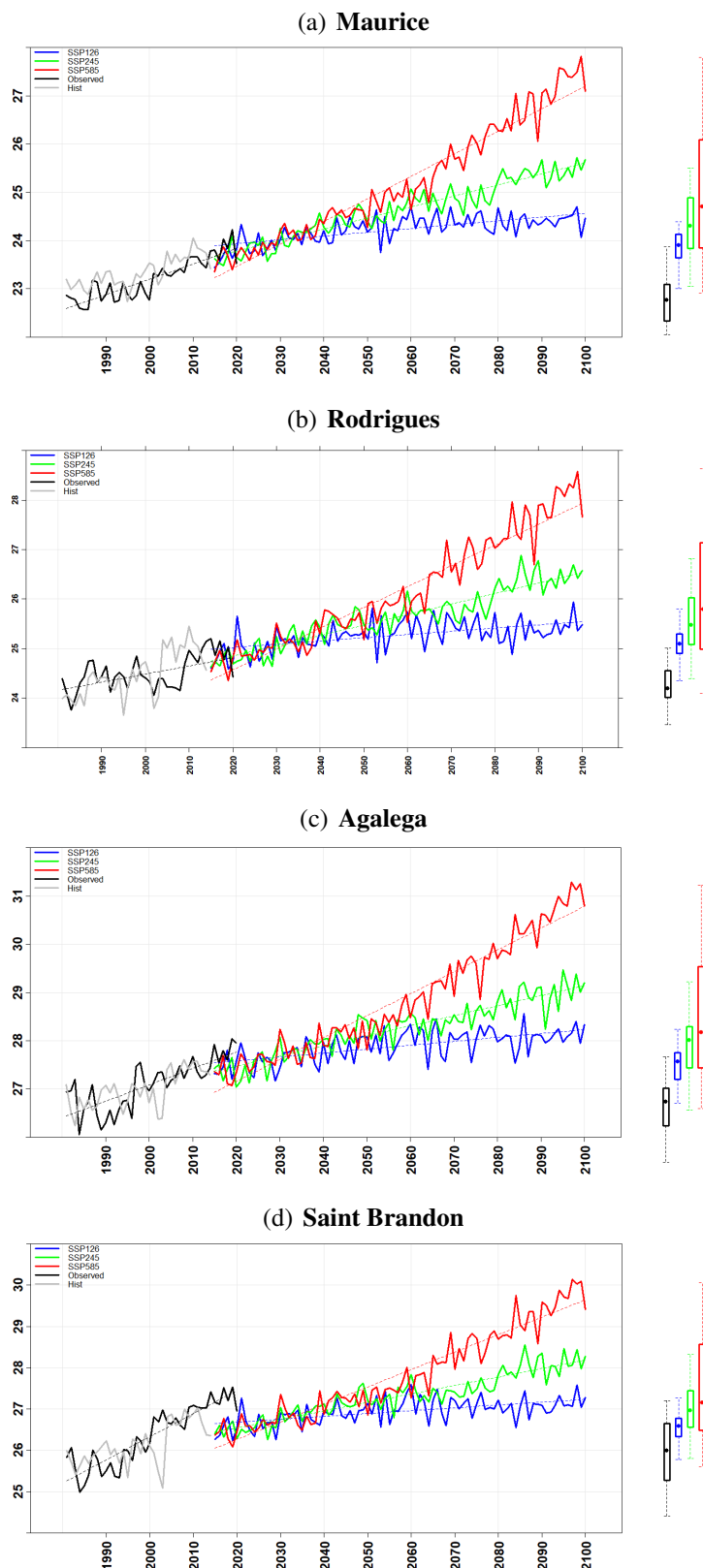


FIGURE 6.44 – Evolution temporelle sur la période 1981-2100 de la température moyenne annuelle à +2 m ($^{\circ}\text{C}$) sur l'île Maurice selon le modèle régional ALADIN pour 3 scénarios SSP, après correction des biais. Les données d'observation sont en noir (1981-2020), l'historique modèle en gris, et les simulations du modèle pour 3 scénarios en couleurs. Les boîtes à moustaches à droite mettent en valeur la médiane C50 (trait), les 1^{er} et 3^{ème} quartiles i.e. les centiles C25 et C75 (contours des boîtes) et les 5^{ème} (C5) et 95^{ème} (C95) centiles (C95).

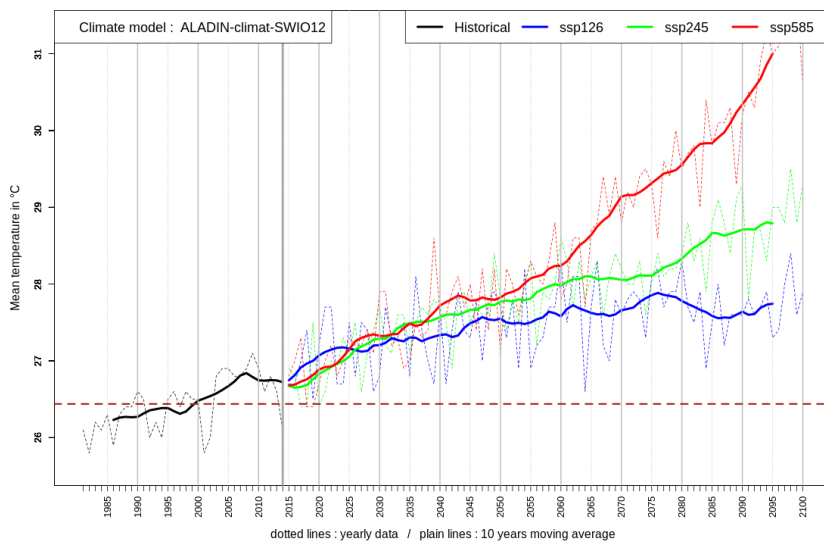


FIGURE 6.45 – Evolution temporelle sur la période 1981-2100 de la température moyenne annuelle à +2 m (°C) sur Moroni, Comores, selon le modèle régional ALADIN pour 3 scénarios SSP, après correction des biais. Les lignes continues représentent la moyenne glissante sur 10 ans. La ligne horizontale tiretée situe la moyenne de référence 1981-2010.

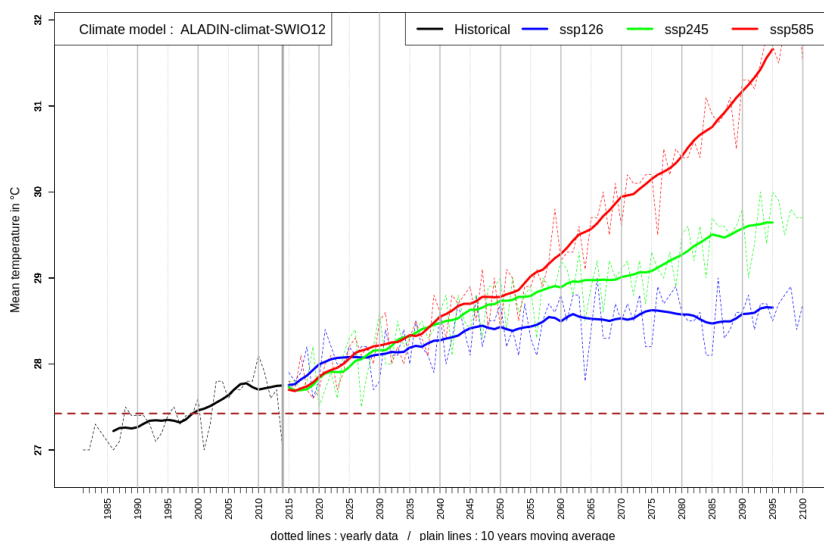


FIGURE 6.46 – Evolution temporelle sur la période 1981-2100 de la température moyenne annuelle à +2 m (°C) sur l'aéroport International des Seychelles (île de Mahé) selon le modèle régional ALADIN pour 3 scénarios SSP, après correction des biais. Les lignes continues représentent la moyenne glissante sur 10 ans. La ligne horizontale tiretée situe la moyenne de référence 1981-2010.

Il est très probable que la température moyenne sur la période 1981-2100 augmente, par rapport à la moyenne de référence de la période 1981-2010, au-dessus de $+0.5^{\circ}\text{C}$ dans les 3 scénarios, $+1.5^{\circ}\text{C}$ dans les scénarios **SSP1-2.6** et **SSP2-4.5**, et $+3.0^{\circ}\text{C}$ dans le scénario **SSP5-8.5** (Fig. 6.46). Aussi, il est très probable que la température moyenne annuelle aux Seychelles atteigne, d'ici la fin du siècle, des valeurs de 28.5°C et 29.5°C dans les scénarios **SSP1-2.6** et **SSP2-4.5** respectivement, et de presque 32.0°C dans le scénario pessimiste (Fig. 6.46), comparé à la normale de 27.5°C sur la période 1981-2010. Cela représente une augmentation de la température moyenne annuelle de l'ordre de $+0.5^{\circ}\text{C}$ à $+4.0^{\circ}\text{C}$ selon les scénarios, qui sera ressentie quelque soit les saisons (non illustré). La température maximale annuelle atteindra très probablement 35.0°C en fin de siècle dans le scénario pessimiste **SSP5-8.5**, soit $+4.8^{\circ}\text{C}$ par rapport à la normale de référence de $+30.2^{\circ}\text{C}$.

6.5 INDICATEURS CLIMATIQUES

La liste des indicateurs climatiques mis en ligne sur le portail (décrit en section 7.2) pour l'ensemble des pays partenaires est visible dans le tableau 6.1. Ils ont été calculés aux pas de temps trimestriel et annuel, en s'inspirant d'indices élaborés par l'OMM décrits sur le site internet http://etccdi.pacificclimate.org/list_27_indices.shtml. Nous en illustrons ci-dessous quelques uns, sélectionnés selon les enjeux et vulnérabilités spécifiques à chacun des territoires. Les autres indicateurs sont consultables sur le portail régional du changement climatique (<http://climat.coi-ioc.org>).

Indicateurs de température		
Indice	Définition	Unités
SU	Nombre de journées chaudes ($TX \geq 25^{\circ}C$)	jour(s)
TXx	Maximum de température maximale TX	$^{\circ}C$
TXn	Minimum de température maximale TX	$^{\circ}C$
TX90p	Pourcentage de jours anormalement chauds ($TX > 90^{\text{ème}}$ percentile)	%
TX10p	Pourcentage de jours anormalement frais ($TX < 10^{\text{ème}}$ percentile)	%
WSDI	Nombre de jours de vagues de chaleur ($TX > 90^{\text{ème}}$ percentile pendant au moins 6 jours consécutifs)	jour(s)
TR	Nombre de nuits tropicales ($TN \geq 20^{\circ}C$)	jour(s)
TN24	Nombre de nuits chaudes ($TN \geq 24^{\circ}C$)	jour(s)
TNx	Maximum de température minimale TN	$^{\circ}C$
TNn	Minimum de température minimale TN	$^{\circ}C$
TN90p	Pourcentage de nuits anormalement chaudes ($TN > 90^{\text{ème}}$ percentile)	%
TN10p	Pourcentage de nuits anormalement fraîches ($TN < 10^{\text{ème}}$ percentile)	%
CSDI	Nombre de jours de vague de froid ($TN < 10^{\text{th}}$ percentile pendant au moins 6 jours consécutifs)	jour(s)
DTR	Ecart de température moyenne (entre TX et TN)	$^{\circ}C$
DEXHT	Nombre de jours de chaleur extrême ($TN > 97.5^{\text{ème}}$ percentile de TN et $TX > 97.5^{\text{ème}}$ percentile de TX)	jour(s)
Indicateurs de précipitations		
Indice	Définition	unités
R[NN]mm	Cumul du nombre de jours de pluie avec $RR \geq [NN]$ mm avec $NN = 10, 20, 50, 100, 200, 300$	mm
R100mm	Cumul du nombre de jours de pluie avec $RR \geq 100$ mm	mm
PRCPTOT	Cumul de précipitations sur les jours pluvieux ($RR \geq 1.0$ mm)	mm
R95pTOT	Cumul des précipitations intenses (jours où $RR \geq 95^{\text{ème}}$ percentile)	mm
R99pTOT	Cumul des précipitations extrêmes (jours où $RR \geq 99^{\text{ème}}$ percentile)	mm
CDD	Période de sécheresse (nombre maximum de jours consécutifs avec $RR < 1.0$ mm)	jour(s)
CWD	Période pluvieuse (nombre maximum de jours de pluie consécutifs avec $RR \geq 1.0$ mm)	jour(s)
SDII	Indice simple d'intensité (précipitations moyennes des jours pluvieux avec $RR \geq 1.0$ mm)	mm
Rx1day	Précipitations maximales sur 24h	mm
Rx5day	Précipitations maximales sur 5 jours consécutifs	mm

TABLEAU 6.1 – Liste des indicateurs climatiques disponibles sur le portail *BRIO* pour l'ensemble des états insulaires de la *COI*. Chaque indicateur est calculé au pas de temps trimestriel ou annuel. *RR* désigne la précipitation quotidienne, *TX* la température maximale et *TN* la température minimale.

6.5.1 Indicateurs climatiques sur Madagascar

Depuis 1980, les kérés (sécheresses en malgache) se succèdent fréquemment et durent de plus en plus longtemps, en particulier dans le sud de Madagascar, qui a connu des sécheresses records ces deux dernières années. Les observations passées (courbe noire) avaient déjà enregistré une hausse notable du nombre maximal de jours secs consécutifs (CDD) sur Antananarivo, capitale de la Grande Île, après le milieu des années 80 (Fig. 6.47) pour atteindre des extrêmes de 95 jours sans pluie. Quelque soit le scénario d'émission de *GES*, l'indicateur CDD connaîtra une hausse à Antananarivo, tout comme l'amplitude de sa variabilité interannuelle (comparer l'amplitude des courbes colorées à

6.5. Indicateurs climatiques

celle de la courbe grise historique en figure 6.47). Cela entraînera un risque accru de sécheresses à certaines périodes du siècle où il pourrait bien ne pas pleuvoir pendant près de 4 mois consécutifs.

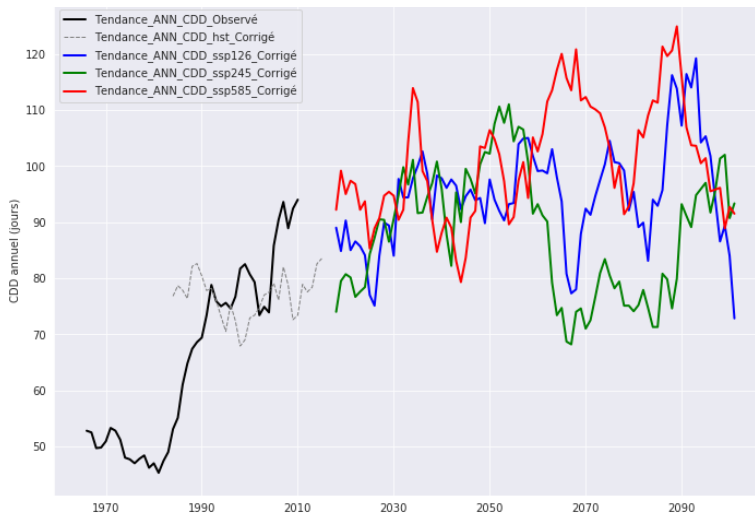


FIGURE 6.47 – Evolution temporelle sur la période 1981-2100 du nombre maximal de jours secs consécutifs (indicateur CDD défini au tableau 6.1) à Antananarivo, Madagascar, selon le modèle régional ALADIN pour 3 scénarios SSP, après correction des biais.

D'après les simulations ALADIN, l'augmentation du nombre maximal de jours secs consécutifs devrait concerner une majeure partie de la Grande Île en fin de siècle avec une augmentation moyenne de 0 à 20% de l'indicateur CDD (Fig. 6.48). Le relief et la côte Est connaîtront des sécheresses plus intenses en fin de siècle, avec des anomalies du CDD de +20% à +40% en scénario faible et médian, et +40% à +60% en scénario SSP5-8.5.

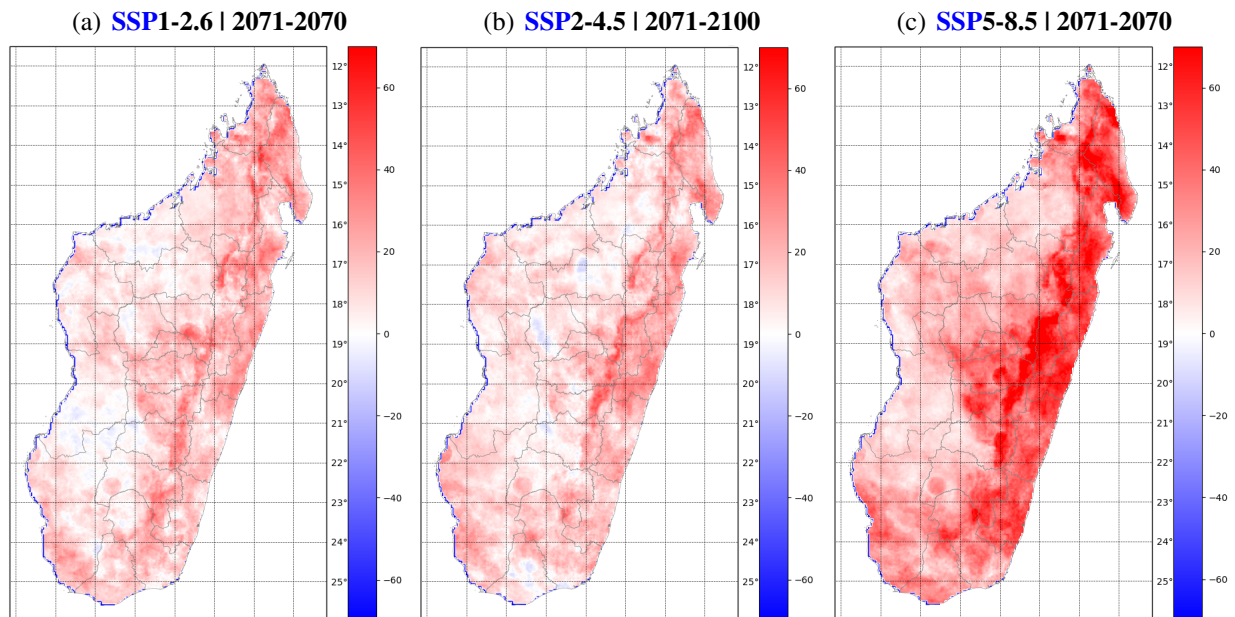


FIGURE 6.48 – Anomalies moyennes (en % par rapport à la normale 1981-2010) des périodes de sécheresse (indicateur CDD défini au tableau 6.1) sur Madagascar selon le modèle régional ALADIN en fin de siècle pour trois scénarios climatiques : (a) SSP1-2.6, (b) SSP2-4.5 et (c) SSP5-8.5, après correction des biais.

6.5.2 Indicateurs climatiques sur La Réunion

Le nombre de jours annuels de forte chaleur devrait être en nette augmentation par rapport à ce que l'on a connu depuis 1981. En fin de siècle par exemple, la température maximale devrait dépasser 31°C à Gillot (Réunion) plus de la moitié de l'année en scénario SSP5-8.5 contre une dizaine de

jours par an jusqu'ici (Fig. 6.49). De telles températures auront des conséquences néfastes sur la santé humaine et animale, sur la biodiversité et les écosystèmes, ainsi que sur la sécurité alimentaire.

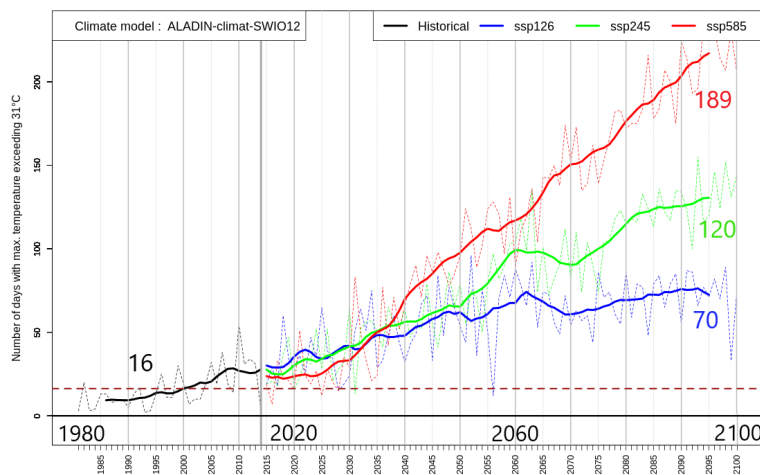


FIGURE 6.49 – Evolution temporelle du nombre de jours annuels où la température maximale simulée par ALADIN dépasse le seuil de 31°C sur Gillot, La Réunion, depuis la période passée 1981-2014 (en noir) jusqu'à l'horizon 2100 pour 3 scénarios SSP (couleurs), après correction des biais. La ligne horizontale tiretée situe la moyenne de référence 1981-2010. Les chiffres superposés au graphique indiquent les valeurs moyennes sur la période historique en noir et sur l'horizon de fin de siècle 2071-2100 en couleur dans chaque scénario. Un lissage sur 10 années glissantes est réalisé pour atténuer la variabilité interannuelle.

Nous avons vu qu'ALADIN prévoit une baisse moyenne des précipitations annuelles sur La Réunion de 10% à 15% en scénario SSP5-8.5 (Figs. 6.27(e), 6.27(f)). En scénario pessimiste, la baisse des précipitations pourrait atteindre 10 % à 40 % sur la saison juillet-août-septembre selon la zone (Figs. 6.30(e), 6.31(e)). L'amplification des contrastes saisonniers devrait ainsi compliquer la gestion de l'eau en saison des pluies (inondations) et en saison sèche (sécheresses). Par ailleurs, une baisse sensible de 20 à 30 % des précipitations sur le dernier trimestre de l'année présage un allongement de la saison sèche avec un probable retard de démarrage de la saison des pluies (Figs. 6.30(d), 6.31(d)). Il devrait en découler des épisodes de sécheresse plus fréquents et plus sévères (Fig. 6.50) sur des périodes de l'année où les ressources en eau sont déjà déficitaires, avec un fort stress hydrique pour la végétation et les cultures. L'évolution de l'indicateur CDD calculé en moyenne sur l'île indique que La Réunion pourrait vivre des épisodes sans pluie de près d'un mois en dernière partie de siècle, en particulier en scénario SSP5-8.5 (Fig. 6.50). L'étendue spatiale et temporelle de la sécheresse est mise en évidence via l'indice de sécheresse pour le scénario SSP5-8.5 (Fig. 6.51).

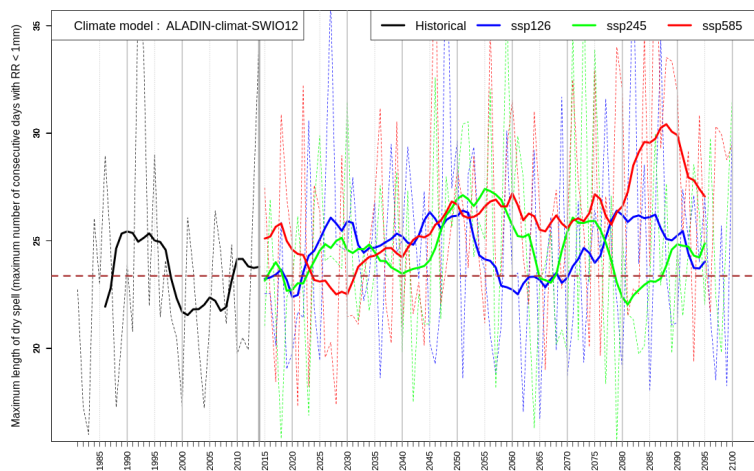


FIGURE 6.50 – Evolution temporelle du nombre maximal de jours secs consécutifs (indicateur CDD défini au tableau 6.1) prévu par ALADIN sur l'île de La Réunion jusqu'en 2100 pour 3 scénarios SSP, après correction des biais. La ligne horizontale tiretée situe la moyenne de référence 1981-2010. Un lissage sur 10 années glissantes est réalisé pour atténuer la variabilité interannuelle.

Selon la relation physique de Clausius-Clapeyron, l'air peut contenir 7% de plus de vapeur d'eau par degré de réchauffement. Quand la vapeur d'eau se condense en pluie, la quantité qui précipite au sol peut augmenter dans les mêmes proportions. Dans le contexte du réchauffement climatique, on

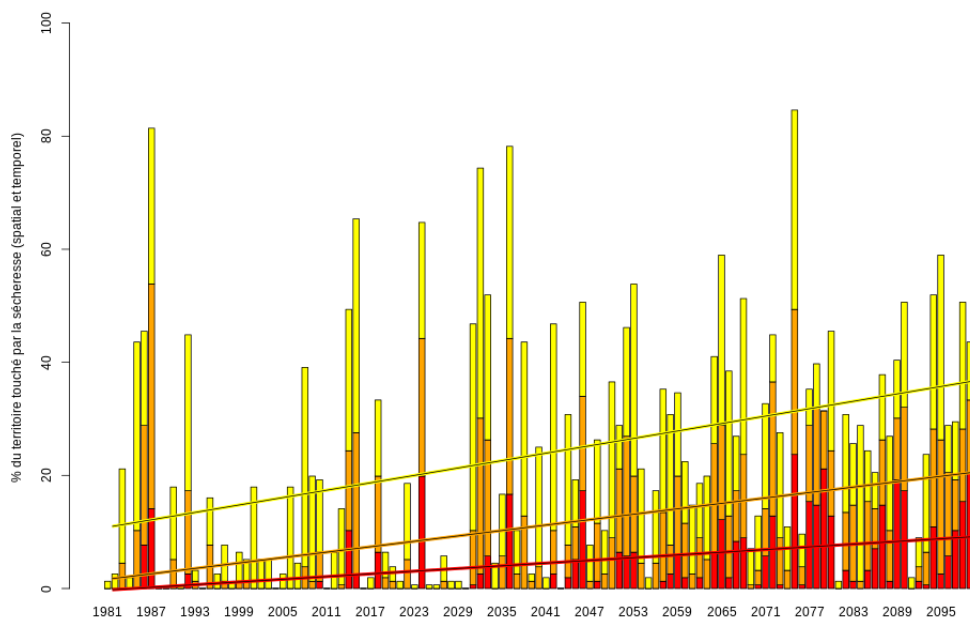


FIGURE 6.51 – Evolution temporelle sur la période 1981-2100 de l'indice sécheresse sur La Réunion selon le modèle régional *ALADIN* pour le scénario *SSP5-8.5*, après correction des biais : pourcentage du territoire touché par la sécheresse. Les valeurs peuvent évoluer chaque année entre 0 (aucune partie du territoire en sécheresse pluviométrique à aucun moment de l'année) et 100 (tout le territoire en sécheresse pluviométrique tout au long de l'année). Les couleurs du jaune au rouge représentent la sévérité de la sécheresse.

peut donc s'attendre à une intensification des précipitations extrêmes au cours du 21^{ème} siècle. Et les données BRIO confirment ces résultats à La Réunion. Le nombre de jours de précipitations extrêmes (cumuls quotidiens supérieurs à 300 mm en un lieu) devraient y augmenter de 10 à 20% dès la seconde moitié du siècle (non illustré). Les simulations *ALADIN* prévoient aussi une augmentation de la valeur maximale annuelle du cumul de précipitations en 5 jours consécutifs (Rx5day) sur certaines décennies dans les scénarios *SSP1-2.6* et *SSP5-8.5* (Fig. 6.52).

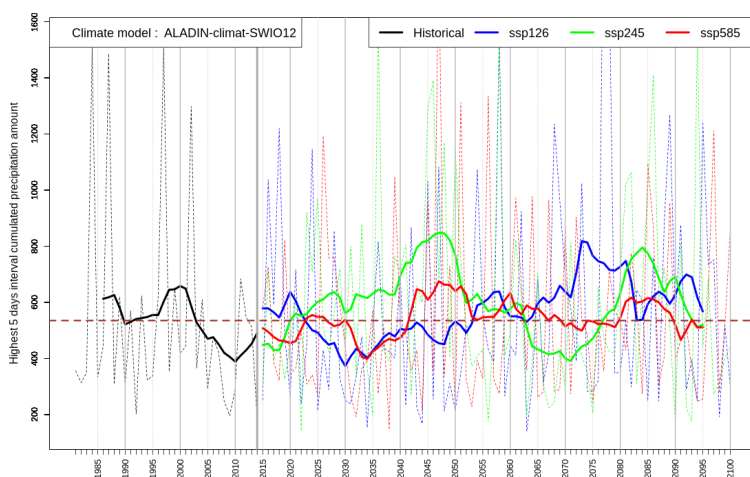


FIGURE 6.52 – Evolution temporelle sur la période 1981-2100 du cumul maximal de précipitations sur 5 jours consécutifs (Rx5day, mm) sur l'île de La Réunion selon le modèle régional *ALADIN* pour 3 scénarios *SSP*, après correction des biais. La ligne horizontale tiretée situe la moyenne de référence 1981-2010. Un lissage sur 10 années glissantes est réalisé pour atténuer la variabilité interannuelle.

6.5.3 Indicateurs climatiques sur les îles de la République de Maurice

Sur l'île Maurice, comme sur les autres îles de la république Mauricienne, le nombre de jours annuels de fortes chaleurs (DEXHT) sera en nette augmentation par rapport au passé, particulièrement dans le scénario *SSP5-8.5* (Fig. 6.53). Les fortes chaleurs concerneront l'île 300 jours par an en moyenne sur l'horizon de fin de siècle 2071-2100 dans le pire scénario.

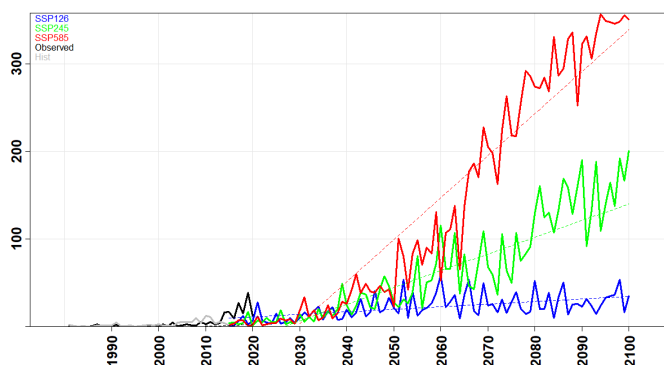


FIGURE 6.53 – Evolution temporelle sur la période 1981-2100 du nombre de jours annuel de chaleur extrême (DEXHT, définition en table 6.1) sur l'île Maurice selon le modèle régional ALADIN pour 3 scénarios SSP, après correction des biais. Les lignes tiretées situent les tendances moyennes sur la période future. Un lissage sur 10 années glissantes est réalisé pour atténuer la variabilité interannuelle.

6.5.4 Indicateurs climatiques sur l'archipel des Comores

Sur l'archipel des Comores, le nombre de jours annuels de fortes chaleurs (DEXHT) sera également en nette augmentation par rapport à ce que l'on a connu depuis 1981, particulièrement dans le scénario SSP5-8.5 (Fig. 6.54). En fin de siècle par exemple, la température maximale devrait dépasser 32°C à Pamandzi (Mayotte) plus de la moitié de l'année en scénario pessimiste contre une dizaine de jours par an jusqu'ici (Fig. 6.55). Comme sur La Réunion en scénario SSP5-8.5 des épisodes de sécheresse plus fréquents et plus sévères sont à attendre, en particulier en saison sèche, quand les ressources en eau sont déjà déficitaires (Fig. 6.56).

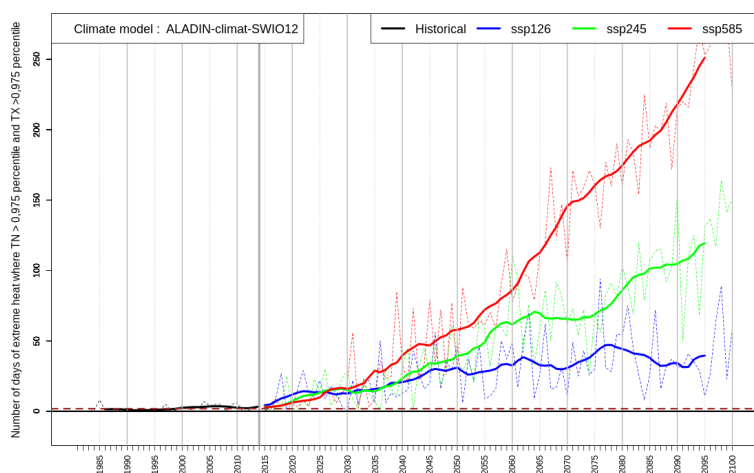


FIGURE 6.54 – Evolution temporelle sur la période 1981-2100 du nombre de jours annuel de chaleur extrême (DEXHT, définition en table 6.1) à Hahaya, Comores selon le modèle régional ALADIN pour 3 scénarios SSP, après correction des biais. La ligne horizontale tiretée situe la moyenne de référence 1981-2010. Un lissage sur 10 années glissantes est réalisé pour atténuer la variabilité interannuelle.

6.5.5 Indicateurs climatiques sur l'archipel des Seychelles

Quelque soit le scénario, le cumul annuel des pluies extrêmes quotidiennes (supérieures au 99^{ème} percentile) est prévu augmenter sur l'Anse Forbans, le Niol, Belombre et Praslin (exemple pour Belombre, Fig. 6.57) mais rester dans la normale climatique sur la zone de La Gogue. Ce signal est du à la fois à la légère augmentation du nombre de jours de pluies extrêmes (en moyenne +0.7 jours environ par an au-delà des 2 jours de la normale historique), et à l'intensification des précipitations de l'air chaud plus riche en vapeur d'eau (relation de Clausius-Clapeyron). Sur l'ensemble des zones climatiques des Seychelles et l'ensemble des scénarios, ALADIN prévoit une accentuation de la variabilité interannuelle des précipitations extrêmes (certaines années compteront jusque 8 jours de précipitations extrêmes, non illustré). Le facteur le plus inquiétant est l'augmentation de l'amplitude de la variabilité interannuelle des précipitations extrêmes (lignes pointillées en figure 6.57), indiquant des cumuls annuels de précipitations extrêmes pouvant atteindre 1000 mm certaines années quelque soit le scénario.

6.5. Indicateurs climatiques

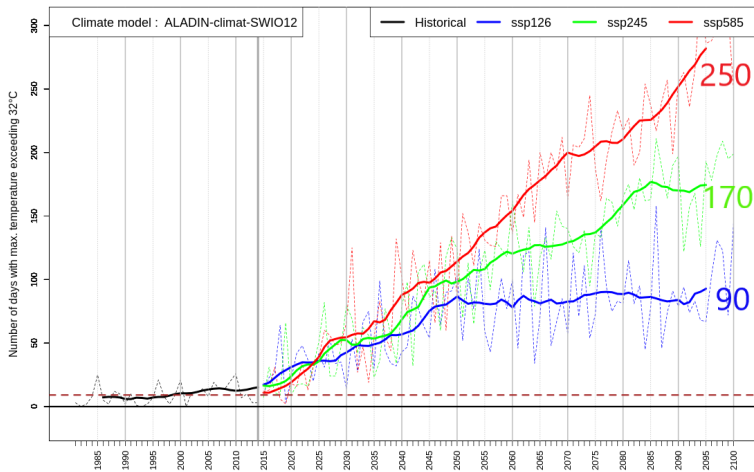


FIGURE 6.55 – Evolution temporelle du nombre de jours annuel où la température maximale simulée par ALADIN dépasse le seuil de 32°C sur Pamandzi, Mayotte, depuis la période passée 1981-2014 (en noir) jusqu'à l'horizon 2100 pour 3 scénarios SSP (couleurs), après correction des biais. Les chiffres superposés au graphique indiquent les valeurs moyennes sur la période historique en noir et sur l'horizon de fin de siècle 2071-2100 en couleur dans chaque scénario. Un lissage sur 10 années glissantes est réalisé pour atténuer la variabilité interannuelle.

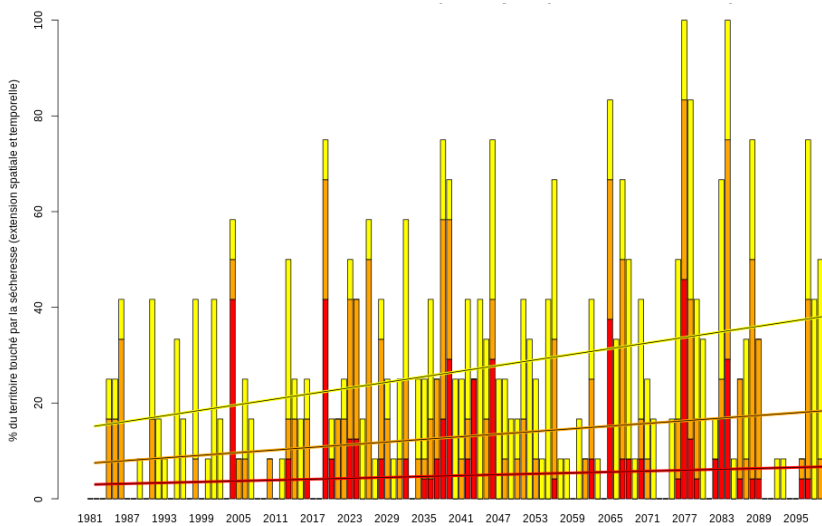


FIGURE 6.56 – Evolution temporelle sur la période 1981-2100 de l'indice sécheresse sur Mayotte selon le modèle régional ALADIN pour le scénario SSP5-8.5, après correction des biais : pourcentage du territoire touché par la sécheresse. Légende similaire à la figure 6.51.

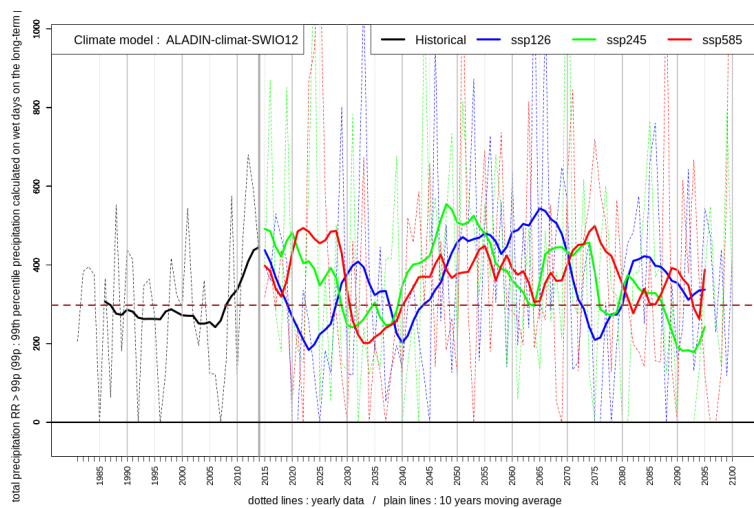


FIGURE 6.57 – Evolution temporelle sur la période 1981-2100 du cumul annuel des précipitations extrêmes sur la zone climatique de Belombre, Seychelles selon le modèle régional ALADIN pour 3 scénarios SSP, après correction des biais. La ligne horizontale tiretée situe la moyenne de référence 1981-2010. Un lissage sur 10 années glissantes est réalisé pour atténuer la variabilité interannuelle.

Sur les Seychelles, le 99^{ème} percentile de la distribution de température maximale sur la période de référence 1981-2010 vaut 34°C. Le pourcentage de jours annuel où la température maximale excèdera cette valeur extrême passera de 1 à 80% en moyenne en scénario **SSP5-8.5** en toute fin de siècle, 35% en scénario **SSP2-4.5**, 10% en scénario **SSP1-2.6** (Fig. 6.58). Si l'on raisonne en nombre de jours par an, cela revient à dire qu'en toute fin de siècle en scénario pessimiste, la température maximale excèdera 34°C pendant 285 jours en moyenne (contre 3 jours dans la période historique).

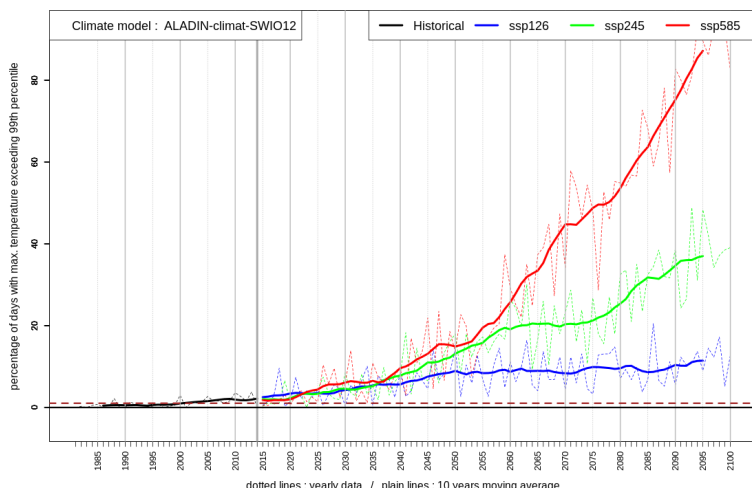


FIGURE 6.58 – Evolution temporelle du pourcentage de jours extrêmement chauds ($T_X > 99^{\text{ème}}$ percentile) sur l'aéroport de Mahé, Seychelles, selon le modèle régional **ALADIN** pour 3 scénarios **SSP**, après correction des biais. La ligne horizontale tiretée situe la moyenne de référence 1981-2010.

6.6 QUANTIFICATION DE L'INCERTITUDE DU CHANGEMENT CLIMATIQUE (CMIP6)

6.6.1 Projections CMIP6 des températures et précipitations annuelles sur le bassin

La figure 6.59 illustre les projections de température annuelle moyenne et de cumuls annuels de précipitations pour un sous-ensemble de 22 modèles CMIP6 et pour trois scénarios. Le diagnostic est réalisé en terme d'anomalies par rapport aux valeurs moyennées sur la période historique 1981-2010, ce qui permet de s'affranchir d'une bonne partie du biais de chaque modèle (on soustrait la valeur passée à la valeur future). Les variables sont moyennées sur la zone nommée COI qui est égale au domaine de simulation ALADIN ([2.1°S - 27.8°S ; 33.8°E - 74.1°E]). Les 22 modèles CMIP6 utilisés, hormis ceux du CNRM, ont été téléchargés sur le portail ESGF entre septembre 2019 et août 2021.

Les fourchettes probables des projections de température à l'horizon 2100 sur notre zone COI sont de +0.6°C à +1.6°C pour le scénario SSP1-2.6, +1.4°C à +2.5°C en SSP2-4.5, et +2.8°C à +5.0°C en SSP5-8.5 (Fig. 6.59(a)). Pour chaque scénario, la simulation ALADIN se situe en milieu de panache des simulations CMIP6 pour la variable température. Comme déjà constaté par les chercheurs du CNRM et d'autres centres de modélisation du climat, les projections de la température moyenne sur le globe ou sur la France métropolitaine ou encore ici sur la zone COI, témoignent d'un réchauffement plus sévère pour CMIP6 en comparaison avec CMIP5 (environ 1°C pour le scénario SSP5-8.5, non illustré). Ceci provient vraisemblablement de l'évolution du contenu physique des modèles, puisque les scénarios SSPY-X.X sont en principe équivalents aux scénarios RCPX.X.

Comme pour les observations passées (section 4), on note que la variabilité interannuelle des précipitations (Fig. 6.59(b)) est supérieure à celle des températures (Fig. 6.59(a)). Il y a donc une plus forte incertitude sur l'évolution des précipitations au cours du siècle. En fin de siècle, les panaches CMIP6 projettent une légère baisse des précipitations annuelles sur la zone COI, baisse bien plus prononcée dans le scénario SSP5-8.5. On remarque une forte variabilité interannuelle des pluies dans ALADIN (Fig. 6.59(b)), un peu plus élevée que celle de chaque modèle global (non illustré). Cette forte variabilité est héritée de son modèle coupleur CNRM-ESM2-1 et pourrait aussi vraisemblablement être due à une meilleure représentation des pluies extrêmes, en particulier celles liées aux systèmes tropicaux d'intensité plus réaliste dans ALADIN. Enfin, les précipitations sont en moyenne plus faibles sur la zone COI dans les nouvelles simulations CMIP6 en comparaison des simulations CMIP5 (non illustré).

L'incertitude quant à la baisse marquée des précipitations dans le 2^{ème} semestre de l'année (JAS et OND) sur la zone COI est bien moindre (Fig. 6.60). La baisse aura bien lieu, mais son amplitude dépendra de l'évolution de nos émissions de gaz à effet de serre et donc du scénario qui sera emprunté. C'est en saison des pluies (JFM) que les pluies auront une tendance à la hausse quelque soit le scénario, avec une plus grande amplitude et une plus grande fourchette d'incertitude dans le cas du scénario SSP5-8.5 (non illustré).

6.6.2 Positionnement des modèles utilisés dans le panache CMIP6

Les diagrammes 6.61 permettent de synthétiser les résultats précédents pour chaque scénario SSP. Il s'agit de graphiques 2D dans lequel les anomalies par rapport à la période 1981-2010 sont moyennées par période de 20 ans cette fois. En abscisse figurent les anomalies de précipitations et en ordonnée les anomalies de température. Ces diagrammes illustrent la position des simulations ALADIN et CNRM-ESM2-1 utilisées dans ce rapport parmi un sous-ensemble de 23 modèles CMIP6

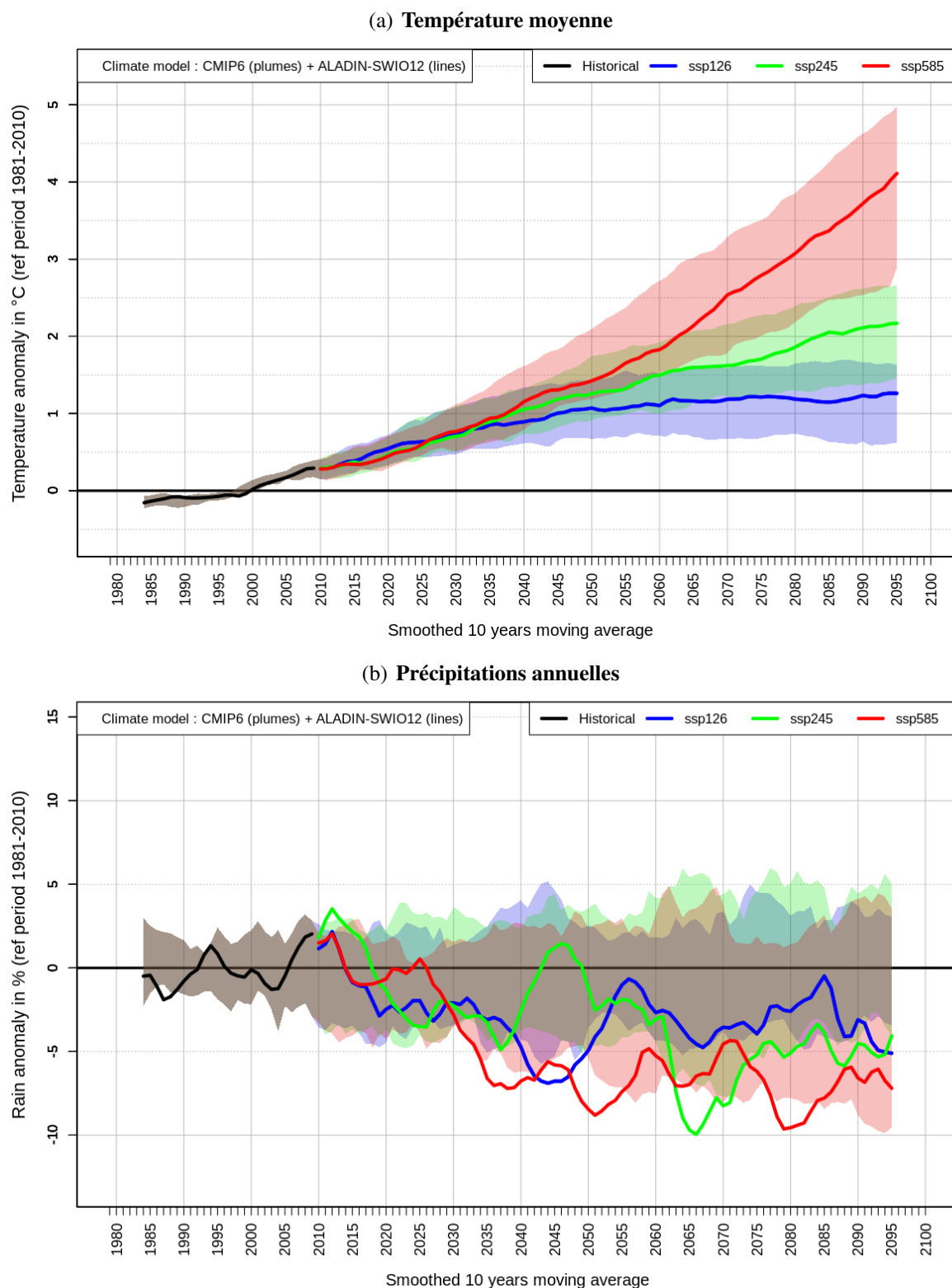


FIGURE 6.59 – Evolution temporelle sur la période 1981-2100 des anomalies (a) de température moyenne annuelle à +2 m (en °C par rapport à la période 1981-2010) et (b) de cumul annuel de précipitations (en % par rapport à la normale 1981-2010), selon 22 modèles globaux de CMIP6 dont CNRM-ESM2-1 dans 3 scénarios (enveloppes de couleur) et selon le modèle régional ALADIN (traits continus), sur la boîte COI (domaine de simulation d'ALADIN, [2.1°S - 27.8°S ; 33.8°E - 74.1°E]). Un lissage sur 10 années glissantes est réalisé pour atténuer la variabilité interannuelle des précipitations et conserver un signal de plus long terme. Les enveloppes de couleurs délimitent les valeurs des centiles 10 à 90 (C10-C90) c'est-à-dire 80% de la distribution des 22 modèles CMIP6, et excluent les valeurs plus extrêmes (20% de la distribution).

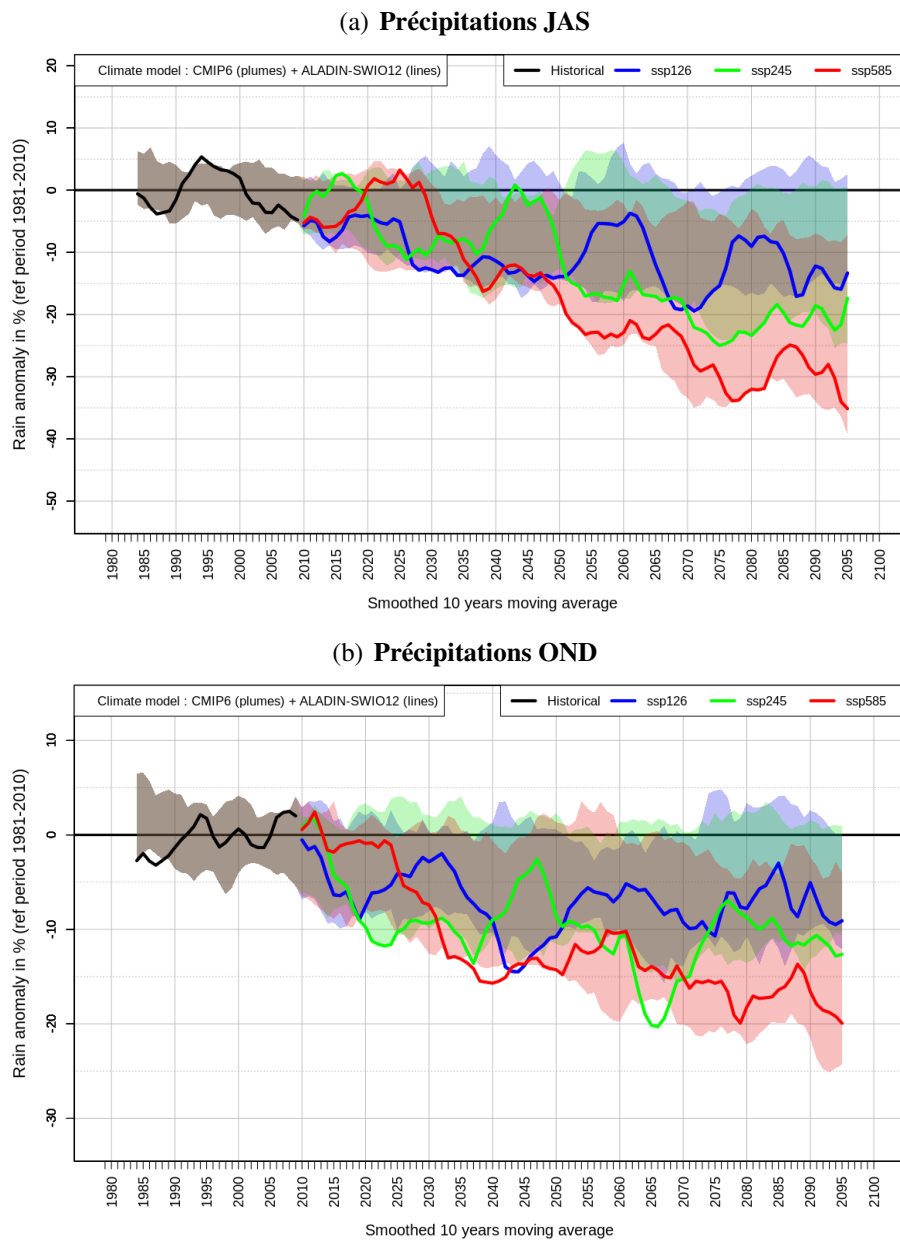


FIGURE 6.60 – *Similaire à la figure 6.59 mais pour les anomalies du cumul de précipitations (en % par rapport à la normale 1981-2010) sur les saisons (a) JAS et (b) OND.*

en terme de température moyenne et de précipitations annuelles. On retrouve le fait qu'**ALADIN** suit son modèle coupleur **CNRM-ESM2-1** en terme d'évolution de température mais qu'il est globalement légèrement plus humide en terme de précipitations sur la zone **COI** quelque soit le scénario (Fig. 6.61). En terme d'évolution de la température moyenne, le modèle global utilisé, **CNRM-ESM2-1**, se situe en milieu de panache des simulations **CMIP6**, ce qui présente l'avantage de se baser sur un scénario médian. En revanche, **CNRM-ESM2-1** fait partie des modèles **CMIP6** les plus "secs" sur la zone **COI** (Fig. 6.61), quelque soit le scénario. Le modèle canadien **CanESM5** apparaît comme un "outlier" puisqu'il est le seul à prévoir une nette augmentation moyenne des précipitations sur la zone **COI** pour le scénario **SSP5-8.5** (Fig. 6.61(c), bulles grisées tout à droite). Le modèle chinois **BCC-CSM2-MR** se détache également du sous-ensemble de simulations **CMIP6** mais en produisant à l'inverse une sécheresse extrême sur la zone **COI** quelque soit le scénario (Fig. 6.61, bulles grisées tout à gauche).

Ces graphiques permettent de mettre en perspective les résultats des simulations **ALADIN** du projet **BRIO** : tendances de températures dans la médiane et tendances de précipitations dans la fourchette "basse". Par ailleurs, ces diagrammes permettent d'identifier d'autres modèles de climat globaux intéressants pour forcer **ALADIN** afin d'échantillonner, via la descente d'échelle dynamique, la part de l'incertitude climatique liée au modèle de climat global utilisé. Des candidats intéressants pour forcer de nouvelles simulations **ALADIN**, bien que ces modèles bénéficient d'une résolution plus lâche en longitude (~ 190 à 250 km) que celle de **CNRM-ESM2-1**, sont : le modèle français **IPSL-CM6A-LR**, (Fig. 6.61, en bleu), le run **r1i1p1f1** du modèle australien **ACCESS-ESM1-5** (Fig. 6.61, en mauve), ou encore le modèle anglais **UKESM1-0-LL** de l'**UKMO** (Fig. 6.61, en vert). Leurs projections de précipitations sont en effet dans la fourchette "neutre" en terme d'anomalies tandis que les projections de températures de **UKESM1-0-LL** et **IPSL-CM6A-LR** sont plus élevées que la moyenne du panache **CMIP6**. Des études récentes ont comparé la sensibilité climatique des modèles globaux de **CMIP6**. [La sensibilité climatique ou "réponse climatique transitoire" (**TCR**) d'un modèle se définit comme la variation brusque de température en degrés Celsius associée à un doublement de la concentration de dioxyde de carbone dans l'atmosphère faisant suite à une hausse annuelle progressive de 1% de celle-ci pendant 70 ans]. Le modèle **UKESM1-0-LL** présente l'inconvénient d'avoir une trop grande sensibilité climatique (2.79) et il est ainsi déconseillé de l'utiliser pour coupler des simulations régionales. Les autres modèles **IPSL-CM6A-LR** et **ACCESS-ESM1-5** ont des sensibilités climatiques acceptables de 2.32 et 1.95 respectivement (contre 1.86 pour **CNRM-ESM2-1**).

6.6. Quantification de l'incertitude du changement climatique (CMIP6)

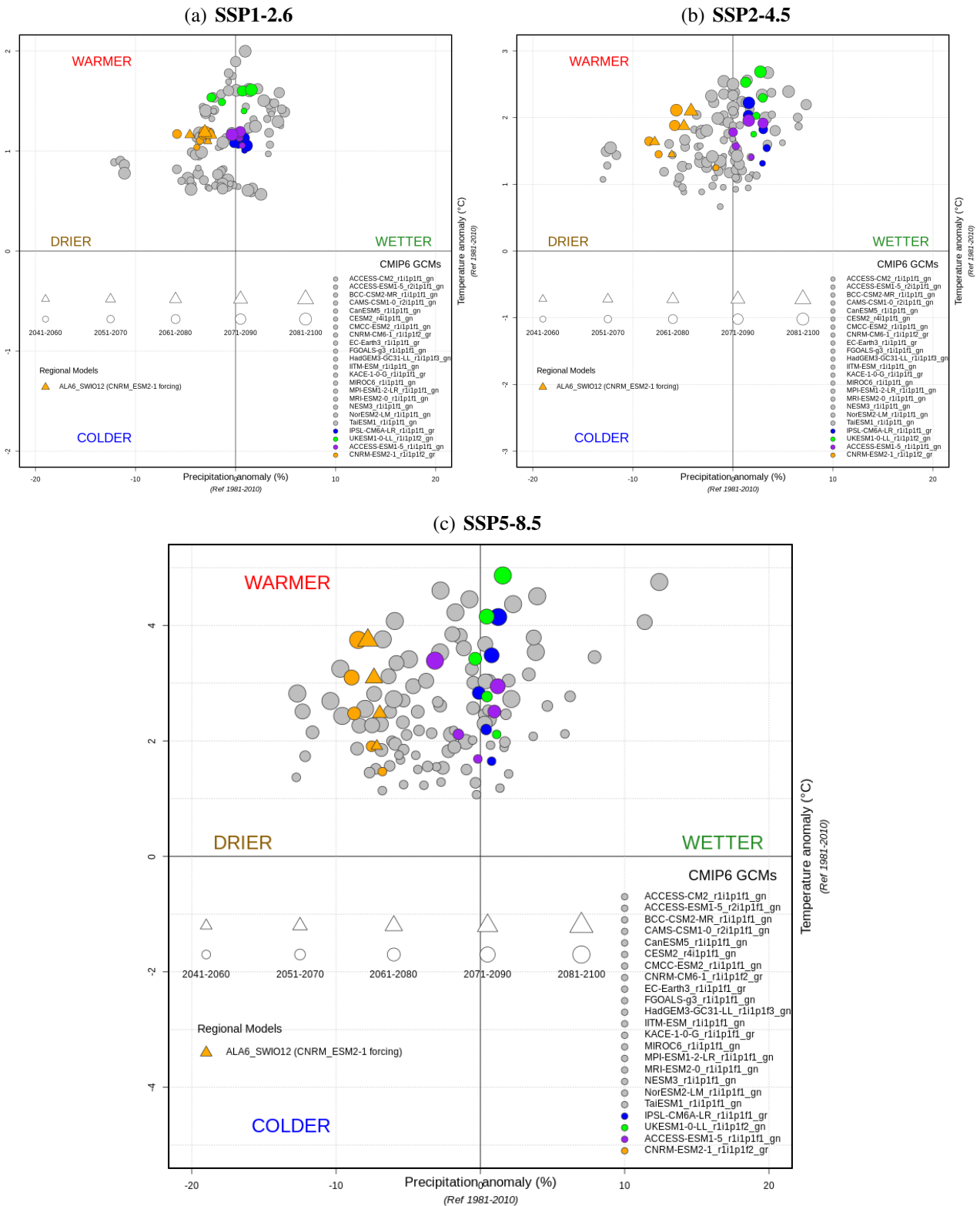


FIGURE 6.61 – Diagramme 2D de l'évolution décennale des anomalies de température moyenne à +2 m sur 20 ans (en ordonnée, en °C par rapport à la période 1981-2000) et des cumuls annuels de précipitations moyens sur 20 ans (en abscisse, en % par rapport à la normale 1981-2010) dans 3 scénarios (a) SSP1-2.6, (b) et SSP2-4.5 (c) SSP5-8.5, pour 23 modèles globaux de CMIP6, et le modèle régional ALADIN (orange pointillés), sur la boîte COI ([2.1°S - 27.8°S; 33.8°E - 74.1°E]). Les modèles globaux de CMIP6 sont matérialisés par des cercles gris ou de couleur (avec CNRM-ESM2-1 en orange). Le modèle ALADIN est représenté par les triangles oranges. La taille des symboles augmente avec l'échéance temporelle.

6.6.3 Cartes d'anomalies de précipitations CMIP6 sur la zone COI

Les modèles **CMIP6** penchent pour une baisse moyenne des précipitations annuelles dans la partie tropicale du bassin **SOOI** à l'horizon 2060-2100, avec davantage de consensus en scénario **SSP5-8.5** (Fig. 6.62). L'amplification des contrastes saisonniers (ex, Fig. 6.63) devrait compliquer la gestion de l'eau en saison des pluies (inondations) et en saison sèche (sécheresses). En scénario pessimiste **SSP5-8.5**, la baisse des précipitations pourrait atteindre 10% à 40% sur la saison juillet-août-septembre selon la zone (Fig. 6.63(c)). Une baisse sensible de 20 à 30% des précipitations sur le dernier trimestre de l'année (**OND**) présage un allongement de la saison sèche (Fig. 6.63(d)) avec un probable retard de démarrage de la saison des pluies. Dans la bande équatoriale en revanche, et donc pour l'archipel des Seychelles situé à 4.5°S, les précipitations annuelles devraient augmenter (Fig. 6.62). Mais l'archipel n'échappera pas à la baisse des précipitations en hiver (**JAS** et **OND**) en scénario **SSP5-8.5** (Figs. 6.63(c), 6.63(d)).

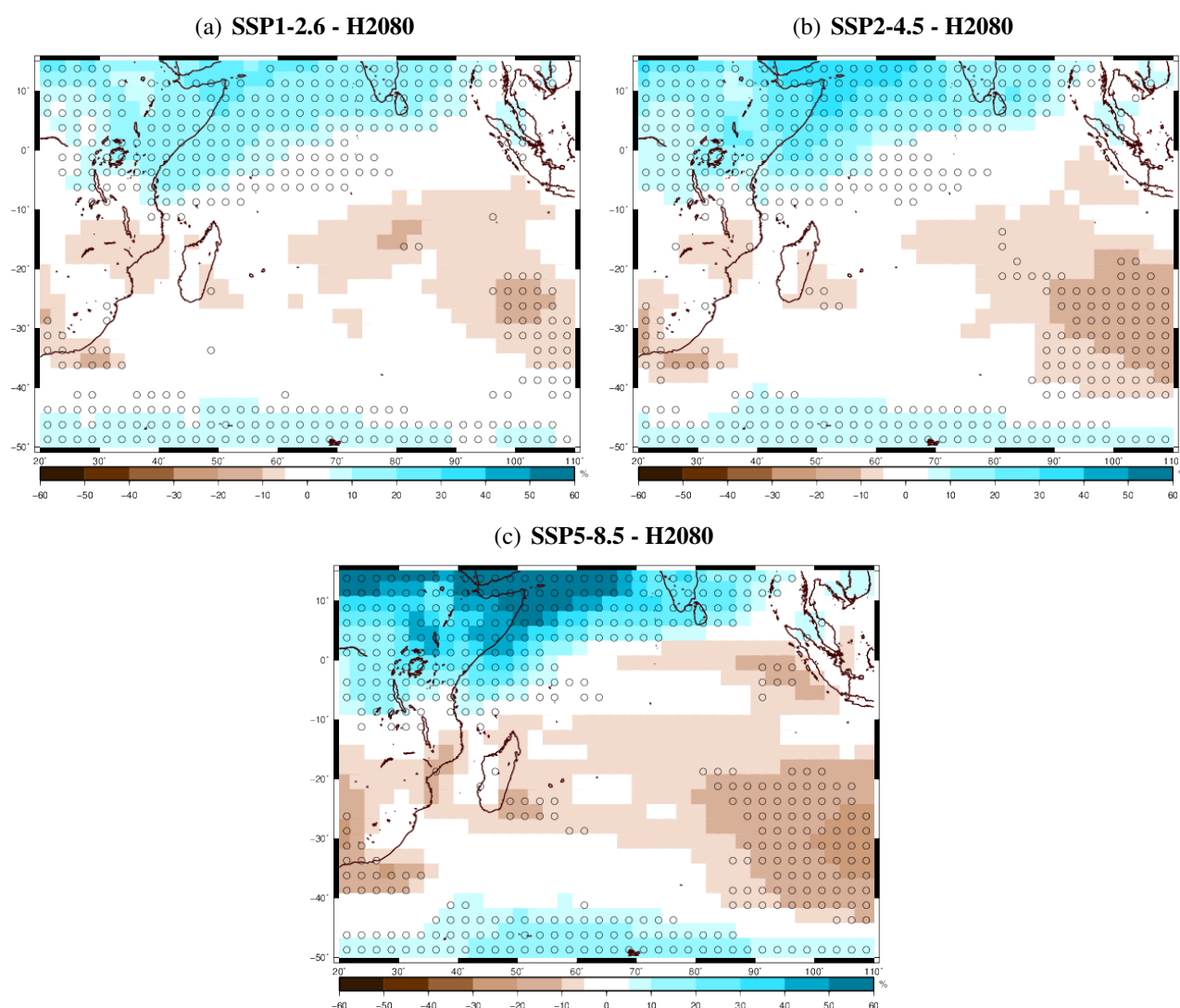


FIGURE 6.62 – Anomalies de précipitations annuelles (% par rapport à la normale 1981-2010) sur le bassin océan Indien à l'horizon 2080 selon 22 modèles globaux **CMIP6** dans 3 scénarios (a) **SSP1-2.6**, (b) et **SSP2-4.5** (c) **SSP5-8.5**. Les valeurs sont moyennées sur la période 2060-2100 (horizon 2080). En marron les zones les plus sèches et en bleu les zones plus pluvieuses. Les cercles indiquent que les modèles sont en accord à plus de 95% (consensus).

6.6. Quantification de l'incertitude du changement climatique (CMIP6)

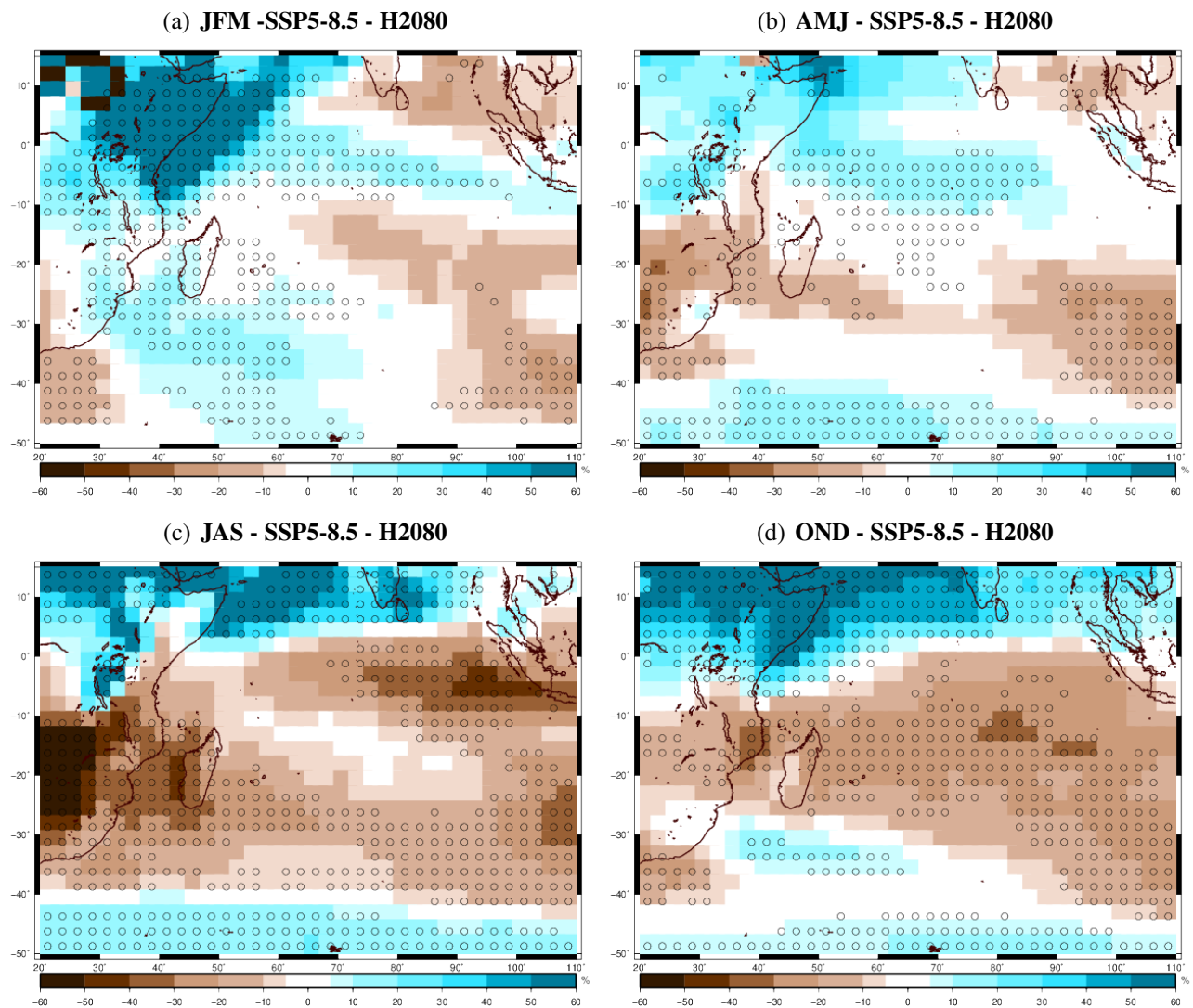


FIGURE 6.63 – Anomalies de précipitations (% par rapport à la normale 1981-2010) sur le bassin océan Indien sur la période 2060-2100 (horizon 2080) dans le scénario SSP5-8.5 selon 22 modèles globaux CMIP6 et pour chaque trimestre (a) JFM, (b) AMJ (c) JAS, et (d) OND.

6.6.4 Projections CMIP6 de la température moyenne sur les îles

Les projections d'anomalies de température moyenne annuelle pour le sous-ensemble de modèles CMIP6 sont tracées ici sur les îles de la COI (Fig. 6.64). Pour les petites îles, on utilise les valeurs des simulations CMIP6 en des points de latitude/longitude donnés; pour la Grande Île les champs modèles sont moyennés sur une boîte rectangulaire représentant Madagascar. Les signaux sur le point associé à Mayotte représentent l'ensemble de l'archipel des Comores. Rappelons que les modèles globaux CMIP6 ont une résolution lâche de 150 à 250 km et ne distinguent pas la présence des petites îles dans l'océan. Les panaches représentent les projections globales des 22 modèles CMIP6 et les courbes continues les projections régionales. Les fourchettes de valeurs attendues sont sensiblement les mêmes sur l'ensemble des petites îles. Elles sont plus élevées sur la Grande Île (Fig. 6.64(h)) ou sur le continent africain (non illustré). Les augmentations de températures par rapport à la période de référence 1981-2010 prévues par le sous-ensemble de 22 modèles CMIP6 sur les petites îles sont les suivantes, en retenant les valeurs minimales et maximales du panache sur la période considérée :

- En milieu de siècle (2041-2070) :
 - autour de $+0.6^{\circ}\text{C}$ à $+1.5^{\circ}\text{C}$ en SSP1-2.6.
 - autour de $+0.7^{\circ}\text{C}$ à $+2.0^{\circ}\text{C}$ en SSP2-4.5.
 - autour de $+0.8^{\circ}\text{C}$ à $+3.0^{\circ}\text{C}$ en SSP5-8.5.
- à l'horizon de fin de siècle (2071-2100) :
 - autour de $+0.7^{\circ}\text{C}$ à $+1.6^{\circ}\text{C}$ en SSP1-2.6.
 - autour de $+1.2^{\circ}\text{C}$ à $+2.5^{\circ}\text{C}$ en SSP2-4.5.
 - autour de $+1.8^{\circ}\text{C}$ à $+4.8^{\circ}\text{C}$ en SSP5-8.5.

Sur la Grande Île, les augmentations de températures par rapport à la période de référence 1981-2010 prévues par le sous-ensemble de 22 modèles CMIP6 sont les suivantes, en retenant les valeurs minimales et maximales du panache sur la période considérée :

- En milieu de siècle (2041-2070) :
 - autour de $+0.7^{\circ}\text{C}$ à $+1.8^{\circ}\text{C}$ en SSP1-2.6.
 - autour de $+1.0^{\circ}\text{C}$ à $+2.3^{\circ}\text{C}$ en SSP2-4.5.
 - autour de $+1.0^{\circ}\text{C}$ à $+3.7^{\circ}\text{C}$ en SSP5-8.5.
- à l'horizon de fin de siècle (2071-2100) :
 - autour de $+0.7^{\circ}\text{C}$ à $+1.9^{\circ}\text{C}$ en SSP1-2.6.
 - autour de $+1.5^{\circ}\text{C}$ à $+3.0^{\circ}\text{C}$ en SSP2-4.5.
 - autour de $+2.1^{\circ}\text{C}$ à $+5.7^{\circ}\text{C}$ en SSP5-8.5.

6.6. Quantification de l'incertitude du changement climatique (CMIP6)

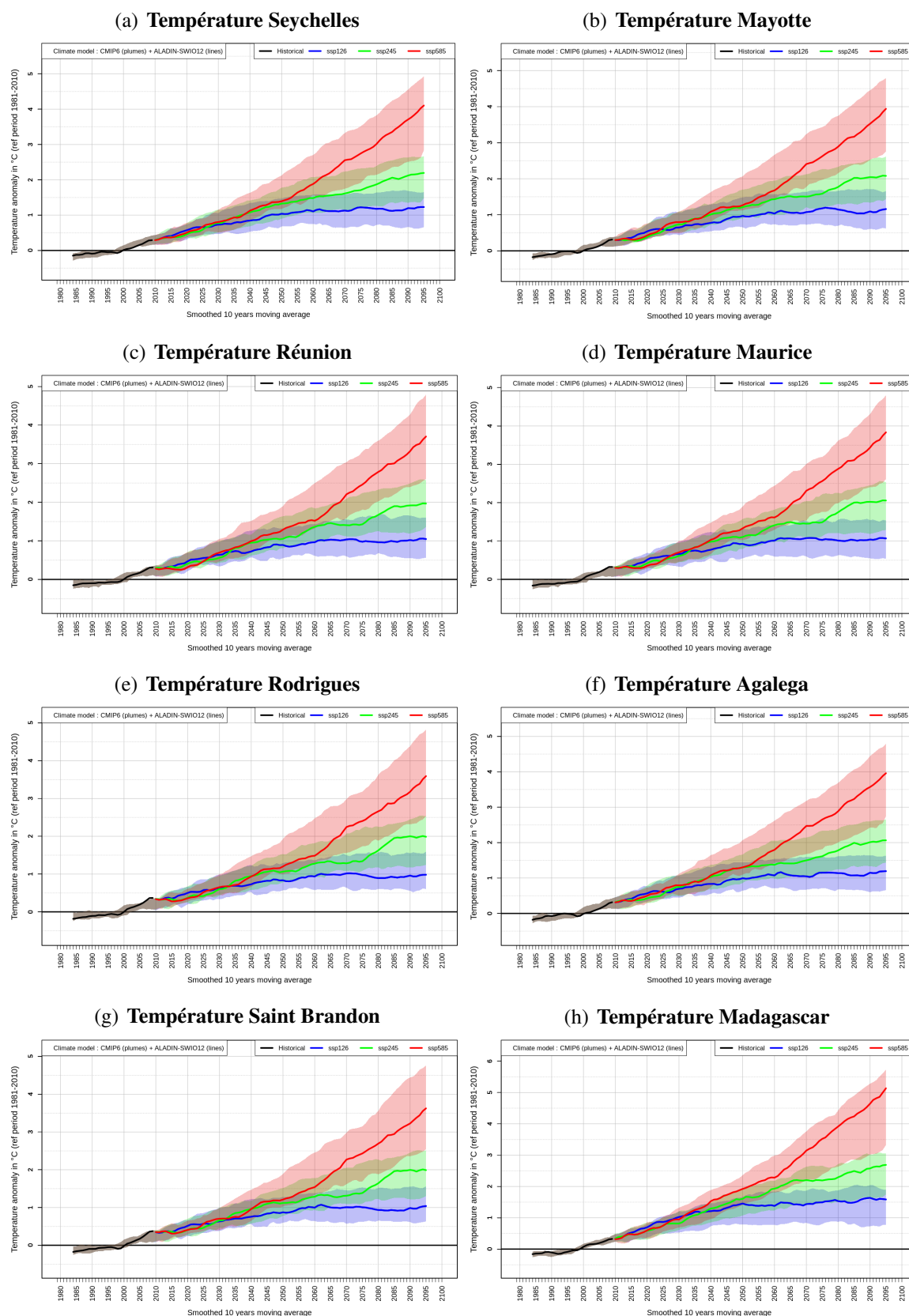


FIGURE 6.64 – Evolution temporelle sur la période 1981-2100 des anomalies de température moyenne annuelle à +2 m (en °C par rapport à la période 1981-2010) sur les îles de la COI : (a) Mahé, Seychelles (55.5°E - 4.5°S), (b) Mayotte (45.3°E - 12.8°S), (c) La Réunion (55.5°E - 21.0°S), (d) Maurice (57.5°E - 20.2°S), (e) Rodrigues (63.5°E - 19.7°S), (f) Agalega (56.6°E - 10.4°S), (g) Saint Brandon (59.6°E - 16.5°S), et (h) Madagascar (43.8°-48.5°E - 15.9°-25.5°S), selon 22 modèles globaux de CMIP6 dont CNRM-ESM2-1 dans 3 scénarios (enveloppes de couleur, comme en Fig. 6.59) et selon le modèle régional ALADIN (traits continus).

6.6.5 Projections CMIP6 des précipitations annuelles sur les îles

L'incertitude est plus prononcée pour les précipitations puisque cette variable, comme nous l'avons vu, a une plus grande variabilité interannuelle que la température (Fig. 6.62). Seul l'archipel des Seychelles, situé dans la bande équatoriale, verra ses précipitations annuelles moyennes augmenter au cours du siècle (Fig. 6.65). On retrouve le fait qu'ALADIN prévoit globalement un signal plus sec que les modèles globaux sur les îles, sauf sur La Réunion où ALADIN se situe en milieu de panache des simulations CMIP6, ce qui présente l'avantage de se baser sur un scénario médian (Fig. 6.66(c)); nous retrouverons cet aspect lors de la descente d'échelle statique sur La Réunion en section 6.7. Pour l'archipel des Comores, Saint Brandon et Madagascar, ALADIN se situe dans la fourchette basse de l'ensemble de projections de précipitations CMIP6 avec un signal très sec quelque soit le scénario (Figs. 6.66(b), 6.66(g), 6.66(h)).

Les précipitations annuelles moyennes auront plus de chance de diminuer que d'augmenter au cours du siècle sur les îles de Madagascar, Saint Brandon, Rodrigues, Maurice, La Réunion. En scénario SSP5-8.5, il est très probable que le cumul moyen de précipitations annuelles diminue fortement en fin de siècle sur Madagascar, Saint Brandon, Rodrigues, Maurice, La Réunion mais aussi sur Agalega (Figs. 6.62, 6.65).

Quelque soit le scénario, les précipitations du dernier trimestre de l'année OND connaîtront une nette baisse au 21^{ème} siècle sur l'ensemble des îles hormis les Seychelles (Fig. 6.66). La saison sèche JAS sera encore plus sèche sur Madagascar, Mayotte et Comores, La Réunion, Maurice, Saint Brandon, et Rodrigues dans une moindre mesure (non illustré). Seules les Seychelles et Agalega pourraient être épargnées par cette baisse des précipitations en hiver.

6.6. Quantification de l'incertitude du changement climatique (CMIP6)

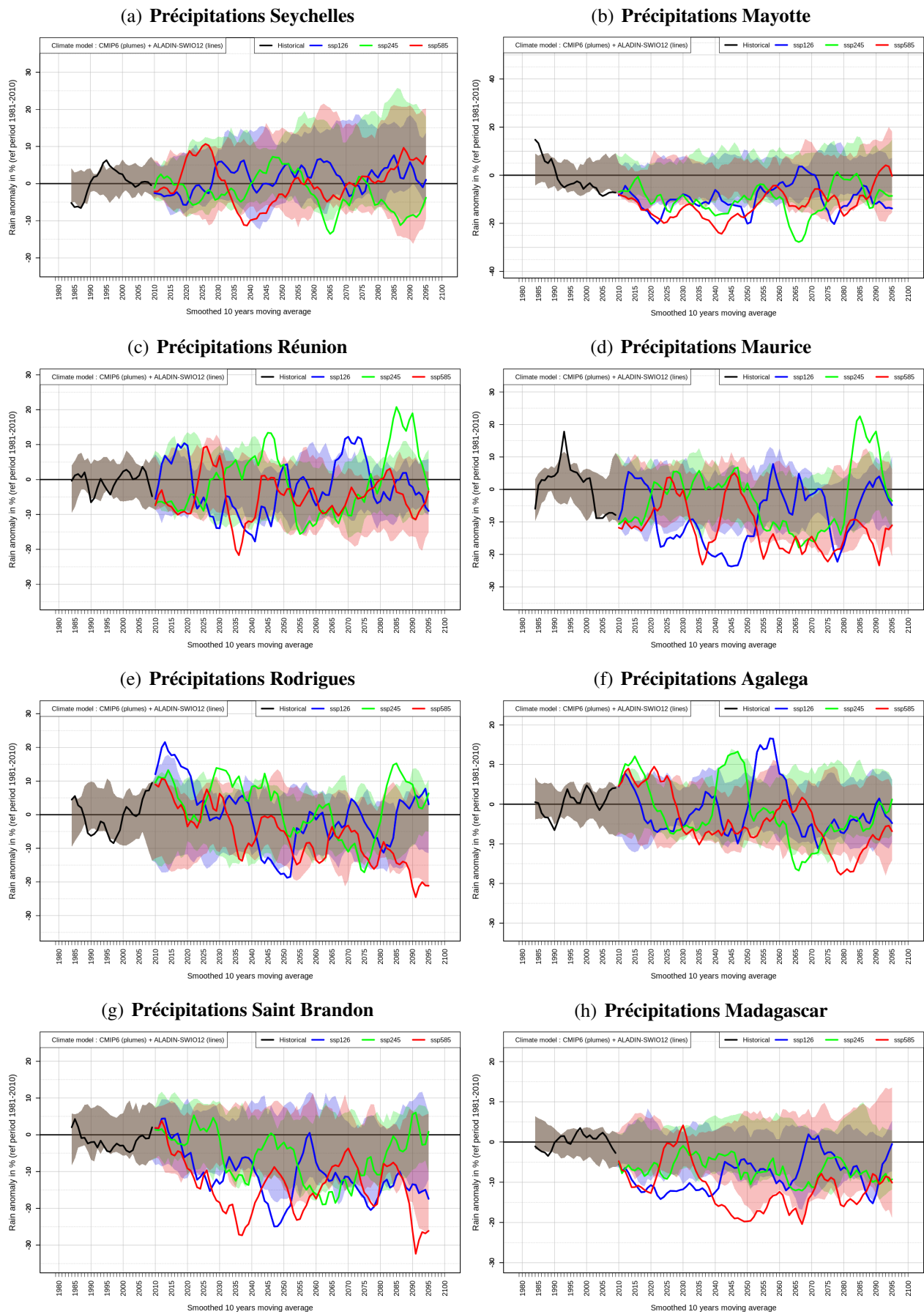


FIGURE 6.65 – Similaire à la figure 6.64 mais pour les anomalies du cumul annuel de précipitations (en % par rapport à la normale 1981-2010).

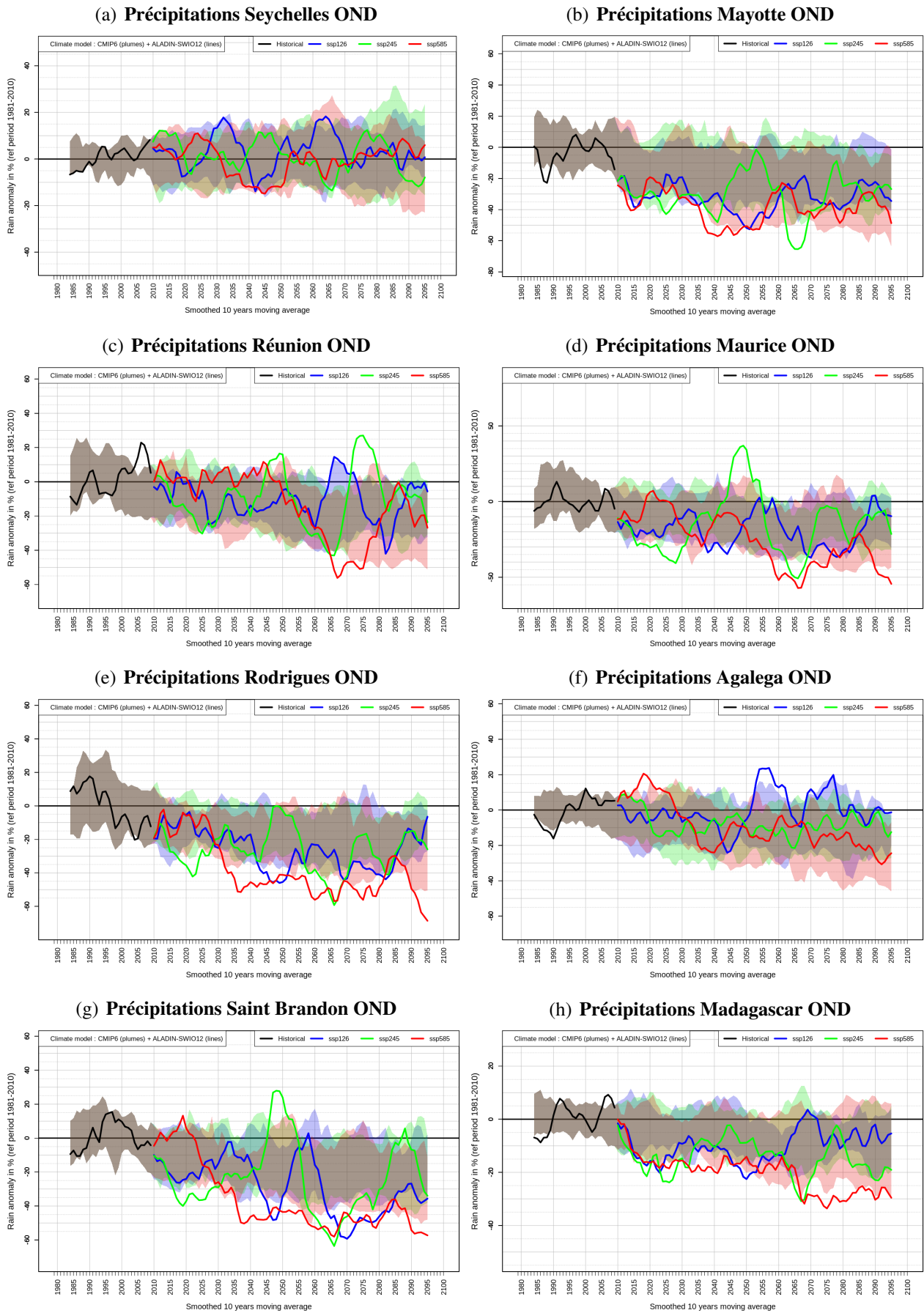


FIGURE 6.66 – Similaire à la figure 6.65 mais pour les anomalies du cumul de précipitations du trimestre OND (en % par rapport à la normale 1981-2010).

6.7 PROTOTYPE DE DESCENTE D'ÉCHELLE STATISTIQUE SUR LA RÉUNION

6.7.1 Méthode innovante de descente d'échelle statistique

Les propriétés climatiques de La Réunion ont été utilisées afin d'établir des types de temps discriminants pour la variable locale précipitations. L'hypothèse principale est que chaque régime de temps particulier (représenté par une variable de circulation atmosphérique de grande échelle, ici le prédicteur vent à 850 hPa) est associé à une distribution spécifique des variables climatiques locales (ici les précipitations à petite échelle, le prédicteur). Cette association est représentée par une fonction de transfert qui est construite statistiquement à partir des observations et/ou réanalyses disponibles. Cinq régimes de temps sont retenus qui sont discriminants pour les précipitations quotidiennes à La Réunion. Ils sont définis par le secteur et la force du vent à 850 hPa : vents supérieurs à 10 km/h de nord, d'Est, de sud, ou d'ouest, et une 5^{ème} classe regroupant les vents faibles inférieurs à 10 km/h, quelque soit leur secteur.

Nous reprenons la méthode de correction de biais **CDF-t** en points de grille et par fenêtre glissante de 3 mois centrée sur le mois à corriger présentée en section 5.1 et utilisée en section 5.2. Cette fois nous décomposons l'échantillon de précipitations à débiaiser en 5 lots, classés selon le critère de vent ci-dessus. C'est à dire que nous sommes amenés à calculer 5 fonctions de transfert, une pour chaque régime de temps. Les jeux de données utilisés pour construire la fonction de transfert sont d'une part (pour le prédicteur) le jeu quotidien d'observations météorologiques à 3 km de résolution de La Réunion présenté en section 4.2 et d'autre part (pour le prédicteur vent) les précipitations quotidiennes et le vent à 850 hPa d'un modèle global **CMIP6**. Dans la première étape de validation de la méthode, nous substituons à un modèle global **CMIP6** la réanalyse météorologique **ERA-Interim** du **CEPMMT** dégradée à 1° de résolution (contre 0.75° à l'origine) pour se rapprocher de la résolution des simulations **CMIP6**.

La méthode est validée sur **ERA-Interim** en effectuant une correction des biais de précipitations de la réanalyse **ERA-Interim** sur la période d'apprentissage 1981-2010 (sur laquelle sont calculées les fonctions de transfert) et en appliquant la méthode de correction de biais à une période test 2011-2017. Les différences moyennes sur la période 1981-2010 entre précipitations **ERA-Interim** corrigées et précipitations climatologiques de référence (biais résiduels) sont minimisées lorsque l'on utilise 5 classes de vent (par rapport à une correction uniforme des précipitations). Les biais annuels et saisonniers sont ensuite analysés sur la période test 2011-2017. Des scores d'erreur absolue moyenne (**MAE**) et d'erreur quadratique moyenne (**RMSE**) sont calculés sur l'ensemble des points de grille de l'île pour la période d'apprentissage 1981-2010 et pour la période test 2011-2017. Les précipitations sont bien corrigées dans l'ensemble mais des biais forts existent en secteur nord, régime de temps rencontré lors des passages cycloniques fortement précipitants, donc en saison des pluies **JFM**. Des analyses de cas sont réalisées sur des journées en flux d'alizés humides, en flux de sud à l'arrière d'un front froid, en situation cyclonique, ou encore dans les 5 classes de vent. Ces analyses de cas montrent bien l'apport de la descente d'échelle statistique sur la structure des précipitations dans l'île, par comparaison entre le champ de précipitations quotidien de grande échelle **ERA-Interim**, l'observation quotidienne, les précipitations **ERA-Interim** corrigées de façon uniforme, et les précipitations **ERA-Interim** corrigées en fonction des classes de vent. Le relief est particulièrement bien pris en compte, avec la distinction nette des zones sous le vent et au vent. L'exemple de la situation de vent d'Est du 31 décembre 2005 (Fig. 6.67) illustre deux aspects. Le premier est le besoin de corriger la réanalyse **ERA-Interim** car elle sous-estime nettement les précipitations sur l'île à cause de sa résolution lâche de 1° (Fig. 6.67(b)). Le deuxième est l'apport de la correction de biais avec 5 classes de vent (Fig. 6.67(c)) devant une correction de biais sans régime de temps (Fig. 6.67(d)) pour renforcer les

précipitations sur le flanc exposé de l'île, donnant une représentation quotidienne des précipitations au plus proche des observations (Fig. 6.67).

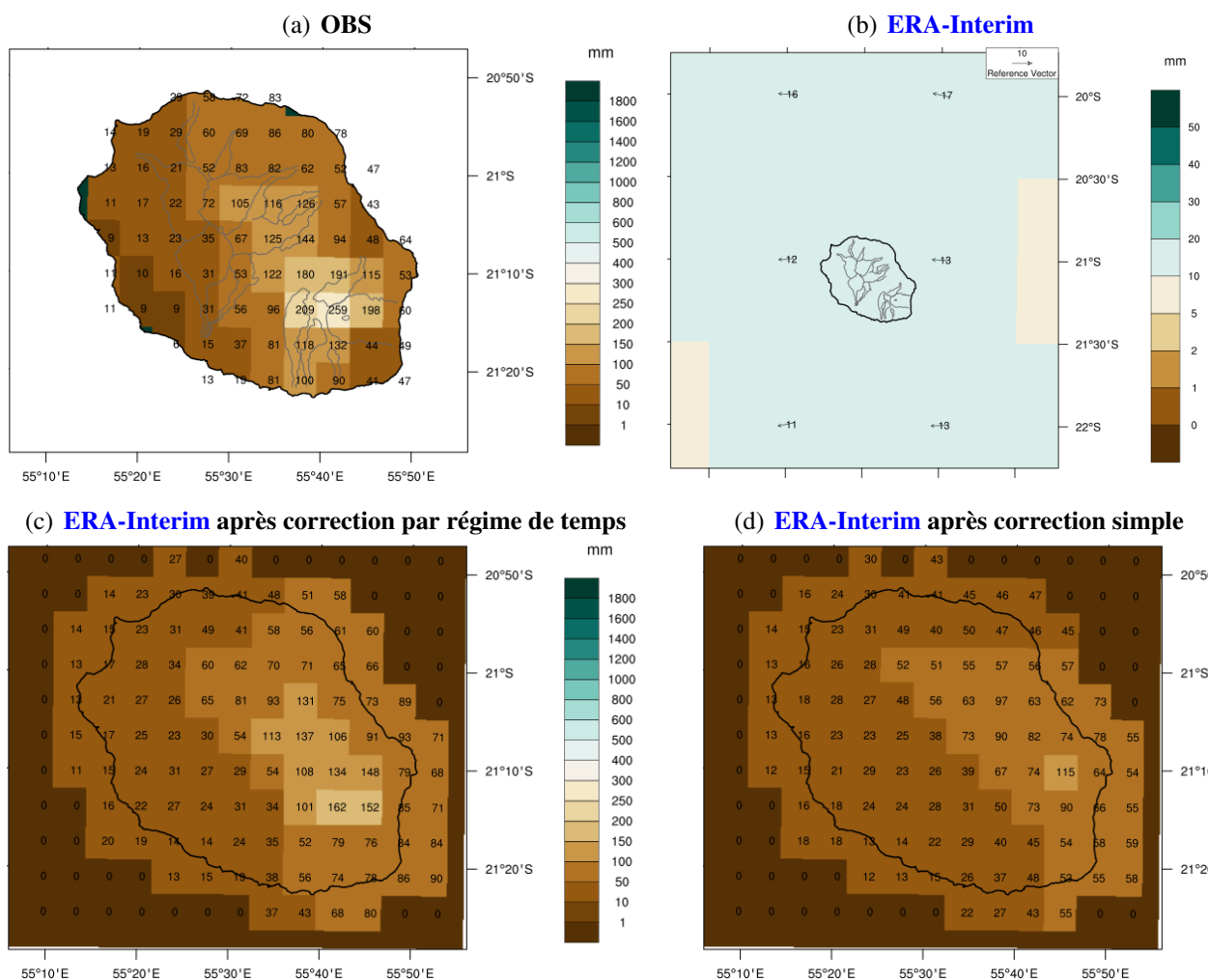


FIGURE 6.67 – Cumul quotidien de précipitations sur La Réunion le 31 décembre 2005 : (a) observations, (b) réanalyse brute, (c) réanalyse après correction des biais avec prise en compte des régimes de temps, (d) réanalyse après correction des biais sans prise en compte des régimes de temps. Les observations et les données corrigées sont tracées à 6 km de résolution.

6.7.2 Descente d'échelle statistique pour les précipitations

La méthode de correction de biais selon 5 classes de vent est appliquée aux projections de précipitations quotidiennes pour 22 modèles **CMIP6** dans deux scénarios extrêmes **SSP1-2.6** et **SSP5-8.5**. Nous utilisons ici la notion de quantile ou centile présentée en section 2.1.7. La valeur moyenne et les centiles C10, C20, C50, C80 et C90 des anomalies de cumuls annuels moyens sont calculés à partir de la distribution des valeurs de l'échantillon des 22 modèles **CMIP6** pour les milieu et fin de siècle en scénario **SSP1-2.6** (Figs. 6.68, 6.69) et en scénario **SSP5-8.5** (Figs. 6.70, 6.71). Nous retrouvons le résultat vu en section 6.6 : sur La Réunion **ALADIN** se situe en milieu de panache des simulations **CMIP6**, ce qui présente l'avantage de se baser sur un scénario médian (Fig. 6.66(c)). En scénario **SSP1-2.6**, le signal d'**ALADIN** se situe vers la moyenne de l'ensemble en milieu de siècle et vers le centile 80 en fin de siècle (Figs. 6.27 (a)-(b)). Pour le scénario **SSP5-8.5** le signal d'**ALADIN** se situe autour du C20 en milieu de siècle et autour du C50 en fin de siècle (Figs. 6.27 (c)-(d)). Ces statistiques permettent de connaître l'incertitude associée au modèle de climat utilisé et peuvent être utilisées par

6.7. Prototype de descente d'échelle statistique sur La Réunion

des décideurs pour prendre en compte les évolutions possibles des précipitations sur les communes de l'île à divers horizons temporels et en fonction du scénario d'émission de [GES](#).

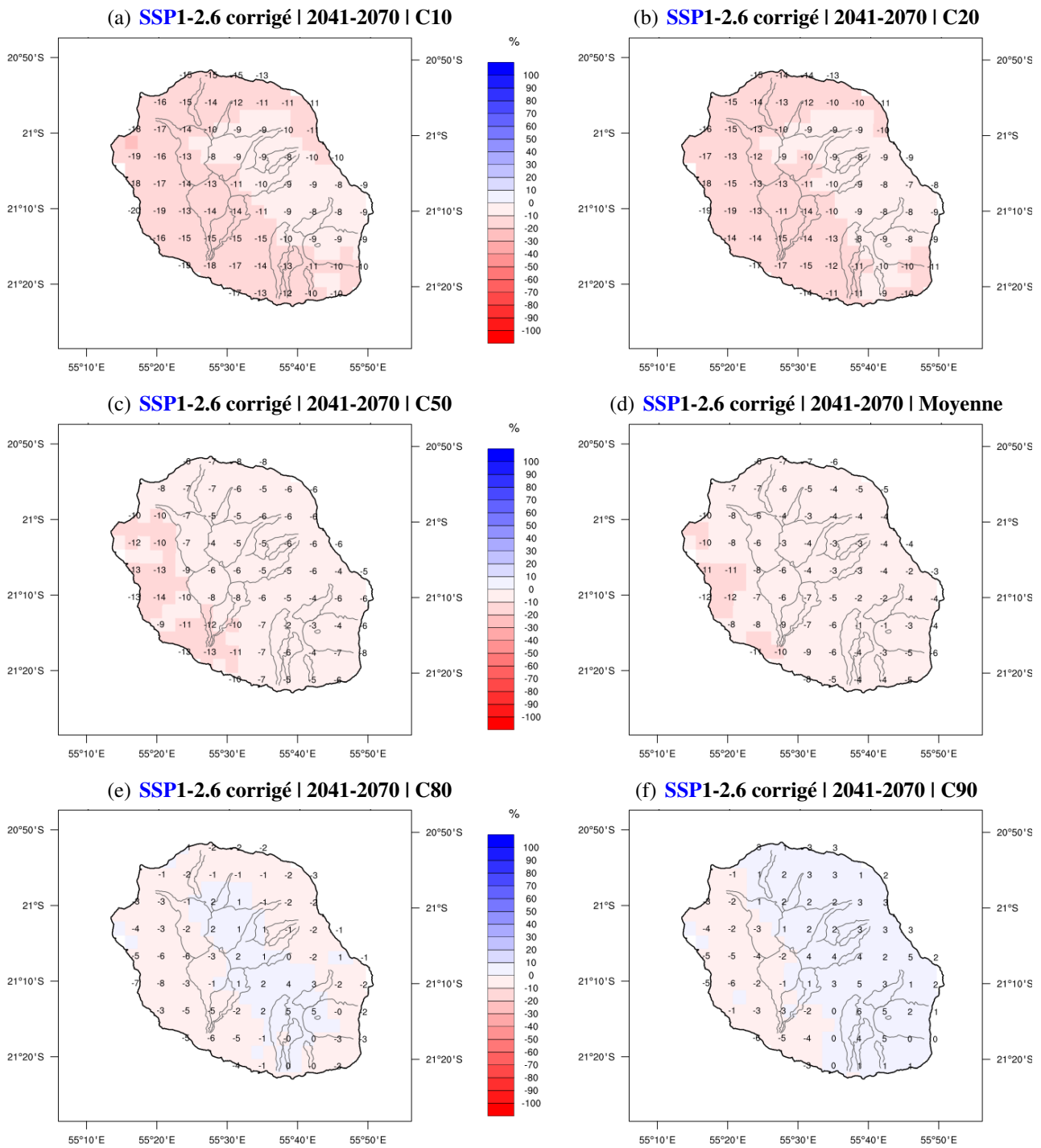


FIGURE 6.68 – Centiles des anomalies (en % par rapport à la normale 1981-2010) des cumuls annuels moyens de précipitations sur La Réunion pour un ensemble de 22 modèles globaux *CMIP6* pour le scénario *SSP1-2.6* en milieu de siècle, après descente d'échelle statistique.

6.7. Prototype de descente d'échelle statistique sur La Réunion

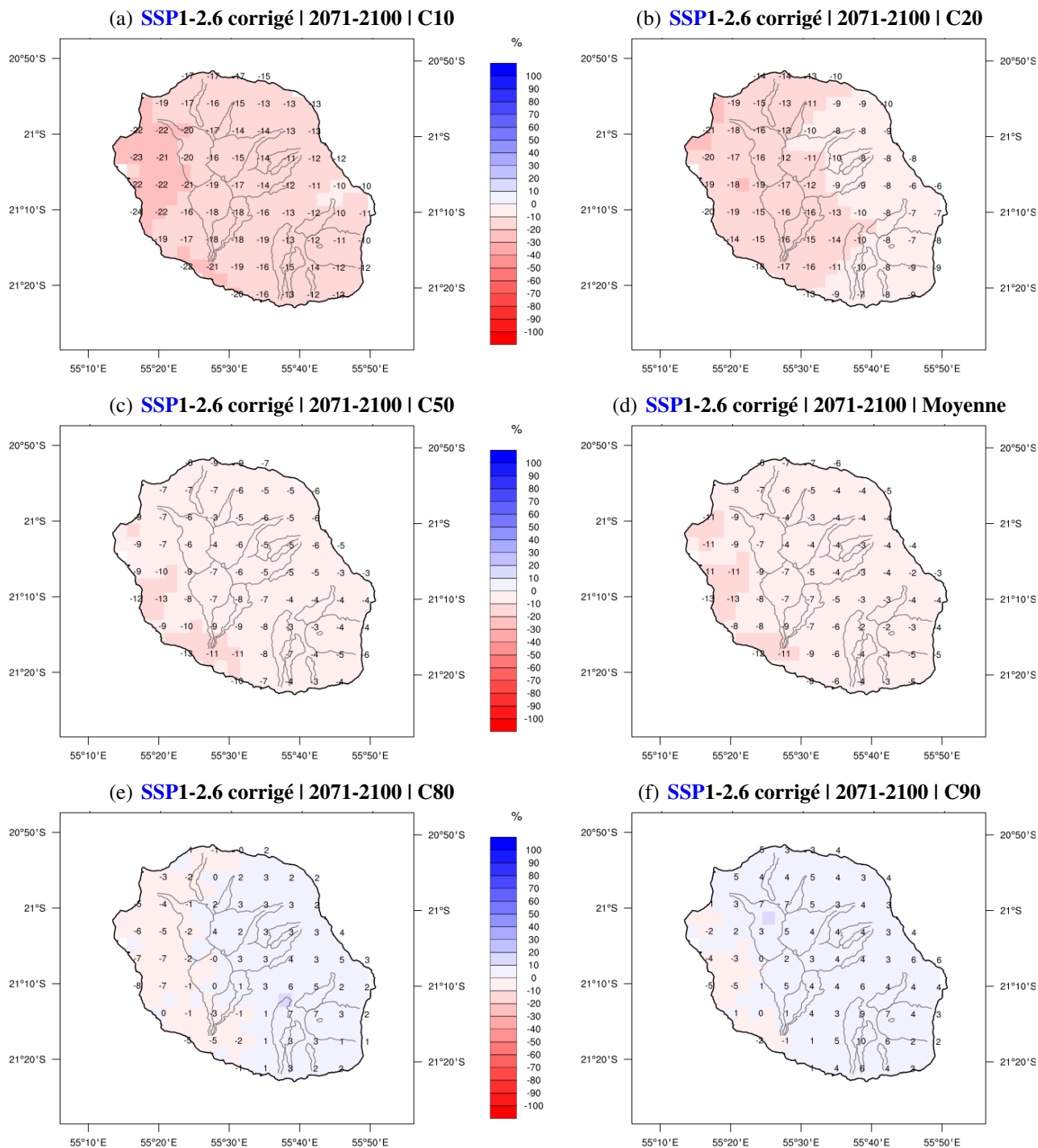


FIGURE 6.69 – Similaire à la figure 6.68 mais pour la fin de siècle.

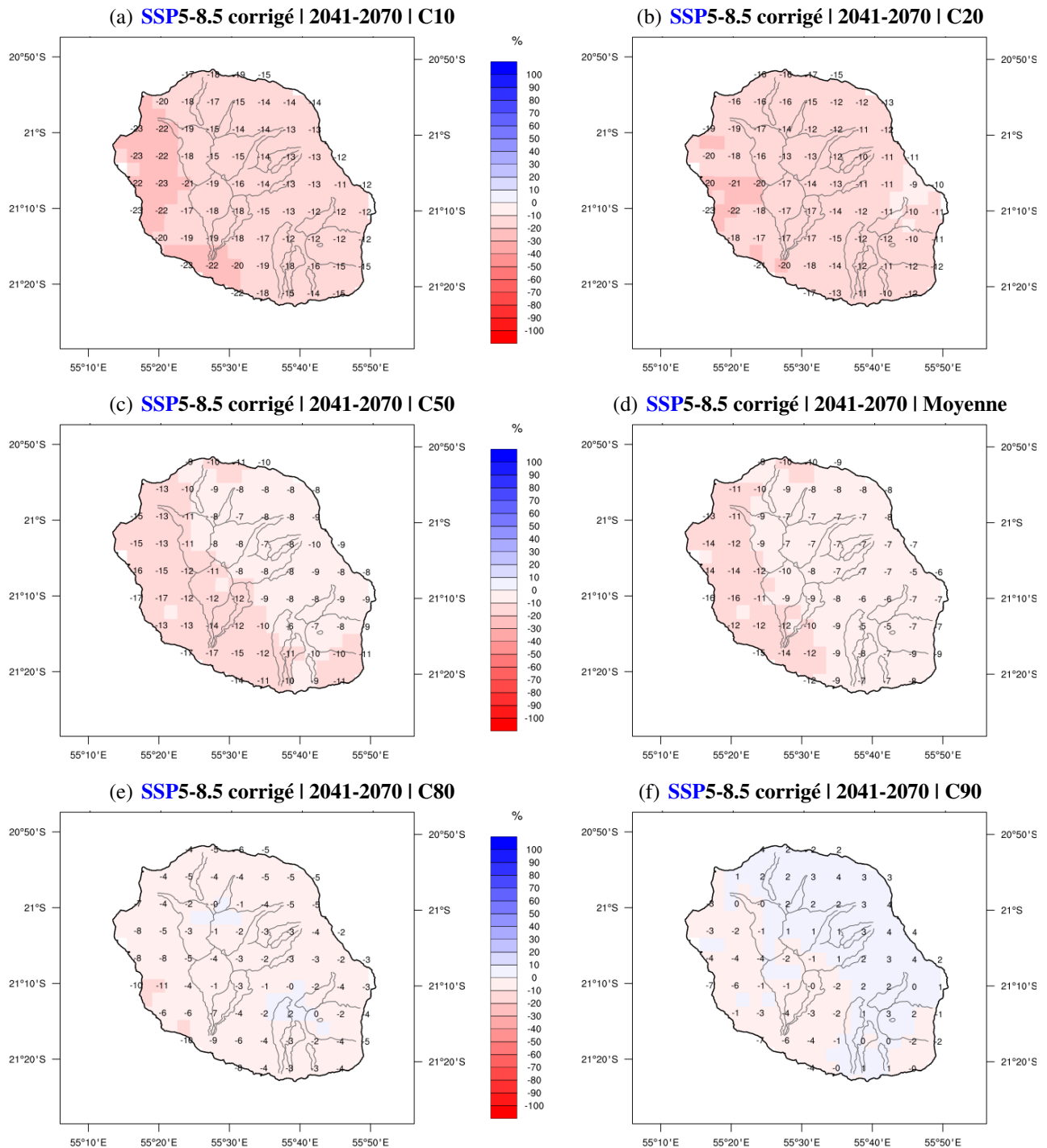


FIGURE 6.70 – Similaire à la figure 6.68 mais pour le scénario SSP5-8.5 en milieu de siècle.

6.7. Prototype de descente d'échelle statistique sur La Réunion

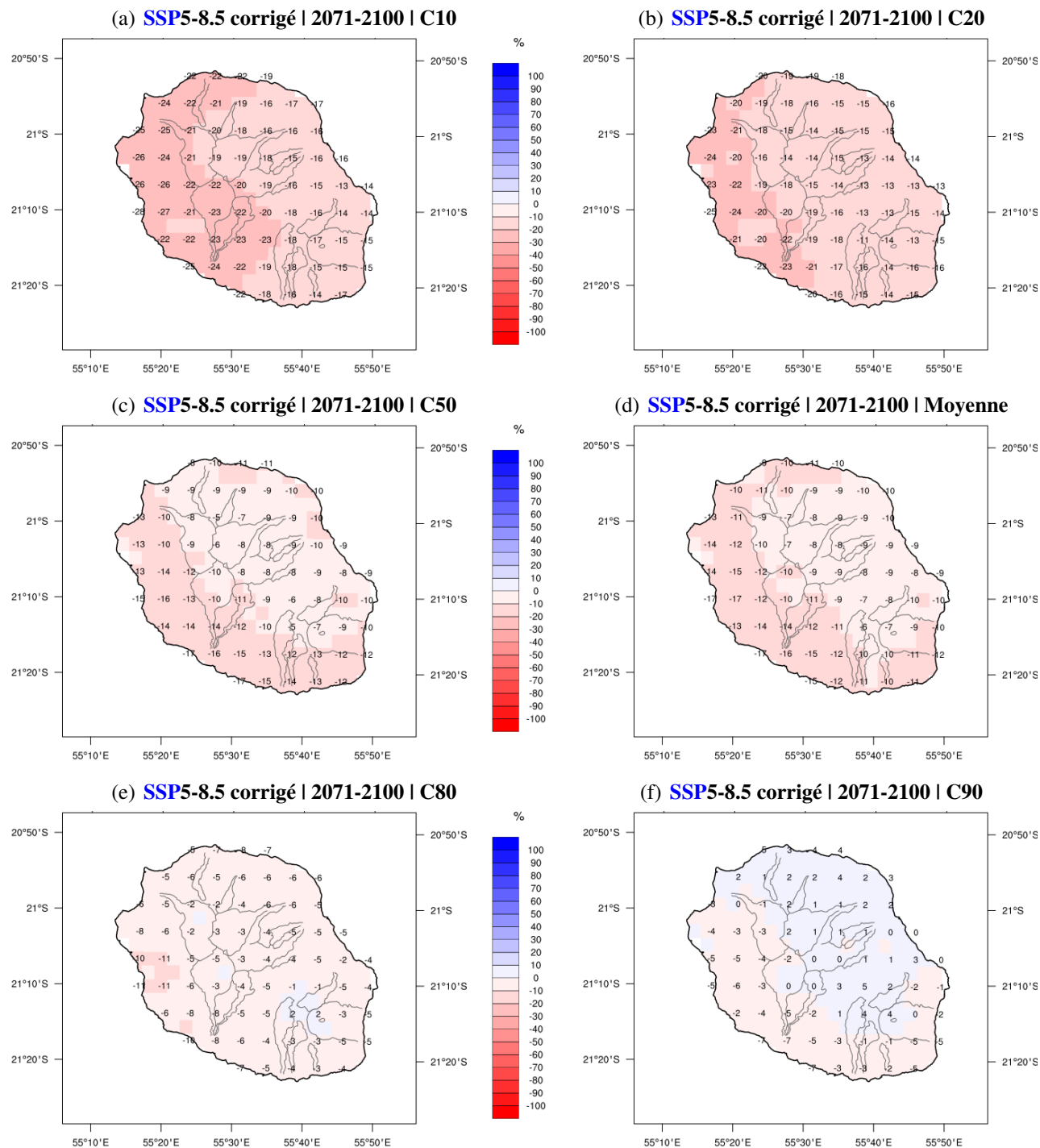


FIGURE 6.71 – Similaire à la figure 6.68 mais pour le scénario SSP5-8.5 en fin de siècle.

6.7.3 Descente d'échelle statistique pour la température

Pour les variables température minimale et température maximale, une correction de biais sans discrimination par secteur de vent a été privilégiée, à l'image des corrections de biais d'**ALADIN** sur les îles (section 5.2) mais appliquée ici directement aux simulations globales **CMIP6**. En effet, la variabilité de la température en fonction du régime de temps à La Réunion est faible (non illustré). Elle est bien moindre que celle des précipitations ou encore que celle de la température aux moyennes latitudes. La correction de biais par secteur de vent n'est donc pas utile. Nous retrouvons le résultat vu en section 6.6 : sur l'ensemble du bassin **ALADIN** se situe en milieu de panache des simulations **CMIP6** en terme de température, ce qui présente l'avantage de se baser sur un scénario médian (Fig. 6.64(c)). Les statistiques en figures 6.72, 6.73, 6.74, et 6.75 permettent de connaître l'incertitude associée au modèle de climat utilisé et peuvent être utilisées par des décideurs pour prendre en compte les évolutions possibles des températures moyennes sur l'île à divers horizons temporels en fonction du scénario d'émission de **GES**.

6.7. Prototype de descente d'échelle statistique sur La Réunion

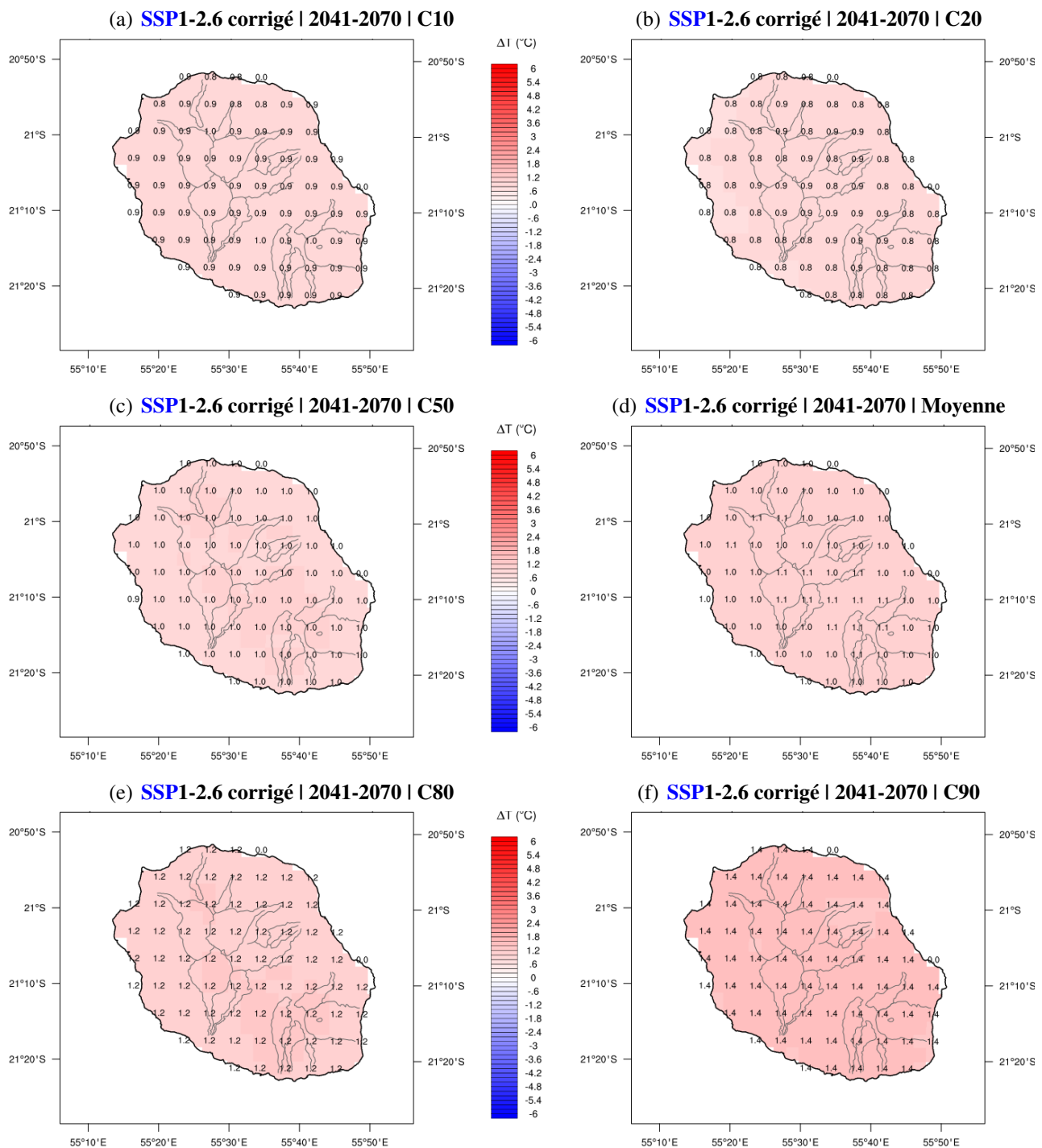


FIGURE 6.72 – Centiles des anomalies (en $^{\circ}\text{C}$ par rapport à la normale 1981-2010) de la température moyenne annuelle à +2 m sur La Réunion pour un ensemble de 22 modèles *CMIP6* pour le scénario *SSP1-2.6* en milieu de siècle, après descente d'échelle statistique.

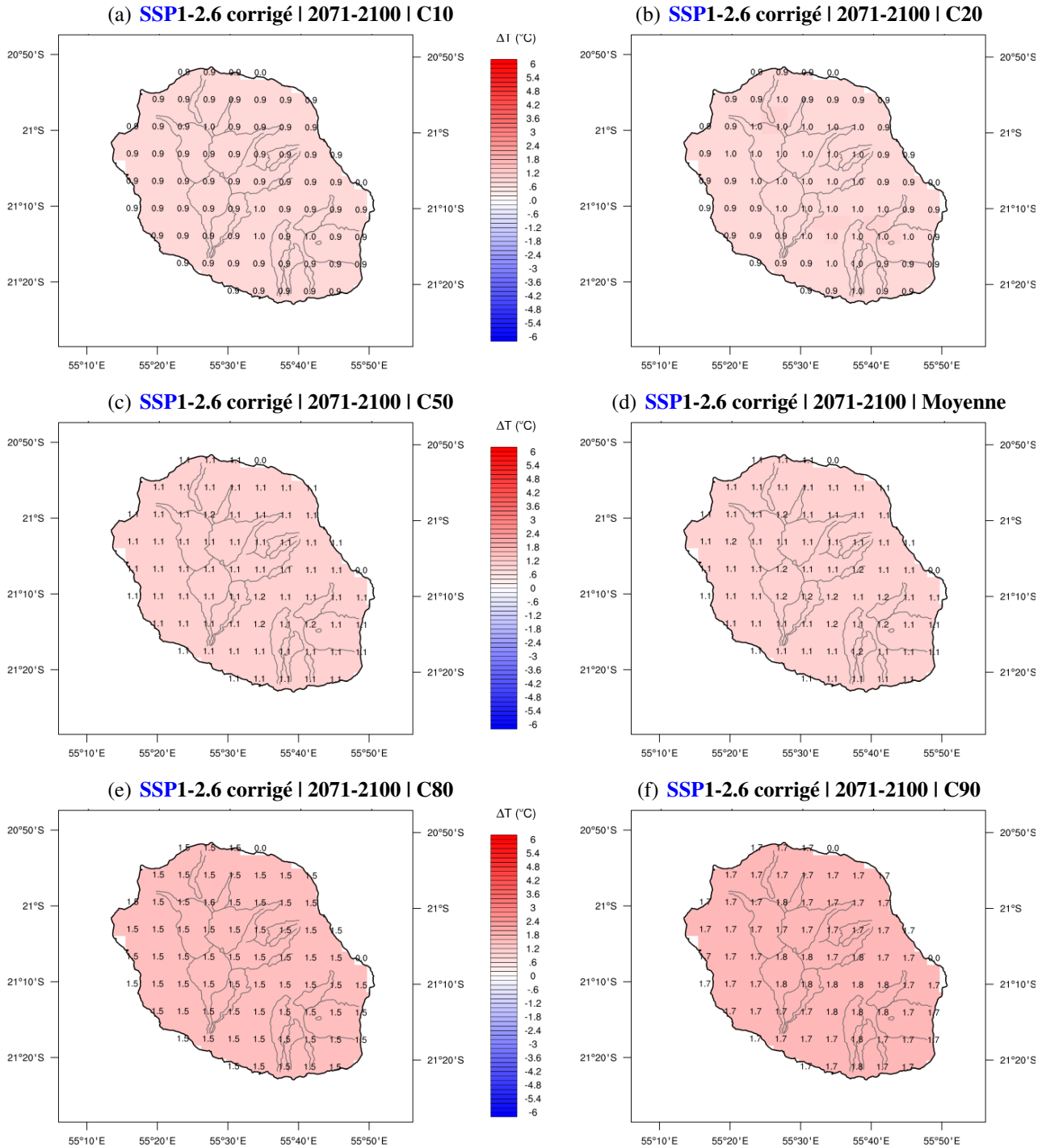


FIGURE 6.73 – Similaire à la figure 6.72 mais pour la fin de siècle.

6.7. Prototype de descente d'échelle statistique sur La Réunion

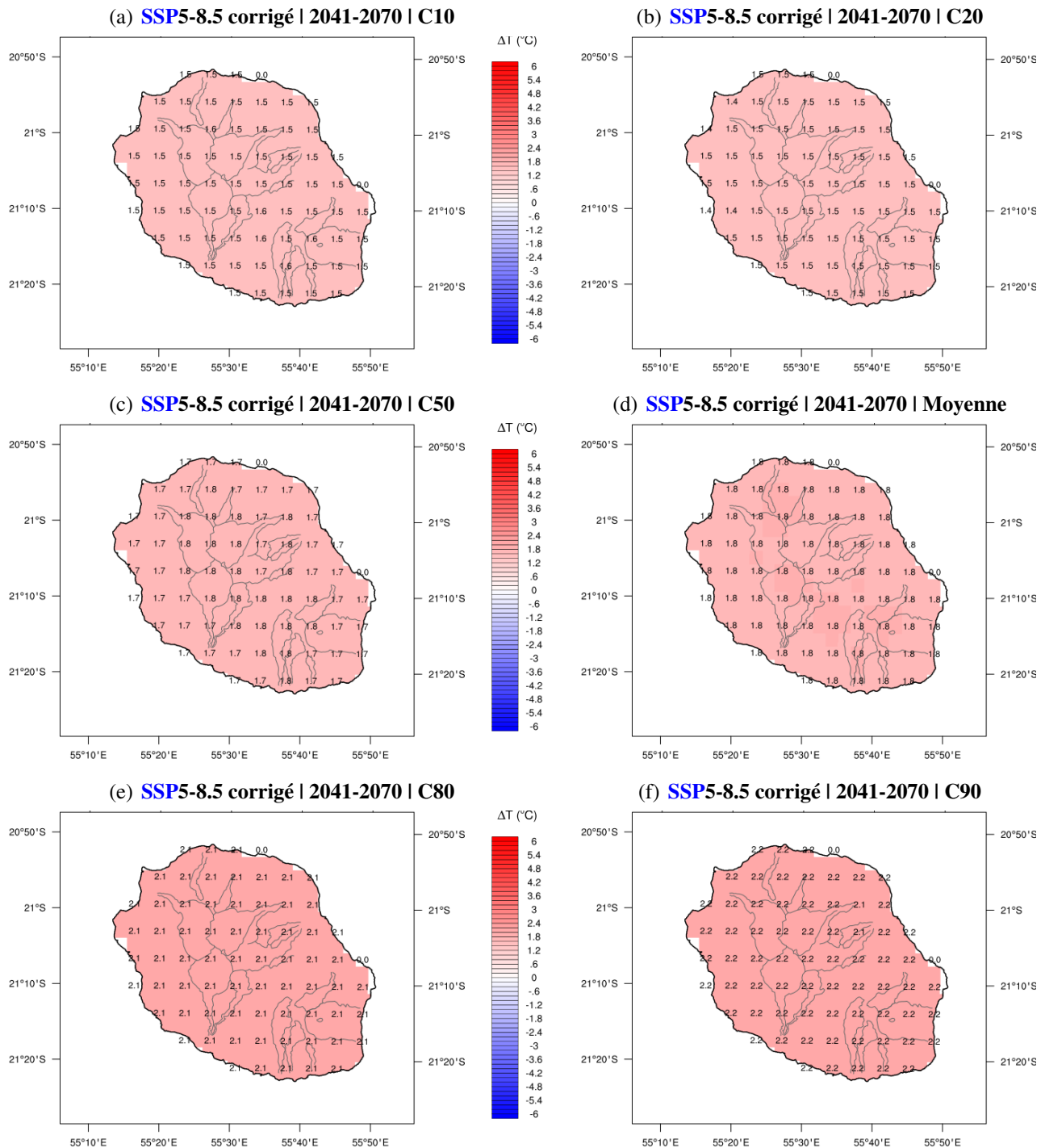


FIGURE 6.74 – Similaire à la figure 6.72 mais pour le scénario SSP5-8.5 en milieu de siècle.

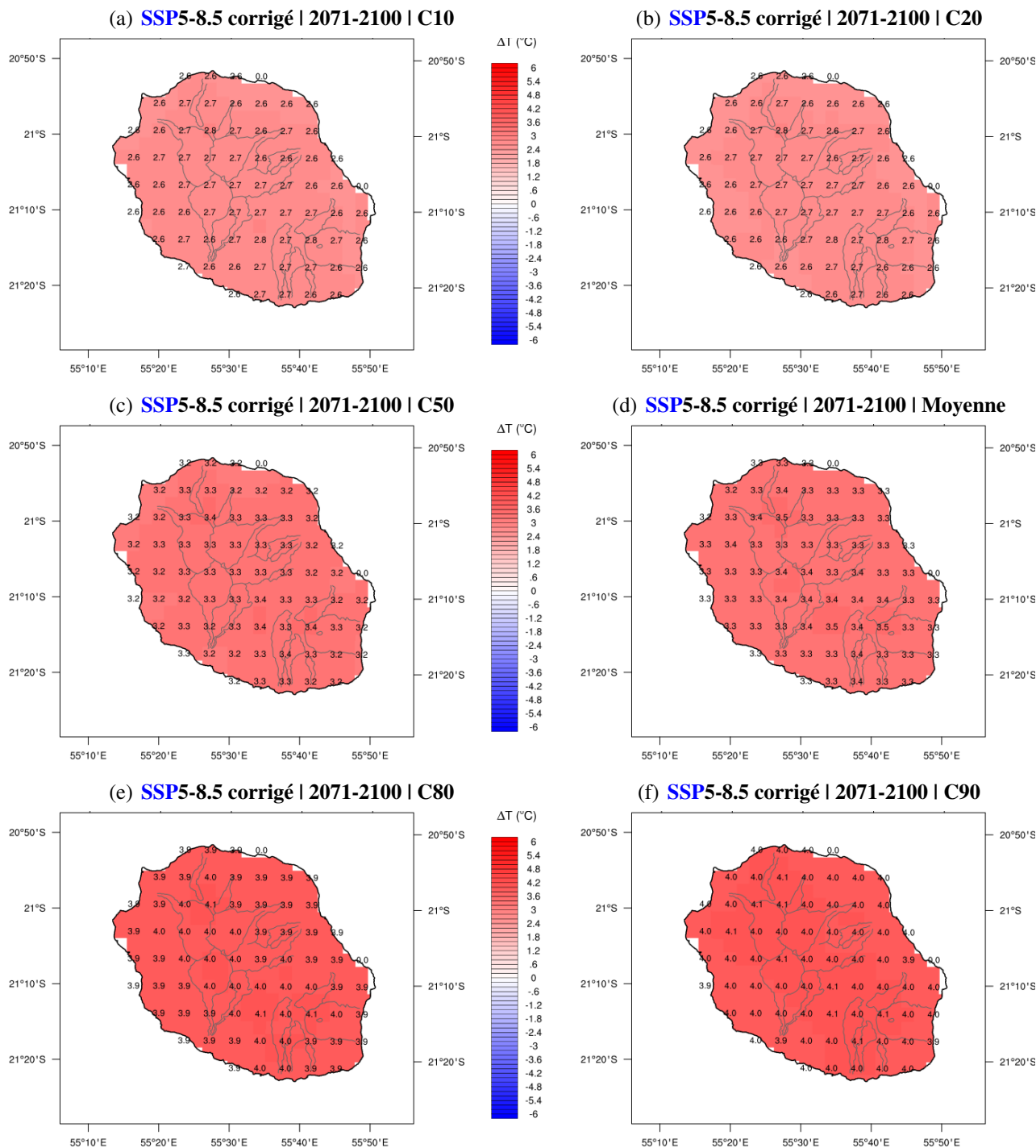


FIGURE 6.75 – Similaire à la figure 6.72 mais pour le scénario SSP5-8.5 en fin de siècle.

Chapitre 7

Communications, géoportail, utilisateurs et études d'impact

SOMMAIRE

7.1 CONFÉRENCES ET PUBLICATIONS	211
7.1.1 Communications dans des congrès internationaux	211
7.1.2 Articles scientifiques dans des revues internationales avec comité de lecture	211
7.1.3 Articles dans des revues sans comité de lecture	211
7.1.4 Rapports	212
7.1.5 Conférences de presse et séminaires	212
7.2 PORTAIL RÉGIONAL DU CHANGEMENT CLIMATIQUE	213
7.3 PROJETS ET UTILISATEURS DES DONNÉES BRIO	214
7.3.1 Utilisateurs des résultats du projet BRIO	214
7.3.2 Projets utilisant les données BRIO	216
7.4 ETUDE D'IMPACT POUR L'AGRICULTURE (CANNE À SUCRE)	216
7.4.1 Motivation	217
7.4.2 Définitions agronomiques	217
7.4.3 Indicateurs climatiques, hydriques et agronomiques - période historique	218
7.4.4 Indicateurs climatiques, hydriques et agronomiques - période future	220
7.4.5 Variabilité du nombre de jours de déficit hydrique annuel	223
7.4.6 Étude de cas sur deux bassins canniers	223
7.4.7 Conclusion et perspectives	223
7.5 ETUDE D'IMPACT POUR LA SANTÉ (VIRUS DE LA DENGUE)	226
7.5.1 Article MACATIA	227

CE chapitre est une vitrine du projet **BRIO**. Nous présenterons la valorisation des résultats qui a pu être donnée dans de multiples conférences et articles, le géoportail en libre d'accès, l'ensemble des utilisateurs intéressés par les données du projet **BRIO**, des exemples d'études d'impact du changement climatique sur une île comme La Réunion à partir des simulations **BRIO**. La haute résolution des données corrigées sur les îles constitue un avantage majeur pour la mise en place de services climatiques.

7.1 CONFÉRENCES ET PUBLICATIONS

Ci-dessous figure une liste des conférences, évènements et communications écrites dans lesquels les résultats du projet **BRIO** ont été (ou vont être) valorisés.

7.1.1 Communications dans des congrès internationaux

Les résultats scientifiques du projet ont été présentés dans diverses conférences internationales, par le biais d'abstracts courts, d'oraux ou de posters, ou encore d'abstracts étendus (mini-articles scientifiques).

- Juillet 2019, conférence Island Biology (**Leroux et Bonnardot 2019**), La Réunion.
- Avril 2021, conférence **EGU** (en ligne dû au contexte sanitaire covid19) - session « weather and climate services in developing countries » proposée par Philippe Roudier de l'**AFD** (**Leroux et al. 2021**).
- Mai 2021, 34th **AMS** Conference on Hurricanes and Tropical Meteorology, conférence en ligne dû au contexte sanitaire covid19 (**Kotomangazafy 2021**, **Ridhoine 2021**, **Veerabadren et al. 2021**).
- Mai 2022, 35th **AMS** Conference on Hurricanes and Tropical Meteorology (**Leroux et Bonnardot 2022**), Nouvelle Orléans (USA).

7.1.2 Articles scientifiques dans des revues internationales avec comité de lecture

Deux articles scientifiques sont en préparation pour publication dans des revues internationales avec comité de lecture répertoriées par l'**AERES** (**Kotomangazafy et al. 2022**, **Leroux et al. 2022**).

7.1.3 Articles dans des revues sans comité de lecture

Une consultante en communication recrutée pour le projet **BRIO** a réalisé en 2020 des interviews écrites et des vidéos des experts nationaux et du secrétaire de la **COI**. Ces articles sont en ligne sur le site de la **COI**, tout comme l'article de présentation du projet **BRIO** et le dossier de presse associé à la conférence de presse 2019 :

- <https://www.commissionoceanindien.org/aladin-avenir-seychelles-interview/>
- <https://www.commissionoceanindien.org/brio-interview-velayoudom-marimoutou/>
- <https://www.commissionoceanindien.org/aladin-sante-madagascar/>
- <https://www.commissionoceanindien.org/aladin-et-lagriculture-des-comores/>
- <https://www.commissionoceanindien.org/aladin-interview-marie-dominique-leroux/>
- <https://www.commissionoceanindien.org/portfolio-items/brio/?portfolioCats=27>
- <https://www.commissionoceanindien.org/brio-conference-presse/>

Les interviews écrites sont insérées en annexe (section **A.2**). Par ailleurs, deux articles ont été rédigés par Météo-France et l'**AFD** pour le média du développement durable **iD4D** :

- <https://ideas4development.org/en/climate-change-in-the-indian-ocean-more-accurate-simulation-models-for-better->
- <https://ideas4development.org/ideas4development-org-modeles-climatiques-ocean-indien/> en anglais
- <https://ideas4development.org/changement-climatique-en-marche-ocean-indien/>

Par ailleurs, les résultats du projet **BRIO** ont régulièrement fait la une (i) dans la presse écrite de La Réunion avec cinq articles du **JIR** parus entre 2019 et 2022 et (ii) dans les médias télévisés comme Antenne Réunion, notamment le jour de la conférence de presse **BRIO**.

7.1.4 Rapports

Outre ce présent rapport technique, précédé de sa version intermédiaire en mars 2020, chaque expert a rédigé un rapport national détaillant les résultats pour son territoire (Amélie 2021, Kotoman-gazafy et al. 2021, Ridhoine et al. 2021, Veerabadren 2021).

7.1.5 Conférences de presse et séminaires

Le projet BRIO et ses résultats ont également été présentés dans divers séminaires et trois conférences de presse :

- 9-11 avril 2019, La Réunion, Forum Régional des énergies durables (Région Réunion-COI).
- 17 septembre 2019, Paris, Conférence de presse sur les simulations CMIP6 françaises : présentation de 2 planches de résultats du projet BRIO par David Salas (Météo-France/CNRM/GMGEC).
- 18 septembre 2019, La Réunion, Conférence de presse AFD : présentation des activités de la Facilité Adapt'Action dans l'océan Indien par Alexandre Lauret (AFD); séance ouverte au grand public et aux médias locaux. Présentation par Météo-France du projet BRIO et des premiers résultats scientifiques.
- 14 novembre 2019, La Réunion, Plan Climat Air Energie Territorial (PCAET) de la Communauté Intercommunale Réunion Est (CIREST) : Présentation Météo-France.
- 11 février 2020, La Réunion, Schéma Directeur d'Aménagement et de Gestion des Eaux (SDAGE) de la DEAL : Présentation Météo-France.
- 17 février 2020, La Réunion, Conférence de presse du projet BRIO : Présentations par Météo-France et les experts de chaque pays partenaire.
- 18 février 2020, La Réunion, Séminaire sur les impacts du changement climatique pour la défense et la sécurité : animation par Météo-France de la première table ronde et présentation du projet BRIO.
- 19 février 2020, La Réunion, Plateau de l'émission RTL "on refait la Réunion" (30 min) : interviews de Météo-France et Marc Dubernet, Directeur régional (AFD).
- 25 février 2020, La Réunion, PCAET de la Communauté Intercommunale du nord de La Réunion (CINOR) : Présentation Météo-France.
- 10 décembre 2020, La Réunion, Webinaire Runeo "Lutte contre le dérèglement climatique : dans le domaine de l'eau, quelles solutions à La Réunion pour faire face à l'urgence et s'adapter?" : Présentation Météo-France, disponible en replay sur <https://youtu.be/5JPYIacDcDo>.
- 17 décembre 2020, La Réunion, Comité Technique Risques de la DEAL : Présentation Météo-France.
- 13-14 janvier 2022, Symposium "sécurité environnementale des espaces maritimes de la COI" : Présentation Météo-France.
- 28 juin 2022, 2ème workshop sur les services et données climatiques de l'OCDE au sein du réseau PCCB de la Convention-cadre des Nations unies sur les changements climatiques (CC-NUCC) : "Capacity Development for Climate Action and Ambition" : Présentation Météo-France.
- 12 juillet 2022, comité de suivi du programme AdaptAction : Présentation Météo-France.

7.2 PORTAIL RÉGIONAL DU CHANGEMENT CLIMATIQUE

Rappelons l'un des objectifs du projet **BRIO** : donner accès aux scénarios climatiques régionalisés du **SOOI** pour l'impact et l'adaptation de nos sociétés et environnements. Un géoportail a donc vu le jour. Ce service permet aux utilisateurs de visualiser des projections et scénarios climatiques régionalisés sur le bassin **SOOI** et ses états insulaires, et de télécharger des données ciblées. En France, une volonté similaire a conduit les climatologues à proposer le portail internet **DRIAS**. Le portail régional du changement climatique est disponible à l'adresse suivante : <http://climat.coi-ioc.org>.

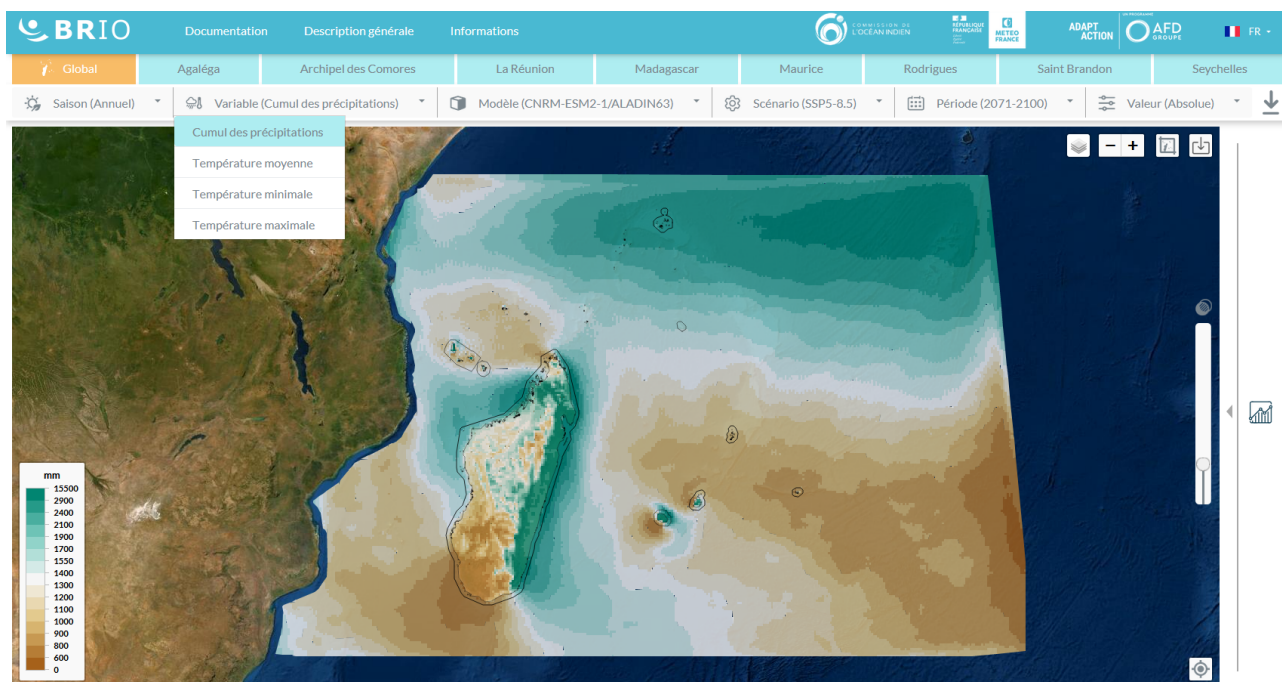


FIGURE 7.1 – Illustration de la page de couverture du portail régional du changement climatique. Vue générale de la région dans le cas des options suivantes (moyenne annuelle, précipitations, scénario **SSP5-8.5**, couple de modèles **CNRM-ESM2-1/ALADIN63**, période future 2071-2100, valeur absolue). L'icône sur la droite permet de visualiser le cycle saisonnier et les tendances temporelles.

Le menu général est organisé en deux niveaux (Fig. 7.1) :

- Choix de la région globale ou d'un territoire (ce choix est réalisé par les onglets du menu supérieur ou de manière interactive sur la carte).
- Choix des paramètres de visualisation (valeur annuelle ou saisonnière, variable, modèle, scénario, période et valeur absolue/anomalie). La palette s'adapte automatiquement au choix réalisé par l'utilisateur.

Une fois un pays choisi ou un point sélectionné sur la carte du menu principal, on bascule sur un affichage de l'île concernée en pixels ou en points de stations. Sur les îles où des corrections en points de grille ont été réalisées, les cartes sont affichées en pixels ou en zones climatiques (au choix). Sur les autres (ex : Comores, Fig. 7.2), les données sont affichées en points de stations. Les cartes sont interactives de telle manière que les informations de chaque station ou pixel sont affichées lorsque le curseur est placé au-dessus. De même, en cliquant sur un point donné, les informations sur le cycle saisonnier et les tendances sont affichées sur la droite. Un lissage sur 10 années glissantes est superposé pour atténuer la variabilité interannuelle. Chacun des graphes peut être exporté au format pdf, tif ou png. Les données climatiques sont également téléchargeables au pas de temps journalier au format netcdf ou csv, sur le bassin (données brutes **ALADIN** non corrigées à 12 km de résolution) ou

sur les îles partenaires (données [ALADIN](#) corrigées à la résolution du réseau d'observations de l'île concernée).

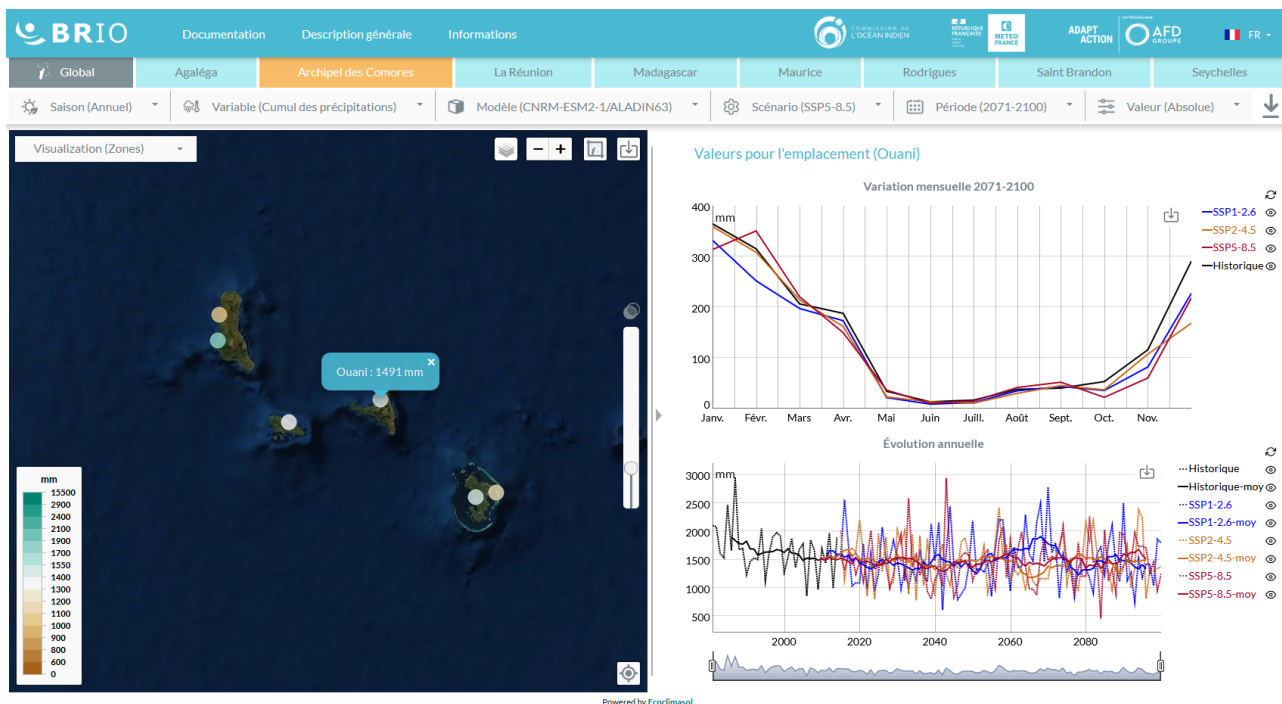


FIGURE 7.2 – Illustration du portail régional du changement climatique. (Volet de gauche) vue en points de stations sur l'archipel des Comores; (volet de droite) visualisation pour 3 scénarios *SSP* et le couple de modèles *CNRM-ESM2-1/ALADIN63* sur la station choisie de Ouani : (en haut) cycle saisonnier sur la période 2071-2100 et (en bas) évolution annuelle des précipitations sur la période 1981-2010 avec superposition de la moyenne glissante sur 10 ans (courbes "-moy").

7.3 PROJETS ET UTILISATEURS DES DONNÉES BRIO

7.3.1 Utilisateurs des résultats du projet BRIO

Voici la liste des acteurs intéressés par des services climatiques dans la zone et pour qui les résultats du projet [BRIO](#) ont été présentés :

- Des projets régionaux (appel d'offres Biodiversa) et locaux (appel d'offres Life) pour répondre aux problématiques de conservation de la biodiversité (alti-montain, habitats de petite altitude, espèces invasives, etc.), avec d'autres acteurs comme l'[ONF](#), le Parc National de la Réunion, la [DEAL](#), la [DAAF](#), le Conservatoire des Mascariens, le [CIRAD](#) et le laboratoire [PVBMT](#).
- Le conseil scientifique du Parc National de la Réunion pour les impacts du changement climatique ([CC](#)) sur l'espace réunionnais inscrit dans la liste du patrimoine mondial de l'[UNESCO](#).
- L'Office International de l'Eau pour le projet LIFE Eau & Climat visant à aider les acteurs locaux à améliorer leurs connaissances et à les mobiliser face à l'adaptation au [CC](#) dans la gestion des ressources en eau.
- L'[ADEME](#) dans le cadre de son organisation sur l'adaptation au changement climatique.
- Les communautés intercommunales [CINOR](#), [CIREST](#) et [CASUD](#) pour leur [PCAET](#).
- L'observatoire Défense et Climat coordonné par l'[IRIS](#) et la [DGRIS](#) pour l'impact des [CC](#) dans l'océan Indien et la sécurité environnementale des espaces maritimes de la [COI](#).

- L'unité mixte de recherche (UMR) SELMET du CIRAD pour le risque climatique sur (a) la disponibilité en fourrages sur l'île de la Réunion et (b) les systèmes d'élevage de ruminants de la zone sud-ouest de l'océan Indien.
- La DEAL - service Risques Naturels et Routiers pour son Comité Techniques Risques.
- La DEAL - service Eau et Biodiversité pour son SDAGE.
- Le Haut Conseil du Climat (HCC pour son rapport annuel 2021 intitulé "Renforcer l'atténuation, engager l'adaptation" (voir p.128 : "Evolution des paramètres hydro climatiques sur l'île de La Réunion").
- ARTELIA, Grand port maritime de la Réunion pour l'impact du CC sur les niveaux marins, la houle et d'autres paramètres.
- EnviroBAT-Réunion animé par la CAUE pour l'intégration des résultats du projet BRIO dans leur formation "gestion des risques et règles de construction".
- STORMGEO, société privée de prévisions météorologiques basée en Norvège, pour une étude de probabilité de tempête tropicale autour du site d'un de leurs clients de l'industrie pétrolière dans le canal du Mozambique (plan de réponse et mitigation du risque cyclonique).
- L'UMR LACy (Université Réunion) pour une étude faite par des économistes sur l'estimation du coût futur des cyclones autour de La Réunion.
- Le Groupe Huit et SUEZ pour l'appui à l'élaboration du schéma d'aménagement territorial de Mohéli, Comores (projections climatiques et risque cyclonique).
- Utilisation des résultats du projet pour la rédaction d'un chapitre de la "troisième communication nationale sur le changement climatique" (CCNUCC) aux Comores.
- Le CIRAD pour l'évolution future du climat à Mayotte.
- Le bureau d'études BRL mandaté par l'Assemblée Régionale de Rodrigues (ARR) pour caractériser l'impact du CC sur les précipitations et la température à Rodrigues (étude intitulée "Consultancy services for the development of Rodrigues water resources strategy and the definition of priority action plan").
- Le secteur agricole de la canne à sucre à Maurice (MCIA,AREU).
- La société AETS (spécialisée dans la mise en œuvre de politiques publiques) et la compagnie Cibola Partners (spécialisée dans le financement climatique) pour l'appui à la révision de la CDN de Maurice (projections climatiques de Rodrigues et Maurice).
- Le Groupe SUEZ pour l'appui à l'élaboration du schéma d'aménagement territorial de Maurice ("Land Drainage Master Plan") à partir des projections climatiques sur l'île Maurice.
- La CWA et la WRU à Maurice pour la gestion des ressources en eau.
- Le NDRRMC à Maurice pour la réduction et gestion des risques de catastrophes.
- La CPGU à Madagascar pour l'élaboration et la mise à jour de la stratégie nationale de réduction des risques et de catastrophes.
- Les groupes Best et Egis pour une étude de faisabilité du projet "Talaky Be" à Madagascar (agriculture adaptée et conservation forestière).
- La Direction Générale de l'Agriculture à Madagascar pour la conception, l'orientation et la planification de la politique du Ministère dans le domaine de la production végétale et sa transformation.
- Le Centre National de Recherches Appliquée au Développement Rural de Madagascar (FOFIFA/CENRADERU) pour la mise en œuvre de la politique nationale de recherche en matière de production agricole.
- Le programme alimentaire mondial (PAM) de l'ONU pour la mise en place du système "Forecast-based Financing" à Madagascar pour la prévention, la gestion et la réduction des effets néfastes des risques climatiques.

- L'agence de coopération allemande GIZ pour son projet "Adaptation des chaînes de valeur agricoles au changement climatique" (PrAda) visant à améliorer la précision des services climatologiques pour le secteur agricole à Madagascar.
- Le projet Eaurizon visant à renforcer les compétences des collectivités de la région Haute Matsiatra (Madagascar) sur le secteur de l'eau, de l'assainissement et de l'hygiène.
- Le projet MAP InsuResilience pour le renforcement de la résilience climatique à Madagascar par la mise en œuvre efficace de mécanismes de financement et d'assurance des risques climatiques et de catastrophes.
- Le projet AD2M pour le renforcement des capacités de résilience des producteurs face aux changements climatiques à Madagascar.

7.3.2 Projets utilisant les données BRIO

La liste ci-dessous énumère les projets ayant directement utilisé les données du projet à partir des fichiers au format netcdf, fichiers débiaisés sur le pays d'intérêt, ou fichiers bruts dans le cas du Mozambique (pas de correction de biais disponible) :

- Le laboratoire [LE2P](#) (Université Réunion) pour son projet Interreg "SWIO-Energy" sur le potentiel d'énergie solaire.
- L'[UMR LACy](#) (Université Réunion) pour son projet [MACATIA](#) sur la quantification du risque climatique lié à la dengue à La Réunion (voir l'étude d'impact réalisée en section 7.5).
- Tereos pour la ressource en eau et la culture de la canne à sucre dans le contexte du [CC](#) (voir l'étude d'impact réalisée pour Tereos en section 7.4).
- Le laboratoire [PIMENT](#) (Université Réunion) pour l'impact du changement climatique sur l'efficacité énergétique des bâtiments en climat tropical.
- L'[UMR PVBMT](#) du [CIRAD](#) et de l'Université de La Réunion pour son projet de biosécurité "OUSNEXT" (création d'un outil de surveillance des nouvelles espèces exotiques dans le contexte du changement climatique).
- Le bureau d'études [BRLI](#) pour l'évaluation de la ressource en eau de surface sur l'ouest de La Réunion.
- L'[IRD](#) pour un projet sur la préservation de la biodiversité (adaptation des plantes aux changements climatiques, notamment à une espèce forestière endémique de la Réunion, *coffea mauritiana*).
- Le bureau d'études [BRLI](#) mandaté par la [DEAL976](#) pour la mise à jour du Plan de Gestion du Risque Inondation 2021-2025 (projections climatiques de températures et précipitations sur le territoire de Mayotte).
- L'[ONG](#) française NITIDAE pour leurs projets de recherche (i) agriculture sur le Mozambique et (ii) vulnérabilité climatique de la biodiversité à Madagascar (projections climatiques moyennes et évènements extrêmes).

Les deux listes précédentes sont non exhaustives et un tableur plus complet, qui recense l'ensemble des demandes et réponses apportées aux potentiels utilisateurs de données du projet, est disponible.

7.4 ETUDE D'IMPACT POUR L'AGRICULTURE (CANNE À SUCRE)

7.4.1 Motivation

Cette section est le fruit d'un travail initié en 2021 avec le **CIRAD** et le groupe agro-industriel français Tereos en vue de développer des services agro-climatiques. Le travail a débuté lors du stage de Master d'Auriane Bérard, encadré à Météo-France (**DIROI**). Tereos souhaite anticiper les changements climatiques futurs et leurs impacts sur la ressource en eau et sur la culture de la canne à sucre et son futur potentiel de rendement.

Pour La Réunion, nous bénéficions de jeux de données de référence sur une grille régulière à 3 km de résolution pour les températures minimale et maximale, les humidités minimale et maximale, le rayonnement global, les précipitations, et la force du vent moyen à dix mètres. Les projections climatiques de ces variables par **ALADIN** sur la période 1981-2010 ont été utilisées en entrée d'un modèle de bilan hydrique qui permet le suivi des ressources en eau des sols. Ce modèle a été paramétré pour la canne à sucre.

7.4.2 Définitions agronomiques

Voici les principales caractéristiques agronomiques de la canne à sucre : la plante supporte mal les températures trop fraîches, qui nuisent à sa croissance. Sa culture se concentre ainsi sur les franges littorales de l'île à moins de 800 mètres d'altitude. Ses importants besoins en eau sont assurés par les pluies importantes à l'est de l'île, et par l'irrigation, principalement par aspersion, sur les côtes ouest et sud-ouest. Durant son cycle annuel, la canne à sucre entre dans sa plus forte croissance lors de la période chaude et humide, de janvier à mars (**JFM**). Un déficit hydrique subi durant cette période aura donc des effets très délétères sur le rendement final de la récolte. En condition de déficit hydrique, la canne à sucre limite l'ouverture stomatique pour réduire sa consommation d'eau pour la transpiration, ce qui a pour effet de réduire la quantité de biomasse produite.

Les réserves en eau capillaire utilisables par la plante constituent ce que l'on appelle la réserve utile (**RU**) du sol. Classiquement, la réserve utile est divisée en deux réservoirs fictifs (Fig. 7.3). La réserve facilement utilisable (**RFU**) désigne le niveau de remplissage de la réserve utile pour lequel la plante puise facilement l'eau. En deçà de l'humidité dite critique, la plante entre en déficit hydrique et puise l'eau dans la réserve difficilement utilisable (**RDU**). La définition de la **RU** exclut l'eau du sol en excès dans la macroporosité lorsque toute la porosité du sol est saturée d'eau, qui percole sous l'effet de la gravité. Le flux de drainage n'est donc pas représenté. La gestion du ruissellement est faite en seillant le niveau de remplissage du réservoir à sa valeur maximale. La distinction de ces deux réservoirs fictifs permet de mettre en œuvre un **modèle de bilan hydrique à double réservoir**. A partir du travail effectué par le **CIRAD** sur les sols réunionnais, il a été choisi de prendre les valeurs de 60 mm pour la **RFU** et 20 mm pour la **RDU** (soit un total de 80 mm pour la **RU**) sur toute la Réunion. Dans le modèle choisi, la **RDU** est remplie en priorité par rapport à la **RFU**.

La quantité d'eau que le couvert végétal pourrait utiliser compte tenu des conditions climatiques (ensoleillement, température, humidité de l'air, vitesse du vent) est appelée EvapoTranspiration Potentielle (**ETP**). L'estimation du flux d'évapotranspiration repose sur l'approche basée sur les coefficients culturaux développée par la **FAO** (**Allen et al. 1998**). L'**évapotranspiration de référence** (ET_0) représente les besoins en eau maximaux d'un couvert de référence dont toutes les caractéristiques sont définies au préalable : il s'agit d'un gazon ras placé en conditions hydriques optimales. Les sources de variations de l' ET_0 ne sont que climatiques (rayonnement, température et humidité de l'air, vitesse du vent). Le coefficient cultural K_c permet de tenir compte des différences de propriétés entre couvert étudié et couvert de référence : surface foliaire, hauteur, densité stomatique. Les valeurs choisies pour la canne à sucre sont $K_c = 1,2$ pour la période de décembre à avril ; $K_c = 0,8$

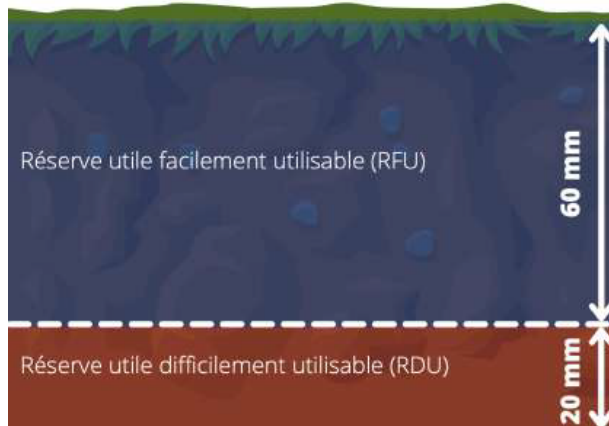


FIGURE 7.3 – Représentation schématique de la partie superficielle du sol et des deux réservoirs fictifs *RFU* et *RDU*. Source : *Bérard (2021)*.

pour les mois d'avril et de novembre et $K_c = 0,6$ pour les mois de mai à octobre. On calcule ainsi l'**évapotranspiration maximale (ETM) du couvert végétal** étudié : $ETM = ET_0 * K_c$.

La régulation stomatique débute lorsque la RFU est consommée entièrement ($RFU = 0$), c'est-à-dire lorsque débute le déficit hydrique. L'**ETM** est alors multipliée par un coefficient de stress hydrique (K_s) pour obtenir l'**évapotranspiration réelle (ETR)** du couvert : $ETR = ETM * K_s$ avec $K_s = RU/RDU$ lorsque $RFU = 0$.

L'équation du bilan hydrique est finalement la suivante :

$$RU_j = RU_{j-1} + P_j - ETR_j \quad (7.1)$$

avec RU_j le stock d'eau du jour j , P_j le cumul de pluie quotidien du jour j et $ETR_j = K_c * K_s * ET_{0j}$; $K_s = 1$ sans stress hydrique ($RFU > 0$) ou $K_s = RU/RDU < 1$ lorsque $RFU = 0$.

7.4.3 Indicateurs climatiques, hydriques et agronomiques - période historique

Examinons l'évapotranspiration de référence (ET_0) sur la période historique 1981-2010. Rappelons qu'elle caractérise la demande climatique de la couche de l'atmosphère située immédiatement au-dessus d'un gazon ras placé en conditions hydriques optimales. Cette demande augmente avec le réchauffement et l'assèchement de l'atmosphère. Sur la période de référence, l' ET_0 en moyenne quotidienne est plus marquée sur les parties littorales de l'île; elle y dépasse les 4 mm/j du fait de la température et du rayonnement qui y sont plus élevés (Fig. 7.4(a)). Dans les Hauts et au centre de l'île, l' ET_0 vaut environ 3 mm/j (Fig. 7.4(a)).

L'évolution des précipitations et de la demande climatique (ET_0) pilote les évolutions du niveau de remplissage du réservoir utile (Fig. 7.4(b)). Sur la période historique, les pluies abondantes de l'Est assurent un bon niveau de remplissage du réservoir utile (supérieur à 90%). A l'ouest, il varie de 25% sur le littoral à 55% dans les hauts. La signature du relief est bien visible, marquant le contraste entre les parties au vent et sous le vent de l'île.

Le niveau de remplissage du réservoir utile impacte directement la capacité évaporative de la surface. Le flux d'évapotranspiration réelle **ETR** se trouve réduit lorsque la **RFU** est entièrement consommée (Fig. 7.4(c)). Sur la période historique, l'**ETR** est maximale sur les parties littorales est et sud, avoisinant les 2.5 mm/j. Au centre de l'île, l'**ETR** vaut environ 2 mm/j. Les valeurs les plus faibles, entre 1 mm/j et 1.5 mm/j, se trouvent sur la partie ouest de l'île, du fait du niveau de remplissage bas du réservoir utile (Fig. 7.4(c)).

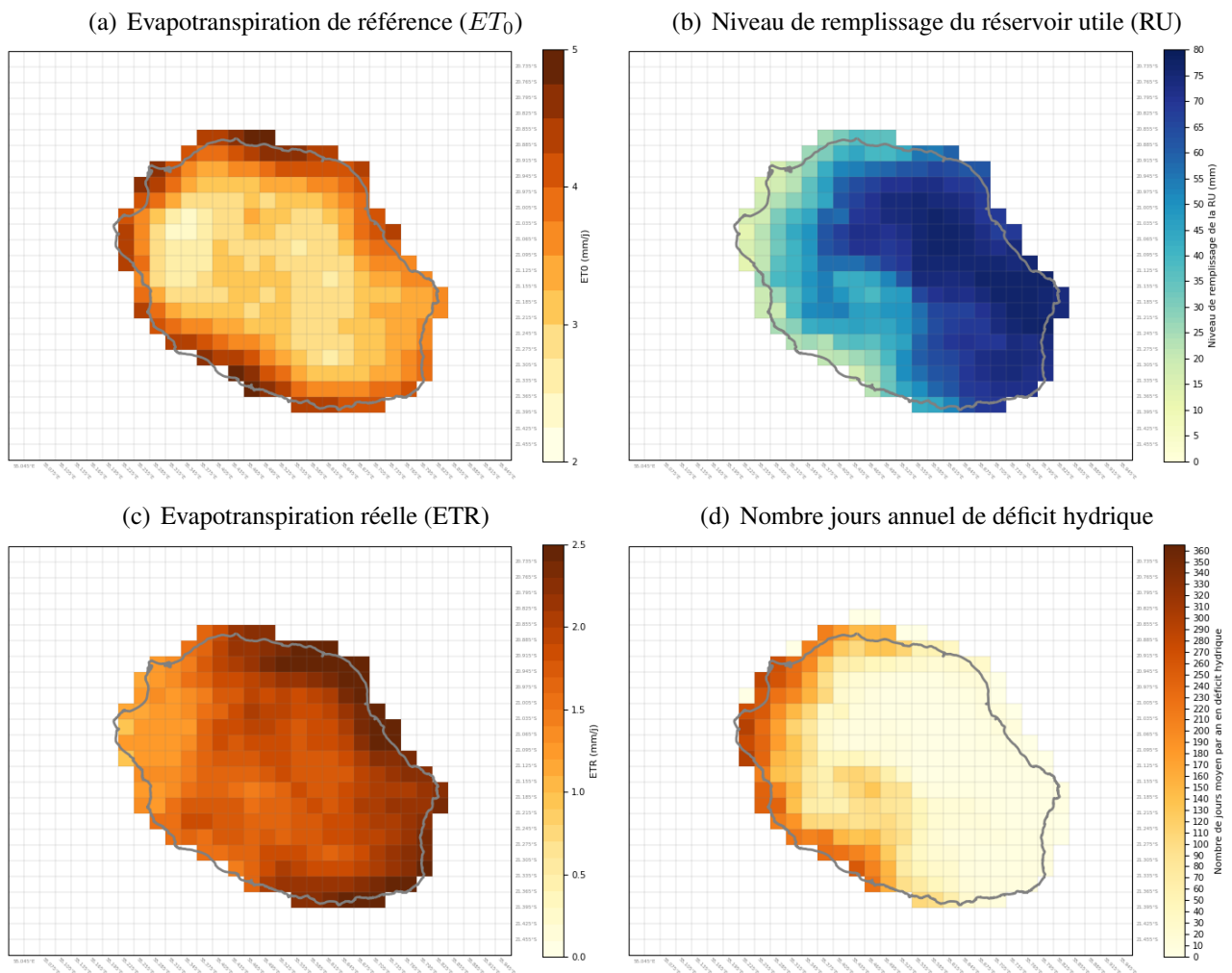


FIGURE 7.4 – Valeurs moyennes sur la période historique 1981-2010 (a) de l'évapotranspiration potentielle quotidienne ET_0 (mm/jour), (b) du niveau de remplissage quotidien du réservoir utile RU (mm/jour), (c) de l'évapotranspiration réelle quotidienne ETR (mm/jour), et (d) du nombre moyen annuel de jours de déficit hydrique sur La Réunion selon le modèle ALADIN, après correction des biais. Source : **Bérard (2021)**.

7.4.4 Indicateurs climatiques, hydriques et agronomiques - période future

Dans le scénario **SSP1-2.6**, l' ET_0 augmente en milieu de siècle de 5% (Fig. 7.5(a)) et se stabilise ensuite pour avoisiner en fin de siècle 3,5 mm/j au centre de l'île et très localement 4,5 mm/j sur la côte (Fig. 7.5(b)). Le scénario **SSP5-8.5** prévoit une hausse de l' ET_0 de 10% (milieu de siècle, Fig. 7.5(c)) à 15% (fin de siècle, Fig. 7.5(d)) sur une large partie de l'île. Cela représente un ET_0 à 5 mm/j sur une large partie littorale de l'île, contre 4 mm/j sur la période historique. Une telle variation représente une augmentation de la consommation d'eau par la culture de $100m^3$ sur un hectare pendant 10 jours.

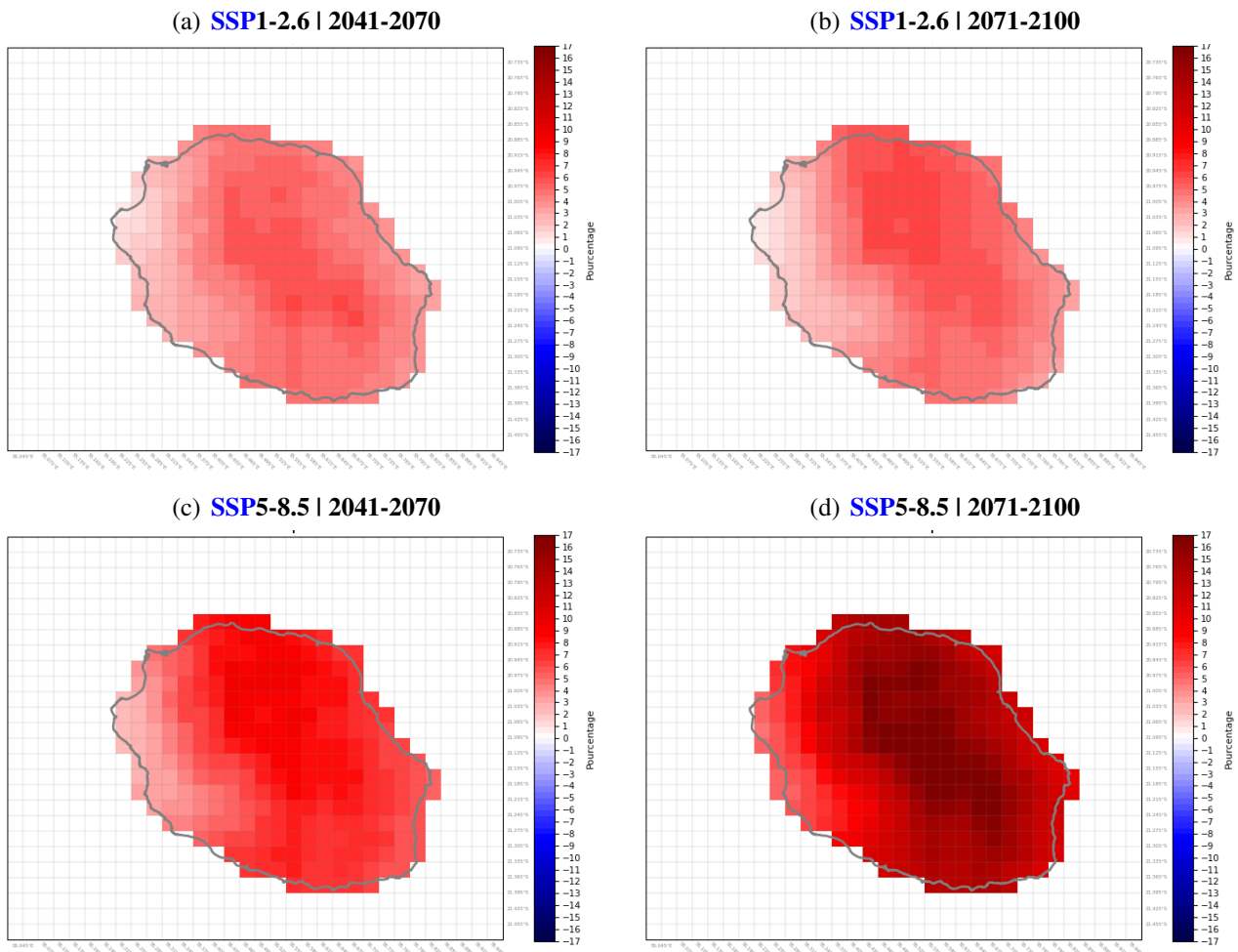


FIGURE 7.5 – Anomalies d'évapotranspiration potentielle quotidienne ET_0 (en % par rapport à la moyenne sur la période 1981-2010) sur La Réunion en milieu (gauche) et fin (droite) de siècle pour les scénarios **SSP1-2.6** (haut), **SSP2-4.5** (milieu), et **SSP5-8.5** (bas). Source : *Bérard (2021)*.

En climat futur, en lien avec une baisse des précipitations (section 6.4) et une augmentation de la demande évaporative de l'atmosphère (Fig. 7.5), les réserves en eau des sols diminuent. Une baisse entre 15 et 20% est attendue dans le scénario **SSP1-2.6** (Figs. 7.6(a), 7.6(b)) sur une large partie ouest de l'île, et atteint 25 à 30% dans le scénario le plus pessimiste en fin de siècle (Fig. 7.6(f)).

Sous l'effet du changement climatique, les évolutions de l'évapotranspiration réelle **ETR** de la canne à sucre se trouvent très contrastées sur la Réunion. A l'ouest, les faibles pluies additionnées à la forte demande évaporative assèchent les sols au point d'entraîner une réduction du flux d'évapotranspiration d'environ 15% dans les trois scénarios (Fig. 7.7). À l'Est, les quantités de précipitations permettent de répondre à l'augmentation de la demande évaporative : l'ETR augmente de 5% en **SSP1-2.6** (Figs. 7.7(a), 7.7(b)) et jusqu'à 15% en fin de siècle dans le scénario **SSP5-8.5** (Fig. 7.7(f)).

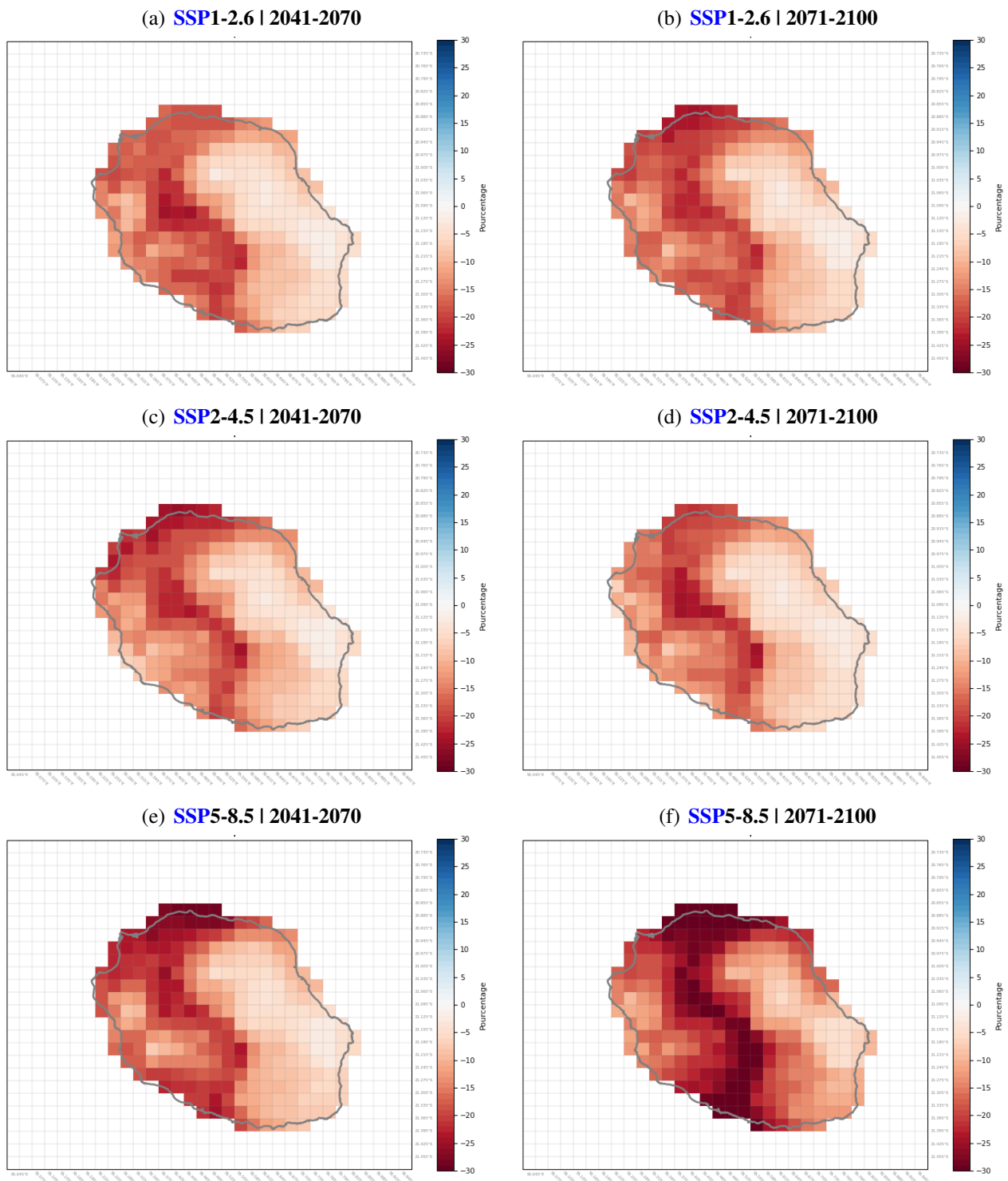


FIGURE 7.6 – Anomalies du niveau de remplissage quotidien du réservoir utile *RU* (en % par rapport à la moyenne sur la période 1981-2010) sur La Réunion en milieu (gauche) et fin (droite) de siècle pour les scénarios *SSP1-2.6* (haut), *SSP2-4.5* (milieu), et *SSP5-8.5* (bas). Source : *Bérard (2021)*.

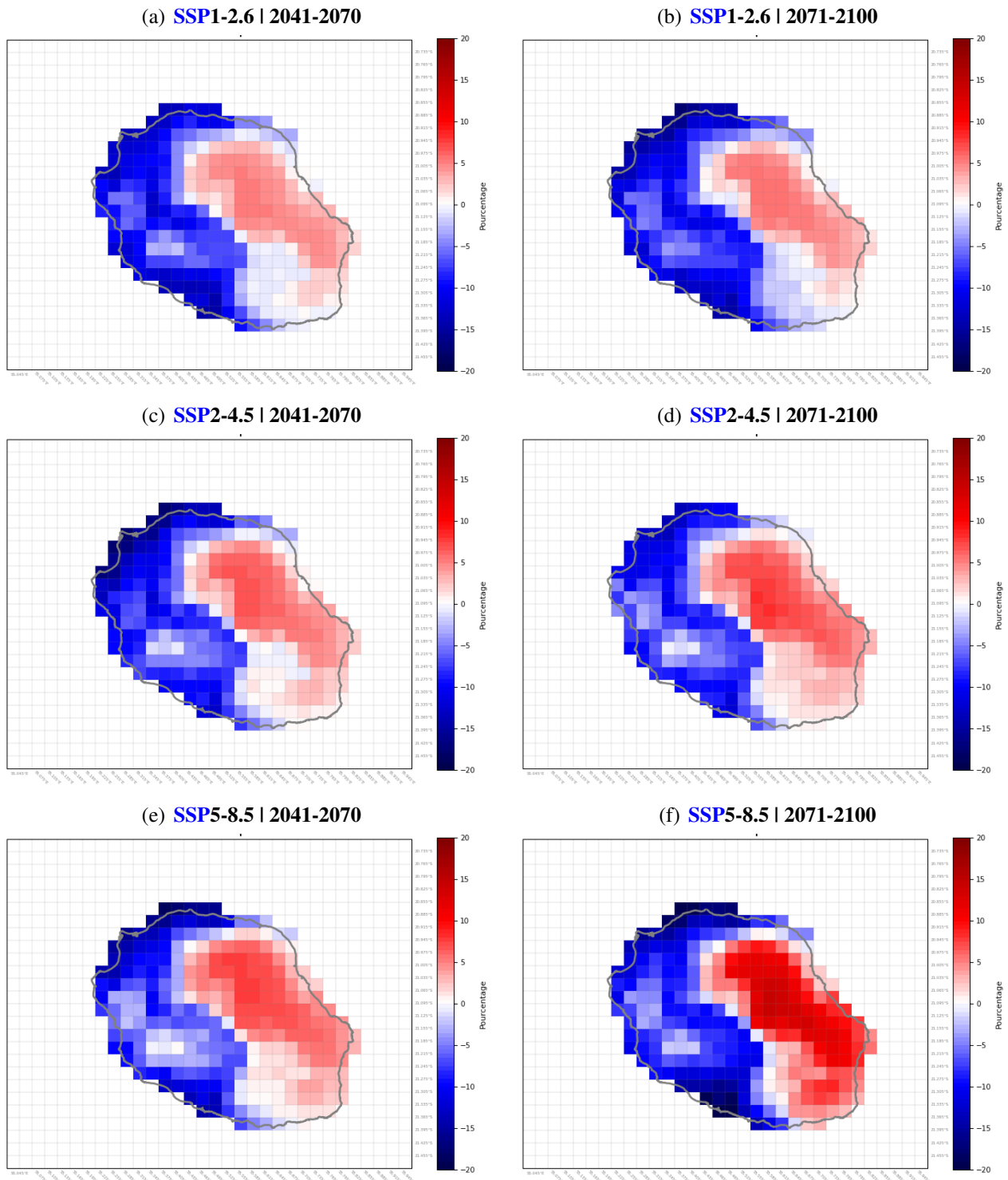


FIGURE 7.7 – Anomalies d'évapotranspiration réelle quotidienne *ETR* de la canne à sucre (en % par rapport à la moyenne sur la période 1981-2010) sur La Réunion en milieu (gauche) et fin (droite) de siècle pour les scénarios *SSP1-2.6* (haut), *SSP2-4.5* (milieu), et *SSP5-8.5* (bas). Source : *Bérard (2021)*.

7.4.5 Variabilité du nombre de jours de déficit hydrique annuel

Les résultats en moyenne sur des périodes de 30 ans ne constituent qu'une première approche pour appréhender les tendances futures du changement climatique. Une étude de la variabilité temporelle d'un paramètre hydrique sur les deux horizons 2041-2070 et 2071-2100 constitue une approche intéressante pour les applications agronomiques. On calcule pour cela le nombre annuel moyen de jours en déficit hydrique. Sur la période historique, le littoral ouest est déjà soumis au déficit hydrique une grande partie de l'année, autour de 270 jours par an en moyenne (Fig. 7.4(d)). L'Est est épargné avec très peu de jours pour lesquels la RFU est entièrement consommée. Dans le futur, la baisse du niveau quotidien moyen de remplissage du réservoir utile va de pair avec une augmentation du nombre de jours en déficit hydrique, c'est-à-dire que le réservoir utile passera plus fréquemment sous le seuil de la RDU, fixé à 20 mm (Fig. 7.8). Dans les deux scénarios SSP1-2.6 et SSP5-8.5, une augmentation plus importante à l'ouest du nombre de jours annuel en déficit hydrique est prévue en milieu et fin de siècle, d'environ 50 jours par an voire 100 jours sur certaines zones en SSP5-8.5 (Fig. 7.8).

7.4.6 Étude de cas sur deux bassins canniers

Les diagnostics climato-agronomiques présentés ci-dessus ont été affinés sur les deux principaux bassins canniers de l'île, Saint-Louis au sud-ouest et Saint-André au nord-est, qui sont très contrastés dans leur climat et dans les pratiques culturales. Le bassin cannier de Saint-André est caractérisé par des précipitations abondantes, la culture de la canne à sucre y est menée de façon pluviale. Les exploitations sont de surface plus importante qu'ailleurs sur l'île. L'organisation des parcelles permet aux exploitants d'utiliser des machines agricoles (moissonneuse et tracteur) d'ampleur permettant de pallier le manque de main d'œuvre. Le bassin cannier de Saint-Louis se différencie par son climat plus sec. Le recours à l'irrigation est indispensable et les seules machines utilisées sont les « coupeuses péi » qui sont adaptées au contexte morphopédologique difficile, avec de la pente, des roches et de petites structures d'exploitation.

Les paramètres sont moyennés spatialement sur chaque bassin pour les deux scénarios extrêmes SSP1-2.6 et SSP5-8.5. L'évolution des niveaux de remplissage du réservoir utile est représentée en figure 7.9 au moyen de boîtes à moustaches. Cette représentation permet notamment de voir le nombre de jours en déficit hydrique, c'est-à-dire les jours pour lesquels le niveau de remplissage du réservoir utile est en deçà de 20 mm.

Pour le bassin de Saint-André, moins de 5% des valeurs sont inférieures à 20 mm sur la période historique (Fig. 7.9(a)). En climat futur, le remplissage du réservoir utile diminue dans les deux scénarios. Le scénario SSP5-8.5 prévoit pour la fin de siècle un assèchement particulièrement marqué, avec 25% des valeurs sous le seuil de 40 mm, alors que 75% des valeurs sont supérieures à 62 mm sur la période historique. Les niveaux de remplissage du réservoir utile du bassin cannier de Saint-Louis sont bien plus faibles (Fig. 7.9(b)). Ces valeurs vont diminuer dans le futur, avec une médiane passant de 10 mm sur la période historique à 4,9 mm en fin de siècle pour le scénario SSP5-8.5. Ce scénario prévoit en fin de siècle 75% des jours de l'année en déficit hydrique ($RU < 20$ mm), rendant indispensable l'irrigation.

7.4.7 Conclusion et perspectives

Les résultats obtenus montrent qu'un assèchement global est observé par baisse des précipitations et augmentation de l'évapotranspiration, particulièrement à l'ouest de l'île qui souffre déjà d'un déficit hydrique marqué. L'augmentation de la demande évaporative (jusqu'à +10% dès 2050 en SSP5-8.5, Fig. 7.5(c)) entraînera une augmentation sensible de la fréquence et de l'intensité du déficit hydrique

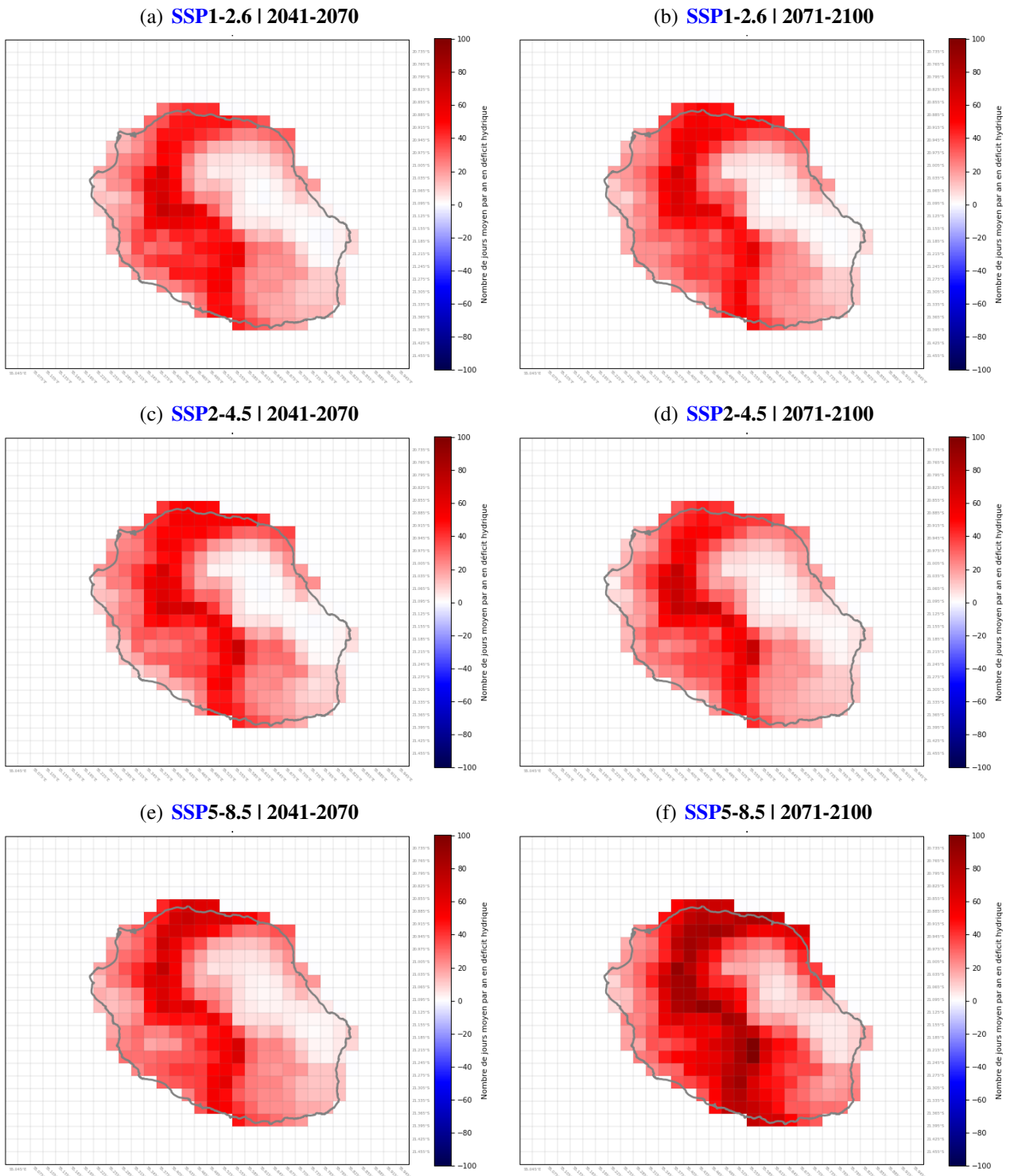


FIGURE 7.8 – Anomalies du nombre annuel moyen de jours de déficit hydrique (en jours par rapport à la moyenne sur la période 1981-2010) sur La Réunion en milieu (gauche) et fin (droite) de siècle pour les scénarios *SSP1-2.6* (haut), *SSP2-4.5* (milieu), et *SSP5-8.5* (bas). Source : *Bérard (2021)*.

7.4. Etude d'impact pour l'agriculture (canne à sucre)

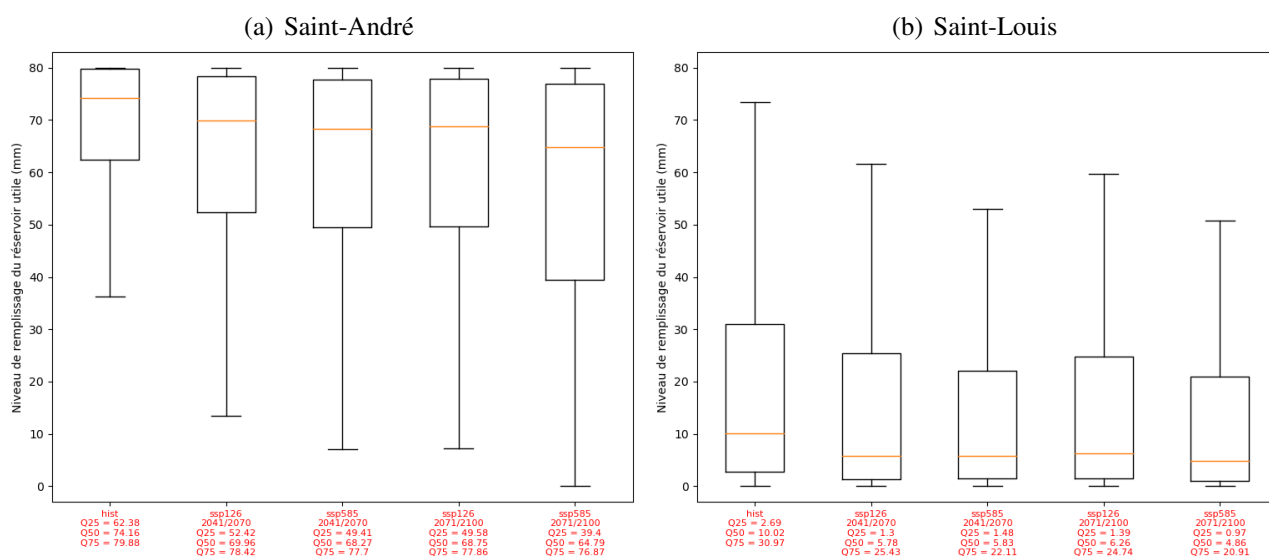


FIGURE 7.9 – Evolution des niveaux de remplissage quotidien du réservoir utile *RU* (mm) des bassins canniers de (a) Saint-André et (b) Saint-Louis sur, de gauche à droite, la période historique 1981-2010, les scénarios *SSP1-2.6* et *SSP5-8.5* en milieu de siècle (2041-2070) et les scénarios *SSP1-2.6* et *SSP5-8.5* en fin de siècle (2071-2100) selon le modèle *ALADIN*, après correction des biais. Les boîtes à moustaches mettent en valeur la médiane *C50* (trait), les 1^{er} et 3^{ème} quartiles i.e. les centiles *C25* et *C75* (contours des boîtes) et les 5^{ème} (*C5*) et 95^{ème} (*C95*) centiles (*C95*). Source : *Bérard (2021)*.

sur les principaux bassins canniers de La Réunion. Plus nos émissions de gaz à effet de serre seront élevées plus le déficit hydrique sera élevé, du fait de l'augmentation croissante de la température depuis le scénario de basse émission *SSP1-2.6* vers le scénario *SSP5-8.5*, en passant par le scénario *SSP2-4.5*. Dans le scénario d'émission de gaz à effet de serre le plus pessimiste (*SSP5-8.5*), le déficit hydrique est préoccupant et pourrait mettre en péril la culture de la canne à sucre sur le bassin cannier de Saint-Louis. Il faudra adapter les pratiques d'irrigation avec une gestion quotidienne optimisée des stocks d'eau si l'on veut conserver cette culture dans le contexte du changement climatique. Si le déficit hydrique est moins préoccupant dans le bassin de Saint-André, cette étude met en évidence le futur besoin potentiel d'irrigation de ce bassin cannier pour maintenir les rendements actuels. Les cultures de cette zone sont actuellement menées de façon exclusivement pluviale. Les infrastructures d'irrigation sont bien développées et maîtrisées à l'Ouest, permettant une déviation des eaux de l'Est à l'Ouest, mais sont inexistantes à l'Est.

La canne à sucre étant la plus affectée par le déficit hydrique durant sa phase de forte croissance entre janvier et mars, il est possible de reconduire l'étude en se focalisant sur le premier trimestre de l'année. Cependant, l'ensemble des modèles *CMIP6* ne sont pas en accord sur les anomalies de précipitations prévues dans la zone autour de la Réunion pour ce trimestre (ex, Fig. 6.63(a)). Pour quantifier l'incertitude sur le changement climatique liée au couple de modèles utilisé (*ALADIN-CNRM-ESM2-1*), il est envisageable d'utiliser la méthode de descente d'échelle statistique sur le sous-ensemble *CMIP6*, méthode présentée en section 6.7 pour la variable précipitations.

La haute résolution de la grille de calculs des indicateurs proposés constitue un avantage majeur pour la mise en place d'un service agro-climatique à Météo-France. En effet, l'utilisateur agricole se trouve en mesure d'adapter les informations à sa zone d'exploitation. Un accès web aux différentes cartes d'indicateurs climatiques, hydriques et agronomiques est envisagé suite aux échanges avec Tereos. Cependant, le modèle de bilan hydrique à double réservoir utilisé est très simplifié. Il constitue un bon point de départ pour un diagnostic sur le contenu en eau des sols, et sa simplicité permet d'effectuer rapidement les calculs jusqu'en 2100. Mais l'utilisateur du service agro-climatique attend

des diagnostics agronomiques plus précis. L'utilisation du modèle de croissance de la canne à sucre **MOSICAS** (Morel 2014) développé par le **CIRAD** en 2003, en sus des données climatiques de **BRIO**, ouvre un champ large d'applications agronomiques. Les indicateurs de rendements ou de richesse en sucre intéressent notamment les acteurs de la filière. L'estimation des volumes d'eau d'irrigation futurs nécessaires pour maintenir un certain niveau de rendement peut de même être utilisée pour dimensionner les futures installations d'irrigation. Les paramètres d'entrée de **MOSICAS** sont : les coordonnées géographiques, la période sur laquelle sont calculées les sorties, la **RU**, la **RFU**, la **RDU**, le taux de remplissage initial du réservoir utile, la profondeur d'enracinement de la culture, la variété de canne choisie ainsi que la dose d'irrigation appliquée et la fréquence d'application. **MOSICAS** permet de simuler le bilan hydrique (**ETR**, niveau de remplissage du réservoir utile, etc.) ainsi que des variables agronomiques comme le rendement (en tonnes par hectare) ou encore la richesse en sucre de la canne. Les applications agronomiques sont donc larges : le modèle permet de connaître précisément les effets des déficits hydriques sur le rendement ou encore de tester plusieurs stratégies d'irrigation pour maximiser le rendement de la culture.

Enfin, en faisant varier le coefficient cultural K_c ainsi que les seuils utilisés pour les réserves utiles **RFU** et **RDU**, cette étude pourrait être reconduite pour d'autres cultures que la canne à sucre ou sur d'autres types de sols.

7.5 ÉTUDE D'IMPACT POUR LA SANTÉ (VIRUS DE LA DENGUE)

Depuis 2021, le projet **MACATIA** (Modeling Assessment of Climate change hAazard in The Indian oceAn) s'intéresse à la propagation du virus de la dengue sur les îles du **SOOI** dans le contexte du changement climatique. Ce projet est porté par l'équipe Stratosphère du Laboratoire de l'Atmosphère et des Cyclones (**LACy**) de l'Université de La Réunion, en partenariat avec Météo-France, le laboratoire **ASTRE** (unité mixte de recherche du **CIRAD** et de l'**INRAE**), le laboratoire **TETIS** (unité mixte de recherche du **CIRAD**, du CNRS, de l'**INRAE** et de AgroParisTech), et le laboratoire **PIMIT** de l'Université de La Réunion. L'étude s'est penchée sur La Réunion dans un premier temps mais le projet a pour objectif de s'étendre aux autres territoires comme prochainement l'île Maurice. Ce projet utilise les données corrigées de précipitations et de températures (min et max) issues d'**ALADIN** pour les 3 scénarios **SSP**. L'article ci-dessous résume les premiers résultats du projet **MACATIA**.

Impact des Changements Climatiques Régionaux sur la propagation des maladies vectorielles transmises par le moustique *Aedes Aegypti* dans un contexte insulaire et tropical.

K. Lamy^{1,*}, A. Tran², T. Portafaix¹, M.D. Leroux³, T. Baldet²

Affiliations:

¹LACy, Laboratoire de l'Atmosphère et des Cyclones (UMR 8105 CNRS, Université de La Réunion, Météo-France), Saint-Denis de La Réunion, France

²CIRAD, UMR TETIS, Sainte-Clotilde, Réunion, France

³Direction Interrégionale pour l'Océan Indien, Saint-Denis de La Réunion, France

⁴ASTRE, Univ. Montpellier, Cirad, INRA, Sainte-Clotilde, La Réunion, France

*Corresponding author Email: kevin.lamy@univ-reunion.fr

1. Introduction:

Les maladies à transmission vectorielle (VBD) sont responsables d'environ 700 000 morts par an selon l'OMS. Les moustiques font partie des vecteurs les plus efficaces pour la transmission de ces maladies et bien que certaines maladies comme le paludisme montrent un déclin, ce n'est pas le cas des Arbovirus (Dengue, Zika ou Fièvre du Nil). L'augmentation des échanges et des déplacements mondiaux sont la cause principale de l'extension géographique de nombreuses maladies vectorielles au cours des dernières décennies. Néanmoins, les paramètres environnementaux vont jouer un rôle-clé sur la survie et la prolifération des vecteurs de ces maladies. Des travaux sur les vecteurs d'arbovirus (*Aedes Aegypti* et *Aedes Albopictus*) ont montré que les précipitations, températures et indices de végétation sont fortement liés aux développements de ces populations de moustiques (Kraemer et al. (2015), Juliano et al. (2007)). Ainsi, dans le contexte actuel de changement climatique, on s'attend aussi à des changements dans la dynamique de ces populations de moustiques et donc des changements sur l'extension géographique et altitudinale des maladies vectorielles et sur l'amplitude des épidémies associées.

Des études à l'échelle globale ont déjà été réalisées sur les liens entre changements climatiques et maladies vectorielles. Helmersson et al. (2016) ont montré que l'augmentation des températures en Europe due au changement climatique favorise la capacité vectorielle des moustiques *Aedes Aegypti* et *Aedes Albopictus*. Iwamura et al. (2020) ont combiné les résultats de CMIP5 à un modèle mécanistique et phénologique décrivant le cycle de vie d'*Aedes Aegypti*, leurs travaux ont montré que pour chaque décennie entre 1950 et 2000, le monde est devenu 1.5% plus viable au renouvellement du cycle de vie des moustiques, cette tendance s'accélère en 2050 jusqu'à 3.2% pour RCP 4.5 et 4.4% pour RCP 8.5.

On s'intéresse ici au cas de la Dengue, transmise principalement par *Aedes Albopictus*. Avant 1970, la dengue n'était présente que dans 9 pays, elle est aujourd'hui présente dans plus de 129 pays et on recense environ 96 millions de cas par an pour environ 40000 morts (OMS). Après une épidémie importante en 1977, la Dengue n'était plus présente sur l'île de la

Réunion. Elle a ensuite réémergé en 2004, suivi de quelques cas sporadiques et intermittents jusqu'à l'année 2017. Depuis 2017, une épidémie importante est constatée chaque année avec une tendance à l'augmentation du pic épidémique (environ 1000 cas par semaine en 2018 jusqu'à atteindre environ 2500 cas par semaine en 2021). Le modèle ALBORUN, développé par le CIRAD (Cailly et al., 2012 et Tran et al., 2020), est un modèle mécanistique et phénologique permettant de modéliser la dynamique de population du moustique *Aedes Albopictus*. Ce modèle résout un système d'équations différentielles décrivant le cycle de vie du moustique. Ce modèle est forcé par les températures et précipitations journalières, il a déjà été validé sur l'île de la Réunion à l'aide de données issues de stations météorologiques et de piégeages entomologiques [Tran et al., 2020].

Dans cette étude, nous avons utilisé les sorties du modèle ALADIN-Climat (réalisé dans le cadre de BRIO), à 3 km de résolution et pour 3 scénarios climatiques (SSP1-2.6, SSP2-4.5 and SSP5-8.5). Les pluies et températures modélisées servent d'entrées aux parcelles modélisées dans ALBORUN afin de déterminer l'impact des changements climatiques modélisés sur la dynamique de population d'*Aedes Albopictus* à l'île de la Réunion [Figure 1].

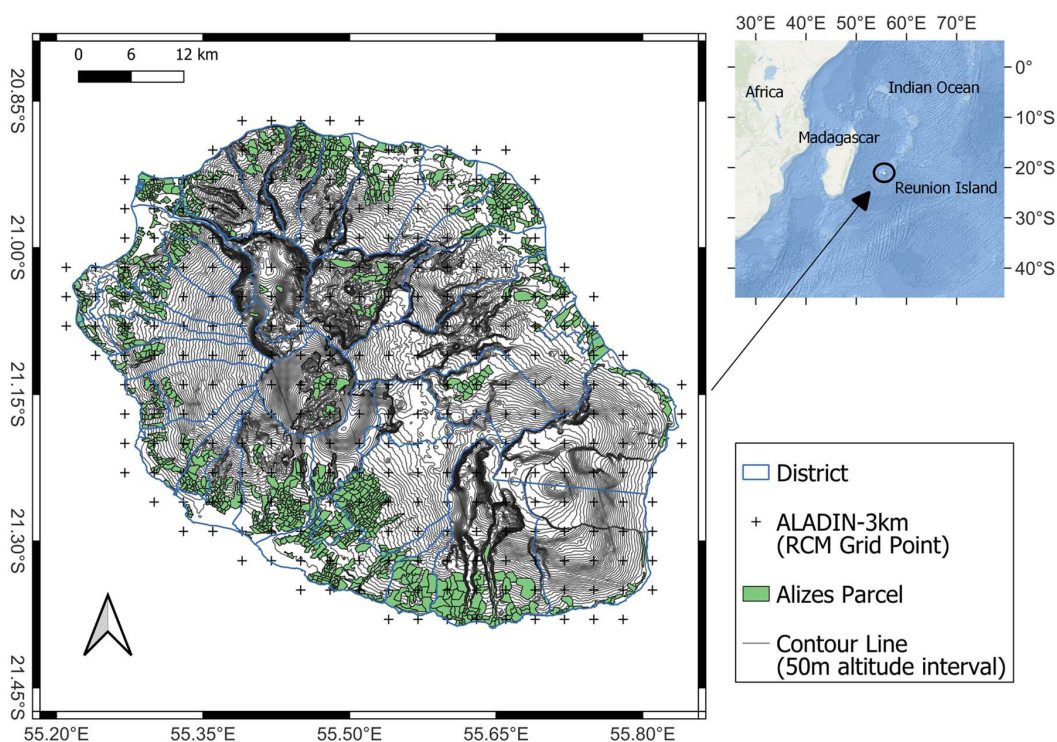


Figure 1. Carte représentant la Réunion, les points de grilles d'ALADIN-3km, les parcelles utilisées dans le modèle ALBORUN et le relief en ligne de contour.

2. Résultat:

2.1. Simulation Climatique:

Une première série d'analyses des sorties climatiques a permis de quantifier les changements

7.5. Etude d'impact pour la santé (virus de la dengue)

relatifs attendus à l'horizon 2070-2100 par rapport aux années 1980-2010 en termes de précipitations et de températures.

Pour les températures, les différences relatives de la moyenne annuelle climatologique sont représentées sur la Figure 2. La température montre une réponse linéaire à l'ampleur du changement climatique attendu. Une augmentation de 1.0° pour la bande littorale à 1.3°C pour le centre de l'île est observée pour le scénario optimiste (SSP1-2.6) tandis qu'une augmentation de 3.2° pour la bande littorale à 4.0°C pour le centre de l'île est observée pour le scénario pessimiste (SSP5-8.5).

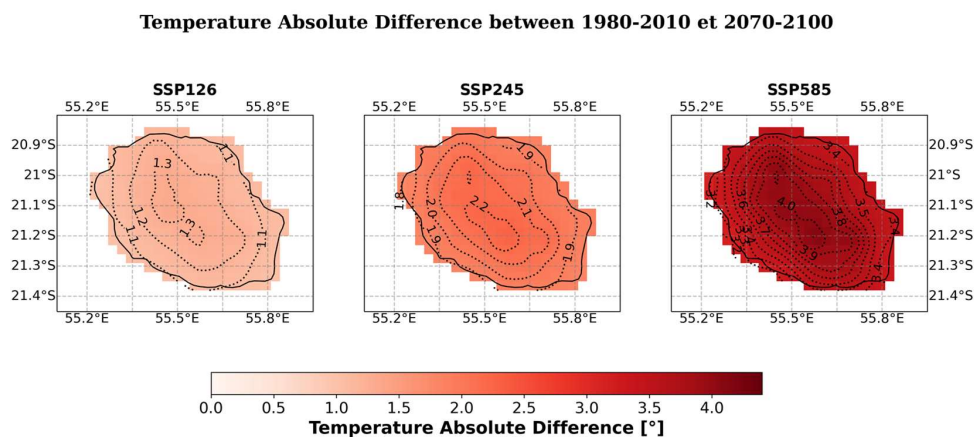


Figure 2: Différence Absolue des Températures Moyennes Annuelles entre les Périodes Climatologiques 2070-2100 et 1980-2010

Pour les précipitations, les différences relatives de la moyenne annuelle climatologique sont représentées sur la Figure 3 pour quatre saisons. On remarque ici la non-linéarité des changements avec l'ampleur des changements climatiques attendus. Pour le scénario pessimiste un assèchement de -10 à -40% de pluie est attendu à l'horizon 2070-2100 en fonction des saisons. Pour le scénario médian, un assèchement entre -10 à -20% est observé pour la saison de JJA sur toute l'île, tandis que les autres saisons montrent une île scindée en deux entre assèchement et humidification. Pour le scénario pessimiste, un assèchement est constaté pour les saisons de MAM et SON tandis qu'une humidification est observée pour DJF et une île scindée en deux pour JJA.

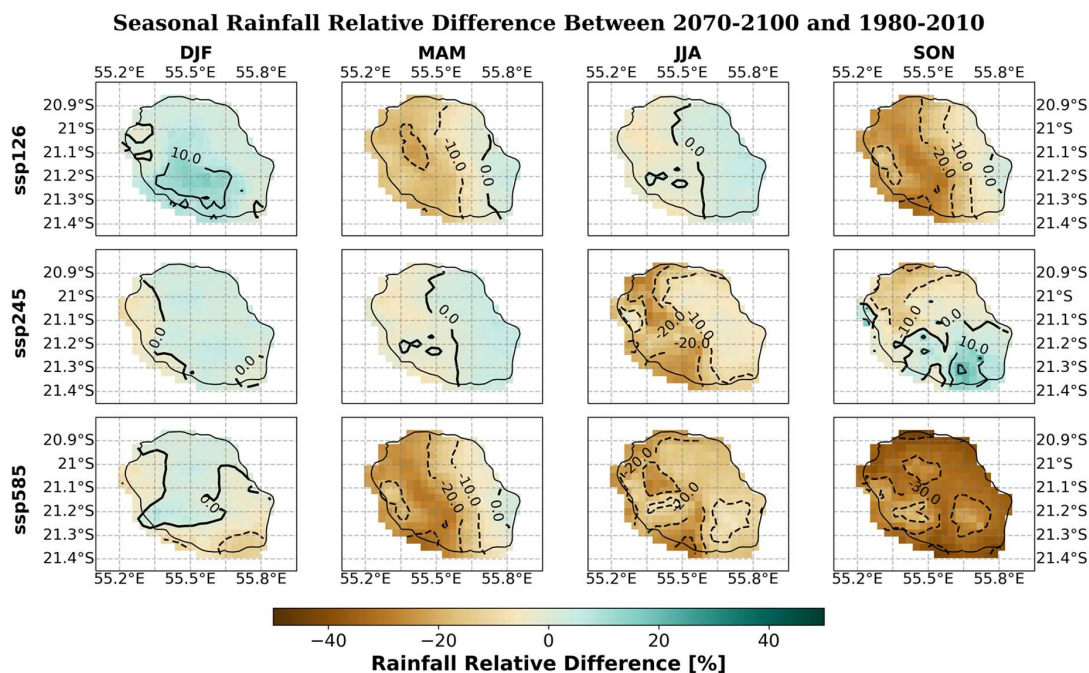


Figure 3: Différence Absolue des Précipitations Moyennes Annuelles entre les Périodes Climatologiques 2070-2100 et 1980-2010

2.2 Simulation d'impact du Climat sur la Dynamique de Population du Moustique:

La variable entomologique la plus décisive dans le cadre de transmissions de maladies vectorielles est la femelle moustique adulte pares en recherche d'hôte (nommée A2H dans le modèle ALBORUN). Cette dernière a déjà fait au moins un repas de sang et est donc potentiellement porteuse d'une VBD.

Les changements relatifs entre les périodes climatologiques 2070-2100 et 1982-2012 ont été calculés pour A2H pour différentes saisons et différents scénarios climatiques (Figure 4). De manière générale, une diminution de l'abondance d'A2H est observée sur les bandes littorales (0-500m) tandis qu'une augmentation est observée à mi-pente (500-1000m) et à haute altitude (1000-1500m).

Une augmentation des températures entraîne une augmentation des fonctions de transitions entre les stades du moustique mais aussi une augmentation des taux de mortalité.

La pluie a elle un rôle non linéaire ; un seuil minimal de pluie est nécessaire pour l'alimentation en eau des gîtes larvaires naturels mais des précipitations trop importantes peuvent entraîner un lessivage de ces mêmes gîtes.

L'analyse détaillée des résultats (Lamy et al. 2022) a permis de déduire que, pour les conditions climatiques observées, la hausse des températures a un impact positif sur les fonctions de transitions qui contrebalancent le taux de mortalité. On obtient un cycle de vie du moustique beaucoup plus efficace.

7.5. Etude d'impact pour la santé (virus de la dengue)

Pour les précipitations, même si une tendance à l'assèchement est attendue, et donc une baisse de la disponibilité des gîtes larvaires, cet effet est contrebalancé par l'effet positif induit par l'augmentation des températures. En effet, les gîtes larvaires naturels ne sont pas les seuls, les gîtes d'origine anthropique (pots, vases, soucoupes...) ne sont pas dépendants de la pluie et restent donc constants. Ainsi, plus le scénario de changement climatique produit des températures élevées et plus les températures vont dominer la dynamique de population du moustique.

Les évolutions attendues à l'horizon 2070-2100 en termes de pluie, températures et d'A2H et le driver climatique principale d'A2H pour les différents scénarios climatiques sont représentés sur la Table 1.

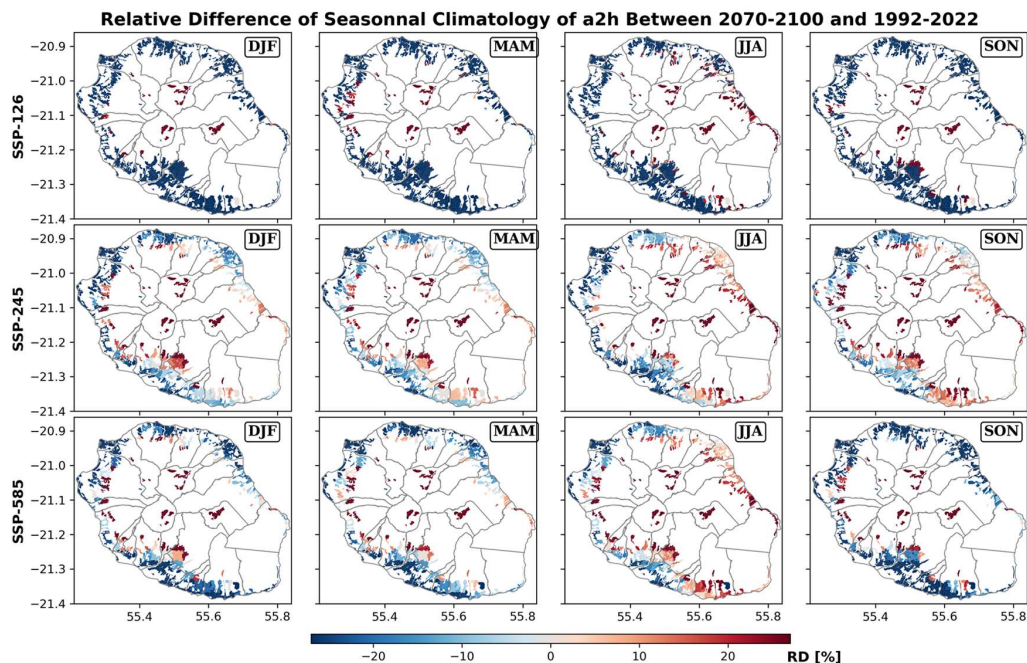


Figure 4: Changements relatifs attendus en 2070-2100 pour la population de moustiques femelles pares en recherche d'hôtes.

Region	Altitude	Scenario	Mean Monthly Percent Change in 2070-2100				Main Climatic Driver
			Rain [%]	K ^{1/p} [%]	T [°]	Adult Host-Seeking	
West	Low	SSP-126	-21.7 ± 9.3	-24.32 ± 8.96	1.1 ± 0.0	-47.5 ± 33.7	Rain
		SSP-245	-19.1 ± 9.5	-17.48 ± 9.35	2.0 ± 0.1	-35.2 ± 26.5	Rain
		SSP-585	-32.3 ± 10.3	-26.55 ± 9.59	3.3 ± 0.1	-55.3 ± 30.8	Rain
	Mid	SSP-126	-14.8 ± 8.0	-16.63 ± 7.64	1.1 ± 0.0	-8.7 ± 13.9	Rain & Temperature
		SSP-245	-12.4 ± 7.9	-12.42 ± 7.77	2.1 ± 0.0	11.7 ± 16.8	Rain & Temperature
		SSP-585	-22.1 ± 9.7	-18.01 ± 9.30	3.5 ± 0.1	22.1 ± 23.6	Rain & Temperature
	High	SSP-126	-18.6 ± 7.8	-20.83 ± 7.73	1.2 ± 0.0	7.4 ± 114.5	Rain & Temperature
		SSP-245	-16.1 ± 7.9	-17.91 ± 7.16	2.1 ± 0.0	60.3 ± 131.2	Rain & Temperature
		SSP-585	-29.2 ± 10.1	-25.46 ± 9.26	3.7 ± 0.1	84.4 ± 135.2	Rain & Temperature
South	Low	SSP-126	-10.1 ± 6.6	-14.68 ± 7.06	1.1 ± 0.0	-23.7 ± 10.1	Rain
		SSP-245	-11.5 ± 7.2	-11.07 ± 6.96	2.0 ± 0.1	-11.6 ± 11.4	Rain
		SSP-585	-30.6 ± 9.1	-26.60 ± 9.70	3.4 ± 0.1	-30.6 ± 19.5	Rain
	Mid	SSP-126	-8.7 ± 5.5	-13.37 ± 5.78	1.2 ± 0.0	-12.9 ± 11.0	Rain & Temperature
		SSP-245	-10.8 ± 5.9	-11.21 ± 5.51	2.1 ± 0.1	5.9 ± 13.8	Rain & Temperature
		SSP-585	-29.3 ± 8.0	-25.06 ± 8.07	3.6 ± 0.1	0.8 ± 26.7	Rain & Temperature
	High	SSP-126	-8.2 ± 6.3	-12.60 ± 5.76	1.2 ± 0.0	14.6 ± 9.0	Rain & Temperature
		SSP-245	-10.4 ± 7.7	-10.65 ± 5.38	2.2 ± 0.1	48.1 ± 11.7	Temperature
		SSP-585	-25.3 ± 9.1	-18.70 ± 7.39	3.7 ± 0.1	65.5 ± 15.8	Temperature
East	Low	SSP-126	-7.2 ± 2.9	-11.06 ± 2.69	1.1 ± 0.0	-11.5 ± 6.5	Rain
		SSP-245	-5.3 ± 2.9	-8.66 ± 2.45	1.9 ± 0.0	-18.0 ± 16.0	Rain
		SSP-585	-20.5 ± 3.4	-21.70 ± 3.56	3.3 ± 0.1	-18.0 ± 16.0	Rain
	Mid	SSP-126	-5.6 ± 2.0	-7.52 ± 2.14	1.2 ± 0.0	14.7 ± 2.8	Temperature
		SSP-245	-3.4 ± 1.9	-5.12 ± 2.15	2.1 ± 0.0	36.9 ± 3.4	Temperature
		SSP-585	-18.7 ± 2.1	-15.45 ± 2.33	3.6 ± 0.0	40.1 ± 5.0	Temperature
	High	SSP-126	-4.0 ± 3.1	-6.83 ± 2.85	1.2 ± 0.0	65.2 ± 38.5	Temperature
		SSP-245	-3.1 ± 3.1	-6.19 ± 2.49	2.1 ± 0.0	99.2 ± 34.6	Temperature
		SSP-585	-19.5 ± 3.1	-15.68 ± 3.06	3.6 ± 0.0	118.9 ± 33.5	Temperature
North	Low	SSP-126	-14.4 ± 4.8	-18.31 ± 5.23	1.2 ± 0.0	-28.6 ± 17.1	Rain
		SSP-245	-13.1 ± 4.5	-14.53 ± 4.82	2.0 ± 0.0	-16.4 ± 15.0	Rain
		SSP-585	-30.1 ± 5.5	-30.11 ± 5.46	3.4 ± 0.1	-39.5 ± 22.7	Rain
	Mid	SSP-126	-14.9 ± 4.4	-18.60 ± 4.73	1.2 ± 0.0	-14.7 ± 13.6	Rain & Temperature
		SSP-245	-13.2 ± 4.5	-14.41 ± 4.77	2.0 ± 0.0	9.0 ± 17.5	Rain & Temperature
		SSP-585	-28.8 ± 4.8	-28.52 ± 5.20	3.5 ± 0.1	2.9 ± 27.1	Rain & Temperature

Rain (R) Changes:

Drier Wetter

Temperature, Environmental Capacity (K^{1/p}) and Adult Host-Seeking Changes:

Decrease Increase

Figure 5: Changements attendus à l'horizon 2070-2100 et driver climatique de l'abondance d'A2H.

3. Discussions et Conclusions:

Cette étude a permis de mettre en avant les impacts possibles du changement climatique sur l'abondance d'*Aedes Albopictus* à La Réunion et donc sur l'impact possible en termes de risque sanitaire lié aux VBD.

L'augmentation des températures, de plus en plus importante avec l'amplitude du forçage radiatif attendu, a un impact positif sur le cycle de vie du moustique en favorisant la transition entre les différents stades. De plus, des zones de moyenne à haute altitude qui ne sont actuellement que peu ou pas habitées par *Aedes Albopictus* présenteront dans le futur des conditions climatiques beaucoup plus favorables à sa survie. Ces zones sont aussi des zones habitées par l'homme, on peut donc supposer un risque de circulation accrue de VBD dans ces régions. L'impact des températures reste une source d'incertitude dans les régions où la température dépasse 35° car la formulation des fonctions de transition a été obtenue à partir de résultats expérimentaux réalisés entre 5°C et 35°C [Delatte, 2009].

Les pluies, et la tendance à l'assèchement à l'horizon 2100, semblent avoir un impact négatif sur la dynamique de population du moustique d'*Aedes*. Toutefois, cet effet négatif est contrebalancé par l'effet positif des températures, et ce, surtout pour les scénarios les plus pessimistes (SSP2-4.5 et SSP5-8.5) et pour les régions de moyennes à hautes altitudes.

Références:

Cailly, P. et al. A climate-driven abundance model to assess mosquito control strategies. *Ecological Modelling* 227, 7–17 (2012).

Juliano, S. A. POPULATION DYNAMICS. *Journal of the American Mosquito Control Association* 23, 265–275 (2007).

Iwamura, T., Guzman-Holst, A. & Murray, K. A. Accelerating invasion potential of disease vector *Aedes aegypti* under climate change. *Nature Communications* 11, (2020).

Kraemer, M. U. et al. The global distribution of the arbovirus vectors *Aedes aegypti* and *Ae. albopictus*. *eLife* 4, (2015).

Lamy, K. et al. The impact of Regional Climate Change on the spread of disease vector *Aedes Albopictus* in tropical island environments. [Unpublished Manuscript], (2022)

Liu-Helmersson, J. et al. Climate Change and *Aedes* Vectors: 21st Century Projections for Dengue Transmission in Europe. *EBioMedicine* 7, 267–277 (2016).

Tran, A. et al. Complementarity of empirical and process-based approaches to modelling mosquito population dynamics with *Aedes albopictus* as an example—Application to the development of an operational mapping tool of vector populations. *PLOS ONE* 15, e0227407 (2020).

WHO. A global brief on vector-borne diseases. 2014

Chapitre 8

Synthèse des changements climatiques observés et projetés dans le sud-ouest de l’océan Indien

SOMMAIRE

8.1 CHANGEMENT CLIMATIQUE OBSERVÉ SUR LES ÎLES DU BASSIN	237
8.1.1 Augmentation des températures	237
8.1.2 Modification des précipitations	237
8.2 PROJECTIONS CLIMATIQUES SUR LE BASSIN SOOI ET LES ÎLES	238
8.2.1 Projections des températures	238
8.2.2 Projections des précipitations	240
8.2.3 Projections climatiques de l’activité cyclonique	241

CETTE partie résume les principales tendances attendues sur le bassin en terme d’activité cyclonique future. Elle synthétise également les fourchettes de valeurs attendues en terme de précipitations et de température moyennes mais aussi d’extrêmes sur les îles du bassin **SOOI** à l’horizon de milieu (2041-2070) et fin (2071-2100) de siècle pour trois scénarios d’émission de gaz à effet de serre.

8.1 CHANGEMENT CLIMATIQUE OBSERVÉ SUR LES ÎLES DU BASSIN

8.1.1 Augmentation des températures

Les relevés historiques de la température moyenne de l'air en surface dans les diverses îles étudiées sur la période passée (une cinquantaine d'années) mettent en évidence que le réchauffement climatique est en marche sur notre bassin et s'accorde avec les tendances mondiales. Le réchauffement semble plus important en remontant vers l'équateur (Maurice, Agalega, Saint Brandon).

- Madagascar : réchauffement de l'ordre de 0.75°C à 1.6°C selon les villes sur la période 1961-2018 (58 ans) par rapport à la moyenne sur la période de référence 1981-2010. L'élévation de température est plus prononcée sur le littoral sud et sud-ouest, les hautes terres centrales et le sud-ouest continental. Seul l'extrême Nord s'est réchauffé de moins de 1°C.
- La Réunion : réchauffement de l'ordre de 1°C sur la période 1968-2021 (54 ans) par rapport à la moyenne sur la période de référence 1981-2010. La tendance observée est de +0.18°C par décennie mais le réchauffement s'est accéléré dans la dernière décennie.
- Maurice : réchauffement moyen de l'ordre de 1.1°C sur la période 1961-2020 (60 ans) par rapport à la moyenne sur la période de référence 1961-1990. La tendance observée sur Maurice est de +0.18°C par décennie comme sur La Réunion mais le réchauffement s'est accéléré dans la dernière décennie.
- Rodrigues : réchauffement moyen de l'ordre de 1.5°C sur la période 1961-2020 (60 ans) par rapport à la moyenne sur la période de référence 1961-1990.
- Agalega : réchauffement moyen de l'ordre de 1.8°C sur la période 1961-2020 (60 ans) par rapport à la moyenne sur la période de référence 1961-1990.
- Saint Brandon : réchauffement moyen de l'ordre de 2.1°C sur la période 1961-2020 (60 ans) par rapport à la moyenne sur la période de référence 1961-1990.
- Comores et Mayotte : anomalies moyennes de températures de 0.8°C sur la fin de la période 1981-2010.
- Seychelles : réchauffement de l'ordre de 0.8°C sur la période 1972-2020 (49 ans) par rapport à la moyenne sur la période de référence 1981-2010.

8.1.2 Modification des précipitations

La variabilité interannuelle des précipitations est supérieure à celle des températures dans les relevés historiques de référence.

- Madagascar : baisse significative du cumul annuel de précipitations sur l'île depuis 1961, en particulier sur le littoral sud et sud-ouest et l'extrême nord.
- La Réunion : pas de tendance significative décelable sur l'évolution du cumul annuel de précipitations sur l'île hormis dans la région sud-ouest où les précipitations annuelles enregistrent une baisse significative d'environ -5% par décennie depuis 1961. Pas d'évolution significative décelable sur la fréquence des événements fortement précipitants depuis 1961.
- Maurice : baisse moyenne de 14% du cumul annuel moyen de précipitations sur la période 1901-2020 par rapport à la normale 1961-1990.
- Rodrigues : pas de tendance significative décelable sur l'évolution du cumul annuel moyen de précipitations sur la période 1954-2020.
- Agalega : pas de tendance significative décelable sur l'évolution du cumul annuel moyen de précipitations sur la période 1945-2020.

- Saint Brandon : baisse moyenne de 5% du cumul annuel moyen de précipitations sur la période 1945-2020 par rapport à la normale 1961-1990.
- Comores et Mayotte : tendance à la baisse des précipitations sur la majorité des stations.
- Seychelles : pas de tendance à long terme du cumul de précipitations annuelles, mais légère décroissance du cumul de précipitations en saison des pluies. Les événements fortement précipitants sont associés à une variabilité interannuelle forte. Les précipitations intenses et les inondations deviennent plus dévastatrices et fréquentes aux Seychelles.

8.2 PROJECTIONS CLIMATIQUES SUR LE BASSIN SOOI ET LES ÎLES

8.2.1 Projections des températures

Ce n'est qu'à partir de 2050 que les températures divergent en fonction du scénario d'émission de GES. Ceci est dû à la longue durée de vie dans l'atmosphère des gaz à effet de serre tel que le CO_2 . Par ailleurs, l'horizon autour de 2050 permet de s'affranchir au premier ordre de l'incertitude liée à la variabilité naturelle du climat (qui peut masquer le signal du changement climatique sur les premières décennies de simulation). C'est pourquoi deux horizons temporels de milieu (2041-2070) et fin (2071-2100) de siècle ont été retenus pour la synthèse des projections de température et de précipitations sur le bassin et sur les îles.

Les fourchettes probables des projections de température en 2100 sur notre zone COI prévues par le sous-ensemble de 22 modèles CMIP6 sont les suivantes :

- +0.6°C à +1.6°C en scénario SSP1-2.6.
- +1.4°C à +2.5°C en scénario SSP2-4.5.
- +2.8°C à +5.0°C en scénario SSP5-8.5.

Les augmentations de températures par rapport à la période de référence 1981-2010 prévues par le sous-ensemble de 22 modèles globaux CMIP6 sur les petites îles sont les suivantes, en retenant les valeurs minimales et maximales du panache sur la période considérée :

- **En milieu de siècle (2041-2070) :**
 - autour de +0.6°C à +1.5°C en SSP1-2.6.
 - autour de +0.7°C à +2.0°C en SSP2-4.5.
 - autour de +0.8°C à +3.0°C en SSP5-8.5.
- **à l'horizon de fin de siècle (2071-2100) :**
 - autour de +0.7°C à +1.6°C en SSP1-2.6.
 - autour de +1.2°C à +2.5°C en SSP2-4.5.
 - autour de +1.8°C à +4.8°C en SSP5-8.5.

Sur la Grande Île (tout comme sur l'est du continent Africain), les augmentations de températures par rapport à la même période de référence 1981-2010 prévues par le sous-ensemble de 22 modèles CMIP6 sont plus élevées :

- **En milieu de siècle (2041-2070) :**
 - autour de +0.7°C à +1.8°C en SSP1-2.6.
 - autour de +1.0°C à +2.3°C en SSP2-4.5.
 - autour de +1.0°C à +3.7°C en SSP5-8.5.

8.2. Projections climatiques sur le bassin SOOI et les îles

- à l'horizon de fin de siècle (2071-2100) :
 - autour de +0.7°C à +1.9°C en SSP1-2.6.
 - autour de +1.5°C à +3.0°C en SSP2-4.5.
 - autour de +2.1°C à +5.7°C en SSP5-8.5.

La figure 8.1 résume l'ensemble de ces informations sous forme graphique. En terme d'évolution de la température moyenne, le modèle global CNRM-ESM2-1, utilisé pour forcer le modèle régional ALADIN, se situe en milieu de panache des simulations CMIP6, ce qui présente l'avantage de se baser sur un scénario médian. Les tendances de température des simulations ALADIN, qui suit son modèle coupleur, sont donc dans la médiane des fourchettes de valeurs citées ci-dessus.

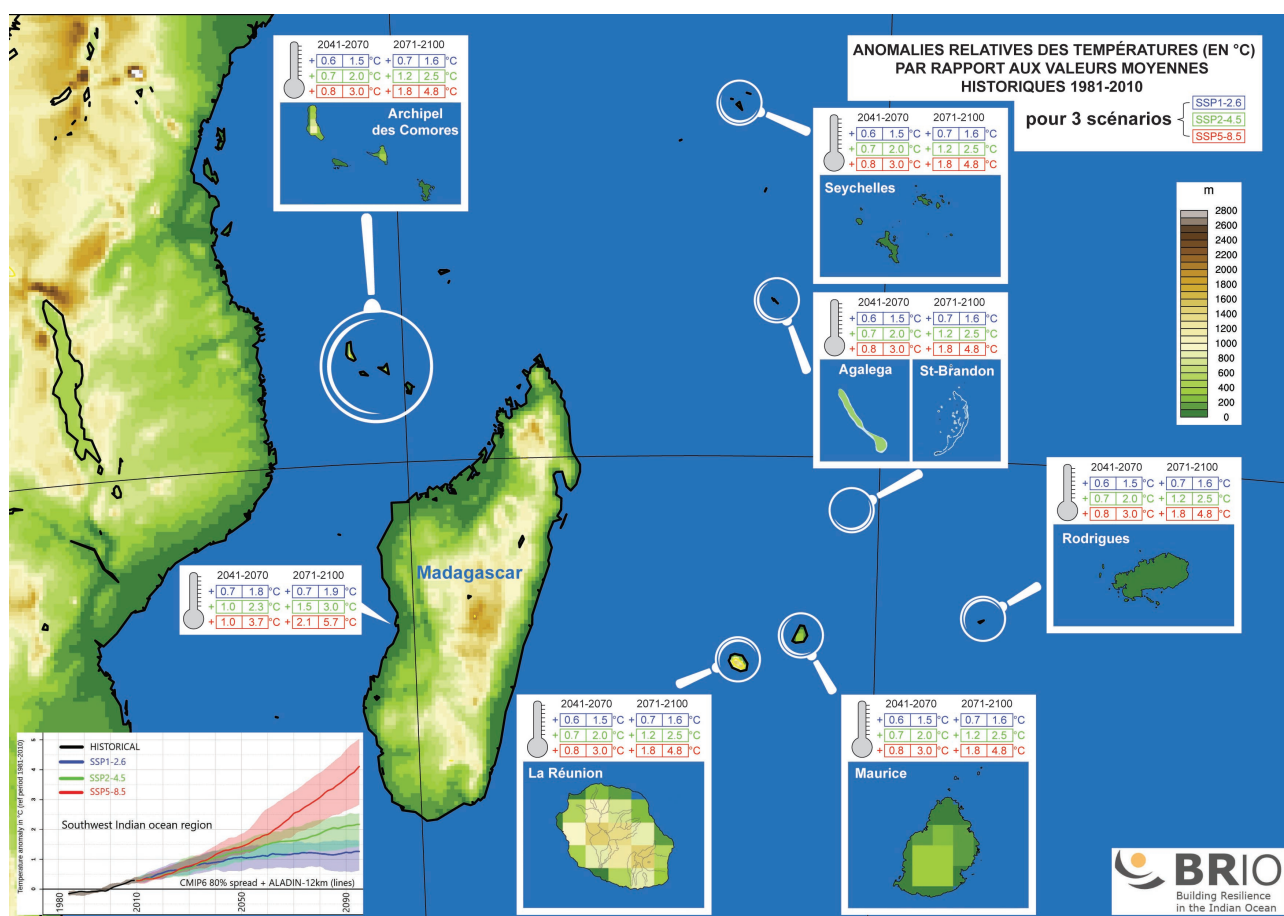


FIGURE 8.1 – Infographie synthétisant l'évolution des températures moyennes annuelles à +2 m, relativement aux valeurs historiques 1981-2010, attendues en milieu et fin de siècle sur l'ensemble des pays de la COI pour 3 scénarios SSP. Les fourchettes de valeurs tiennent compte des incertitudes CMIP6.

En terme de saisonnalité, c'est durant le coeur de saison chaude (JFM), quand les températures sont déjà à leur maximum, que les températures augmenteront le plus par rapport à la période de référence. Les indicateurs climatiques calculés à partir des simulations ALADIN indiquent que le nombre de jours annuels de forte chaleur devrait être en nette augmentation par rapport à ce que l'on a connu depuis 1981. En fin de siècle par exemple, la température maximale devrait dépasser 31°C à Gillot (La Réunion) plus de la moitié de l'année en scénario SSP5-8.5 contre une dizaine de jours par an jusqu'ici. De même à Pamandzi (Mayotte), la température maximale devrait dépasser 32°C plus de la moitié de l'année en scénario pessimiste en fin de siècle contre une dizaine de jours par an jusqu'ici. De telles températures auront des conséquences néfastes sur la santé humaine et animale, sur la biodiversité et les écosystèmes, ainsi que sur la sécurité alimentaire.

L'augmentation des températures ne sera pas uniforme sur les îles à fort relief comme La Réunion. Quelque soit le scénario, le réchauffement est prévu augmenter graduellement avec l'altitude depuis la côte vers le relief. Les différences de réchauffement entre la côte et le centre de l'île de La Réunion varient de 0.2°C en scénario **SSP1-2.6** à 0.8°C en scénario **SSP5-8.5**. On note que sur la côte ouest, ce sont les températures minimales ou nocturnes (T_N) qui augmenteront davantage, tandis que sur les hauts et l'intérieur de l'île ce sont les températures maximales ou diurnes (T_X) qui subiront le plus d'augmentation. Les différences d'augmentation entre T_X et T_N peuvent atteindre +/-0.5°C par endroits.

8.2.2 Projections des précipitations

La variabilité interannuelle des précipitations est supérieure à celle des températures. Il y a donc une plus forte incertitude sur l'évolution des précipitations au cours du siècle. Les panaches **CMIP6** projettent une légère baisse des précipitations annuelles sur la zone **COI**, baisse bien plus prononcée dans le scénario **SSP5-8.5**. Dans ce scénario pessimiste, les modèles s'accordent sur une baisse moyenne des précipitations annuelles dans le bassin à l'horizon 2060-2100. Enfin, les précipitations sont en moyenne plus faibles sur la zone **COI** dans les nouvelles simulations **CMIP6** en comparaison des simulations **CMIP5**. L'incertitude quant à la baisse marquée des précipitations dans le 2^{ème} semestre de l'année (**JAS** et **OND**) sur la zone **COI** est bien moindre. La baisse aura bien lieu, mais son amplitude dépendra de l'évolution de nos émissions de gaz à effet de serre et donc du scénario qui sera emprunté. C'est en saison des pluies (**JFM**) que les pluies auront une tendance à la hausse quelque soit le scénario, avec une plus grande amplitude et une plus grande fourchette d'incertitude dans le cas du scénario **SSP5-8.5**. L'amplification des contrastes saisonniers devrait ainsi compliquer la gestion de l'eau en saison des pluies (inondations) et en saison sèche (sécheresses). En scénario pessimiste, la baisse des précipitations pourrait atteindre 10 % à 40 % sur la saison juillet-août-septembre selon la zone. Une baisse sensible de 20 à 30 % des précipitations sur le dernier trimestre de l'année présage un allongement de la saison sèche avec un probable retard de démarrage de la saison des pluies.

En terme d'évolution du cumul annuel moyen de précipitations, le modèle global utilisé, **CNRM-ESM2-1**, fait partie des modèles **CMIP6** les plus "secs" sur la zone **COI**, quelque soit le scénario. Les tendances de précipitations des simulations **ALADIN** du projet **BRIO** sont donc généralement dans la fourchette "basse", bien qu'**ALADIN** réhausse quelque peu le signal de précipitations de son modèle coupleur grâce à sa meilleure prise en compte du relief et des systèmes cycloniques. L'infographie de synthèse en figure 8.2 illustre les tendances de précipitations annuelles simulées par **ALADIN** pour diverses villes du bassin et divers niveaux de réchauffement planétaire : +1.5°C, +2°C, ou encore +4°C (par rapport à l'ère pré-industrielle 1850-1900). Pour faire cet exercice, nous avons suivi les dernières recommandations du **GIEC** qui, dans son rapport **AR6**, a évalué l'impact du réchauffement climatique sur l'évolution des précipitations à la fois par scénario et horizon temporel mais aussi par niveau de réchauffement atteint sur le globe (en moyenne sur 20 ans). Les résultats par niveaux de réchauffement mixent ainsi un à plusieurs scénarios **SSP** et des horizons temporels distincts. Par exemple, dans **CNRM-ESM2-1**, le niveau de réchauffement global +1.5°C est atteint autour de 2047 en scénario **SSP1-2.6**, 2037 en scénario **SSP2-4.5** et 2032 en scénario **SSP5-8.5**, alors que le niveau de réchauffement global +4.0°C n'est atteint que dans la simulation du scénario **SSP5-8.5**, et ce autour de l'année 2079.

On remarque aussi une plus forte variabilité interannuelle des pluies dans **ALADIN** par rapport aux modèles globaux. Cette forte variabilité est héritée de son modèle coupleur **CNRM-ESM2-1** et pourrait aussi vraisemblablement être due à une meilleure représentation des pluies extrêmes, en particulier celles liées aux systèmes tropicaux d'intensité plus réaliste dans **ALADIN**. On observe dans **ALADIN** une modification du régime des pluies infra-annuel. Pour l'ensemble des scénarios

d'émission de GES, ALADIN prévoit une augmentation de la variabilité naturelle des précipitations, c'est-à-dire des extrêmes plus sévères : des années avec des cumuls de pluie plus faibles que dans le passé (sécheresses) et des années avec de plus fortes précipitations (et sujettes aux inondations). Les infographies de synthèse des figures 8.3 et 8.4 donnent un aperçu des tendances de précipitations sur les semestres pluvieux (de décembre à mai) et sec (de juin à novembre) simulées par ALADIN sur plusieurs villes et pour trois niveaux de réchauffement planétaire.

Selon le sous-ensemble de 22 modèles globaux CMIP6, les précipitations annuelles moyennes auront plus de chance de diminuer que d'augmenter au cours du siècle sur les îles de Madagascar, Saint Brandon, Rodrigues, Maurice, La Réunion. En scénario SSP5-8.5, il est très probable que le cumul moyen de précipitations annuelles diminue fortement sur Madagascar, Saint Brandon, Rodrigues, Maurice, La Réunion mais aussi sur Agalega. Quelque soit le scénario, les précipitations du dernier trimestre de l'année OND connaîtront une nette baisse au 21^{ème} siècle sur l'ensemble des îles hormis les Seychelles. La saison sèche JAS sera encore plus sèche sur Madagascar, Mayotte et Comores, La Réunion, Maurice, Saint Brandon, et Rodrigues dans une moindre mesure. Seules les Seychelles et Agalega pourraient être épargnées par cette baisse des précipitations en hiver. Il devrait en découler des épisodes de sécheresse plus fréquents et plus sévères sur des périodes de l'année où les ressources en eau sont déjà déficitaires, avec un fort stress hydrique pour la végétation et les cultures. Les indicateurs climatiques calculés à partir des simulations ALADIN indiquent qu'en scénario SSP5-8.5, des épisodes de sécheresse plus fréquents et plus sévères sont à attendre sur des îles comme la Réunion et l'archipel des Comores. L'évolution du nombre de jours secs consécutifs indique que La Réunion pourrait vivre des épisodes sans pluie moyenne sur l'île de près d'un mois en dernière partie de siècle, en particulier en scénario SSP5-8.5.

Selon la relation physique de Clausius-Clapeyron, l'air peut contenir 7% de plus de vapeur d'eau par degré de réchauffement. Dans le contexte du réchauffement climatique, on peut donc s'attendre à une intensification des précipitations extrêmes au cours du 21^{ème} siècle quelque soit le scénario, ce que confirment les simulations ALADIN.

8.2.3 Projections climatiques de l'activité cyclonique

Les simulations régionales disponibles (ALADIN et ARPEGE-str) montrent une probable diminution du nombre total de systèmes dépressionnaires dans le sud-ouest de l'océan Indien, un nombre de systèmes intenses ou très intenses constant ou en hausse, et une probable augmentation du maximum d'intensité cyclonique. En outre, la bande de latitude où l'on observe actuellement les maximums d'intensité cyclonique devrait migrer vers le sud, se traduisant par un risque accru de passage d'un système dévastateur sur les îles sœurs. En outre, selon la relation physique de Clausius-Clapeyron, on peut s'attendre, dans le contexte du réchauffement climatique, à une intensification des précipitations au sein des systèmes dépressionnaires tropicaux au cours du 21^{ème} siècle.

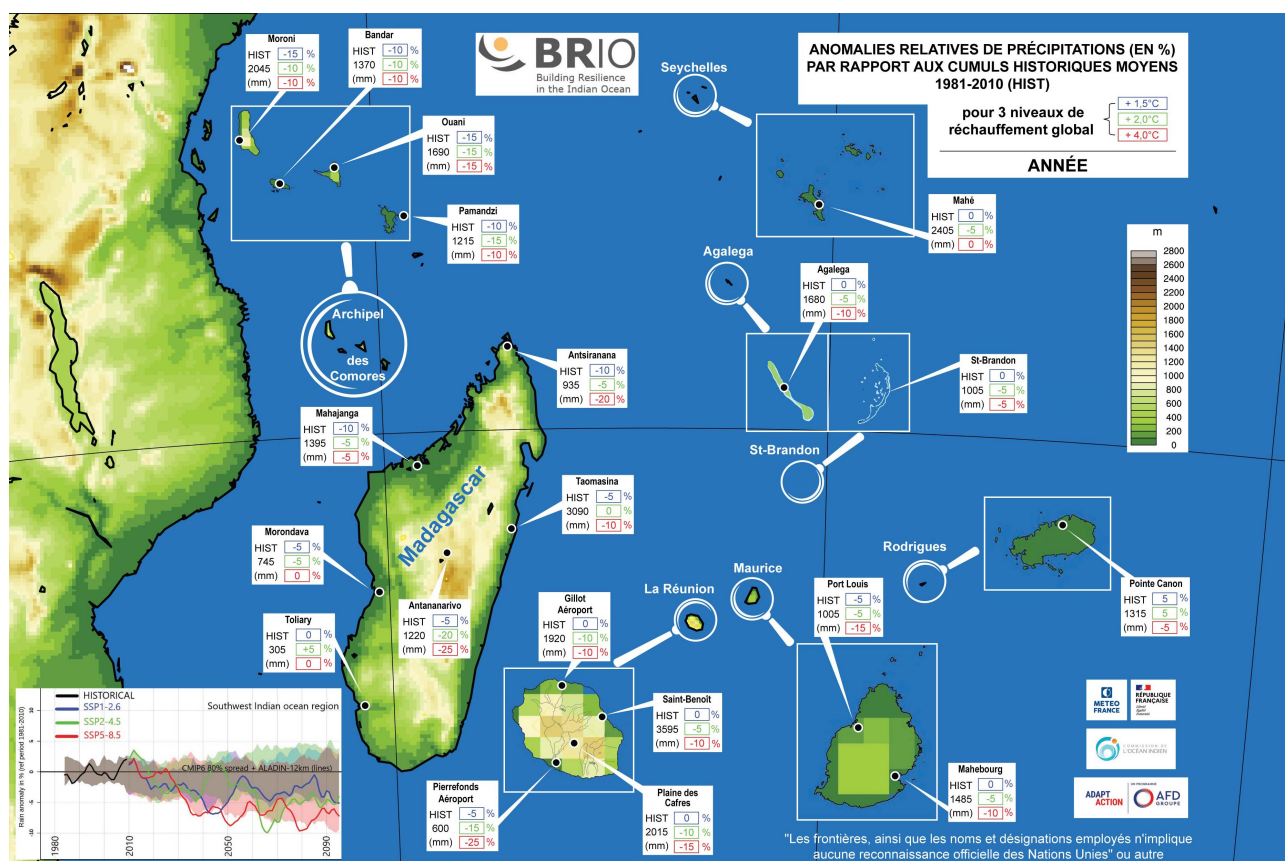


FIGURE 8.2 – Infographie synthétisant l'évolution des précipitations annuelles moyennes, en % par rapport à la normale 1981-2010, attendues en milieu et fin de siècle sur l'ensemble des pays de la COI pour 3 niveaux de réchauffement planétaire, selon le modèle régional ALADIN. Les incertitudes issues de l'ensemble CMIP6 sont indiquées par les panaches de couleur du graphique en bas à gauche, pour chaque scénario SSP.

8.2. Projections climatiques sur le bassin SOOI et les îles

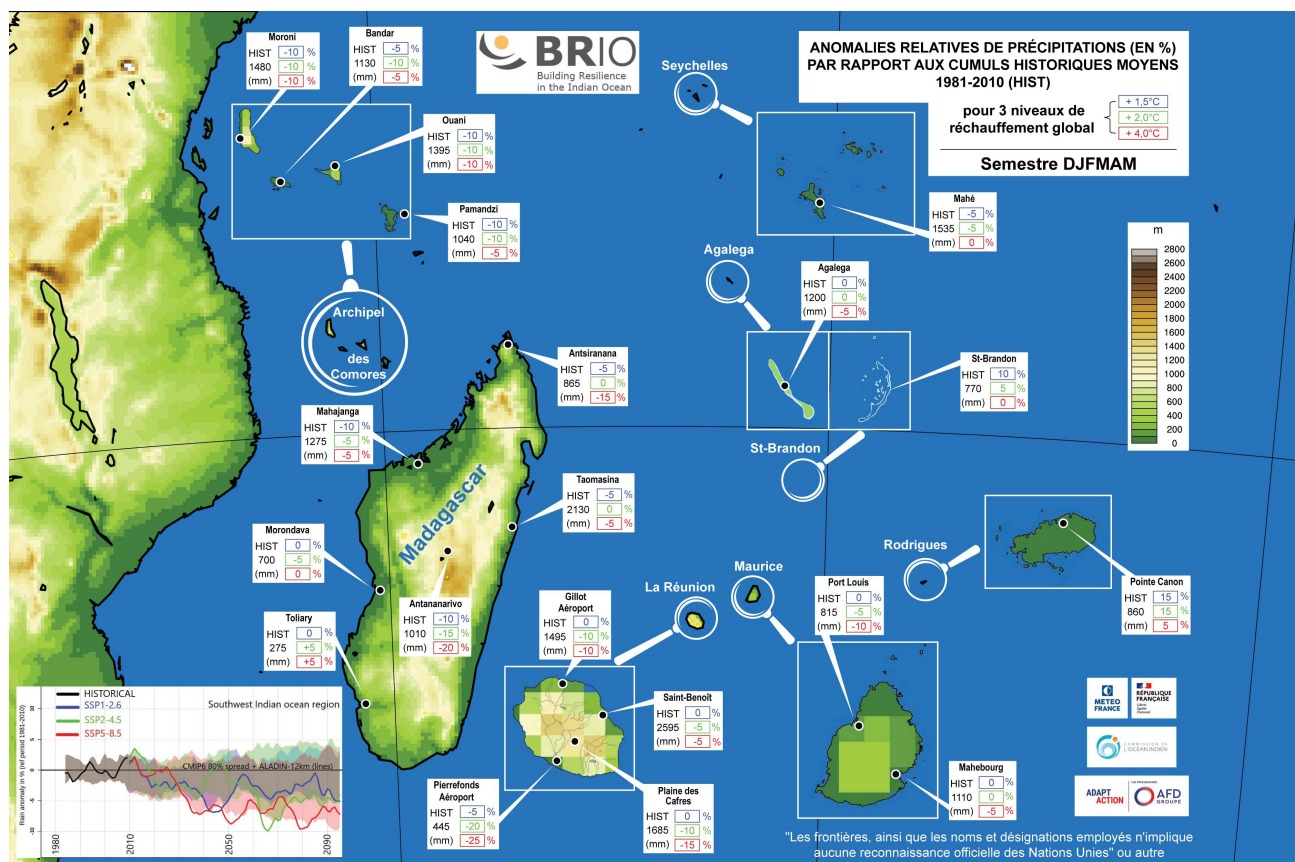


FIGURE 8.3 – Similaire à la figure 8.2 mais pour le cumul de précipitations en saison des pluies (de décembre à mai).

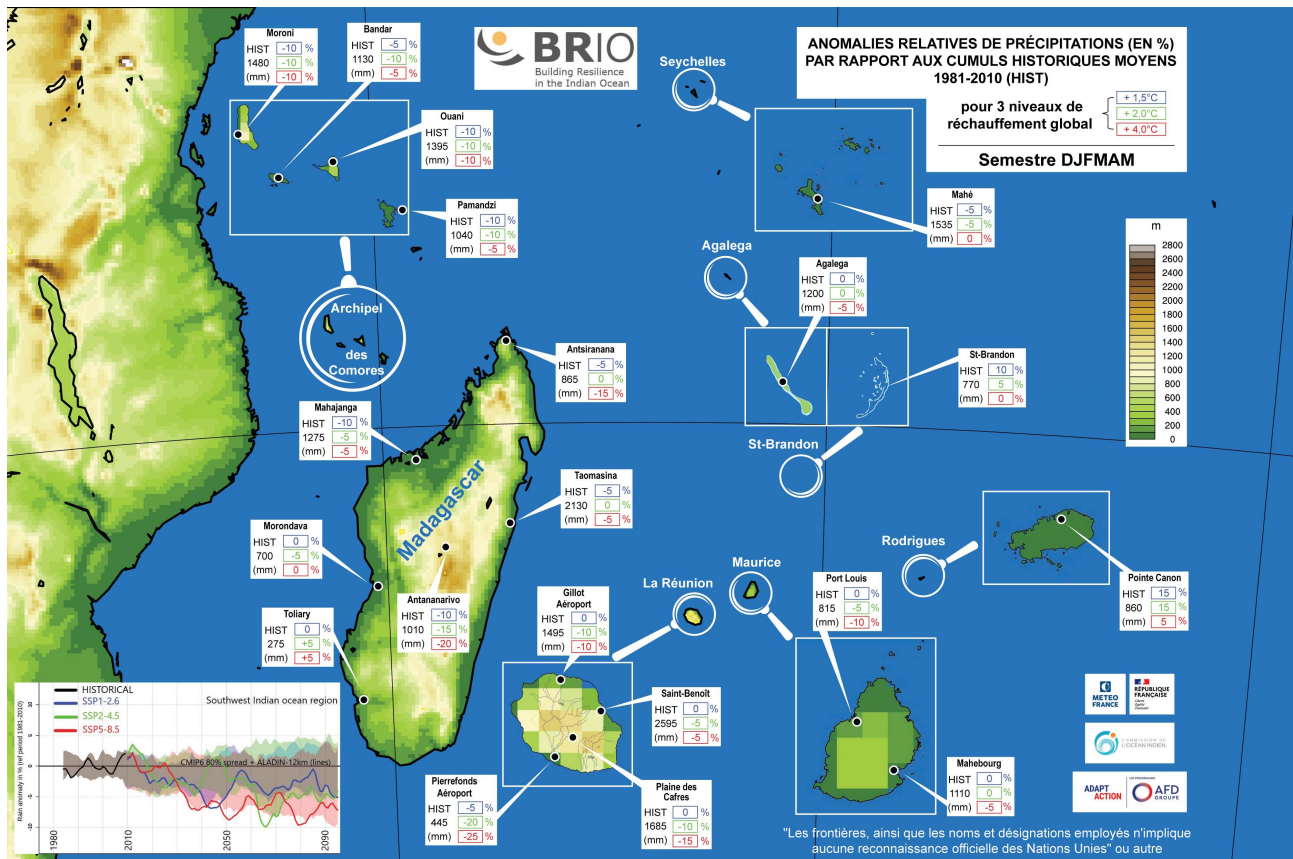


FIGURE 8.4 – Similaire à la figure 8.2 mais pour le cumul de précipitations sur le semestre couvrant les mois de juin à novembre.

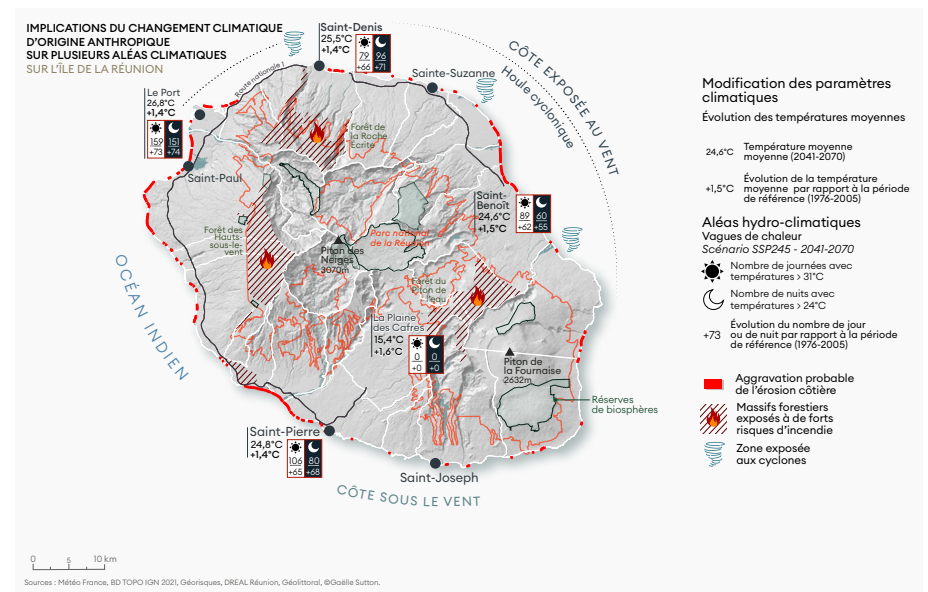


FIGURE 8.5 – Evolution des paramètres hydro climatiques sur l'île de La Réunion à l'horizon 2041-2070 dans le scénario SSP2-4.5. Source : rapport annuel 2021 du HCC avec contribution de Météo-France.

Chapitre 9

Conclusion et perspectives

Le projet **BRIO** aura bien été un succès. Il a impulsé, avec audace et ardeur, un élan aux états membres de la **COI** pour étudier l'évolution future du climat dans le sud-ouest de l'océan Indien (Fig. 9.2). C'est une première réalisation en matière de services climatiques sur le bassin pour orienter les stratégies d'adaptation. Les missions du projet ont couvert l'ensemble des volets climat, recherche, formation, communication et vulgarisation. **BRIO** a permis de faire coopérer les différents pays de la zone en vue de consolider les bases de données du climat passé sur la région (complétion et homogénéisation). Il a contribué à la montée en compétences de ces pays en formant des experts nationaux à des outils météorologiques et statistiques de pointe. Il a doté la zone sud-ouest de l'océan Indien de simulations climatiques à haute résolution permettant d'affiner régionalement les signaux passés et futurs du changement climatique sur l'ensemble des terres habitées comprenant des îles au relief très accidenté. Ces simulations ont été produites jusqu'à l'horizon 2100 pour trois scénarios d'émission de **GES** afin d'échantillonner l'incertitude climatique ; elles se basent sur les récentes simulations globales dont s'inspire le sixième rapport d'évaluation du **GIEC**. Les scénarios retenus couvrent toute la palette des émissions futures possibles de gaz à effet de serre : faibles (**SSP1-2.6**), modérées **SSP2-4.5**, et élevées (**SSP5-8.5**). Des méthodes innovantes ont été développées tout au long du projet pour créer des jeux de données de référence, corriger les biais du modèle à partir de ces jeux d'observations et pour échantillonner l'incertitude des modèles globaux sur les îles habitées du bassin ; le prototype de descente d'échelle statistique sur La Réunion saura être étendu aux autres îles.

Les résultats du projet offrent une riche expertise concernant les diagnostics du changement climatique dans le sud-ouest de l'océan Indien : des projections de température et précipitations sur le bassin et sur chaque état insulaire jusqu'à l'évolution future d'indicateurs climatiques dédiés aux secteurs météo-sensibles (santé, agriculture, biodiversité, etc.), en passant par les tendances en terme d'évolution cyclonique (fréquence et intensité) dans le bassin à divers horizons temporels. Ces diagnostics pourront soutenir les politiques publiques d'adaptation au changement climatique. Le portail régional du changement climatique pour le sud-ouest de l'océan Indien est né grâce au projet **BRIO**. C'est un service libre d'accès et gratuit pour rendre accessible à tous une vision intégrée du climat passé et futur, à l'échelle du bassin et des territoires insulaires habités. Il offre aux nombreux utilisateurs la possibilité de télécharger les données du projet pour les utiliser dans des études d'impact locaux. Une des ses portées est de vulgariser, sensibiliser, et inciter à atténuer et s'adapter.

Des partenariats ont déjà permis le calcul d'indicateurs agro-climatiques comme le déficit hydrique en période de végétation de la canne à sucre, ou d'évaluer la propagation future du virus de la dengue en couplant les projections d'**ALADIN** à un modèle de prédiction des densités du moustique tigre. Ces études d'impact s'inscrivent dans une démarche d'adaptation au changement climatique. Le portail continuera d'être alimenté dans le futur. La suite du projet **BRIO** s'insère dans le projet de grande ampleur **Hydromet** qui vise à renforcer la résilience régionale grâce à des services météorologiques, hydrologiques et climatiques améliorés dans les états insulaires de la **COI**.

En terme de modélisation numérique, ce travail a montré la pertinence et l'apport d'une descente d'échelle dynamique à 12 km de résolution sur les îles du sud-ouest de l'océan Indien avec un modèle régional. L'évaluation du modèle **ALADIN** a montré qu'il présente une bonne "climatologie" (i) des

systèmes dépressionnaires (nombre, trajectoires, intensités excessives corrigées), (ii) des précipitations sur le bassin (intensité et localisation de la ZCIT), et (iii) des précipitations sur les îles des pays de la COI (bonne spatialisation, quantités excessives corrigées). ALADIN apporte également une nette plus-value par rapport au modèle global CNRM-ESM2-1 pour les précipitations sur les îles grâce à une meilleure représentation du relief. A ce titre, ALADIN est capable de modifier le signal climatique du modèle global CNRM-ESM2-1 sur les îles (contraste sous-vent/au vent, distance à la côte, cyclones).

Les perspectives du projet BRIO sont nombreuses. Des projections hydrologiques produites par des instituts comme l'INRAE à partir des simulations haute résolution de BRIO verront certainement le jour. Des études d'impact pourront aboutir aux choix des futures cultures agricoles (rendements), à des diagnostics de risques pour les collectivités territoriales, à des démarches d'adaptation pour les entreprises météo-sensibles. L'incertitude climatique pourra continuer d'être échantillonnée : en étendant aux autres îles du bassin le prototype de descente d'échelle statistique développé sur La Réunion, en calculant les quantiles de chaque indicateur climatique à partir de cette descente d'échelle statistique, et en multipliant les expériences de descente d'échelle dynamique avec des simulations haute résolution ALADIN forcées par d'autres modèles coupleurs issus de CMIP6 ayant des signaux de précipitations et de température sur le bassin éloignés de ceux du modèle global utilisé ici (CNRM-ESM2-1).

Par ailleurs, une seconde descente d'échelle dynamique imbriquée en utilisant AROME-Climat (Caillaud et al. 2021, Lucas-Picher et al. 2022) à 2.5 km de résolution et 60 niveaux verticaux (configuration CNRM-AROME41t1) a été initiée en 2020. Le premier test s'est porté sur un domaine restreint autour de La Réunion (Fig. 9.1). Les simulations ont été réalisées sur la période historique 1991-2010 et la période future 2081-2100 pour le scénario SSP5-8.5. Ces simulations ont été initialisées et couplées par les sorties d'ALADIN-Climat. Nous analyserons ces premières simulations AROME-Climat pour voir l'intérêt d'une double descente d'échelle dynamique sur la zone (trio CNRM-ESM2-1/ALADIN/AROME) par rapport à une simple descente d'échelle dynamique (duo CNRM-ESM2-1/ALADIN). Quel est l'apport d'AROME sur la structure et l'intensité des systèmes tropicaux ? Quel est son apport sur la représentation des précipitations (en valeurs moyennes mais aussi en structures et en valeurs extrêmes) sur une île à fort relief comme La Réunion ? Après correction des biais à 3 km de résolution sur La Réunion, nous déterminerons si AROME apporte des informations supplémentaires pertinentes sur les signaux du changement climatique par rapport à la descente d'échelle dynamique (duo CNRM-ESM2-1/ALADIN) associée à la correction de biais à 3 km de résolution. Les coûts de calculs numériques liés à la très haute résolution ne permettent pas d'envisager un domaine de simulation plus grand. Néanmoins, si les projections climatiques futures dans le bassin pouvaient bénéficier de la mise en place d'un modèle à échelle fine, il serait envisageable de faire tourner AROME-Climat sur plusieurs petits domaines centrés sur les îles du bassin SOOI.

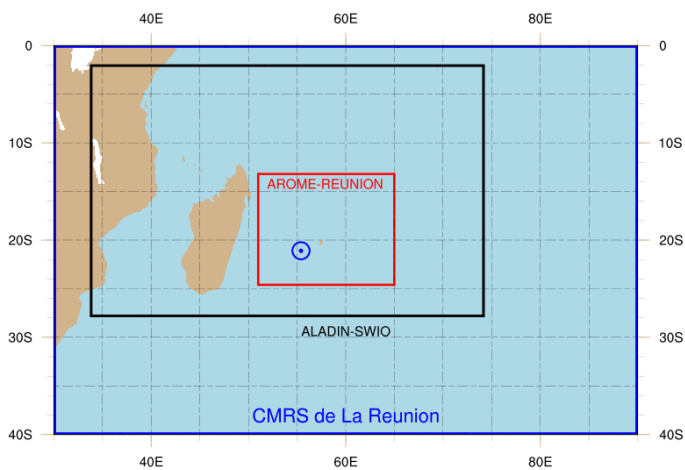


FIGURE 9.1 – Domaines des simulations *AROME-Climat* et *ALADIN-Climat* comparés à la zone de responsabilité du *CMRS* de La Réunion. La cible bleue désigne l'île de La Réunion.

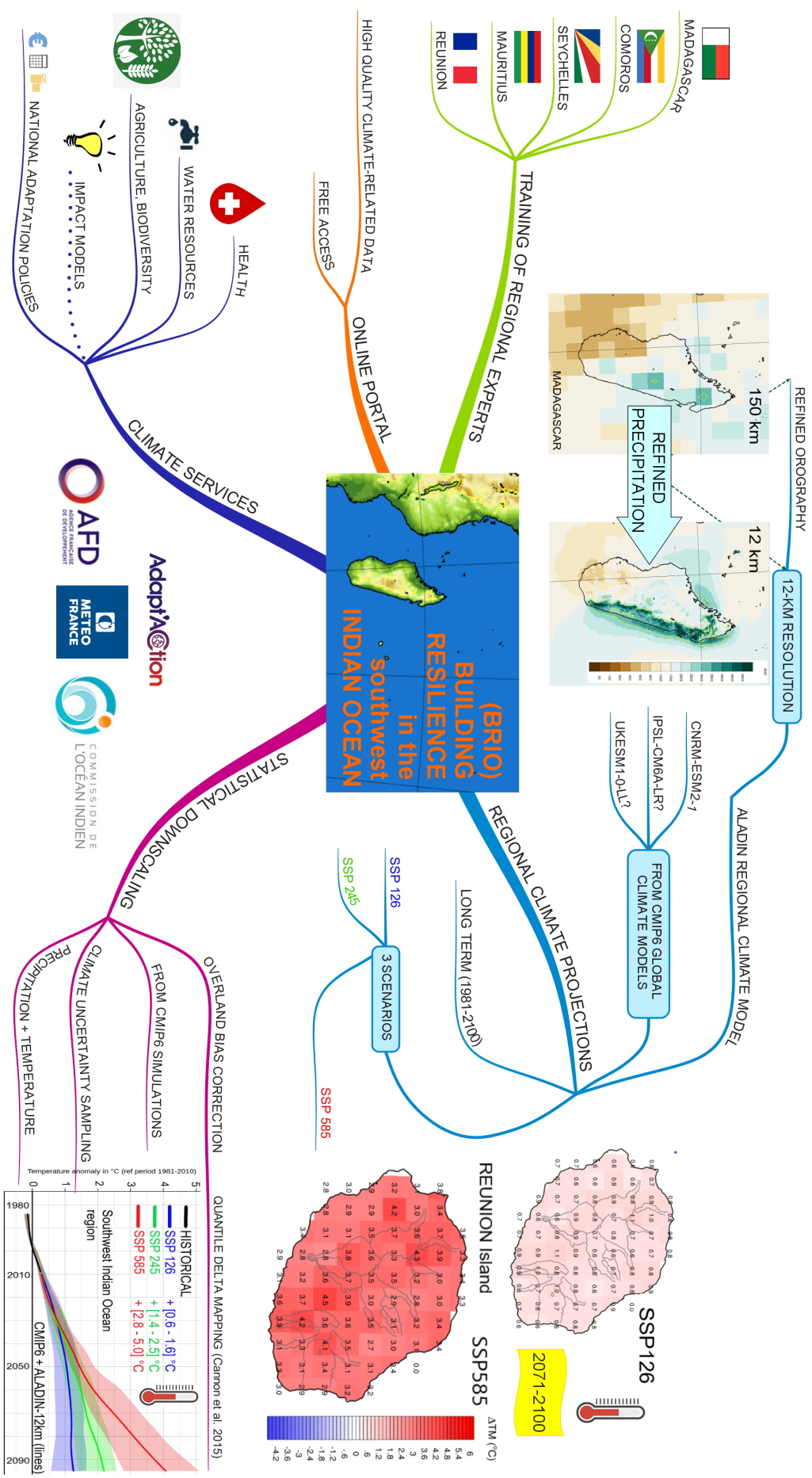


FIGURE 9.2 – Carte heuristique résumant les principaux tenants et aboutissants du projet BRIO.

Glossaire

ACCESS	the Australian Community Climate and Earth-System Simulator (modèle développé conjointement par le BoM et le CSIRO). 188
ADEME	Agence De l'Environnement et de la Maîtrise de l'Energie. 214
AERES	Agence d'Evaluation de la Recherche et de l'Enseignement Supérieur. 211
AETS	Application Européenne de Technologies et de Services. 215
AFD	Agence Française pour le Développement. 30 , 211 , 212 , 287 , 288
ALADIN	Aire Limitée Adaptation dynamique Développement InterNational. 8 , 11–16 , 31–36 , 39 , 41–51 , 54 , 55 , 71 , 72 , 78 , 95 , 100 , 102–113 , 115–122 , 124 , 126 , 127 , 131–133 , 135 , 137 , 139 , 141–148 , 153 , 154 , 159 , 160 , 162 , 164–166 , 168–176 , 179–186 , 188 , 189 , 193 , 194 , 198 , 204 , 213 , 214 , 217 , 225 , 239–241 , 245–247 , 287 , 288
AMJ	Avril Mai Juin. 145 , 191
AMS	American Meteorological Society. 211
ANACM	Agence Nationale de l'Aviation Civile et de la Météorologie. 2
AOGCM	Atmosphere-Ocean General Circulation Model. 13–16 , 18
AR	Assessment Report. 5 , 6 , 240
AREU	Agricultural Research and Extension Unit - Maurice. 215
AROME	Applications de la Recherche à l'Opérationnel à Méso-Echelle (Applications of Research to Operations at Mesoscale). 246 , 247
ARPEGE	Action de Recherche Petite Echelle Grande Echelle. 13 , 31 , 33–35 , 41 , 44–47 , 122 , 141–144 , 241
ARR	Assemblée Régionale de Rodrigues. 215
ASTRE	Animal - Santé - Territoires - Risques - Ecosystèmes. 226
AWS	Automatic Weather Stations. 74 , 80
BoM	Bureau of Meteorology (organisme météorologique national Australien). 249
BRIO	Building Resilience in the Indian Ocean. 1 , 2 , 4 , 8 , 15 , 18–20 , 23 , 24 , 30–37 , 41 , 71 , 72 , 90 , 91 , 141 , 178 , 188 , 209 , 211–215 , 226 , 240 , 245 , 246 , 248 , 287 , 288
BRLI	BRL Ingénierie de l'Eau et de l'Environnement. 216
CASUD	Communauté d'Agglomération du SUD Ile de La Réunion. 214
CAUE	Conseil d'Architecture d'Urbanisme et de l'Environnement. 215
CC	Changement Climatique. 214–216
CCNUCC	Convention-cadre des Nations unies sur les changements climatiques. 212 , 215
CDF	Cumulative Distribution Function. 99–101 , 114 , 115
CDF-t	Cumulative Distribution Function - Transform. 21 , 98 , 100 , 101 , 197
CDN	Contribution Déterminée au niveau National. 215
CENRADERU	CENtre National de Recherches Appliquée au DEveloppement RUral - Madagascar. 215
CEPMMT	Centre Européen de Prévision Météorologique à Moyen Terme). 45 , 197 , 250
CERFACS	Centre Européen de Recherche et de Formation Avancée en Calcul Scientifique. 21
CHIRP	Climate Hazards Group InfraRed Precipitation. 63 , 64

CHIRPS	Climate Hazards Group InfraRed Precipitation with Stations. 64
CINOR	Communauté intercommunale du nord de La Réunion. 212 , 214
CIRAD	Centre de coopération Internationale en Recherche Agronomique pour le Développement. 214–217 , 226
CIREST	Communauté Intercommunale Réunion Est. 212 , 214
CMIP	Coupled Model Intercomparison Project. 2 , 3 , 14–17 , 20 , 21 , 23 , 24 , 30 , 31 , 34–36 , 124 , 185 , 186 , 188–194 , 197 , 198 , 200 , 204 , 205 , 212 , 225 , 238–242 , 246 , 287 , 288
CMRS	Centre Météorologique Régional Spécialisé (RSMC en anglais). 3 , 8 , 26–28 , 44 , 247
CNRM	Centre National de Recherches Météorologiques. 9 , 21 , 30 , 31 , 33–36 , 39 , 41–43 , 45 , 46 , 48–52 , 54 , 55 , 137 , 139 , 158 , 185 , 186 , 188 , 189 , 193 , 212–214 , 225 , 239 , 240 , 246 , 287 , 288
COI	Commission Océan Indien. 1 , 16 , 17 , 23 , 30 , 32 , 33 , 124 , 125 , 158 , 178 , 185 , 186 , 188 , 189 , 192 , 193 , 211 , 212 , 214 , 238–240 , 242 , 245 , 246 , 288
COP	Conférence des Parties. 5 , 6 , 8 , 10
CORDEX	Coordinated Regional Climate Downscaling Experiment. 19–21 , 32
CPGU	Cellule de Prévention et Gestion des Urgences - Madagascar. 215
CSIRO	Commonwealth Scientific and Industrial Research Organisation. 249
CT	Cyclone Tropical. 28
CTI	Cyclone Tropical Intense. 28
CTTI	Cyclone Tropical Très Intense. 28 , 41
CWA	Central Water Authority - Maurice. 215
DAAF	Direction de l'Alimentation de l'Agriculture et de la Forêt de La Réunion. 214
DEAL	Direction de l'Environnement de l'Aménagement et du Logement de La Réunion. 212 , 214–216
DGM	Direction Générale de la Météorologie. 2 , 62–65
DGRIS	Direction Générale des Relations Internationales et de la Stratégie - ministère des Armées. 214
DIROI	Direction Interrégionale pour l'Océan Indien. 2 , 30 , 217 , 250
DRIAS	Donner accès aux scénarios climatiques Régionalisés français pour l'Impact et l'Adaptation de nos Sociétés et environnement. 21 , 22 , 99 , 213
DT	Dépression Tropicale. 28
EC	Etudes et Climatologie - division de la DIROI . 2
ECDF	Empirical Cumulative Distribution Function. 85
EGU	European Geosciences Union. 211
ENSO	El Niño Southern Oscillation. 24 , 25
ERA-Interim	réanalyses globales du CEPMMT à la troncature T255 L60 (résolution horizontale d'environ 80 km et 60 niveaux verticaux) de 1979 à nos jours par pas de 6 h et avec assimilation 4D-Var. 16 , 45 , 46 , 48 , 197 , 198
ESGF	Earth System Grid Federation. 15 , 185
ESM	Earth System Model. 33–36 , 185 , 186 , 188 , 189 , 193 , 239 , 240
ETM	EvapoTranspiration Maximale. 218
ETP	EvapoTranspiration Potentielle. 71 , 217
ETR	EvapoTranspiration Réelle. 218–220 , 222 , 226

FAO	Food and Agriculture Organization of the United Nations. 217
GCM	General Circulation Model. 12 , 19 , 21 , 23
GES	Gaz à Effet de Serre. 6–9 , 12 , 19 , 34 , 178 , 199 , 204 , 238 , 241 , 245
GIEC	Groupe d’experts Intergouvernemental sur l’Evolution du Climat. 1 , 5–11 , 13–15 , 23 , 34 , 240 , 245
GMGEC	Groupe de Météorologie de Grande Échelle et Climat. 212
GPM	Global Precipitation Measurement. 51
HCC	Haut Conseil pour le Climat. 215 , 244
IDW	Inverse Distance Weighted - pondération par l’inverse de la distance. 77 , 79
IMERG	Integrated Multi-SatellitE Retrievals for GPM. 51
INRAE	Institut National de Recherche pour l’Agriculture - l’alimentation et l’Environnement. 226 , 246
IOC	Indian Ocean Commission. 287
IOD	Indian Ocean Dipole. 25
IPCC	Intergovernmental Panel on Climate Change. 5
IPSL	Institut Pierre-Simon Laplace. 21 , 100 , 188
IRD	Institut de Recherche pour le Développement. 216
IRI	International Research Institute for Climate and Society. 62 , 63
IRIS	Institut de Relations Intenationales et Stratégiques. 214
JAS	Juillet Août Septembre. 148–151 , 153 , 167 , 185 , 187 , 190 , 191 , 194 , 240 , 241
JFM	Janvier Février Mars. 152 , 167 , 170 , 185 , 191 , 197 , 217 , 239 , 240
JICA	Japan International Cooperation Agency. 25
JIR	Journal de l’Ile de la Réunion. 211
JMA	Japan Meteorological Agency. 63
JTWC	Joint Typhoon Warning Center. 28
KNN	K-nearest neighbors. 62
LACy	Laboratoire de l’Atmosphère et des Cyclones. 31 , 215 , 216 , 226
LE2P	Laboratoire d’Energétique électronique et Procédés. 216
MACATIA	Modeling Assessment of Climate change hAzard in The Indian oceAn. 173 , 216 , 226
MAE	Mean Absolute Error - erreur absolue moyenne. 197
MCIA	Mauritius Canes Industry Authority. 215
MJO	Madden-Julian Oscillation. 25
MMS	Mauritius Meteorological Services. 2 , 74 , 80 , 81
MOSICAS	Modèle de croissance de la canne à sucre. 226
NASA	National Aeronautics and Space Administration. 51
NDRRMC	National Disaster Risk Reduction and Management Council. 215
NHC	National Hurricane Center. 28
NOAA	National Oceanic and Atmospheric Administration. 25

OCDE	Organisation de Coopération et de Développement Économiques. 212
OMM	Organisation Mondiale de la Météorologie. 1 , 5 , 14 , 26 , 28 , 58 , 178
OND	Octobre Novembre Décembre. 145 , 152 , 161 , 163 , 185 , 187 , 190 , 191 , 194 , 196 , 240 , 241
ONF	Office National des Forêts. 214
ONG	Organisation Non Gouvernementale. 216
ONU	Organisation des Nations Unies. 215
PAM	Programme Alimentaire Mondial. 215
PCAET	Plan Climat Air Energie Territorial. 212 , 214
PCCB	Paris Committee on Capacity-building. 212
PDF	Probability Distribution Function. 99 , 101
PIMENT	laboratoire de Physique et d'Ingénierie Mathématique pour l'Energie l'environnement et le bâtiment. 216
PIMIT	Processus Infectieux en Milieu Insulaire Tropical. 226
PT	Perturbation Tropicale. 28
PVBMT	Peuplements Végétaux et Bioagresseurs en Milieu Tropical. 214 , 216
RCM	Regional Climate Model. 18 , 19 , 21 , 23
RCP	Representative Concentration Pathways. 8–12 , 21 , 34 , 141 , 142 , 144 , 185
RDU	Réserve Difficilement Utilisable. 217 , 218 , 223 , 226
RFU	Réserve Facilement Utilisable. 217 , 218 , 223 , 226
RMSE	Root Mean Square Error - erreur quadratique moyenne. 77 , 79 , 197
RSMC	Regional Specialized Meteorological Centre. 27 , 250
RU	Réserve Utilisable. 217 , 219 , 221 , 225 , 226
SDAGE	Schéma Directeur d'Aménagement et de Gestion des Eaux. 212 , 215
SELMET	Systèmes d'ELevage MEditerranéens et Tropicaux. 215
SMA	Seychelles' Meteorological Authority. 2
SOOI	Sud-Ouest de l'Océan Indien. 1 , 8 , 9 , 24 , 28–30 , 34 , 39 , 45 , 190 , 213 , 226 , 235 , 246
SRES	Special Report on Emissions Scenarios. 7
SSP	Shared Socioeconomic Pathways. 10–17 , 22 , 24 , 34 , 35 , 95 , 105 , 106 , 117 , 118 , 121 , 125–137 , 141–166 , 168–177 , 179–185 , 188–192 , 194 , 198 , 200–203 , 205–208 , 213 , 214 , 220–226 , 238–241 , 244–246 , 287 , 288
SWIOCOF	South-West Indian Ocean Climate Outlook Forecast. 32
TAMSAT	Tropical Applications of Meteorology using SATellite data and ground-based observations. 63
TCR	Transient Climate Response. 188
TETIS	Territoires - Environnement - Télédétection et Information spatiale. 226
TMPA	TRMM Multi-satellite Precipitation Analysis. 51
TRMM	Tropical Rainfall Measuring Mission. 51
TT	Tempête Tropicale. 28
UKMO	United Kingdom Meteorological Office. 188
UMR	Unité Mixte de Recherche. 215 , 216
UNESCO	The United Nations Educational Scientific and Cultural Organization. 214

WCRP	World Climate Research Program. 14 , 20
WRU	Water Resources Unit - Maurice. 215
ZCIT	Zone de Convergence Inter-Tropicale. 26 , 27 , 41 , 45 , 46 , 51 , 83 , 246

Bibliographie

- Allen, R., L. Pereira, D. Raes, et M. Smith, 1998 : FAO Irrigation and Drainage Paper : Crop Evapotranspiration, guidelines for computing crop water requirements. Tech. rep.
- Amélie, V., 2021 : Climate Change Scenarios for the Seychelles. Tech. rep., Seychelles' Meteorological Authority, 92 pp.
- Bessafi, M., B. Morel, J.-D. L. S. Luk, J.-P. Chabriat, et P. Jeanty, 2013 : A Method for Mapping Monthly Solar Irradiation Over Complex Areas of Topography : Réunion Island's Case Study. *Springer, Climate Smart Technologies - Integrating Renewable Energy and Energy Efficiency in Mitigation and Adaptation Responses*, In : Leal Filho W., Mannke F., Mohee R., Schulte V., Surroop D. (eds), Vol. Climate Change Management, 295–306, URL http://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-642-37753-2_22.
- Beucher, F., 2010 : *Météorologie tropicale : des alizés au cyclone - Tome 1*. Cours et manuels 19, Météo-France, 1–476 pp.
- Bérard, A., 2021 : Changements futurs de la ressource en eau des sols à la Réunion sous culture de canne à sucre. Rapport de stage M2, Météo-France/ENM, 43 pp.
- Caillaud, C., S. Somot, A. Alias, I. Bernard-Bouissières, Q. Fumière, O. Laurantin, Y. Seity, et V. Ducrocq, 2021 : Modelling Mediterranean heavy precipitation events at climate scale : an object-oriented evaluation of the CNRM-AROME convection-permitting regional climate model. *Clim. Dynam.*, **56**, 1717–1752, URL <https://doi.org/10.1007/s00382-020-05558-y>.
- Cannon, A. J., S. R. Sobie, et T. Q. Murdock, 2015 : Bias Correction of GCM Precipitation by Quantile Mapping : How Well Do Methods Preserve Changes in Quantiles and Extremes? *J. Climate*, **28** (17), 6938–6959, doi :10.1175/JCLI-D-14-00754.1, URL <https://journals.ametsoc.org/view/journals/clim/28/17/jcli-d-14-00754.1.xml>.
- Charron, I., 2016 : Guide sur les scénarios climatiques : Utilisation de l'information climatique pour guider la recherche et la prise de décision en matière d'adaptation. Technical reference manual,, Ouranos, 94 pp. [Available at https://www.ouranos.ca/wp-content/uploads/GuideScenarios2017_FR.pdf].
- Chauvin, F., J.-F. Royer, et M. Déqué, 2006 : Response of hurricane-type vortices to global warming as simulated by ARPEGE-Climat at high resolution. *Clim. Dynam.*, **27**, 377–399, doi :10.1007/s00382-006-0135-7, URL <https://doi.org/10.1007/s00382-006-0135-7>.
- DaLA, 2013 : Seychelles Damage, Loss, and Needs Assessment (DaLA). Tech. rep.
- Daniel, M., A. Lemonsu, M. Déqué, S. Somot, A. Alias, et V. Masson, 2019 : Benefits of explicit urban parametrization in regional climate modelling to study climate and city interactions. *Clim. Dynam.*, **52** (50), 2745–2764, doi :10.1007/s00382-018-4289-x, URL <http://link.springer.com/article/10.1007/s00382-018-4289-x>.

- Déqué, M. et al., 2007 : Frequency of precipitation and temperature extremes over France in an anthropogenic scenario : model results and statistical correction according to observed values. *Global Planet. Change*, **57**, 16–26.
- Douville, H., 1992 : Utilisation d'un modèle numérique de terrain pour le calcul de champs pluviométriques en zone montagneuse. application de la méthode à l'île de la réunion. Tech. rep., Météo-France/Direction Interrégionale pour l'Océan Indien, 151 pp.
- DRIAS, 2020 : Les nouvelles projections climatiques de référence DRIAS 2020 pour la métropole. Technical reference manual,, Météo-France/DCSC, 98 pp. [Available at <http://www.drias-climat.fr/document/rapport-DRIAS-2020-red3-2.pdf>].
- Giorgi, F., 2006 : Climate change hot-spots. *Geophys. Res. Lett.*, **33**, L08 707, doi :10.1029/2006GL025734.
- Goodman, S. M., 2008 : Paysage naturels et biodiversité de madagascar. Tech. rep., Muséum national d'Histoire naturelle, Paris ; WWF, Antananarivo, 694 p.
- Hersbach, H., et al., 2019 : Global reanalysis : goodbye ERA-Interim, hello ERA5. *Meteorology*, **159**, 17–24, doi :10.21957/vf291hehd7, URL <https://www.ecmwf.int/node/19027>.
- Huffman, G. J. et Coauthors, 2007 : The TRMM Multisatellite Precipitation Analysis (TMPA) : Quasi-global, multiyear, combined-sensor precipitation estimates at fine scales. *J. Hydrometeor.*, **8**, 38–55.
- Huffman, G. J., et al., 2019 : Algorithm theoretical document ; NASA GPM ; Integrated Multi-satellite retrievals for GPMs. NASA technical document ATBD V06,, 38 pp. [Available at https://pmm.nasa.gov/sites/default/files/document_files/IMERG_ATBD_V06_0.pdf].
- IPCC, 2013 : *Climate Change 2013 : The Physical Science Basis, Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Edited by Stocker, T. F., Qin, D., Plattner, G.-K., Tignor, M., Allen, S. K., Boschung, J., Nauels, A., Xia, Y., Bex, V., and Midgley, P. M., Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 1535 pp.
- IPCC, 2021 : *Climate Change 2021 – The physical science basis*. 3949 pp.
- Jumaux, G., H. Quetelard, et D. Roy, 2011 : Atlas climatique de la réunion. Tech. rep., Météo-France/Direction Interrégionale pour l'Océan Indien.
- Kiehl, J. T. et K. E. Trenberth, 1997 : Earth's Annual Global Mean Energy Budget. *Bulletin of the American Meteorological Society*, **78** (2), 197–208, doi :10.1175/1520-0477(1997)078<0197:EAGMEB>2.0.CO;2, URL https://journals.ametsoc.org/view/journals/bams/78/2/1520-0477_1997_078_0197_eagmeb_2_0_co_2.xml.
- Kossin, J. P., K. A. Emanuel, et G. A. Vecchi, 2014 : The poleward migration of the location of tropical cyclone maximum intensity. *Nature*, **509**, 349–352, doi :https://doi.org/10.1038/nature13278.
- Kotlarski, S., K. Keuler, O. B. Christensen, A. Colette, et al., 2014 : Regional climate modeling on European scales : a joint standard evaluation of the EURO-CORDEX RCM ensemble. *Geoscientific Model Development*, **7** (4), 1297–1333.

- Kotomangazafy, S. F., 2021 : Scenarios of Climate Change for Madagascar using High Resolution Regional Climate Simulation (ALADIN-Climat v6). *Extended abstracts, 34th Conference on Hurricanes and Tropical Meteorology*, 10 – 14 May, Online, Amer. Meteor. Soc., CD-ROM, 11B.10, [Abstract étendu disponible sur <https://ams.confex.com/ams/34HURR/meetingapp.cgi/Paper/372391>].
- Kotomangazafy, S. F., M.-D. Leroux, et F. Bonnardot, 2021 : Scénarios du Changement Climatique à Madagascar en utilisant les Simulations Climatiques Régionales à Haute Résolution (ALADIN-Climat V6). Tech. rep., Direction Générale de la Météorologie, Madagascar, 76 pp.
- Kotomangazafy, S. F., M.-D. Leroux, et F. Bonnardot, 2022 : Scenarios of climate change for Madagascar using high resolution regional climate simulation (ALADIN-Climat v6). *J. Climate*, **Submitted**.
- Leroux, M. D. et F. Bonnardot, 2019 : Climate change in the southwest Indian ocean : observations and projections. *Island Biology*, 8 – 13 July, Saint Denis, La Reunion, CD-ROM, 7029, [<https://ib2019.sciencesconf.org/253693>].
- Leroux, M. D. et F. Bonnardot, 2022 : Climate change in the southwest Indian Ocean from CMIP6 downscaled data. *35th Conference on Hurricanes and Tropical Meteorology*, 9 – 13 May, New Orleans, Louisiana, Amer. Meteor. Soc., CD-ROM, 1B.6, [<https://ams.confex.com/ams/35Hurricanes/meetingapp.cgi/Paper/402046>].
- Leroux, M.-D., F. Bonnardot, S. Kotomangazafy, P. Veerabadren, A. O. Ridhoine, S. Somot, et A. Alias, 2022 : Climate change and climate services for the southwest Indian ocean from CMIP6 high resolution downscaling. *Meteorology*, **In preparation**.
- Leroux, M. D., F. Bonnardot, S. Kotomangazafy, P. Veerabadren, A. O. Ridhoine, S. Somot, A. Alias, et F. Chauvin, 2021 : Regional climate projections and associated climate services in the southwest Indian ocean basin. *Extended abstracts, EGU General Assembly 2021*, 19 – 30 Apr, online, CD-ROM, 7029, [Abstract étendu disponible sur : https://presentations.copernicus.org/EGU21/EGU21-7029_presentation.pdf].
- Leroux, M.-D., J. Meister, D. Mekies, A.-L. Dorla, et P. Caroff, 2018 : A Climatology of Southwest Indian Ocean Tropical Systems : Their Number, Tracks, Impacts, Sizes, Empirical Maximum Potential Intensity, and Intensity Changes. *J. Appl. Meteor. Climatol.*, **57** (4), 1021–1041, doi :10.1175/JAMC-D-17-0094.1, URL <https://doi.org/10.1175/JAMC-D-17-0094.1>, <https://doi.org/10.1175/JAMC-D-17-0094.1>.
- Lucas-Picher, P., et al., 2022 : Evaluation of the convection-permitting regional climate model CNRM-AROME41t1 over northwestern Europe. *Clim. Dynam.*, **in revision**, URL https://assets.researchsquare.com/files/rs-1393181/v1_covered.pdf?c=1646148070.
- Maraun, D., 2016 : Bias Correcting Climate Change Simulations - a Critical Review. *Current Climate Change Reports* 2, 211–220, doi :10.1007/s40641-016-0050-x.
- Michelangeli, P. A., M. Vrac, et H. Loukos, 2009 : Probabilistic downscaling approaches : Application to wind cumulative distribution functions. *Geophys. Res. Lett.*, **36**, 1–6.
- Morel, J., 2014 : Estimation de la biomasse de canne par modélisation et télédétection. Application à la Réunion. Thèse pour l'obtention du doctorat en agronomie, Université de La Réunion.

- Moss, R., J. Edmonds, K. Hibbard, et al., 2010 : The next generation of scenarios for climate change research and assessment. *Nature*, **463**, 747–756, doi :10.1038/nature08823.
- Nabat, P., et al., 2020 : Modulation of radiative aerosols effects by atmospheric circulation over the Euro-Mediterranean region. *Atmos. Chem. Phys.*, **20**, 8315–8349, doi :10.5194/acp-20-8315-2020, URL <https://acp.copernicus.org/articles/20/8315/2020/>.
- Neumann, C. J., 1993 : Global Overview. *Global Guide to Tropical Cyclone Forecasting*, World Meteorological Organization, Geneva, Switzerland, WMO/TC-No. 560, Report No. TCP-31, 1.1–1.56.
- O’Neill, B. C., et al., 2016 : The Scenario Model Intercomparison Project (ScenarioMIP) for CMIP6. *Geoscientific Model Development*, **9** (9), 3461–3482, doi :10.5194/gmd-9-3461-2016, URL <https://gmd.copernicus.org/articles/9/3461/2016/>.
- Ribes, A., 2009 : Détection statistique des changements climatiques. Thèse, Université Toulouse III - Paul Sabatier.
- Ridhoine, A. O., 2021 : Climate change in the Southwest Indian Ocean : observations and projections. *34th Conference on Hurricanes and Tropical Meteorology*, 10 – 14 May, Online, Amer. Meteor. Soc., CD-ROM, 11B.11, [<https://ams.confex.com/ams/34HURR/meetingapp.cgi/Paper/372666>].
- Ridhoine, A. O. S., M.-D. Leroux, et F. Bonnardot, 2021 : Changement climatique dans le Sud-Ouest de l’Océan Indien, observation et projection : cas de l’Archipel des Comores). Tech. rep., Agence Nationale de l’Aviation Civile et de la Météorologie, Comores, 185 pp.
- Rija, F., 2019 : Renforcement du Service d’Information Climatique MAPROOM de Madagascar pour répondre aux besoins des secteurs clés de développement. Tech. rep., Antananarivo : Meteo Madagascar.
- Séférian, R., P. Nabat, M. Michou, D. Saint-Martin, A. Voltaire, et J. C. et al., 2019 : Evaluation of CNRM Earth System model, CNRM-ESM2-1 : role of Earth system processes in present-day and future climate. *Journal of Advances in Modeling Earth Systems*, **11**, 4182–4227, doi :10.1029/2019MS001791.
- Veerabadren, P., 2021 : BRIO project : Report for the Republic of Mauritius. Tech. rep., Mauritius Meteorological Services, 311 pp.
- Veerabadren, P. J.-M., M. D. Leroux, et F. Bonnardot, 2021 : Climate Projection Towards the End of the Century for the Republic of Mauritius. *34th Conference on Hurricanes and Tropical Meteorology*, 10 – 14 May, Online, Amer. Meteor. Soc., CD-ROM, Poster Session 3 – Climate Change in the Tropics – Poster 88, [<https://ams.confex.com/ams/34HURR/meetingapp.cgi/Paper/372514>].
- Vrac, M., P. Drobinski, A. Merlo, M. Herrmann, C. Lavaysse, L. Li, et S. Somot, 2012 : Dynamical and statistical downscaling of the French Mediterranean climate : uncertainty assessment. *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.*, **12**, 2769–2784.
- WMO, 2017 : Global Guide to Tropical Cyclone Forecasting. World Meteorological Organization, WMO/TD-No. 1194, Geneva, URL <http://www.wmo.int/cycloneguide/pdf/Global-Guide-to-Tropical-Cyclone-Forecasting.pdf>.

Annexes

ANNEXE A.1 : NOTATIONS

TABLEAU A.1 – *Liste des variables et constantes employées dans le manuscrit (description, unités et valeurs)*

Variable-Constante	Description
CO_2	Dioxyde de carbone
RR	précipitations quotidiennes
TX	température maximale
TN	température minimale

ANNEXE A.2 : INTERVIEWS ÉCRITES DES EXPERTS PAR LA COI

Les nouveaux modèles pour nous sauver du dérèglement climatique.



Interview avec le prof. Vêlayoudom Marimoutou Secrétaire général de la Commission de l'océan Indien

La Commission de l'océan Indien (COI) est la seule organisation régionale africaine composée exclusivement d'îles. L'union fait la force face aux changements climatiques ?

Et cette union dépasse les frontières de l'Indianocéanie ! L'action face à cet enjeu planétaire est indispensable et forcément collective. C'est une mobilisation internationale, des États, de la société civile, des acteurs économiques et des citoyens qui est nécessaire. La COI est le véhicule de cette action collective au niveau régional. Les îles en développement sont les premières victimes des dérèglements climatiques alors qu'elles ne contribuent qu'à 0,03% des émissions de gaz à effet de serre !

DES NOUVEAUX MODÈLES ET MODES DE VIE

L'Indianocéanie est la troisième région du monde la plus exposée aux catastrophes naturelles. Comment se défendre ?

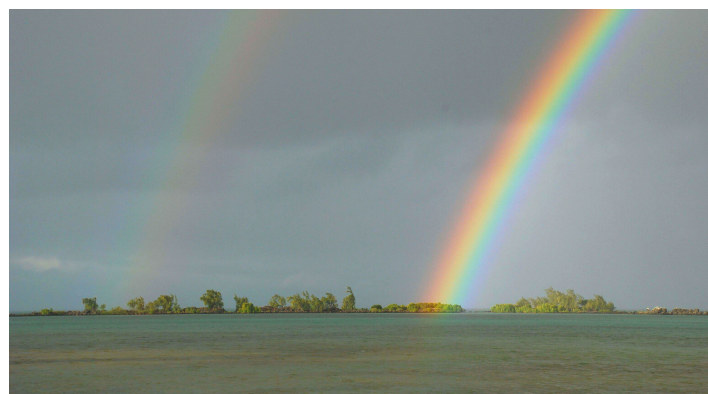


Il faut des politiques publiques, des stratégies et aussi de la recherche. Des politiques publiques et des stratégies pour définir de nouveaux modèles de production, de consommation, d'aménagement des territoires, de construction et de protection des infrastructures, de prévention et de réduction des risques de catastrophes, de gestion et de préservation des écosystèmes. C'est essentiel. Quant à la recherche scientifique, elle est primordiale pour accompagner la prise de décision, pour porter des solutions nouvelles, pour développer des technologies utiles. Et il faut aussi des modes de vie plus

sobres : c'est d'ailleurs aussi une des leçons de la pandémie de Covid-19 : on a appris la frugalité, on est revenu à des circuits courts, on a relâché la pression sur les écosystèmes.



La recherche scientifique est primordiale pour accompagner la prise de décision.



Pourquoi le changement climatique est-il une priorité pour vous ?

C'est une priorité pour tout le monde. Ou plutôt, il devrait l'être ! Il est question d'avenir : le mode de vie de populations entières est menacé, certaines communautés sont vouées à devenir des réfugiés climatiques, des zones basses risquent la disparition, les catastrophes naturelles gagnent en fréquence et en intensité. Le climat est dérégulé. C'est un fait. Ce qu'on doit atteindre, c'est une limitation drastique de ces dérèglements.

L'IMPORTANCE DES PROJECTIONS CLIMATIQUES

Le modèle de prévision météo ALADIN, 10 fois plus précis, est disponible grâce au projet BRIO. Son atout principal ?

C'est un modèle qui permet d'effectuer des projections climatiques à une échelle fine. On peut ainsi déterminer des probabilités d'évolution du climat, par exemple les précipitations et les températures, sur une zone agricole, une zone bâtie ou autre. Un géoportail sera mis en ligne et accessible pour tous les usagers. Ils pourront consulter les projections climatiques, accéder à des données sur les précipitations et les températures, ainsi qu'à d'autres informations utiles à leur activité.

Les simulations climatiques à haute résolution de ALADIN pourront-elles contribuer à la sécurité alimentaire ?



Je le crois mais cela suppose que les agriculteurs, les acteurs des filières, s'approprient cet outil, qu'ils y aient

accès et soient en mesure de lire les données. En cela, le rôle des administrations nationales est important comme des associations sectorielles qui peuvent être un relai d'information. Les projections sur une zone agricole peuvent indiquer une probabilité de sécheresse, ce qui est une information importante pour gérer la ressource en eau, adapter les pratiques culturales, éventuellement modifier les semences.



UN BON INVESTISSEMENT

Être préparés face aux chocs climatiques : cela veut-il dire qu'il faut attirer plus d'investissements ?

Oui, et notamment pour les infrastructures critiques, pour l'agriculture ou encore la préservation d'écosystèmes vitaux comme les récifs qui sont des contributeurs à l'économie, à la sécurité alimentaire et des barrières naturelles contre les fortes houles ou l'érosion. Et l'investissement est toujours payant. Une étude de la Banque mondiale montrait que pour 1 dollar investi dans la prévention des risques de catastrophe, on économise 4 dollars dans la gestion post-catastrophe et la reconstruction. C'est donc un bon investissement.



Pour 1 dollar investi dans la prévention, on économise 4 dollars dans la gestion post-catastrophe et la reconstruction.

Quelle pensée sur le climat vous semble significative aujourd'hui ?

"Il n'y a pas de plan B parce qu'il n'y a pas de planète B". C'est la formule de Ban Ki-Moon, l'ancien Secrétaire général de l'ONU. L'Accord de Paris, c'est le plan adopté par tous. Sa mise en œuvre effective n'est pas une option, c'est une responsabilité.

Le changement climatique pour vous en 1 seul mot ?

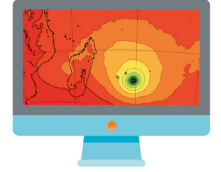
Dérèglement.



Vélayoudom Marimoutou est le Secrétaire général de la Commission de l'océan Indien (COI) qui regroupe l'Union des Comores, La Réunion (France), Madagascar, Maurice et les Seychelles. Le projet BRIO (Building Resilience in the Indian Ocean) est mis en œuvre par la COI et Météo France avec l'appui de la facilité Adapt'Action de l'Agence Française de Développement (AFD).



ALADIN, le « génie » de la météo pour anticiper les catastrophes naturelles



Interview avec Marie-Dominique Leroux
Chercheur climat de Météo France à la Reunion

Vous êtes une experte climatique. Quel proverbe ou quelle pensée sur le climat vous semble significatif aujourd'hui ?
Le climat est l'affaire de tous. Il faut agir aujourd'hui pour optimiser le climat dans lequel nous vivons dans quelques décennies.

LE MODÈLE ALADIN

ALADIN est un « génie de la météo », 10 fois plus précis que les modèles actuels. Présentez-le nous.

ALADIN-Climat est un modèle de climat régional capable d'affiner à une résolution de 12 km les projections climatiques d'un modèle global, typiquement de 150 à 200 km de résolution sur une zone d'intérêt comme le sud-ouest de l'océan indien.



ALADIN-climat est un modèle capable d'affiner à une résolution de 12 km les projections climatiques sur la zone de l'océan Indien.

LA CASCADE DES INCERTITUDES

Pourquoi est-il important de quantifier les incertitudes liées au changement climatique ?

Ceci est bien illustré par le graphe de la « cascade d'incertitude ». À chaque étape, les incertitudes spécifiques s'accroissent, conduisant à une cascade. Il est donc important de quantifier les incertitudes liées aux changements climatiques car les projections climatiques



se basent sur des scénarios futurs d'émission de gaz à effet de serre, qui dépendent de notre mode de vie futur.

Les incertitudes se multiplient si on cherche à régionaliser ou même géolocaliser les projections climatiques sur une zone d'intérêt plus restreinte, chaque étape présente des nouvelles imperfections.

L'Indianocéanie est la 3ème région du monde la plus exposée aux catastrophes naturelles. Comment se défendre?

L'idéal est de pouvoir anticiper les catastrophes naturelles à la fois sur le court terme (prévision météo) mais aussi sur le long terme (anticipation et adaptation) pour adapter notre infrastructure (habitat, ressources en eau, etc.) en réponse.

Comment le fait d'être capable de simuler les cyclones tropicaux avec une intensité très proche de la réalité va-t-il nous aider ?

Grâce aux observations des cyclones du passé on peut mieux appréhender les modifications du climat futur. Et, par conséquent, de mieux anticiper l'évolution des cyclones tropicaux et leur possible impact sur les zones habitées. Plus le modèle représente bien la distribution (fréquence et localisation) des cyclones du passé, plus il sera précis.

Le projet BRIO-Building Resilience in the Indian Ocean a mis en place le modèle Aladin-Océan Indien. Concrètement, qui va bénéficier de cet outil ?

L'outil de modélisation a été utilisé pour affiner les projections climatiques à l'échelle régionale. Des simulations ont été effectuées grâce aux supercalculateurs de Météo-France sur une majeure partie de la zone du Sud-Ouest de l'Océan Indien. Ces prévisions climatiques (températures, précipitations, indicateurs climatiques, vents, etc.) pourront être utilisés par les services météorologiques des pays participants au projet BRIO (Comores, Madagascar, Maurice, Seychelles). Les utilisateurs potentiels seront les services de l'Etat, décideurs, institutions internationales, ONGs, opérateurs du développement, chercheurs, organismes de développement, assurances, secteurs climato-sensibles comme l'agriculture et la santé, etc.

Ces prévisions climatiques pourront être utilisés par les services météorologiques des pays participant au projet BRIO (Comores, Madagascar, Maurice, Seychelles)

UN ACCÈS AUX DONNÉES CLIMATIQUES GRÂCE À UN GÉOPORTAIL

Quels services climatiques seront mis à disposition des usagers?

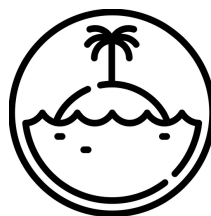
L'accès aux projections climatiques de long terme pour la zone sud-ouest Océan Indien sera possible librement via un géoportail. Ce portail contiendra des cartographies et histogrammes des divers paramètres climatiques (température, précipitations) ainsi que des indicateurs climatiques. On aura aussi la possibilité de zoomer sur une région ou une ville.



Le portail contiendra des cartographies et histogrammes des divers paramètres climatiques (température, précipitations) ainsi que des indicateurs climatiques.

Quels sont les premiers résultats du projet BRIO et quels sont les scénarios pour la région ?

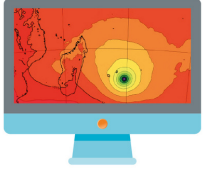
Dans le projet BRIO, les données régionales sont affinées à partir des simulations globales qui alimenteront le 6ème rapport d'évaluation du Groupe intergouvernemental d'experts sur l'évolution du climat (GIEC), prévue en 2021. Les premiers résultats du projet montrent un réchauffement de 3 à 5°C à la fin du 21ème siècle par rapport aux normales annuelles (1981-2010) sur le bassin, avec un réchauffement plus conséquent sur le continent africain et Madagascar, dans le scénario pessimiste, contre 1 à 2°C dans le scénario optimiste. Sur notre région, une baisse des précipitations est également attendue, avec un fort contraste saisonnier qui présage d'une probable augmentation de la fréquence des sécheresses dans le 2ème semestre. Une analyse est en cours pour qualifier l'évolution des phénomènes intenses (précipitations extrêmes et systèmes cycloniques) dans le bassin et leur impact sur les territoires habités.



Le changement climatique pour vous en 1 seul mot ?

Extrême.

Marie-Dominique Leroux est chercheur climat pour la Division Etudes et climatologie de Météo France à La Réunion et coordinatrice technique du projet BRIO. Le projet BRIO (Building Resilience in the Indian Ocean) est mis en oeuvre par Météo France et la Commission de l'Océan Indien (COI) avec l'appui de la facilité Adapt'Action de l'Agence Française de Développement (AFD).



ALADIN et la santé à Madagascar

Interview avec Stephason François Kotomangazafy
Directeur de la Météorologie Appliquée, Météo Madagascar



Vous êtes un expert climatique. Le changement climatique en une image ?

Je voudrais sélectionner pour vous cette image qui représente un assèchement de la rivière de l'Ikopa, qui assure l'alimentation en irrigation de la plaine d'Antananarivo. Le changement climatique est une réalité à Madagascar. Le pays se trouve parmi les plus vulnérables au niveau mondial.



Madagascar subit en moyenne 100 millions de dollars de pertes directes totales causées par les inondations et les cyclones tropicaux. Comment se défendre ?

Selon le dernier rapport de Météo Madagascar sur les tendances climatiques et les futurs changements climatiques, les précipitations annuelles sont en baisse presque partout à Madagascar, particulièrement dans les parties Est et Sud-Est. Les températures maximales et minimales augmentent jusqu'à 0,04°C et 0,05°C par an, respectivement.



L'apport de la haute résolution pour les îles à fort relief comme Madagascar est frappant.

UN PLAN DE CONTINGENCE NATIONALE

Chaque année, le plan de contingence national de notre pays est mis à jour en prenant en compte les leçons apprises des saisons précédentes, les versions révisés sont testées par des exercices de simulation. La toute première fois était en 2007, quand le gouvernement malgache à travers le Bureau National de Gestion des Risques et des Catastrophes (BNGRC) et ses partenaires ont élaboré un plan de contingence national sur les cyclones et les inondations.



Le modèle de prévision météo ALADIN, beaucoup plus précis que les modèles actuels pourra donc aider ?

L'apport de la haute résolution sur la distribution spatiale des précipitations pour les îles à fort relief comme Madagascar est frappant. Notre île-continent, compte 5 600 km de côte. ALADIN-Climat peut améliorer le cadre écologique, économique et de planification de la gestion intégrée des zones côtières à Madagascar. Dans le cadre du projet BRIO - Building Resilience in the Indian Ocean on utilise la sixième version d'ALADIN bénéficiant des toutes dernières évolutions de la physique du modèle. Du fait de sa résolution 12 fois plus fine, ALADIN est nettement plus réaliste et représente bien les 3 massifs principaux de Madagascar.

DETECTER LES MALADIES GRÂCE À L'INFO CLIMATIQUE

Les prévisions météo aident-elles aussi le secteur de la santé?



Plusieurs maladies infectieuses ou chroniques sont directement ou indirectement sensibles au climat. La gestion de cette sensibilité exige de nouvelles relations de travail plus efficaces entre le secteur santé et les fournisseurs de données et d'informations climatiques. ALADIN-Climat peut nous aider sur la fourniture et l'utilisation de produits d'informations climatiques pour la détection et la réponse précoces aux maladies telles que le paludisme et la peste.



ALADIN-Climat peut nous aider dans la détection et la réponse précoce aux maladies telles que le paludisme et la peste

Et pour l'agriculture ?

ALADIN-Climat peut aider Madagascar à se développer durablement avec le secteur Agriculture-Élevage-Pêche comme pilier d'une économie verte à vocation agricole, résilient aux effets du changement climatique, contribuant significativement au PIB, assurant l'autonomie alimentaire de la population rurale et urbaine, s'élargissant aux marchés extérieurs.

Où l'énergie ?

ALADIN-Climat peut nous aider à réaliser la Nouvelle Politique Énergétique (NPE) qui soutient la transition vers du mix de production pour l'électricité et l'éclairage, utilisant 80% de ressources renouvelables. Sa résolution lui permet de préciser la déclinaison des tendances climatiques de grande échelle sur des territoires Malagasy.

DES INDICATEURS CLIMATIQUES PRECIEUX

Quels services climatiques seront mis à disposition à Madagascar ?

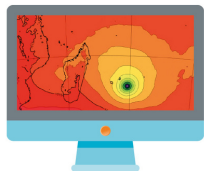
Comme résultat du projet BRIO, nous pouvons mettre à la disposition de tous les principaux secteurs d'activité impactés par le changement climatique des nouveaux jeux de données climatiques (précipitations et températures), des indicateurs climatiques standards (type OMM) et des indicateurs selon le besoin de chaque secteur.

Que devra-t-on faire pour accéder à ces données ?

Pour le moment, par contact direct au responsable national (moi) et d'ici peu nous procéderons à l'intégration de ces produits dans le *Maproom* climatique et de la société de Madagascar.



Stephason François Kotomangazafy, stephasonk@gmail.com, est Directeur de la Météorologie Appliquée, Météo Madagascar, Expert National du Projet BRIO à Madagascar. Le projet Building Resilience in the Indian Ocean (BRIO) est mis en oeuvre par Météo France et la Commission de l'océan Indien (COI) avec l'appui de la facilité Adapt'Action de l'Agence Française de Développement (AFD).



ALADIN et la gestion des risques à Maurice

Interview avec Philippe Veerabadren
Météorologue de la Station nationale de météorologie, Maurice



Vous êtes un expert climatique. Quelle phrase sur le climat vous semble significative?

Le climat ne connaît pas de frontières.

Maurice subit en moyenne 110 millions de dollars de pertes directes totales causées par les inondations et les cyclones tropicaux. Comment se défendre ?

En étant mieux préparés en terme de prévisions de ces phénomènes et de leurs intensités afin de minimiser leurs impacts néfastes.

LA PRÉPARATION NOUS A PERMIS DE SAUVER DES VIES



Lors des inondations, des sauveteurs et des ressources ont été mobilisés dans un centre spécialisé.

Quelle est l'importance du modèle de prévision météo ALADIN pour Maurice?

Il est très important car il produit des prévisions très fiables. Par exemple, quand le modèle de prévision météo ALADIN avait prévu des épisodes de fortes pluies, des sauveteurs et des ressources ont pu être mobilisés dans un centre spécialisé. Cette préparation nous a permis de sauver beaucoup de vies lors des inondations.

C'est le modèle à plus fine résolution qui existe pour notre région et c'est le seul capable de prévoir ces pluies très localisées et intenses qu'on l'appelle communément « Sea Breeze » à la station météo de Maurice.

INDICATEURS CLIMATIQUES POUR OPTIMISER LA PLANIFICATION

Le projet BRIO-Building Resilience in the Indian Ocean a mis sur place le modèle ALADIN. Quels services climatiques seront mis à disposition?

Des prévisions à long et moyen terme seront mises à disposition des secteurs climato-sensibles de Maurice dans le but de mieux adapter leurs stratégies face au changement climatique.



À titre d'exemple, le secteur foncier, le tourisme et la pêche sont les secteurs les plus touchés à Maurice. Comment pourront-ils bénéficier du modèle ALADIN?



Le modèle ALADIN fournit des données sur une large zone maritime qui seront utilisées pour la planification des campagnes de pêche.



Le secteur foncier et le tourisme vont bénéficier d'une prévision plus détaillée pour optimiser leur planification. Ces données



seront disponibles en juillet sur un géo-portail dédié.



UN SCÉNARIO PLUS PESSIMISTE POUR AGALÉGA



Quels sont les premiers résultats du projet BRIO et quels sont les scénarios envisagés?

Malheureusement, les résultats confirment le réchauffement climatique sur nos îles. Les scénarios varient selon les îles. Le plus pessimiste est celui d'Agaléga. Ces changements sont dans les normes des paramètres climatiques causés par l'activité irréfléchie de l'homme et qui perdure...



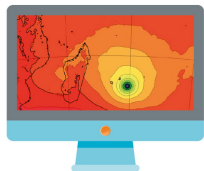
Le climatiseur : on pourrait le définir l'emblème du réchauffement climatique.

Quel est un objet qui, pour vous, représente le changement climatique ?

Le climatiseur. C'est un appareil devenu indispensable dans notre vie quotidienne à cause de la hausse des températures qui se fait sentir année après année. À cause de sa prolifération, on pourrait définir le climatiseur comme l'emblème du réchauffement climatique.

Philippe Veerabadren

Météorologue de la Station nationale de météorologie et expert national du projet BRIO à Maurice. Le projet BRIO (Building Resilience in the Indian Ocean) est mis en oeuvre par Météo France et la Commission de l'Océan Indien (COI) avec l'appui de la facilité Adapt'Action de l'Agence Française de Développement (AFD).



ALADIN et l'agriculture des Comores

Interview avec Abdoul-Oikil Saïd Ridhoine
Prévisionniste météo de l'ANACM



Vous êtes un expert climatique. Quelle pensée sur le climat vous semble significative aujourd'hui?

L'opération résilience et l'adaptation face au changement climatique.

Les Comores subissent en moyenne une perte directe annuelle moyenne de 5,7 millions de dollars due aux inondations et cyclones tropicaux. Comment se défendre ?

Durant ces 10 dernières années, certaines régions de nos îles ont dû subir des pertes considérables notamment en agriculture, en infrastructures et en biens matériels. Il est donc important de mener des opérations d'aménagement sur le territoire afin de s'adapter. Par exemple : construire des habitations résilientes ou sensibiliser à un reboisement massif sur le territoire.

Il est aussi essentiel de s'équiper d'outils d'analyse et de prévision pour prédire à l'avance les événements climatiques sévères.

ALADIN ET LE SECTEUR AGRICOLE

Le modèle de prévision météo ALADIN, 10 fois plus précis que les modèles actuels, pourra donc aider le secteur agricole aux Comores ?



Le modèle ALADIN est d'une importance majeure dans notre pays. Il arrive à nous fournir des informations pertinentes malgré la taille de nos îles. En s'inspirant de ce type de données

corrigées du modèle ALADIN, le secteur agricole pourra mener des études sur certains domaines qui auront un impact sur l'eau, sur l'agriculture mais aussi une adaptation de la gestion de l'eau, la protection des plantes et de l'aménagement des zones agricoles inondables.



Le modèle ALADIN est d'une importance majeure dans notre pays.



UN GÉOPORTAIL AVEC BRIO

Quels services climatiques seront mis à disposition par le projet BRIO-Building Resilience in the Indian Ocean?

Différents services climatiques seront mis à disposition : le service de la santé, de l'énergie, des risques naturels et de l'eau et de l'agriculture.



Par exemple, en agriculture, sachant que les résultats de projection prévoient une tendance à la baisse pour la précipitation, le secteur pourra se munir d'un système de stockage d'eau afin de répondre aux besoins d'irrigation des plantes si les pluies deviennent de plus en plus rares. Le secteur pourra aussi mener des études sur les zones agricoles vulnérables à la sécheresse et facilement inondables afin de s'adapter en cas d'inondations ou en cas de sécheresses.

Les données de ALADIN permettront des études afin de s'adapter en cas d'inondation ou de sécheresse.

Que devra-t-on faire pour accéder à ces données ?

L'accès aux projections climatiques de long terme pour la zone du sud-ouest de l'Océan Indien sera possible via un géo portail en ligne consultable gratuitement par les usagers concernés.

TROIS SCENARIOS POUR LES COMORES

Que prévoit ALADIN pour le futur des Comores?

La prévision des températures du modèle ALADIN dans les années à venir se prévoit à la hausse. Nous avons trois scénarios possibles. Pour tous les scénarios, le réchauffement moyen sera de l'ordre de 1.5°C vers le milieu du siècle et, pour le scénario le plus pessimiste, entre 3 et 4°C vers l'horizon 2100. Pour tous les scénarios, nous avons aussi une baisse progressive des cumuls des précipitations mais qui s'accroît surtout vers la fin du siècle.



Nous avons trois scénarios pour le futur : optimiste, moyen et pessimiste.

Les trois scénarios envisagés dans notre pays sont : **Scénario plus optimiste** avec une diminution progressive de l'émission de CO2 dès 2020, pour aboutir à Zéro carbone en 2080, ce qui est conforme aux accords de Paris (COP21).

Scénario moyen avec un maximum des émissions en 2050, avec une diminution progressive pour revenir à la situation d'aujourd'hui en 2085.

Scénario plus pessimiste où on ne fait rien pour réduire l'utilisation des énergies fossiles et à une multiplication par un facteur 6 des émissions de CO2 en 2080. C'est le pire scénario.

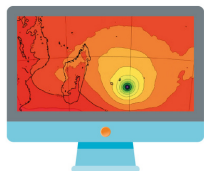


Le changement climatique pour vous en 1 seul mot ?

Sérieux.



Abdoul-Oikil Said Ridhoine, prévisionniste météo de l'Agence Nationale de l'Aviation Civile et de la Météorologie (ANACM), est expert national du projet BRIO aux Comores. Le projet BRIO (Building Resilience in the Indian Ocean) est mis en œuvre par Météo France et la Commission de l'Océan Indien (COI) avec l'appui de la facilité Adapt'Action de l'Agence Française de Développement (AFD).



ALADIN and the future of Seychelles

Interview with Vincent Amelie
CEO of the Seychelles Meteorological Authority (SMA)



You are a climate expert. Which thought on climate is most meaningful for you today?

Since a young age I have always been fascinated with the wonders of climate and today more than ever I want to use my climate expertise to address the impact of climate change on the environment.

Seychelles suffers an average of \$ 2.8 million in total direct losses from floods and tropical cyclones. What is our best defence?

Building resilience through adaptation measures must be an integral component of an effective strategy, along with mitigation.



ALADIN, is a « genie of the weather » 10 times more accurate than global models, how relevant is it for our islands?

Global models struggle to represent small areas like Seychelles and this makes it even more difficult to resolve smaller-scale climate features that contribute to the overall climate pattern. The high-resolution regional model, ALADIN, provides a better solution to this challenge. It is a very useful tool for downscaling climate simulations from global scale models.

For Seychelles ALADIN can capture the strong influence of high mountains on the climate pattern and contribute to the simulation of a more robust climate projection for the country.

ALADIN USERS: FROM POLICY MAKERS TO FARMERS

Through the ALADIN model, implemented by BRIO-Building Resilience in the Indian Ocean, which climate services will be available in Seychelles?

Tailored, science-based information that will help different users - from policy makers to farmers - make better decisions on how to adapt to the adverse impact of climate variability and change. In the sectors of water, coastal management, fisheries and tourism, the need for this precise information is particularly strong.



People will know which aspects of the climate are going to change, when they are going to change and how much they are going to change.

Indeed, water, fishing and tourism are the sectors most affected by climate change in Seychelles. How will they benefit?

People working in these sectors will know which aspects of the climate are going to change, when they are going to change and how much they are going to change.



This information is valuable to develop adaptation measures for survival, while at the same time it makes us more aware that we should all do our part to reduce the emission of greenhouse gases that cause global warming, otherwise we will reach a stage where we will not be able to adapt anymore.

CLIMATE KNOWLEDGE IS ESSENTIAL TO SURVIVE



Knowing that the weather will change suddenly from too wet to too dry, will push people to invest in water harvesting systems.

What can the average family do?



Knowing that there will be more instances when the weather will just change suddenly from being too wet to be too dry, or vice versa, to invest in what is most useful for them, for example rain water harvesting systems to cater for the dry spells. Knowing that there will also be times of excessive precipitation will help educate policy-makers and the population at large to work together to prevent it, or if this is not possible, work to mitigate the impact of flooding (in particular flash floods) in low lying areas where they are more frequent.

What will users need to do to access the ALADIN data?

Contact the climate section of the Seychelles Meteorological Authority (SMA) www.meteo.gov.sc and also access the regional climate change portal hosted by the SMA.

FLASH FLOODS AND DROUGHT IN THE FUTURE OF SEYCHELLES

According to the first results of BRIO which scenarios are envisaged for Seychelles?

The amount of enhanced inter-annual precipitation is likely to increase in both frequency and intensity. Similarly, the year-to-year deficit in precipitation is also expected to increase and become more severe.

The inter-annual variation in precipitation will be triggered by abrupt transition from one event to the next. For example, a year of extremely wet condition can suddenly change to a year of extremely dry condition or vice versa and this will lead to flash flood as well as drought conditions.

Both maximum and minimum temperatures are increasing, the difference in the rate of increase indicates that the minimum



temperature is warming much faster, leading to a decrease in diurnal temperature range and warmer nights in the years to come. Similar to precipitation, results also show strong inter-annual variation in the temperature extremes throughout the whole projected period till 21st century, although the variation in temperature appears to be more robust and consistent than in precipitation.

Vincent Amelie

CEO of the Seychelles Meteorological Authority (SMA) and national expert of the BRIO project in Seychelles. The BRIO project (Building Resilience in the Indian Ocean) is implemented by Météo France, with the support of the French Development Agency (AFD) Adapt'Action facility.



ANNEXE A.3 : ABSTRACTS ÉTENDUS DE CONFÉRENCES INTERNATIONALES

11B.10 Scenarios of Climate Change for Madagascar using High Resolution Regional Climate Simulation (ALADIN-Climat v6)

Kotomangazafy Stephason F.^{1,2}, M-D Leroux³ et F. Bonnardot³

1. INTRODUCTION

To face the economic extremes of climate change, the Malagasy government has decided to strengthen the resilience of populations by integrating climate information into the planning and implementation of development actions. Detailed and reliable data on climate change at the national/local scale and in high temporal resolution is essential for planning and applications in the field of climate consequences.

These data take into account the knowledge drawn from the sixth assessment report of the Intergovernmental Panel on Climate Change and are based on the most recent climate simulations from Météo-France (CNRM-ESM2-1 and ALADIN-Climat v6) according to three emission scenarios. These climatic scenarios made it possible to generate data (Precipitation and Temperatures) in a daily resolution, on the one hand for different synoptic stations distributed throughout Madagascar and on the other hand for a high resolution grid of 4 km.

For practical applications in the fields of administration and economics, this daily resolution data has been further processed, taking spatial and/or temporal averages. These datasets for temperature and precipitation are shown here.

2. DATA AND METHODS

2.1. Referenced and Simulated Data

After rigorous quality and quantity control for the reliability and homogeneity testing of observed data, 25 synoptic stations with less than 30% missing values are retained. To complete these missing data, the K-Nearest Neighbors (KNN) method was used (Dixneuf 2019). The

combined database, interpolated on a regular grid at 4 km of resolution (0.0375° x 0.0375°), comes from the development and update of the Maproom Climate Information Service of Madagascar (Rija F. 2019).

2.2. Dynamical and Statistical Downscaling Methods

The Global Climate Model CNRM-ESM2-1 or ARPEGE (Séférian et al. 2019), which operate on a large scale (150 km), has been geographically refined to obtain Regional Climate Models ALADIN Climat (Daniel et al. 2019, Nabat et al. 2020); They relate to a limited area (South-West Indian Ocean here) with a fine horizontal resolution of 12 km. This downscaling was carried out as part of the Building Resilience in the Indian Ocean project (Leroux et al. 2021).

Different assumptions about the future evolution of global greenhouse gas emissions are used as marginal conditions in the simulations. Three emission scenarios were considered (O'Neill et al. 2016):

- RCP8.5 (SSP585): Scenario without climate protection measures, in which global emissions keep increasing.
- RCP4.5 (SSP245): Intermediate scenario, predicting a smaller increase in global emissions until about the middle of this century, followed by a flattening of the curve.
- RCP2.6 (SSP126): Systematic climate protection scenario, where the emission reduction targets set in the Paris Agreement are achieved.

Since Regional Climate Models are still based on a relatively coarse spatial scale, it was necessary to statistically process the results

¹ Kotomangazafy Stephason F. *Ecole Doctorale Modélisation Informatique, Université de Fianarantsoa, Madagascar.* stephasonk@gmail.com

² Direction Générale de la Météorologie, Madagascar

³ Météo-France Direction Interrégionale pour l'Océan Indien - 50 Boulevard du Chaudron, 97490 Sainte Clotilde, Réunion

produced in order to generate local climate predictions. The conditions required to follow such a procedure are the existence, in addition to Regional Climate Simulations, of long series of measurements from different stations or relating to high spatial definition grids. This information was used to calibrate the models so that its climatology reproduces as closely as possible the past observation.

2.3 Bias Correction Methods

Quantile Mapping correction consists of developing a correction function to reduce the statistical distribution of simulated data to that of observed values for each variable, season and concomitant period. This non-parametric method assumes that the model is able to predict the distribution of climate variables but not the exact value of each quantile (Déqué M., 2007).

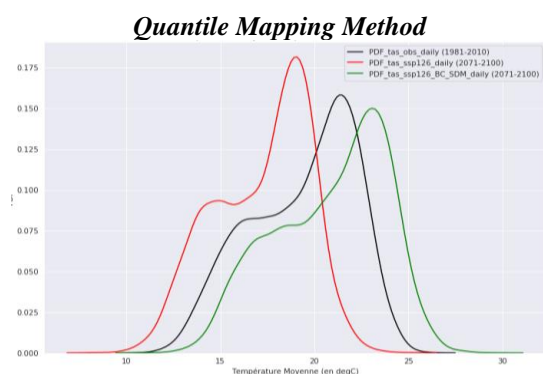


Figure 1 : PDF of mean annual temperatures ($^{\circ}\text{C}$) for the Fianarantsoa station: Observation in black, the raw output of the ALADIN model (in red), and the ALADIN model corrected (in green)

This operation produced transient corrected time series for 1981–2100 for daily parameters. This "quantile mapping" procedure was applied individually for each simulation and climate variable (Cannon et al., 2015).

2.4. Data Agregations

Finally, to represent the results and derive simple information on the climate allowing the generation of statistics on daily and local time series, different aggregations were applied to each parameter: time aggregation (monthly, seasonal and annual average) and spatial aggregation (national and local) for different climatic periods (1981-2010, 2015-2040, 2041-2070 and 2071-2100).

3. RESULTS AND DISCUSSION

Due to its 12 km fine resolution, the orography of the ALADIN-Climat model is clearly more realistic and represents well the 3 main massifs of Madagascar. We note the good global spatial representation of precipitation and temperatures in ALADIN, with a maximum overestimation on East coast and a clear underestimation at altitude.

3.1. Bias correction of simulated data

For the historical period (1981-2014), the anomalies are relatively weak and show a very good spatial correction of precipitation and temperatures over Madagascar. With a maximum overestimation of 300 mm of precipitation in the east coast and a maximum temperature underestimation of 0.6°C in altitude.

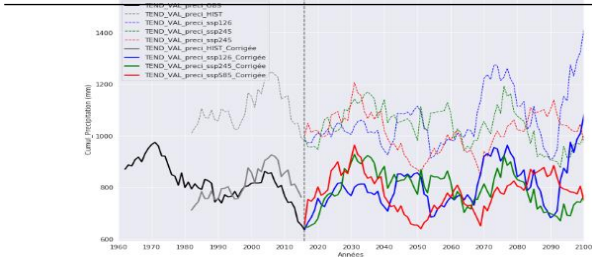
For the future period (2015-2100), and each scenario, the model overestimates rainfall almost everywhere in Madagascar. There is a difference of more than 300 mm on the extreme North and the South-West Coast. The model underestimates temperatures to about 0.5°C on the South-West coast of Madagascar and above 2°C on the rest of the island (Fig.2).

The corrected precipitation and temperature data show a good performance with correlation coefficients greater than 0.9 and Nash-Sutcliffe efficiency coefficients greater than 0.8.

3.2. Climate Uncertainty

In terms of average temperature changes, the global model used, CNRM-ESM2-1 (dotted in Fig. 3b), is located in the middle of the plume of CMIP6 simulations, which has the advantage of being based on a *median scenario*. On the other hand, CNRM-ESM2-1 is one of the "driest" CMIP6 models in Madagascar (Fig. 3a).

(a) Precipitation bias correction



(b) Temperature bias correction

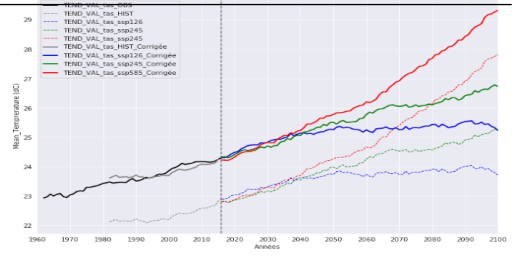
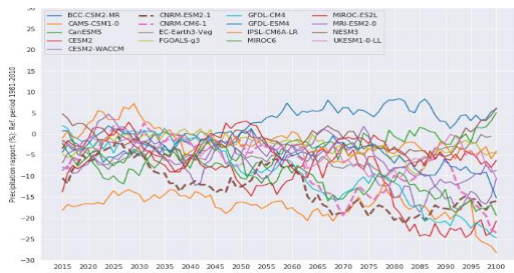


Figure 2 : Temporal evolution of annual precipitation (in mm) and average temperatures (in °C) over the historical period 1981-2014 (in black) and future (SSP126 in blue, SSP245 in green and SSP585 in red) before (dotted lines) and after correction of the biases (solid lines) of the model on South West Coast

(a) Cumulative Annual Precipitation



(b) Mean Temperature

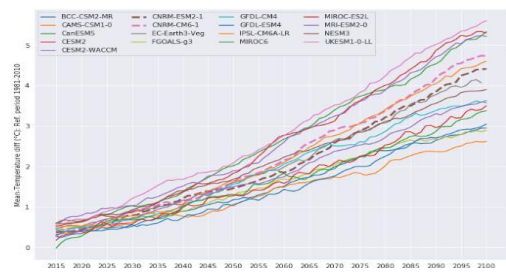
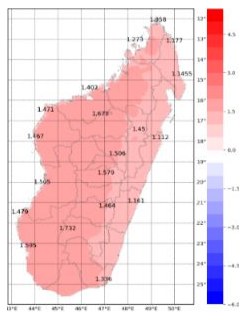
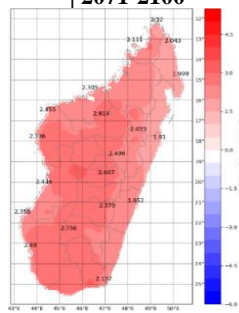


Figure 3 : Annual evolution of (a) annual precipitation and (b) mean temperature anomalies (in °C) relative to the reference period 1981-2010

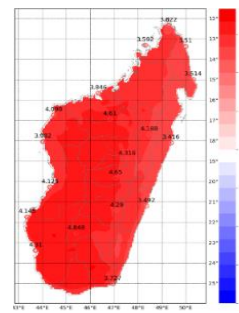
(a) Temperature SSP126 | 2071-2100



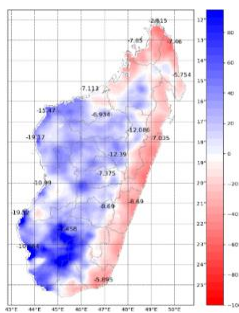
(b) Temperature SSP245 | 2071-2100



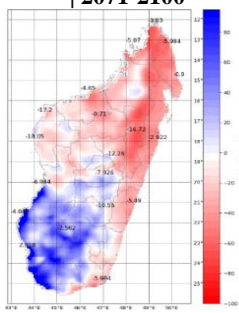
(c) Temperature SSP585 | 2071-2100



(d) Precipitation SSP126 | 2071-2100



(e) Precipitation SSP245 | 2071-2100



(f) Precipitation SSP585 | 2071-2100

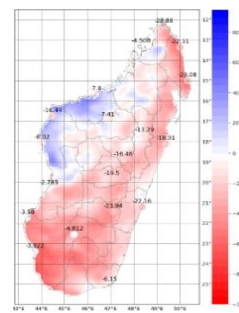
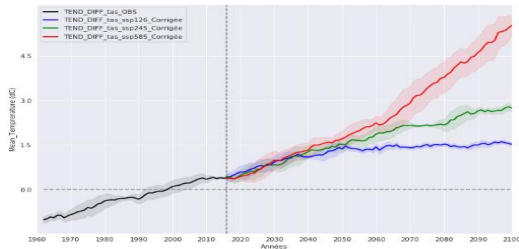


Figure 4 : Anomalies of the mean annual temperature (in °C) and annual rainfall (in % of ref.) predicted by the ALADIN model over Madagascar for SSP126 (left), SSP245 (middle) and SSP585 (right) at the end of century.

(a) Temperature Trend



(b) Precipitation Trend



Figure 5 : Temporal evolution of annual mean temperature (°C) and precipitation (% of ref.) anomalies over the historical period (in black) and future (SSP126 in blue, SSP245 in green and SSP585 in red), after bias correction of the model at Central Highlands. The panache indicates the standard deviation of the data.

3.3. Description of the expected future evolution of climatic parameters

Climate change will continue to intensify in Madagascar in the future. For the high emissions scenario (SSP585), we expect a continuous increase in the mean annual temperature in Madagascar compared to the reference period 1981–2010: around +3.5°C on the East and North-West coasts and around +4.8°C on the rest of the island toward the end of century (Fig. 4 c). Temperature increases in Madagascar are expected to reach around +1°C to +1.7°C in SSP126 (Fig. 4 a), around +2°C on the coasts and around +2.5°C on the highlands in SSP245 (Fig. 4 b).

There is no significant change to be expected in terms of mean annual precipitation, except perhaps in the SSP585 scenario (Fig. 4 f). The two scenarios (Fig. 4 d & e), predict an increase in precipitation (up to 10% of ref. for SSP126 and around 4% of ref. for SSP245) over the South West Region and decrease elsewhere ($\leq -10\%$ relative to the historical period). While the SSP585 scenario (Fig. 4 f), predicts a slight decrease almost everywhere in Madagascar (around 10% of ref.).

However, climate scenarios also highlight the potential of climate protection efforts: resolute climate protection (SSP126) should kill half of the possible effects of climate change in Madagascar by the middle of this century, compared to the SSP585 scenario, and about two-thirds by the end of the century (Fig. 4 a & b).

3.4. Climate Trends of climatic parameters

Whatever the scenario, climatic changes predict an increase in mean temperature in order of: 1°C to 1.5°C for the SSP126 scenario, around 1.5°C for the SSP245 scenario and 2°C to 4°C for the pessimistic scenario SSP585 (Fig. 5 a).

Whatever the scenario, climatic changes predict a decrease in precipitation and an increase in the amplitude of the interannual variability of precipitation (Fig. 5 b), that is to say greater extremes: years with less cumulative rainfall than in the past (*droughts*) and years with higher rainfall (*risk of flooding*).

4. CONCLUSION

The main purpose of this project was to study the future evolution of the climate in Madagascar, and this with advanced meteorological and statistical tools and reference databases. This work has shown the relevance and contribution of a dynamic downscaling to 12 km resolution over Madagascar with the ALADIN-Climat model. It has a better representation of the relief of Madagascar and a *good climatology* of precipitation and temperatures.

The corrections are calibrated over the reference period 1981–2010 and then applied to the 2014–2100 projections of the three scenarios climatic. They allow you to downscale from the resolution of ALADIN-Climat (12km) to that of the spatialized reference products (4km). The signal for climate change should remain unchanged, but this may induce differences in terms of rainfall variability.

The main results for the SSP585 climate scenario, the most pessimistic but the most realistic at present if we refer to global greenhouse gas emissions, are as follows: Temperature increase of 3.5°C to 4.8°C expected at the end of the century in Madagascar and Greater uncertainty about the evolution of precipitation but a probable decrease in precipitation in the dry season and an increase in the natural variability of the climate with more severe extremes (in rain and drought).

Reference

1. Dixneuf, P. (2019). *Analyse de la performance de la méthode d'imputation de données manquantes missForest et application à des données environnementales.*
2. Rija F., F. (2019). *Renforcement du « Service d'Information Climatique Maproom de Madagascar » pour répondre aux besoins des secteurs clés de développement. Antananarivo: Meteo Madagascar.*
3. Séférian, R., P. Nabat, M. Michou, D. Saint-Martin, A. Voldoire, and J. C. et al., 2019: *Evaluation of CNRM Earth System model, CNRM-ESM21: role of Earth system processes in present-day and future climate.*

Journal of Advances in Modeling Earth Systems, 11, 4182–4227, doi:10.1029/2019MS001791

<https://journals.ametsoc.org/view/journals/clim/28/17/jcli-d14-00754.1.xml>.

4. Daniel, M., A. Lemonsu, M. D'équ'e, S. Somot, A. Alias, and V. Masson, 2019: Benefits of explicit urban parametrization in regional climate modeling to study climate and city interactions. *Clim. Dynam.*, 52 (50), 2745–2764, doi:10.1007/s00382-0184289-x, URL <http://link.springer.com/article/10.1007/s00382-018-4289-x>.
5. Nabat, P., et al., 2020: Modulation of radiative aerosols effects by atmospheric circulation over the Euro-Mediterranean region. *Atmos. Chem. Phys.*, 20, 8315–8349, doi:10.5194/acp-20-8315-2020, URL <https://acp.copernicus.org/articles/20/8315/2020/>
6. Leroux, M. D., Bonnardot, F., Kotomangazafy, S., Veerabadren, P., Ridhoine, A. O., Somot, S., Alias, A., and Chauvin, F., (2021): Regional climate projections and associated climate services in the southwest Indian ocean basin, EGU General Assembly 2021, online, 19–30 Apr 2021, EGU21-7029, <https://doi.org/10.5194/egusphere-egu21-7029>.
7. O'Neill, B. C., et al., 2016: The Scenario Model Intercomparison Project (ScenarioMIP) for CMIP6. *Geoscientific Model Development*, 9 (9), 3461–3482, doi:10.5194/gmd-9-3461-2016, URL <https://gmd.copernicus.org/articles/9/3461/2016/>
8. Deque, Michel. (2007). Frequency of precipitation and temperature extremes over France in an anthropogenic scenario: Model results and statistical correction according to observed values. *Global and Planetary Change*. 57. 16-26. 10.1016/j.gloplacha.2006.11.030.
9. Cannon, A. J., S. R. Sobie, and T. Q. Murdock, 2015: Bias Correction of GCM Precipitation by Quantile Mapping: How Well Do Methods Preserve Changes in Quantiles and Extremes? *J. Climate*, 28 (17), 6938–6959, doi:10.1175/JCLI-D-14-00754.1, URL

16C.7

**REGIONAL CLIMATE PROJECTIONS AND ASSOCIATED CLIMATE SERVICES IN THE
SOUTHWEST INDIAN OCEAN BASIN**

MARIE-DOMINIQUE LEROUX^{1,*}, F. BONNARDOT¹
S. KOTOMANGAZAFY²
A. O. S. RIDHOINE³
P. VEERABADREN⁴
V. AMÉLIE⁵
A. ALIAS⁶, F. CHAUVIN⁶, S. SOMOT⁶

¹ *Météo-France DIROI/EC, La Réunion, France*

² *Direction Générale de la Météorologie, Madagascar*

³ *Agence Nationale de l'Aviation Civile et de la Météorologie (ANACM), Moroni, Comores*

⁴ *Mauritius Meteorological Services, Maurice*

⁵ *Seychelles Meteorological Agency, Seychelles*

⁶ *CNRM, Université de Toulouse, Météo-France, CNRS, Toulouse, France*

1. The BRIO project

This research work was motivated by the lack of quality climate data specifically designed for the anticipation of climate change in the Southwest Indian Ocean (SWIO) basin that stretches from 30 to 90 degrees East. This region is prone to tropical cyclone activity with an average of 9.7 tropical systems developing each year, among which 4.8 systems go on to become TCs that are equivalent to a hurricane or a typhoon (Leroux et al. 2018). The SWIO region is also characterized by many small-size islands with peculiar high-orography. In the former Cordex program, regional climate models were run over Africa and only covered the western part of the South Indian Ocean at a coarse 50-km resolution (Dosio et al. 2015) while a 12-km resolution was used for Europe. A 50-km resolution is insufficient for island territories as small and steep as those in the Indian Ocean and the restriction of the domain to the western part of the basin could not represent the climatology of SWIO tropical systems, which is crucial for representing precipitation patterns.

Yet this area is especially vulnerable to natural catastrophes related to the effects of climate change; It is the third region in the world most affected by extreme climatic events. The need for climate services

over that populated area has now become a critical issue.

Through the framework of the “Adapt’action” program, the Agence Française de Développement (AFD), the Indian Ocean Commission (IOC) and Météo-France have defined a cooperation agreement to finance the BRIO (Building Resilience in the Indian Ocean) project aiming at supplying IOC member countries with regional climate simulations over the 2018-2021 period. One of the project’s final objective is to provide a set of 21st century high quality climate-related data on a free-access online regional portal as well as climate services. Another goal is to train national experts to climate data mining in each of the IOC member countries: Madagascar, Reunion, Mauritius, as well as the Comoros and Seychelles archipelagos.

The numerical and statistical tools used for this regional climate study as well as some results are illustrated here for the southwest Indian ocean basin as well as for some islands of the region.

2. Regional climate simulations

Dynamical downscaling from a few ongoing CMIP6 simulations (historical and ScenarioMIP, O’Neill et al. 2016) was used to obtain regional climate information on a large area of the southwest Indian Ocean that includes most of the inhabited countries from the coasts of Mozambique (33°E) to 74°E as well as the

*Corresponding author address: Météo-France DIROI/EC, 50 boulevard du chaudron, 97491 Sainte Clotilde Cedex, La Réunion.
E-mail: marie-dominique.leroux@meteo.fr

main area of tropical cyclone genesis [2-28°S]; the domain is visible in Figure 4. The ALADIN limited area model was implemented in its most recent 6.3 climate version (Daniel et al. 2019; Nabat et al. 2020) with a horizontal resolution of 12 km and 91 vertical levels. It is based on a bi-spectral, semi-implicit, semi-Lagrangian advection scheme and will be called ALADIN63 hereafter. The first simulations were driven by one of the CMIP6 Earth System coupled models named CNRM-ESM2-1 (Séférian et al. 2019), providing atmospheric lateral boundary forcing at 6-h frequency with a horizontal resolution of about 150 km (T127) and 91 vertical levels. Historical simulations were run over the 1979-2014 period while projections were obtained for the ssp126, ssp245 and ssp585 scenarios (O’Neill et al. 2016) over the 2015-2100 period. The acronym “sspXY” indicates the shared socio-economic pathways (ssp) based on a development pathway X (i.e., 1, 2, 3, 4, or 5) reaching a net radiative Y by 2100.

a. Benefits from high resolution modeling

The 12-km resolution of ALADIN63 allows small islands such as the Seychelles and Comoros archipelagos to be depicted as earth pixels (e.g., Fig. 1). The refined topography (e.g., Fig. 1) allows refined precipitation over all the steep islands of the region as illustrated in Fig. 2 for Madagascar.

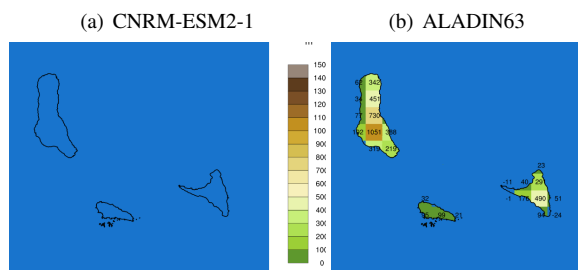


FIG. 1. Model orography (m) over the Comoros archipelago in (a) CNRM-ESM2-1 and (b) ALADIN63.

b. Evolution of tropical systems and their intensity

The climatology of tropical systems in ALADIN63 is close to the best-track data of RSMC La Réunion over the historical period 1981-2014, albeit a positive bias in tropical system intensity and a poleward bias in tropical systems’ tracks (not shown). After an intensity calibration of the model, differences between future and past frequencies of maximum intensity show a most likely decrease of the total number of tropical systems over the region, a constant or slight increase

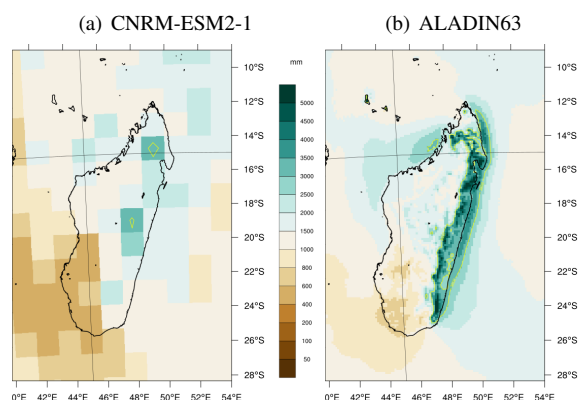


FIG. 2. Average annual precipitation (mm) over Madagascar for the 1981-2010 period in (a) CNRM-ESM2-1 compared to that in (b) ALADIN63. Yellow contours delineate 3000-mm annual precipitation.

in the number of intense to very intense TCs (Fig. 3), and a likely increase of their maximum intensity (not shown).

c. Future temperature anomalies expected over the region

According to ALADIN63, temperatures over the SWIO region are projected to increase by +1°C to +2.2°C under the ssp126 scenario at the end of the century (Fig. 4). Increases of about +3°C to +5.6°C are projected under the ssp585 scenario (Fig. 4). Large continental masses such as Madagascar and the African continent will be prone to the greatest temperature increases (above +5.0°C over 2071-2100 under the ssp585 scenario), while small islands will be affected by lower yet substantial amounts of warming (about +4.0°C over 2071-2100 under the ssp585 scenario). It is worth noting that projected rates of regional warming are stable throughout the century under the lower case scenario considered here (ssp126) while they are accelerating at the end of the century under the high emission scenario (ssp585).

d. Bias correction

Observations over the islands of Madagascar, Réunion, Seychelles, Comoros, Mayotte, Mauritius, Rodrigues, Agalega and St Brandon during the 1981-2014 period were used for model bias correction on daily temperature and precipitation variables. The quantile delta mapping bias correction algorithm (Cannon et al. 2015) was chosen as it explicitly preserves relative changes in the model quantiles. We used 30-year moving time-slices over 3-month windows centered on the month to correct. The final resolution after bias correction depends on the observational data and ranges from

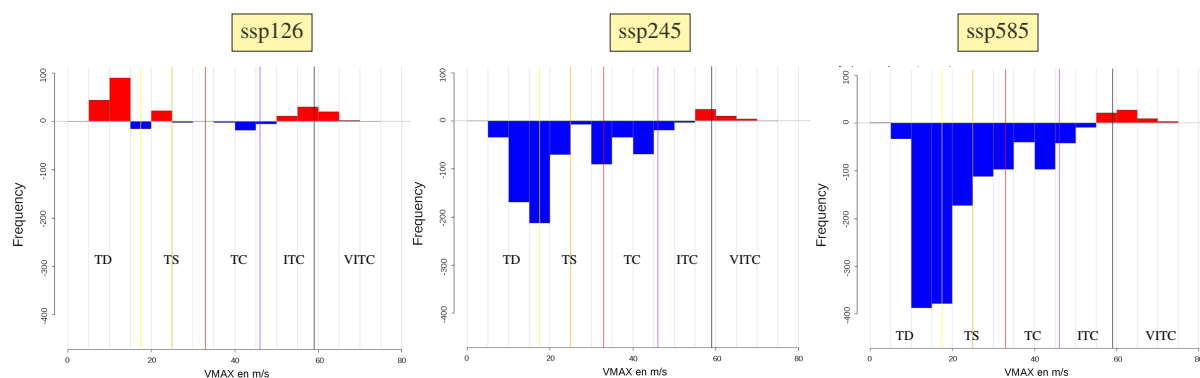


FIG. 3. Evolution (blue for a decrease, red for an increase) of ALADIN63 6-hr tropical system counts per 5-m/s bins of maximum intensity (Vmax) in the southwest Indian Ocean by the end of the century (2066-2099) compared to that of the historical period 1981-2014 under ssp126, ssp245 and ssp585 scenarios. Letters indicate intensity categories: Tropical Depression (TD), Tropical Storm (TS), Tropical Cyclone (TC), Intense Tropical Cyclone (ITC), Very Intense Tropical Cyclone (VITC).

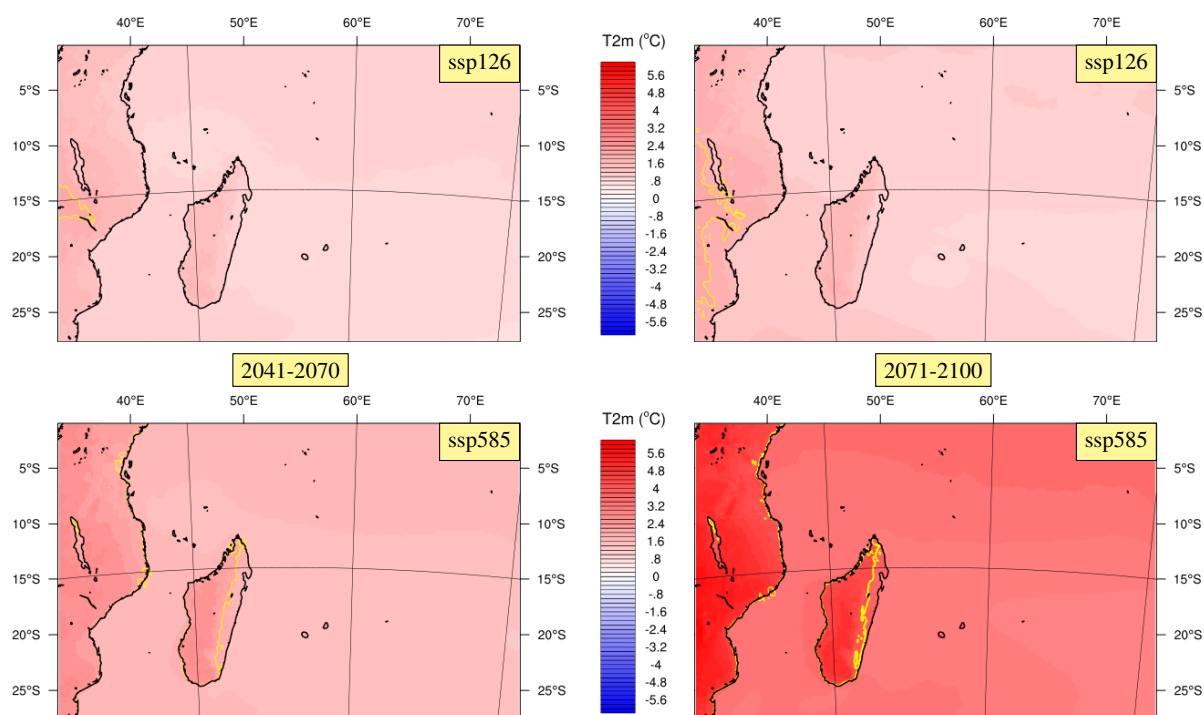


FIG. 4. Annual average differences relative to 1981-2010 of ALADIN63 mean 2-m air temperature ($^{\circ}\text{C}$, shaded) over the southwest Indian ocean under the ssp126 and ssp585 scenarios and over two future periods (2041-2070 and 2071-2100). Yellow contours delineate $+4^{\circ}\text{C}$ temperature anomalies.

4 km (Madagascar, Mauritius) to 6 km (Reunion) for gridded data. Station-scale bias correction was applied on the smallest islands (Seychelles, Comoros, Mayotte, Rodrigues, Agalega and St Brandon). An example is given in Figure 5 for Reunion island. It indicates that annual water deficits could rise up to 20% at the end of the century under the worst-case scenario (it will be illustrated in the next section that ALADIN63 has inherited from the rather dried signal of its driving model over the SWIO region).

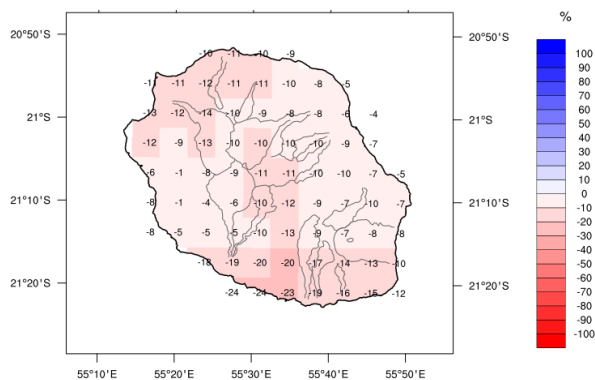


FIG. 5. Annual precipitation (%) anomalies over Reunion simulated by ALADIN63 over the 2071-2100 period under the ssp585 scenario. The percentage anomalies are computed against the average annual precipitation of the 1981 – 2010 reference period.

Note that bias correction is currently being computed at 3-km resolution over Reunion island for the precipitation, temperature, humidity, wind and solar radiation reference parameters in order to correct the model daily evapotranspiration (ETP) computed using the FAO-56 formula (Allan et al. 1998).

3. Climate uncertainty sampling

The precipitation and temperature variables from a pool of global climate models available from the CMIP6 archive (<https://esgf-node.llnl.gov/search/cmip6/>), including CNRM-ESM2-1, were examined over the SWIO region. An annual decrease in precipitation over the entire SWIO region is expected by most models under the ssp585 scenario (Fig. 6). An examination of the seasonal trends show that the January-February-March trimester will actually be wetter while the second semester of the year will be much drier than the reference period (not shown). This is due to more extreme events in the future such as tropical cyclones with increased intensity, floods and droughts (not shown) but also longer periods of droughts (illustrated in the next section for Reunion island).

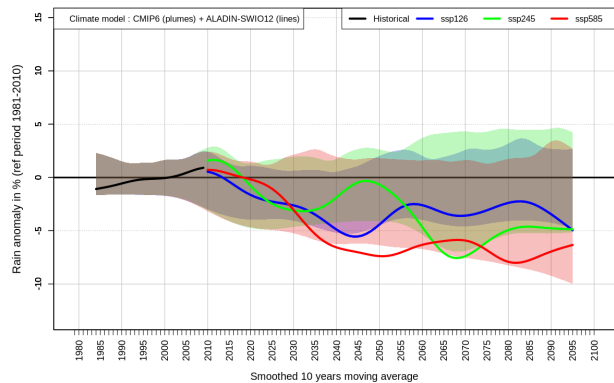


FIG. 6. Annual precipitation anomalies (%) between future and historical periods for eighteen of the CMIP6 models (colored plumes or envelopes) and for ALADIN63 (solid lines) under ssp126, ssp245 and ssp585 scenarios. The percentage anomalies are computed against the average annual precipitation of the 1981 – 2010 reference period. The eighteen CMIP6 models are named in Fig. 7.

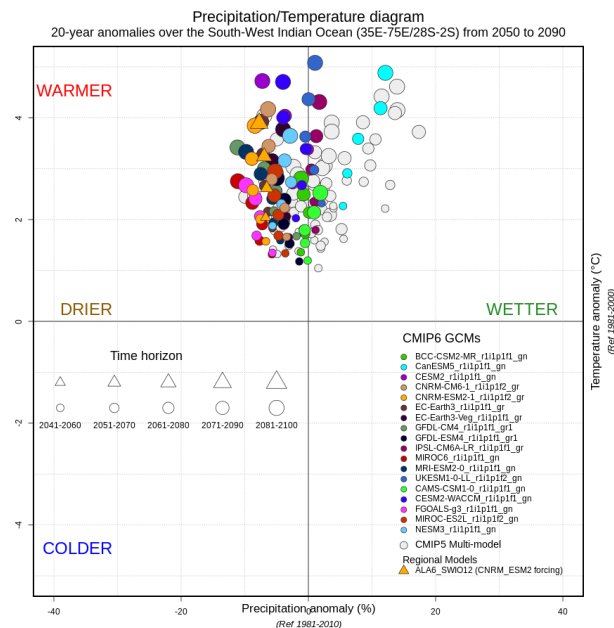


FIG. 7. The annual precipitation (x, %) and 2-m mean temperature (y, °C) 20-year anomalies over the SWIO region from 2050 to 2090 under the ssp585 scenario. The reference period is 1981 – 2010 for the precipitation and 1981 – 2000 for the temperature. Data are displayed for eighteen of the CMIP6 models (colored dots with CNRM-ESM2-1 in orange), for CMIP5 models (grey dots), and for the ALADIN63 regional model (orange triangles). Dots or triangles sizes increase with time horizon.

The precipitation-temperature diagram drawn for the same pool of CMIP6 models but also for the CMIP5 models shows that there seem to be a shift towards drier trends from CMIP6 to CMIP5 models over the SWIO region under the ssp585 scenario (Fig. 7). This diagram shall be completed as soon as all CMIP6 models are published. Fig. 7 also illustrates that the CNRM-ESM2-1 and ALADIN63 models fall within the lowest range of precipitation anomalies simulated over the region.

This diagram is also used to choose global climate models to drive other ALADIN63 simulations and complete the dynamical downscaling in order to better sample climate model uncertainty. The IPSL-CM6A-LR model (red-purple dots in Fig. 7) and UKESM1-0-LL model (grey-blue dots in Fig. 7) are good candidates as their precipitation and temperature trends vary from that of CNRM-ESM2-1. The two models predict a neutral precipitation anomaly trend over the SWIO region and the UKESM1-0-LL model predicts the highest temperature anomalies by the end of the century.

Statistical downscaling from CMIP6 simulations is under progress to provide further quantification of climate uncertainty over the IOC member countries where observational data is available (not shown). The downscaling method is being tested on Reunion island using ERA-Interim data.

4. Portal and climate services for end-users

The BRIO project aims at supporting the IOC member countries in the implementation of their adaptation policies with respect to climate change (regarding water resources, health and other issues). Many end-users are already using the BRIO data in impact models (agriculture, biodiversity, and health for mosquito-borne diseases such as dengue fever). The BRIO data shall be publicly available for download on the regional portal by the end of the 2021 year.

A number of climate indices were also derived over the main IOC islands, such as TX90p, the percentage of days when daily maximum temperature exceeds its 90th percentile; WSDI, the warm spell duration index; DTR, the daily temperature range (monthly mean difference between TX and TN); DEXHT, the number of days of extreme heat where both daily minimum temperature and daily maximum temperature exceed their respective 97.5th percentile; Rnnmm, the annual count of days when the precipitation exceeds nmm with various nn thresholds ranging from 10 to 100 mm; Rnnp, the annual count of days when the precipitation exceeds the nnth percentile with various nn thresholds ranging from 75 to 99; RnnpTOT, the annual total

precipitation when daily precipitation is greater than the nnth percentile; CDD, the maximum length of dry spell (Fig. 8); Rx1day, the monthly maximum 1-day precipitation; Rx5day, the monthly maximum 5-day precipitation, among others. According to Figure 8, the length of droughts over Reunion island should increase in the future, especially under the ssp585 scenario for which the maximum decrease in annual total precipitation should occur (Fig. 5).

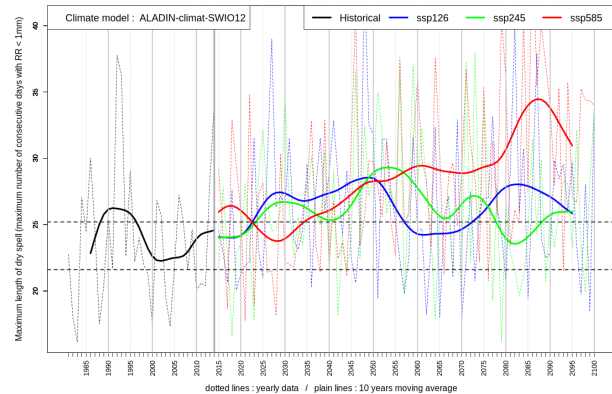


FIG. 8. Evolution of the maximum length of dry spell (i.e. the annual maximum number of consecutive days with daily precipitation lower than 1 mm) derived from ALADIN63 outputs over Reunion island from 1981 to 2100 under ssp126, ssp245 and ssp585 scenarios. Dotted lines are yearly data, solid lines are 10-year moving averages.

REFERENCES

- Allan, R., L. Pereira, and M. Smith, 1998: *Crop evapotranspiration-Guidelines for computing crop water requirements-FAO Irrigation and drainage paper 56*, Vol. 56.
- Cannon, A. J., S. R. Sobie, and T. Q. Murdock, 2015: Bias Correction of GCM Precipitation by Quantile Mapping: How Well Do Methods Preserve Changes in Quantiles and Extremes? *J. Climate*, **28** (17), 6938–6959, doi:10.1175/JCLI-D-14-00754.1, URL <https://journals.ametsoc.org/view/journals/clim/28/17/jcli-d-14-00754.1.xml>.
- Daniel, M., A. Lemonsu, M. Déqué, S. Somot, A. Alias, and V. Masson, 2019: Benefits of explicit urban parametrization in regional climate modelling to study climate and city interactions. *Clim. Dynam.*, **52** (50), 2745–2764, doi:10.1007/s00382-018-4289-x, URL <http://link.springer.com/article/10.1007/s00382-018-4289-x>.

-
- Dosio, A., H. Panitz, M. Schubert-Frisius, and D. Lüthi, 2015: Dynamical downscaling of CMIP5 global circulation models over CORDEX-Africa with COSMO-CLM: evaluation over the present climate and analysis of the added value. *Clim. Dynam.*, **44**, 2637–2661, doi:10.1007/s00382-014-2262-x.
- Leroux, M.-D., J. Meister, D. Mekies, A.-L. Dorla, and P. Caroff, 2018: A climatology of southwest indian ocean tropical systems: Their number, tracks, impacts, sizes, empirical maximum potential intensity, and intensity changes. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, **57** (4), 1021–1041, doi:10.1175/JAMC-D-17-0094.1, URL <https://doi.org/10.1175/JAMC-D-17-0094.1>, <https://doi.org/10.1175/JAMC-D-17-0094.1>.
- Nabat, P., et al., 2020: Modulation of radiative aerosols effects by atmospheric circulation over the Euro-Mediterranean region. *Atmos. Chem. Phys.*, **20**, 8315–8349, doi:10.5194/acp-20-8315-2020, URL <https://acp.copernicus.org/articles/20/8315/2020/>.
- O'Neill, B. C., et al., 2016: The Scenario Model Intercomparison Project (ScenarioMIP) for CMIP6. *Geoscientific Model Development*, **9** (9), 3461–3482, doi:10.5194/gmd-9-3461-2016, URL <https://gmd.copernicus.org/articles/9/3461/2016/>.
- Séférián, R., P. Nabat, M. Michou, D. Saint-Martin, A. Voltaire, and J. C. et al., 2019: Evaluation of CNRM Earth System model, CNRM-ESM2-1: role of Earth system processes in present-day and future climate. *Journal of Advances in Modeling Earth Systems*, **11**, 4182–4227, doi:10.1029/2019MS001791.

Title

Regional climate projections and associated climate services in the southwest Indian ocean basin

Abstract

Through the framework of the “Adapt’action” program, the Agence Française de Développement (AFD), the Indian Ocean Commission (IOC) and Meteo France have defined a cooperation agreement to finance a project named BRIO for "Building Resilience in the Indian Ocean". It aims at supplying IOC member countries with regional climate simulations as well as training for regional experts on that matter. Another outcome is the development of a free-access online regional portal that provides a set of high quality climate-related data over the region and its many inhabited islands.

Both dynamical and statistical downscaling from a few ongoing CMIP6 simulations are used to obtain regional climate information. The french regional climate model ALADIN was run at 12-km resolution on a large area of the southwest Indian Ocean that includes most of the inhabited countries from the coasts of Mozambique (33°E) to 74°E as well as the main area of tropical cyclone genesis [2°S - 28°S]. The first ALADIN runs were coupled by outputs from the french Earth Simulation Model CNRM-ESM2-1.

This report presents the numerical and statistical tools used for this regional climate study as well as the first projections obtained for three greenhouse gas emission scenarios (SSP1-2.6, SSP2-4.5, et SSP5-8.5) over the 2015-2100 period. Results are presented for the southwest Indian ocean basin and a focus is given on the inhabited islands of the IOC member countries: Madagascar, Reunion, Mauritius, Rodrigues, Agalega, Saint Brandon, Seychelles, Comoros and Mayotte. *In situ* observations over the 1981-2010 period were used for model bias correction. For climate uncertainty representativeness, the 2015-2100 evolution of both ALADIN and CNRM-ESM2-1 temperature and precipitation averages over our region are compared to that of other available CMIP6 simulations. The first climate services were built ; they are meant to help countries to deal with water resources and health issues and to provide information on the evolution of extreme events, including tropical cyclones.

Keywords

Climate change, regional climate modelling, southwest Indian ocean, CMIP6 simulations, statistical downscaling, tropical climate, impacts for insular territories, geo-portal

Titre

Projections climatiques régionales et services climatiques associés dans le sud-ouest de l’océan Indien

Resumé

Grâce à la facilité “Adapt’action” de l’Agence Française de Développement (AFD), la Commission de l’Océan Indien (COI) et Météo France ont défini un accord de coopération pour financer le projet nommé BRIO pour "Building Resilience in the Indian Ocean". Il a pour vocation de fournir aux pays membres de la COI des simulations climatiques régionales et de former des experts régionaux à l’exploitation de ces jeux de données climatiques sur les îles habitées. Un autre livrable est le développement d’un géoportail régional en accès libre pour mettre à disposition les données climatiques issues du projet.

Des descentes d’échelle dynamique et statistique issues de simulations CMIP6 sont utilisées pour obtenir de l’information climatique à l’échelle régionale. Le modèle régional de climat français ALADIN a tourné à 12 km de résolution sur une grande partie du sud-ouest de l’océan Indien incluant la plupart des territoires habités depuis les côtes du Mozambique (33°E) jusque 74°E et couvrant la zone principale de cyclogénèse tropicale [2°S - 28°S]. Les premières simulations ALADIN ont été couplées aux sorties du modèle de climat global français nommé CNRM-ESM2-1.

Ce rapport présente les outils numériques et statistiques utilisés pour cette étude régionale ainsi que les premières projections obtenues pour trois scénarios d’émission de gaz à effet de serre (SSP1-2.6, SSP2-4.5, et SSP5-8.5) sur la période future 2015-2100. Les résultats sont présentés pour le bassin sud-ouest de l’océan Indien ainsi que pour les îles habitées des pays membres de la COI : Madagascar, Reunion, Mauritius, Rodrigues, Agalega, Saint Brandon, Seychelles, Comoros et Mayotte. Des observations *In situ* sur la période 1981-2010 ont été utilisées pour corriger le modèle régional de ses biais. Pour représenter l’incertitude climatique, l’évolution de la température et des précipitations sur la période 2015-2100 a été analysée dans les simulations ALADIN et CNRM-ESM2-1 et comparée à celles d’autres simulations globales CMIP6. Les premiers services climatiques ont vu le jour. Ils ont pour but d’aider les pays dans la gestion des ressources en eau et des problèmes de santé et d’informer sur l’évolution des événements extrêmes tels que les cyclones tropicaux.

Mots-clés

Changement climatique, modélisation climatique régionale, océan Indien sud-ouest, simulations CMIP6, descente d’échelle statistique, climat tropical, impacts sur les territoires insulaires, géoportail
