



Les tendances climatiques
observées
&
les futurs
changements climatiques
à Madagascar

2023



Sommaire

SOMMAIRE	2
AUTEURS	3
REMERCIEMENTS	3
MOT DU MINISTRE	4
PRÉFACE	5
1. INTRODUCTION	6
2. GÉNÉRALITÉS	7
2.1. Contexte du pays	7
2.2. Climat de Madagascar	7
3. TENDANCES CLIMATIQUES OBSERVÉES	10
3.1. Tendances Globale et Régionale	10
3.2. Tendances Climatiques Observées à Madagascar	10
3.2.1. Température Moyenne (1961-2018)	10
3.2.2. Précipitations (1961-2018)	12
3.2.3. Cyclones Tropicaux (1982-2022)	13
4. FUTURS CHANGEMENTS CLIMATIQUES À MADAGASCAR	14
4.1. Modélisation du Climat	14
4.2. Apport du modèle régional à haute résolution ALADIN-Climat	14
4.3. Futurs Changements Climatiques à Madagascar	15
4.3.1. Températures Moyennes	15
4.3.2. Précipitations	17
4.3.3. Activité cyclonique	20
5. CONCLUSION	22
6. RÉFÉRENCES	23



Auteurs

Direction Générale de la Météorologie de Madagascar :

Kotomangazafy Stephason François
Nirivololona Raholijao
Zo Andrianina Patrick Herintiana
Rakotomavo

Division Études et Climatologie de la Direction Interrégionale de la Météo-France pour l'Océan Indien, La Réunion :

Marie-Dominique LEROUX
François BONNARDOT

Remerciements

La Direction Générale de la Météorologie tient à remercier :

- Le programme Adapt'Action de l'Agence Française de Développement (AFD) pour l'appui financier à l'élaboration de cette étude.
- La Direction Inter-régionale de Météo-France pour l'Océan Indien à La Réunion, et la Commission de l'Océan Indien (COI), pour l'appui technique et scientifique et le renforcement de capacité qu'elles ont prodigué à l'expert de la Direction Générale de la Météorologie (DGM) dans le cadre de ce projet.
- La Banque Mondiale pour l'appui financier quelle à fourni à la DGM pour l'édition de ce rapport .

Mots du Ministre des Transports et de la Météorologie

Le réchauffement global et les changements climatiques qui en résultent préoccupent à juste titre la population, les décideurs et les collectivités Malagasy suite aux phénomènes météorologiques extrêmes, tels que les cyclones tropicaux de forte intensité qui ont frappé l'île au cours du premier trimestre 2022 et en ce début d'année 2023.

Madagascar est classé parmi les pays les plus vulnérables au changement climatique en raison de sa faible capacité d'adaptation. Les répercussions socio-économiques des catastrophes naturelles d'origine météorologique sont énormes et le pays doit y faire face chaque année, qu'il s'agisse de cyclones tropicaux, d'inondations ou de sécheresses.

Le Ministère des Transports et de la Météorologie, à travers la Direction générale de la Météorologie, est la source officielle exclusive des informations météorologiques, climatologiques et avis météorologiques diffusés sur le territoire national. Les Services Météorologiques Nationaux (SMHN) sont tenus de fournir rapidement et en temps voulu des informations fiables, faciles à comprendre pour une large diffusion, afin de prévenir les catastrophes et en atténuer leurs effets.

Les SMHN aident le Gouvernement et la population à prévenir les risques potentiels à travers les prises de décisions en amont sur les actions de prévention et d'adaptation. Ils constituent un des piliers de la gestion des renseignements sur les risques climatiques et contribuent ainsi au développement durable, notamment à travers la participation à l'éradication de la pauvreté, le renforcement de la sécurité alimentaire, l'amélioration des conditions sanitaires, ainsi qu'à l'accès aux énergies renouvelables et à l'eau potable. Ceci est d'autant plus crucial dans le contexte actuel lié au changement climatique, l'une des menaces et entraves au développement durable au cours de ce siècle.

Grâce à cette nouvelle publication sur « **Les Tendances Climatiques et les Futurs Changements Climatiques à Madagascar 2023** », le Ministère des Transports et de la Météorologie tient à mettre en lumière l'importance des



informations scientifiques crédibles et factuelles que nous fournissons nos spécialistes du climat.

Dans le Plan Emergence Madagascar, initié par Son Excellence Président de la République Andry Rajoelina, afin de mieux se préparer et réagir efficacement aux impacts climatiques, la lutte contre le changement climatique est inscrite au **Velirano 10: Préserver les ressources naturelles et l'environnement**.

J'espère que cette nouvelle publication, troisième dans la série depuis l'année 2008, puisse contribuer à l'atteinte des objectifs et à répondre aux besoins d'informations climatiques fiables de tous les acteurs et secteurs socio-économiques impactés par la variabilité et le changement climatique.

Pour terminer, mes remerciements s'adressent à tous ceux qui ont contribué à l'élaboration, à la rédaction et à l'édition de cette publication sur les Tendances climatiques et le Changement Climatique à Madagascar, notamment le projet BRIO/COI, les experts climatiques nationaux et internationaux et la Banque Mondiale.

Valery Manambahoaka Ramonjavelo
Ministre des Transports et de la Météorologie



Préface

METEO MADAGASCAR a le plaisir de mettre à la disposition des autorités, des décideurs et du public cette nouvelle publication sur "**Les Tendances Climatiques Observées et les Futurs Changements Climatiques à Madagascar 2023**". Elle est la troisième de la série sur Madagascar après la publication de 2019.

Cette publication 2023, comme les précédentes, est le fruit d'une collaboration entre METEO MADAGASCAR et une organisation régionale. Les nouvelles informations scientifiques sur les tendances climatiques observées et les futurs changements climatiques à Madagascar présentées dans cette publication sont tirées d'une étude régionale effectuée dans le cadre du projet Building Resilience in the Indian Ocean (BRIO) qui vise à développer des projections climatiques haute résolution pour décrire le climat de la région jusqu'à l'horizon 2100. Les dernières techniques et méthodologies d'élaboration des projections climatiques, à savoir les modèles numériques à haute résolution, ont été utilisées dans le cadre de cette étude.

Les informations sur les tendances climatiques sont issues des données réelles observées sur les stations météorologiques tandis que les projections climatiques de Madagascar présentées dans cet ouvrage sont donc le résultat d'analyse de données climatiques obtenues par un modèle numérique avec une résolution horizontale de 4kmx4km comparées aux informations des publications précédentes qui étaient basées sur des modèles globaux de résolution horizontale plus faible (150kmx150km). Les données et informations peuvent être obtenues aux échelles nationale, régionale et locale en accédant à la plateforme en ligne du projet BRIO de la Commission de l'Océan Indien.

Cette nouvelle publication est mise à la disposition du public et des usagers gratuitement. Elle est une grande avancée et d'une aide indéniable pour la communauté des différents secteurs socio-économiques qui travaille dans les études d'impacts et de vulnérabilité, dans la définition des stratégies d'adaptation et d'atténuation et la résilience à la variabilité et au changement climatique, à l'échelle des districts voire des communes.

Ce rapport sur "**Les Tendances Climatiques Observées et les Futurs Changements Climatiques à Madagascar 2023**" est dorénavant la référence scientifique en matière de publication nationale dans ce domaine. METEO MADAGASCAR souhaite que vous preniez plaisir à le lire et à l'utiliser.

Dr Nirivolona Raholijao
Le Directeur Général de la Météorologie.

1. Introduction

Le projet Building Resilience in the Indian Ocean (BRIO), financé par la facilité Adapt'Action de l'Agence Française de Développement (AFD), en partenariat avec la Direction Inter-régionale de Météo - France pour l'Océan Indien (DIROI), le Centre National de Recherches Météorologiques (CNRM) de Météo-France, la Commission de l'Océan Indien (COI) et les Services Météorologiques et Hydrologiques Nationaux (SMHNs) de chaque pays membre, vise à produire un ensemble de jeux de données à partir des simulations climatiques régionales haute résolution pour décrire le climat de la région Sud-Ouest de l'Océan Indien (SOOI) jusqu'à l'horizon 2100; à former des experts en climatologie dans les différents pays de la zone (Madagascar, Comores, Maurice et Seychelles) à l'exploitation de ces jeux de données climatologiques et mettre à disposition les données climatiques issues du projet sur un portail internet régional en libre accès.

Le projet a exploité les simulations globales issues du sixième phase du projet d'intercomparaison des modèles couplés (CMIP6) du sixième rapport d'évaluation (AR6) du Groupe d'experts Intergouvernemental sur l'Evolution du Climat (GIEC) et est basé sur les simulations climatiques les plus récentes de Météo-France (CNRM-ESM2-1 et ALADIN-Climat) selon trois scénarios à trajectoires socio-économiques communes (Shared Socio-economic Pathways ou SSP): SSP1-2.6, SSP2-4.5 et SSP5-8.5. Chaque expert des différents pays participants contribue au développement de l'ensemble des résultats du projet et à la fourniture des données climatologiques de leurs territoires respectifs pour préparer les tendances climatiques observées et les scénarios de changement climatique aux niveaux national et local. Les dernières tendances climatiques et les futurs changements climatiques ont été publiés par la DGM et ses partenaires en 2019. Cette publication constitue ainsi une mise à jour des informations utiles sur les changements climatiques observés et projetés vers le milieu

et la fin du XXIème siècle à Madagascar.

En rappelant qu'une des principales missions de la Direction Générale de la Météorologie (DGM) est de fournir des informations météorologiques, hydrologiques et climatologiques utiles et utilisables répondant aux besoins spécifiques des usagers. Ces informations serviront d'outils de prises de décisions pour réduire au mieux les effets néfastes du changement climatique et mettre en place des stratégies d'adaptation et rendre le pays résilient.

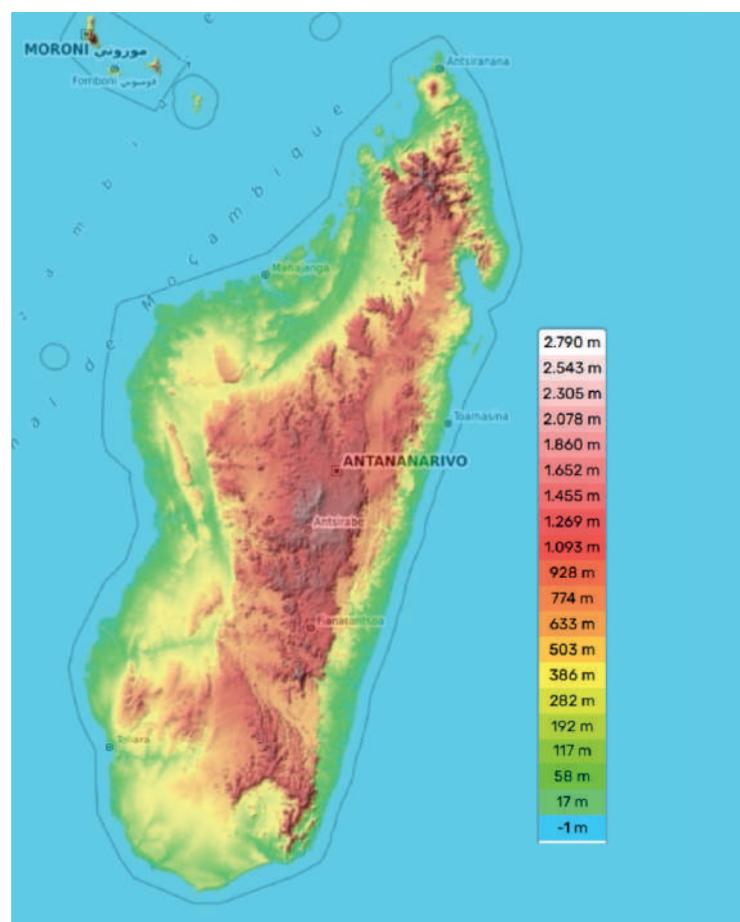


Figure 1 : Le relief de Madagascar

2. Généralités

2.1. CONTEXTE DU PAYS

Madagascar se trouve dans l'hémisphère Sud, dans le Sud-Ouest de l'Océan Indien, séparée de la côte Sud-Est de l'Afrique par le Canal du Mozambique. Elle a une superficie totale de 587 401 km² et une longueur totale de côtes de 4 828 km.

L'Île est dominée par un ensemble de hautes terres occupant les deux-tiers du territoire s'élevant en moyenne entre 800 m et 1 600 m d'altitude, culminant au Nord à 2 876 m dans le massif du Tsaratanana (Fig. 1). À l'Est, le territoire descend par un escarpement abrupt jusqu'à une étroite plaine bordant l'Océan Indien. À l'Ouest, le versant s'incline par une pente prolongée jusqu'à une plaine côtière un peu plus large le long du Canal du Mozambique.

2.2. CLIMAT DE MADAGASCAR

Madagascar connaît deux saisons: une saison chaude et humide (été) de Novembre à Avril et une saison sèche et fraîche (hiver) de Mai à Octobre. Deux courtes intersaisons les séparent et durent chacune environ un mois. Les éléments les plus importants qui contrôlent le climat 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 mousson de Nord-Ouest et le courant des Aiguilles (Goodman, S. M., 2008).

De Mai à Octobre, l'anticyclone des Mascareignes amène sur Madagascar un régime de vent d'alizé du Sud-Est. Au cours de cette période, la partie Est de l'Île jouit d'un climat humide au vent tandis que la partie Ouest subit un climat sec sous le vent.

De Novembre à Avril, le régime d'alizé devient moins régulier mais la partie Est reste toujours sous son influence. Les hautes terres centrales, les régions occidentales et les parties Nord de Madagascar reçoivent des précipitations pendant cette période, principalement par l'activité convective et les orages liés à la Zone de Convergence Intertropicale (ZCIT). C'est aussi la saison cyclonique pour le Sud Ouest de l'Océan Indien.

Un zonage climatique a été réalisé pour diviser Madagascar en plusieurs zones présentant les mêmes caractéristiques climatologiques (Fig. 2). 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.



Sur la base des précipitations et des températures moyennes observées (1981-2010), six zones climatiques majeures se distinguent sur Madagascar (Fig. 2):

- La Côte Est (climat tropical chaud et 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)

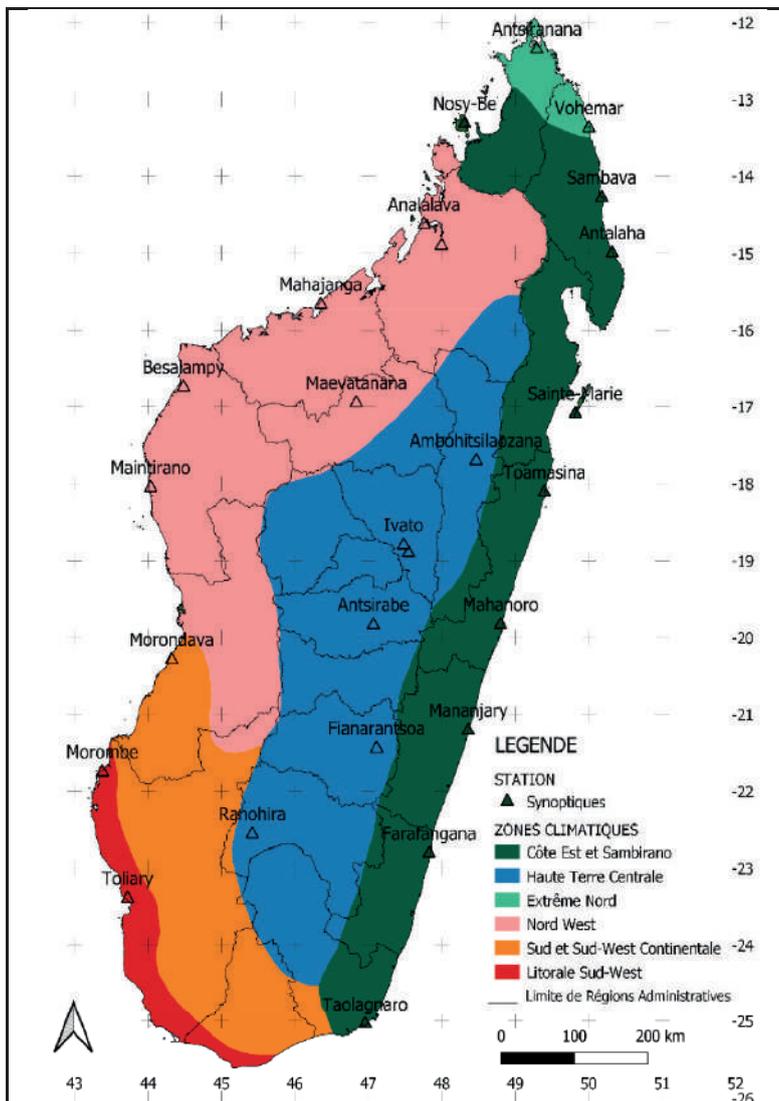


Figure 2: Classification de Madagascar en 6 zones climatiques (Nematchoua M., 2017)

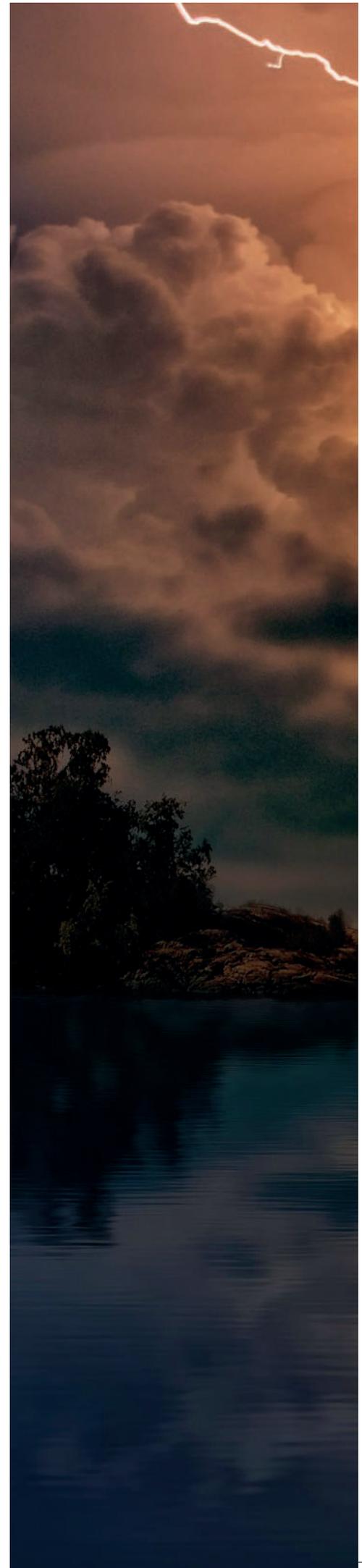


Tableau 1 : Description de chaque zone climatique

ZONE CLIMATIQUE	DESCRIPTIONS
Côte Est	<p>Chaud : températures moyennes annuelles comprises entre 23°C et 25°C.</p> <p>Très humide à Humide : reçoit annuellement plus de 2 000 mm de précipitations (plus de 3 000 mm pour le centre Est).</p> <p>Un gradient Nord-Sud de l'humidité : moins importantes dans le Sud-Est que dans la région du Nord-Est. Il n'existe pas de saison sèche bien définie mais seulement une diminution des précipitations en Septembre et Octobre.</p>
Hautes Terres Centrales	<p>Fraîches : températures moyennes annuelles comprises entre 15°C et 22°C ; On y trouve le minimum des températures moyennes de Madagascar (moins de 14°C).</p> <p>Humides: reçoivent annuellement 1 000 à 2 000 mm de précipitations; 90 à 95 % du total annuel des précipitations tombent de Novembre à Avril.</p>
Nord Ouest	<p>Relativement plus chaude : température moyenne annuelle supérieure à 26°C ; Elle enregistre la température moyenne la plus haute à Madagascar (plus de 29°C).</p> <p>Plutôt sèche : reçoit annuellement 1 000 à 1 500 mm de précipitations.</p>
Extrême Nord	<p>Chaud : températures moyennes annuelles comprises entre 25°C et 27°C.</p> <p>Sèche : cumul annuel de précipitations oscille autour de 1 000 mm.</p>
Sud et Sud-Ouest Continentale	<p>Chaud : températures moyennes annuelles varient entre 21°C et 25°C. Beaucoup plus sèches que celles du Nord : précipitations annuelles comprises entre 500 et 1 000 mm.</p>
Littoral Sud-Ouest	<p>Chaud: températures moyennes annuelles sont supérieures à 24°C. La plus sèche de l'île: reçoit annuellement moins de 500 mm de précipitations.</p>

3. Tendances Climatiques observées

3.1. TENDANCES GLOBALE ET RÉGIONALE

Aujourd'hui, c'est un fait établi et sans équivoque que le réchauffement de l'atmosphère, des océans et des terres est dû aux activités humaines (Fig. 3a). Le réchauffement global déjà constaté est de +1,09°C (2011-2020) par rapport à la période 1850-1900 (Fig. 3b). Le réchauffement directement attribuable aux activités humaines (sur la période 2010-2019) est de +1,07°C, soit la quasi-totalité du réchauffement observé. En Afrique, le taux d'augmentation de la température de surface a généralement été plus rapide que la moyenne mondiale et d'au moins 0,1°C à 0,2°C par décennie entre 1961 et 2015 (Gutiérrez et al. 2021). Sur 51 ans, on observe un réchauffement de 0,5°C à 0,6°C de la surface océanique sur une majeure partie du bassin SOOI (Leroux et al. 2022).

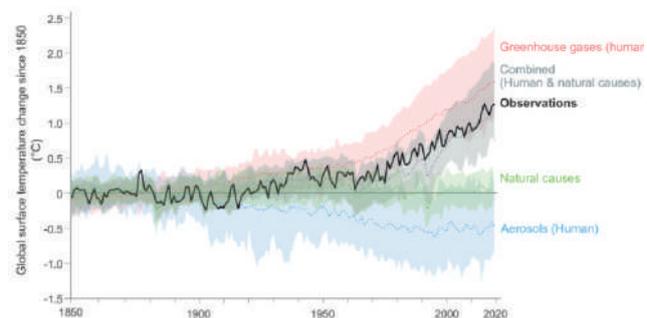
Le niveau moyen de la mer, à l'échelle planétaire, s'est élevé de 20 cm entre 1901 et 2018, ce rythme s'étant accéléré pour atteindre 3,7 mm/an sur la période 2006-2018. Sur ces 25 dernières années, on relève pour le bassin SOOI une élévation relativement importante de +12 cm, soit +5 mm/an en moyenne, supérieure à la valeur moyenne relevée sur le globe. En 2019, les concentrations atmosphériques globales de gaz carbonique (CO₂) sont les plus hautes depuis au moins deux millions d'années. Celles du méthane (CH₄) et de l'oxyde nitreux (N₂O) sont les plus élevées depuis au moins 800 000 ans (Gutiérrez et al., 2021).

3.2. TENDANCES CLIMATIQUES OBSERVÉES À MADAGASCAR

3.2.1. Température Moyenne (1961-2018)

La figure 4 indique l'évolution temporelle des anomalies de température moyenne annuelle (en °C, par rapport à la moyenne sur la période historique 1981-2010) observées sur les six zones climatiques de Madagascar entre 1961 et 2018. On observe un réchauffement de l'ordre de +0,75°C à +1,6°C en 58 ans. L'élévation de température est plus prononcée sur

a) Influence humaine sur le réchauffement observé de 1850 à 2019



b) Changement observé de la température de surface moyenne mondiale (par rapport à 1850-1900)

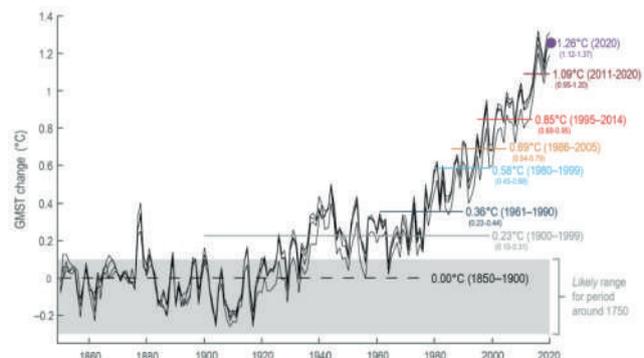


Figure 3: Influence humaine sur le réchauffement observé (FAQ 3.1, Figure 1 in IPCC, 2021) et Changement observé de la température de surface moyenne mondiale par rapport à 1850-1900 (Figure 1.12 in IPCC, 2021)

le littoral Sud-Ouest (Fig.4f), le Sud et Sud-Ouest continental (Fig.4e) et les hautes terres centrales (Fig.4b), de l'ordre de +0,3°C/décennie. Un réchauffement de +0,23°C/décennie a été constaté sur la côte Est (Fig.4a) et le Nord Ouest (Fig.4c). Seul l'extrême Nord (Fig.4d) s'est réchauffé de moins de +0,15°C/décennie.

Les températures maximales montrent une tendance à la hausse de +0,23°C/décennie. Sur une base annuelle, la saison chaude et humide indique une augmentation de +0,20°C/décennie. En hiver, la tendance de la température maximale est de +0,25°C/décennie.

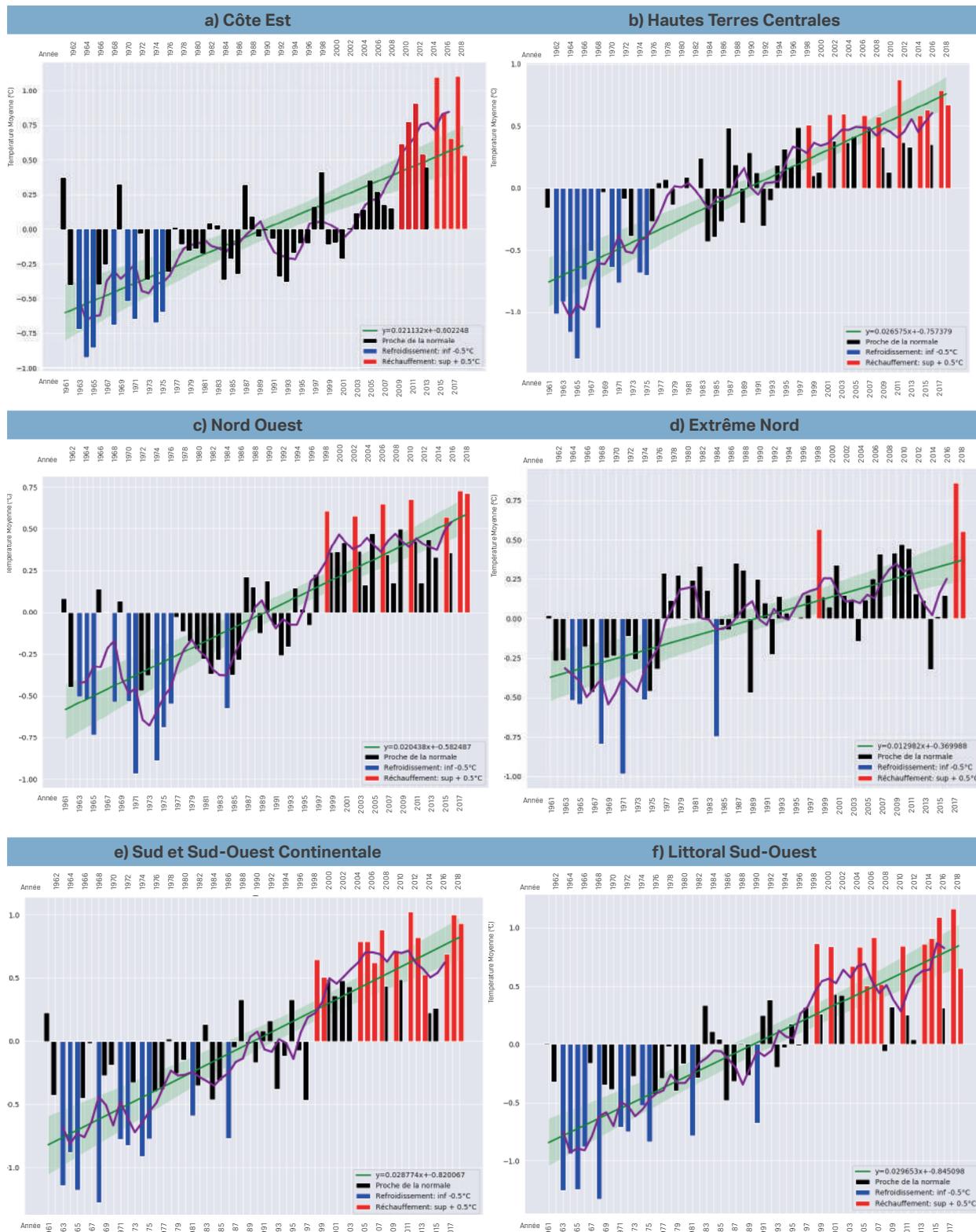


Figure 4 : Evolution temporelle des anomalies de température moyenne annuelle (en °C, par rapport à la moyenne sur la période historique 1981-2010) observées sur 6 zones climatiques depuis 1961. La ligne verte représente la tendance moyenne sur la période 1961-2018.

3.2.2. Précipitations (1961-2018)

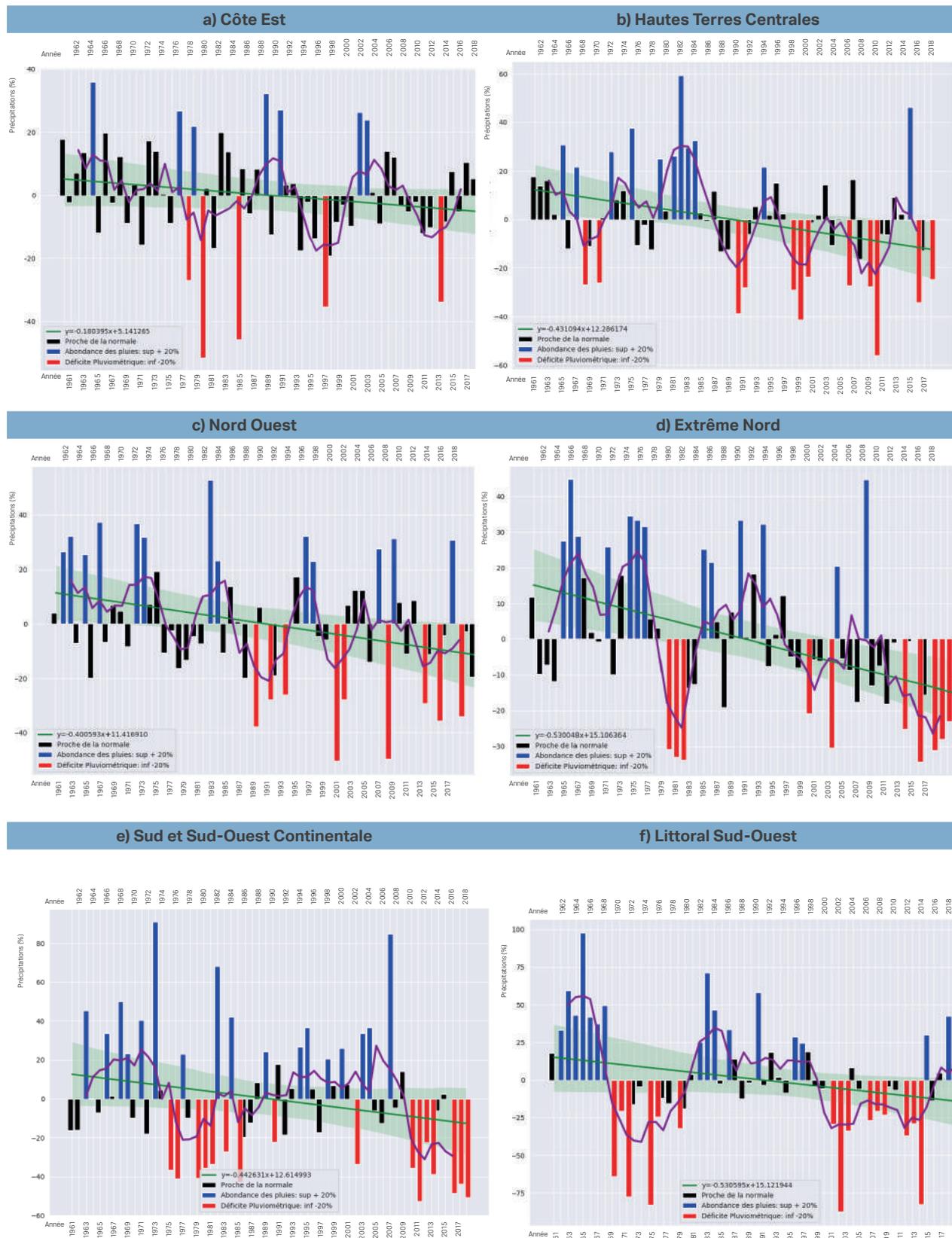


Figure 5 : Evolution temporelle des anomalies du cumul annuel de précipitations (% par rapport à la moyenne sur la période historique 1981-2010) observées sur 6 zones climatiques de Madagascar depuis 1961. La ligne verte représente la tendance moyenne sur la période 1961-2018.

La figure 5 indique l'évolution temporelle des anomalies du cumul annuel de précipitations (% par rapport à la moyenne sur la période historique 1981-2010) observées sur 6 zones climatiques de Madagascar entre 1961 et 2018. On observe une baisse significative de -15% à -20% par rapport à 1981-2010, du cumul annuel de précipitations en 58 ans. Cette baisse de précipitation est plus marquée sur le littoral Sud-Ouest (Fig. 5f) et l'extrême Nord (Fig. 5d), de l'ordre de -7,6%/décennie. Une baisse de -4,5%/décennie a été constatée sur les hautes terres centrales (Fig. 5b), le Nord-Ouest (Fig. 5c) et

le Sud et Sud-Ouest continentale (Fig. 5e). Sur la côte Est (Fig. 5a), cette baisse est moins marquée, autour de -2%/décennie. Cette tendance à la baisse est faible comparée à la très forte variation annuelle des précipitations.

En termes de saison, les précipitations en été montrent un déclin par rapport aux précipitations en hiver. Le nombre de jours où il y a des pluies extrêmes en une journée diminue en général.

3.2.3. Cyclones Tropicaux (1982-2022)

En moyenne et par saison cyclonique (officiellement de Novembre à Avril), 10 perturbations tropicales évoluent dans le bassin du SOOI, parmi lesquelles 5 deviennent des cyclones. Ceci représente 11% de l'activité annuelle mondiale (Leroux et al., 2018).

Depuis la saison cyclonique 1981/1982, on constate à Madagascar une forte variabilité inter-annuelle du nombre et de l'intensité des phénomènes cycloniques mais de tendance presque nulle.

Les cyclones qui touchent la Grande Île prennent naissance

soit dans l'Océan Indien, soit dans le Canal de Mozambique. Pendant les 41 dernières années (1982 à 2022), un total de 82 systèmes a atterri à Madagascar. Ce qui fait en moyenne 2 systèmes par saison pendant la saison cyclonique (Novembre à Avril). Aucune tendance n'est observée pour le nombre de système ayant touché Madagascar au stade de tempête tropicale (Fig 6a) ou cyclone tropical (Fig 6b), tandis qu'une légère tendance à la hausse est observée pour le nombre de système ayant atterri au stade de cyclone tropical intense (Fig 6c).

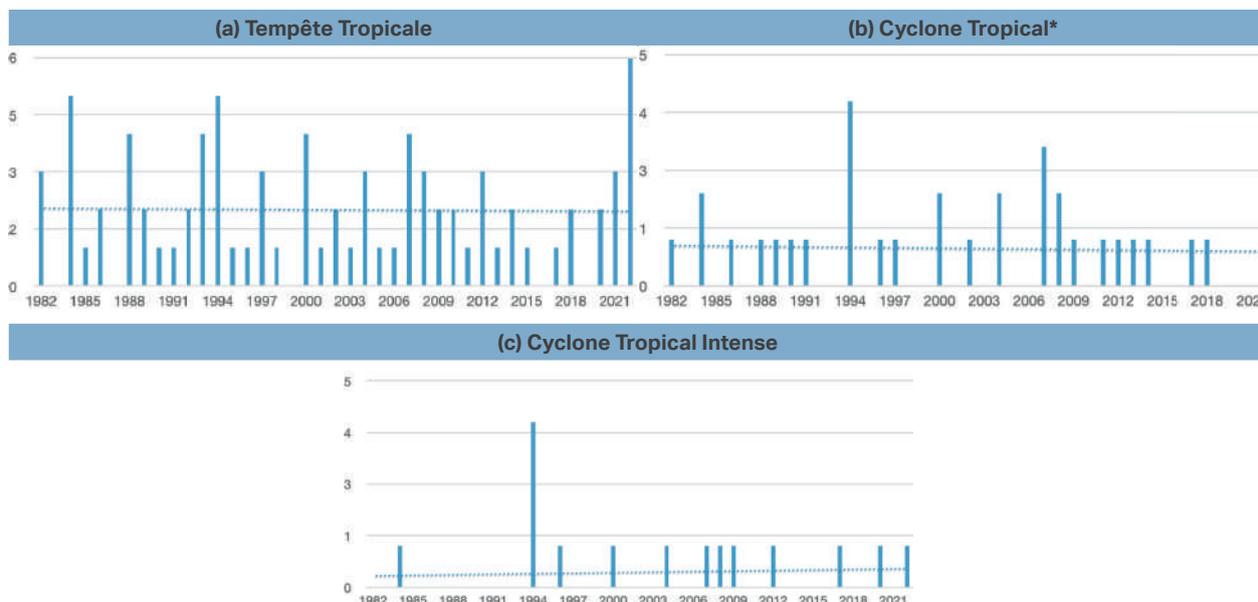


Figure 6: Nombre de Systèmes ayant atterri à Madagascar de 1982 à 2022.

4. Futurs Changements Climatiques à Madagascar

4.1. MODÉLISATION DU CLIMAT

Les Modèles de Circulation Générale (MCG) sont l'outil fondamental utilisé pour projeter les changements dans l'avenir. Ce sont des modèles informatiques complexes, qui représentent les interactions entre les différentes composantes du système climatique telles que la surface terrestre, l'atmosphère et les océans. En faisant des projections du changement climatique, plusieurs MCG et scénarios d'émissions futures de Gaz à Effet de Serre (GES) sont utilisés pour prédire l'avenir. Cela conduit à une suite d'avenirs possibles, dont chacun est une représentation valable de ce que le climat futur peut être. Qu'il existe une gamme de possibilités futures est un concept important à comprendre clairement car cela signifie que nous ne pouvons que suggérer des futurs qui peuvent être plus probables que d'autres.

Les MCG fonctionnent généralement à une échelle spatiale de 150 à 300 km. Avec des échelles généralement plus

grandes, les phénomènes physiques qui prennent place à des échelles spatiales plus fines que la maille du modèle ne sont pas explicitement résolus. De plus, 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. Par conséquent, la technique de « *descente d'échelle* » est généralement utilisée pour produire des projections à une échelle spatiale plus fine ou Modèle Climatique Régional (MCR).

Les principaux objectifs de la régionalisation sont d'améliorer la représentation de la variabilité spatiale et temporelle du climat et de son évolution, en particulier les statistiques des événements extrêmes climatiques (fortes pluies, sécheresses, cyclones, etc.) et de faciliter les études d'impact du changement climatique sur les différents secteurs socioéconomiques (Agriculture, hydrologie, écosystèmes, santé, etc.).

4.2. APPORT DU MODÈLE RÉGIONAL À HAUTE RÉOLUTION ALADIN-CLIMAT

Dans cette étude, on a utilisé le Modèle Climatique Régional ALADIN-Climat dans sa version 6.3 (Daniel, M. Et al., 2019), bénéficiant 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. ALADIN-Climat est couplé, initialisé et forcé aux bords par le Modèle Climatique Global de Météo-France nommé CNRM-ESM2-1 (Séférian et al., 2019).

Une approche multi-scénarios a été retenue dans cette étude pour quantifier l'incertitude climatique liée aux scénarios d'émissions de GES. Trois scénarios de référence de l'AR6 du GIEC ont été simulés avec ALADIN-Climat afin de mieux éclairer les stratégies et décisions publiques : SSP1-2.6 (scénario à faible hausse des émissions), SSP2-4.5 (scénario de hausse intermédiaire des émissions) et SSP5-8.5 (scénario de très forte hausse des émissions).

Toutefois, les sorties brutes, 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. Les sorties brutes des modèles climatiques doivent donc être débiaisées à l'aide de jeux de données observées de référence pour le climat passé. Dans notre cas, la grille des données de référence est plus fine (4 km de résolution horizontale) que celle du modèle, cela permet d'affiner la résolution des données simulées.

La correction de biais va permettre de rendre la distribution statistique des données quotidiennes du modèle identique à la distribution observée en chaque point et pour chaque variable. 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, de telle sorte que les données de la période de référence simulée et les observations deviennent plus équivalentes (Déqué, M. et al., 2007).

4.3. FUTURS CHANGEMENTS CLIMATIQUES À MADAGASCAR

L'analyse du changement climatique concerne les principales variables atmosphériques telles que la température moyenne et les précipitations, leurs comportements moyens (température moyenne, cumul annuel de précipitations...) ou encore des comportements extrêmes (nombre de jours de fortes chaleurs, précipitations extrêmes, ...). Dans tous les cas, on procède à cette analyse sur des périodes de 30 ans afin de lisser la variabilité naturelle du climat. 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.

4.3.1. Températures Moyennes

La figure 7 montre l'évolution temporelle des anomalies de températures moyennes annuelles de chaque zone climatique de Madagascar sur la période 1961-2100 pour les trois scénarios SSP après correction des biais d'ALADIN. Le modèle projette vers la fin du siècle (entre 2071-2100) une augmentation (par rapport à la période historique 1981-2010) de l'ordre de +1.5°C pour le scénario SSP1-2.6 et pour toutes les zones climatiques. Une hausse de +2°C à +3°C est projetée pour le scénario SSP2-4.5, vers la fin du siècle. Selon le scénario pessimiste SSP5-8.5, un réchauffement de +3°C à +5°C sera attendu entre 2071 à 2100.



La figure 8 illustre des représentations spatiales des anomalies de température moyenne annuelle (°C) par rapport à 1981-2010 pour trois scénarios climatiques et deux horizons temporels, sur Madagascar. Des augmentations de températures de valeurs comparables à celles sur le bassin du SOOI sont attendues sur Madagascar.

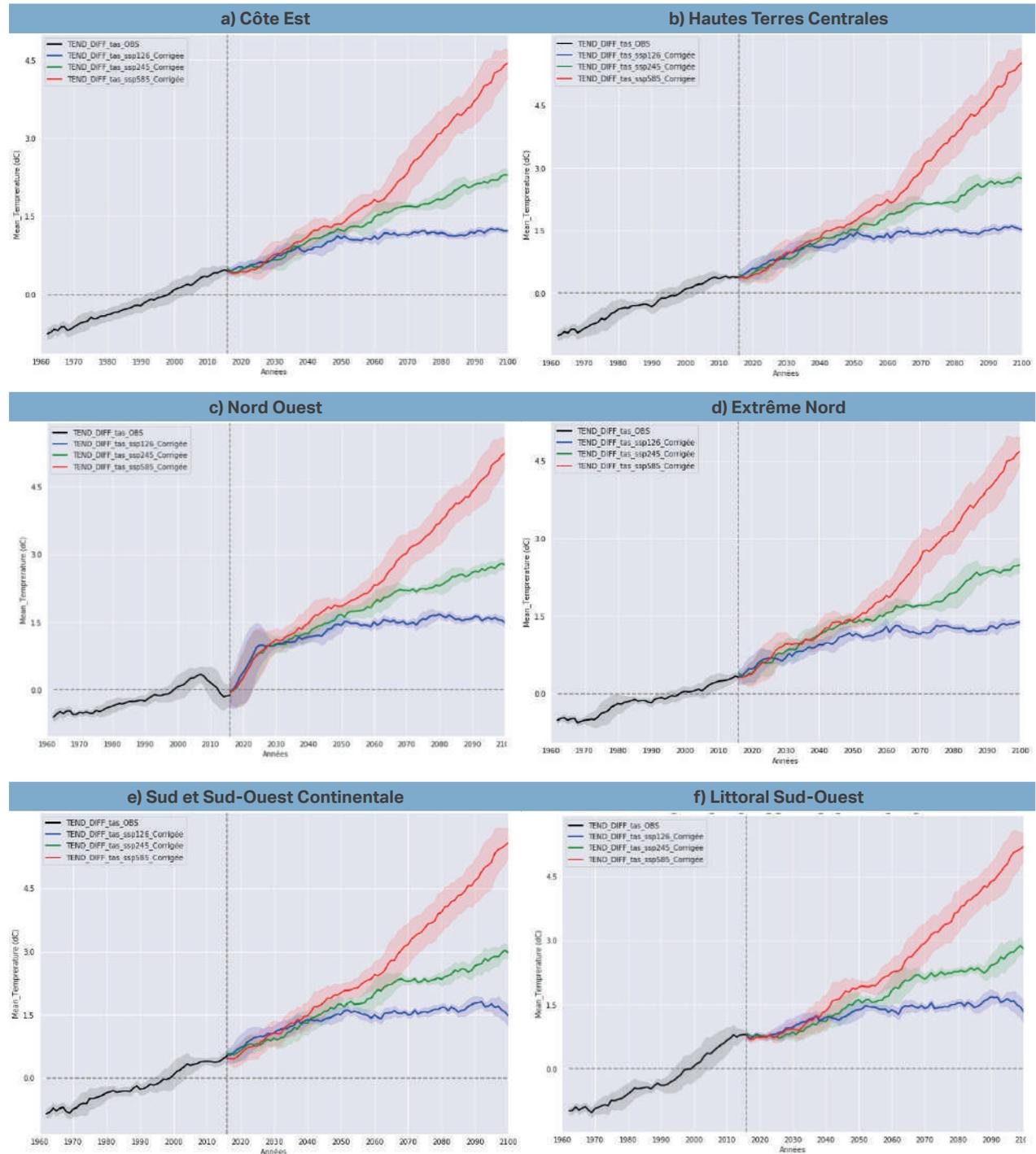


Figure 7: Evolution temporelle sur la période 1961-2100 des anomalies (en % par rapport à la normale 1981-2010) de la température moyenne sur les 6 zones climatiques de Madagascar selon le modèle régional ALADIN pour 3 scénarios SSP. Les données d'observation sont en noir, l'historique modèle en gris, et les simulations du modèle pour 3 scénarios en couleurs.

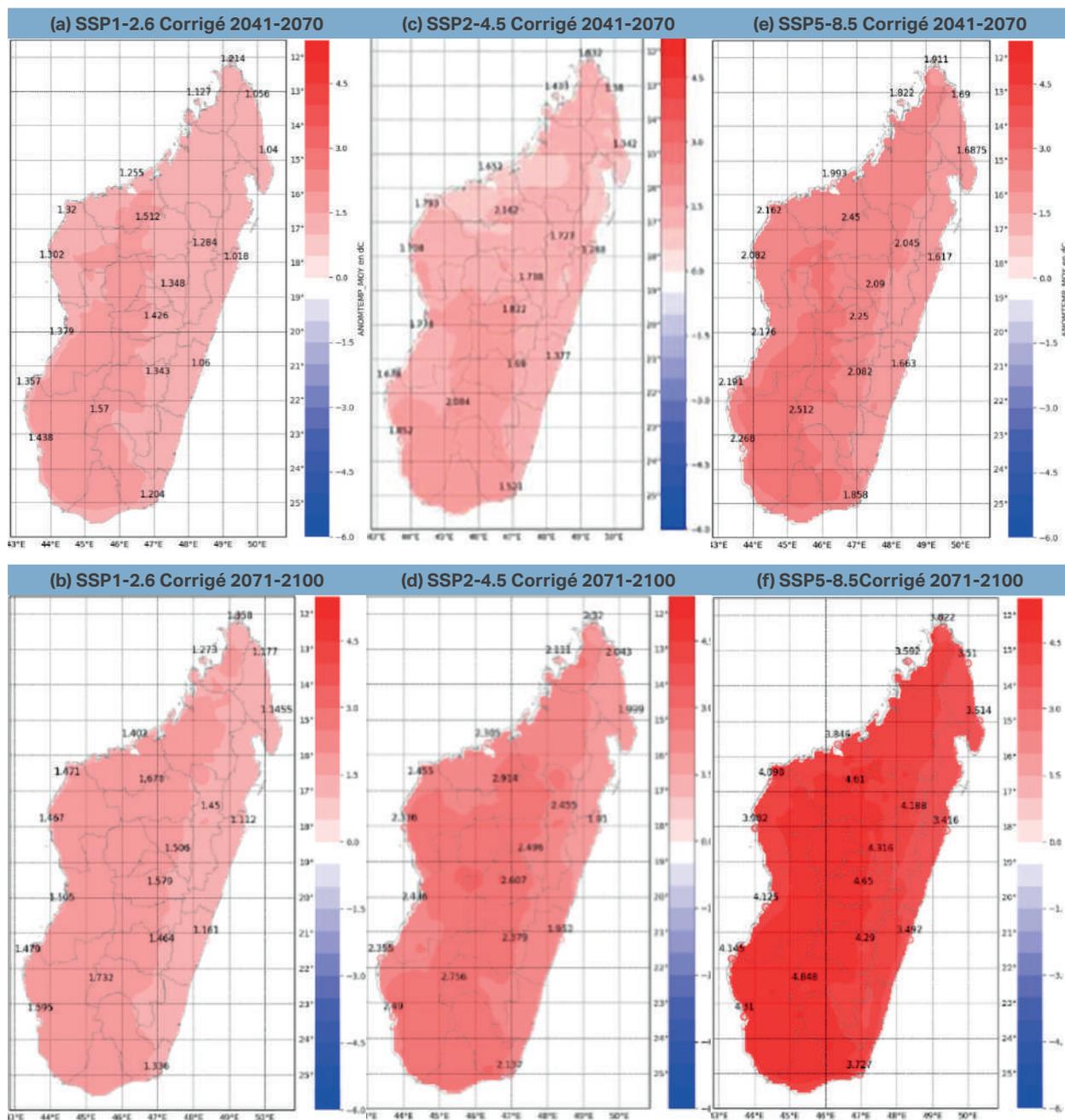


Figure 8 : Anomalies de température moyenne annuelle (°C) par rapport à 1981-2010 selon le modèle régional ALADIN pour trois scénarios climatiques (SSP1-2.6, SSP2-4.5 et SSP5-8.5 de gauche à droite) et deux horizons temporels (milieu de siècle 2041-2070 et fin de siècle 2071-2100). Les nombres superposés sur le graphe indiquent les valeurs sur les 25 stations synoptiques de référence.

4.3.2. Précipitations

La figure 9 montre l'évolution temporelle sur la période 1961-2100 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. Quelque soit les scénario, une baisse des précipitations annuelles, de l'ordre de -5% à -10%, est attendue sur la côte Est (Fig. 9a) et l'extrême Nord (Fig. 9d) de l'île au milieu et vers la fin du siècle. Tous les scénario projettent une baisse entre -10% et -20% pour les hautes terres centrales (Fig. 9b) et la zone Nord-Ouest (Fig. 9c). Sauf dans les deux zones "Sud et Sud-Ouest continental (Fig. 9e)" et "littoral Sud-Ouest (Fig. 9f)", une tendance à la hausse sera attendue.

Le modèle ALADIN anticipe aussi une accentuation de l'amplitude de la variabilité interannuelle des précipitations, sauf dans l'extrême Nord (Fig. 9d) où la variabilité historique était déjà très élevée. Les extrêmes seront plus importants, les risques de sécheresse et d'inondation seraient plus élevés que dans le passé.

C'est dans le scénario pessimiste SSP5-8.5 que la baisse des précipitations annuelles moyennes sera la plus prononcée sur Madagascar, atteignant -10% à -20%, avec des extrêmes à presque -30% sur les hautes terres centrales en milieu de siècle (Fig. 10e). La tendance vers la hausse des précipitation sur la partie Sud et Sud-Ouest de Madagascar a été prouvée par les représentations spatiales des deux scénarios (optimiste SSP1-2.6 et modéré SSP2-4.5) vers la fin du siècle (Fig. 10b et 10d).

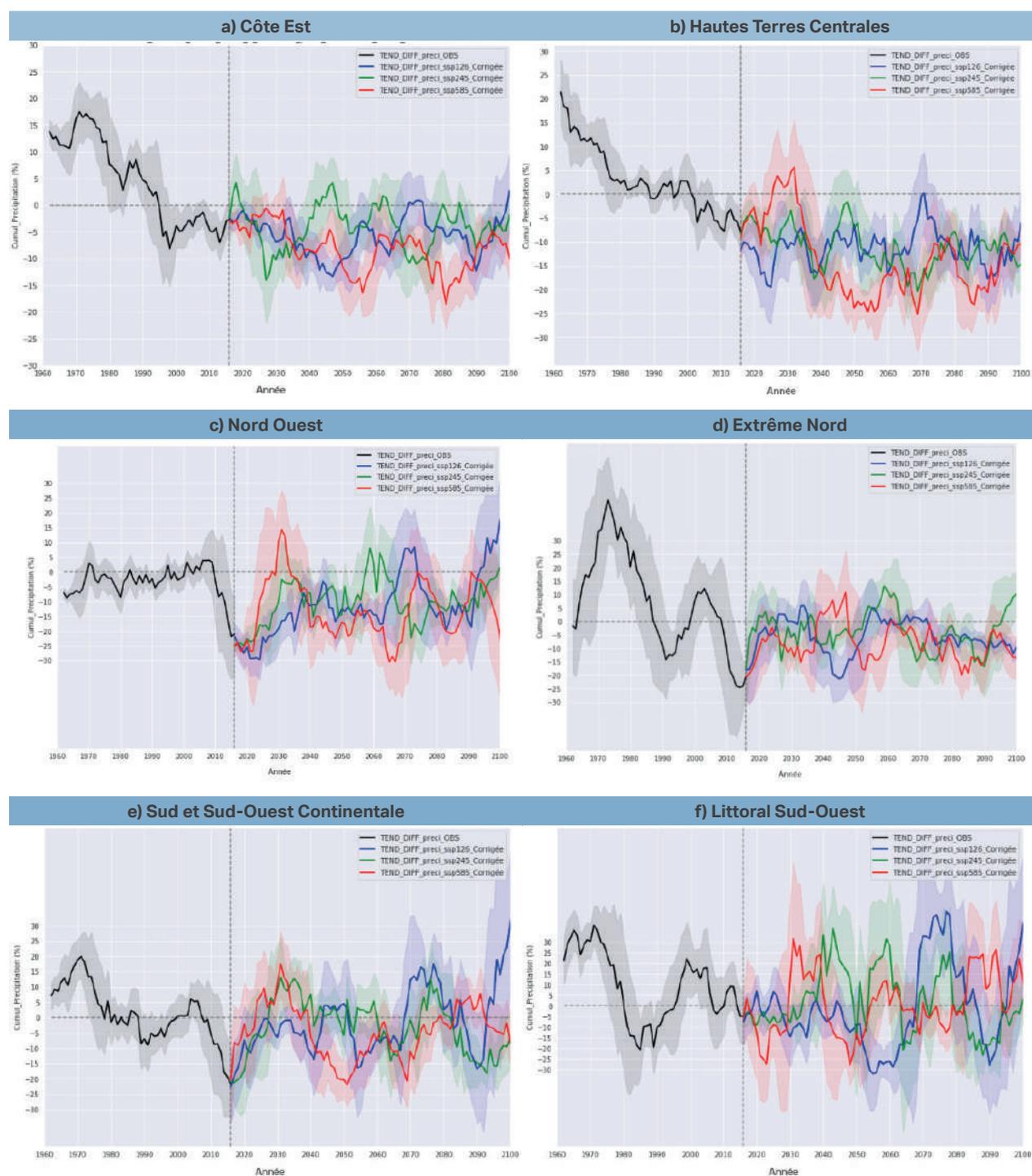


Figure 9 : Evolution temporelle sur la période 196 1-2100 des anomalies (en % par rapport à la normale 1981-2010) du cumul annuel de précipitations sur les 6 zones climatiques de Madagascar selon le modèle régional ALADIN pour 3 scénarios SSP. Les données d'observation sont en noir, l'historique modèle en gris, et les simulations du modèle pour trois scénarios en couleurs.

Les cumuls trimestriels indiquent un retard de démarrage de la saison des pluies avec un trimestre Octobre-Novembre-Décembre (OND) plus sec que la normale historique hormis sur le littoral Sud-Ouest dans le scénario SSP1-2.6. La bordure littorale de la côte Est semble plus arrosée au trimestre Avril-Mai-Juin (AMJ) quelque soit le scénario. C'est en saison sèche, quand les cumuls de pluie sont les plus bas, que le signal du changement climatique est plus contrasté.

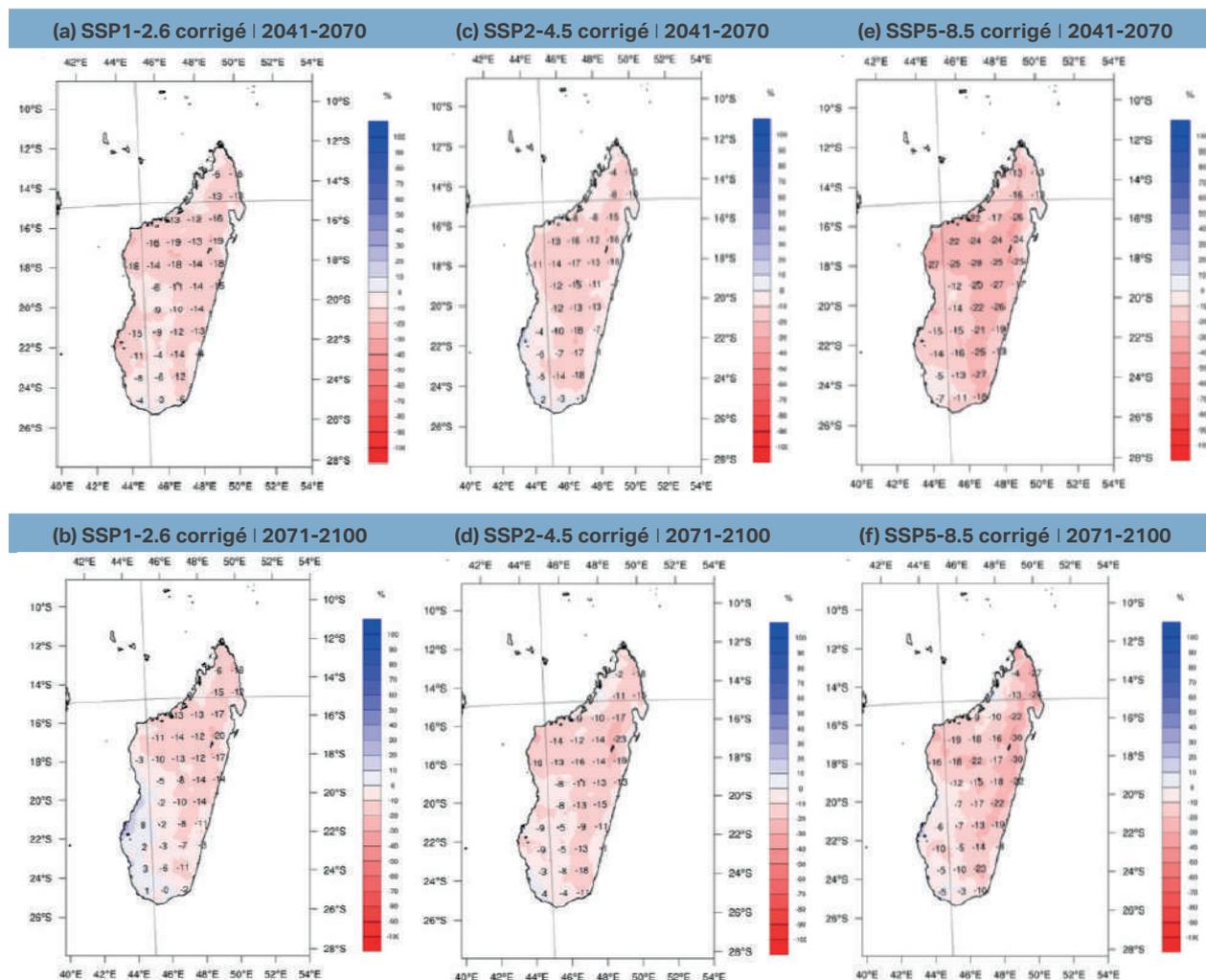


Figure 10 : Anomalies (en % par rapport à la normale 1961-2010) du cumul annuel de précipitations sur Madagascar selon le modèle régional ALADIN pour trois scénarios climatiques (SSP1-2.6 à gauche, SSP2-4.5 au milieu, et SSP5-8.5 à droite) et deux horizons temporels (milieu de 2041-2071 et fin de siècle 2071-2100).

4.3.3. Activité cyclonique

Les simulations régionales disponibles montrent une probable diminution du nombre total de systèmes dépressionnaires dans le SOOI (Fig. 11), 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 Madagascar (Fig. 12). Dans le contexte du réchauffement climatique, on peut donc s'attendre à une intensification des précipitations et des vents au sein des systèmes dépressionnaires tropicaux au cours du 21ème siècle.

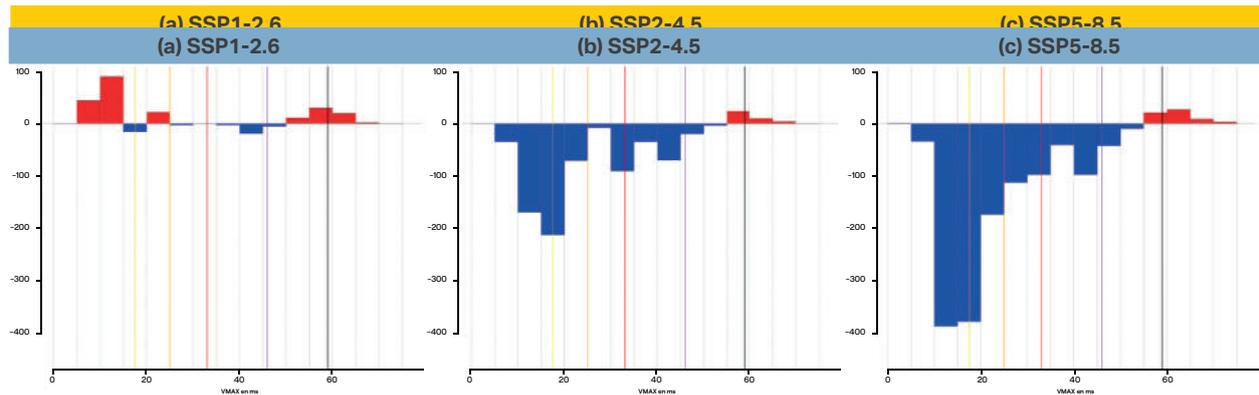


Figure 11: Évolution de la fréquence des systèmes cycloniques du bassin SOOI par seuil de vent dans les simulations ALADIN sur la période future 2066-2099 pour 3 scénarios (a) SSP1-2.6, (b) SP2-4.5, et (c) SSP5-8.5. En rouge une augmentation du nombre, en bleu une diminution (Leroux et al. 2022).

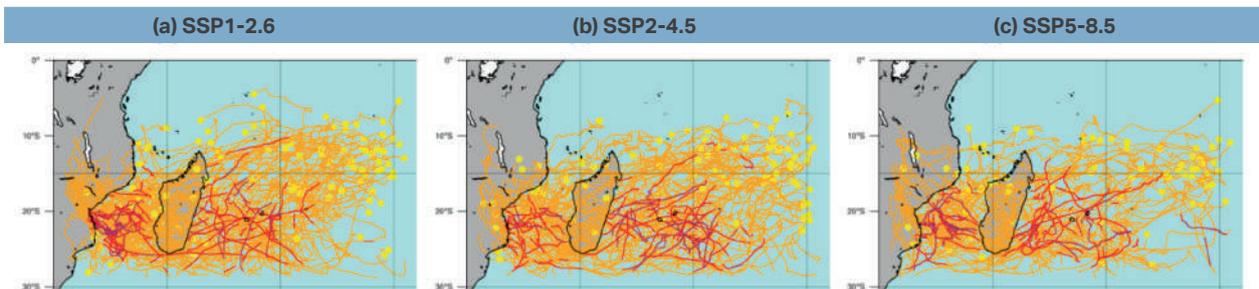


Figure 12: Trajectoires des systèmes tropicaux du bassin SOOI dans les simulations ALADIN sur la période future 2066-2100 pour 3 scénarios (a) SSP1-2.6, (b) SSP2-4.5, et (c) SSP5-8.5. En orange les systèmes au stade de tempête, en rouge ceux au stade de cyclone, et en pourpre les cyclones intenses et très intenses. Un rond jaune matérialise le début de chaque trajectoire (Leroux et al. 2022).



5. Conclusion

Les relevés historiques de la température moyenne de l'air en surface dans les diverses zones climatiques sur la période passée (une cinquantaine d'années) mettent en évidence que le réchauffement climatique est en marche sur Madagascar et s'accorde avec les tendances mondiales.

Madagascar subit une 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.

Quelque soit le scénario, le réchauffement climatique persiste toujours sur Madagascar. Les températures moyennes annuelles vont probablement augmenter du milieu et vers la fin du siècle, en particulier sur les hautes terres centrales, le Nord-Ouest et le Sud de l'île.

Pour les futurs changements climatiques, les précipitations annuelles moyennes auront plus de chance de diminuer que d'augmenter au cours du siècle sur Madagascar. 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. On peut s'attendre à une intensification des précipitations extrêmes au cours du 21^{ème} siècle quel que soit le scénario.

Les simulations régionales ALADIN 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, une migration vers le Sud des points d'impacts serait probable.

6. Références

1. <https://fr-be.topographic-map.com/map-pk9z4/>
2. Goodman, S. M., 2008 : Paysage naturels et biodiversité de madagascar. Tech. rep., Muséum national d'Histoire naturelle, Paris ; WWF, Antananarivo, 694 p.
3. Nematchoua Modeste, 2017, A study on outdoor environment and climate change effects in Madagascar. *Journal of Buildings and Sustainability*
4. Gutiérrez et al., 2021: Atlas. In *Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the AR6 of the IPCC*.
5. Leroux et al. 2022. Régionalisation du changement climatique et développement de services climatiques dans le sud-ouest de l'océan Indien et ses territoires insulaires.
6. FAQ 3.1, Figure 1 in IPCC, 2021: Chapter 3. In: *Climate Change 2021: The Physical Science Basis*.
7. Figure 1.12 in IPCC, 2021: Chapter 1. In: *Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of WGI to the AR6 of the IPCC*.
8. 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>.
9. Séférian, R. 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.
10. 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.
11. Leroux et al., 2018. A Climatology of South-west Indian Ocean Tropical Systems : Their Number, Tracks, Impacts, Sizes, Empirical Maximum Potential Intensity, and Intensity Changes.

Nos contacts

Direction Générale de la Météorologie
B.P 1254 Ampandrianomby Rue Farafaty
101 Antananarivo, Madagascar

Téléphone: +261 34 05 582 46

Site Web: www.meteomadagascar.mg

Facebook: Foibe Famantarana ny Toetry ny Andro

Application mobile: Météo Madagascar Officielle