

METEO FRANCE
Toujours un temps d'avance

Etude pour l'identification des évolutions des changements climatiques à
La Réunion (version finale)

REF : version 1.0

Date : 29-sept.-09

Etude pour l'identification des évolutions des changements climatiques à La Réunion

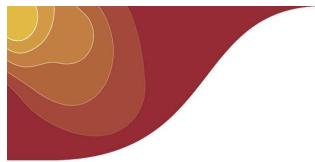
(*version finale 1.0*)

Destinataires :

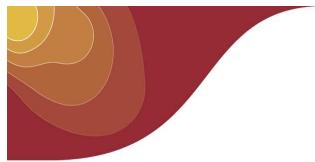
HÔTEL DE REGION PIERRE LAGOURGUE
Avenue René-Cassin
Moufia – B.P. 7190
97719 ST-DENIS MESSAG CEDEX 9

		Date	Signature
Réalisé par	Denis Roy – Bureau d'études et Climatologie (Direction Interrégionale de La Réunion) Hubert Quetelard – Responsable du Bureau d'études et Climatologie (Direction Interrégionale de La Réunion) Guillaume Jumaux – Bureau d'études et Climatologie (Direction Interrégionale de La Réunion)		
Validé par	Pierre Bessemoulin - Président de la Commission de Climatologie (CCI) de l'Organisation Météorologique Mondiale (OMM) Jean-Marc Moisselin – Chargé de mission sur le changement climatique à Météo-France		
Autorisé par	Yves Grégoris – Directeur Interrégional de Météo-France à La Réunion		

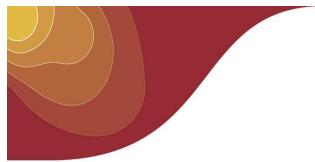
Entité Emettrice : Météo France – Direction Interrégionale de La Réunion



<i>Introduction</i>	4
<i>Synthèse</i>	5
1 Rappel des causes du réchauffement global actuel	8
1.1 L'effet de serre	8
1.2 Définition du forçage radiatif du système climatique	8
1.3 Evolution des concentrations des gaz à effet de serre	9
2 Analyse des valeurs observées à ce jour	11
2.1 Evolution des paramètres observés dans le monde et sur l'océan Indien	11
2.1.1 Températures	11
2.1.1.1 Températures moyennes	11
2.1.1.2 Températures extrêmes	12
2.1.2 Précipitations	13
2.1.2.1 Précipitations moyennes	13
2.1.2.2 Précipitations extrêmes	14
2.1.3 Tempêtes et cyclones	14
2.1.4 Niveau de la mer	14
2.2 Evolution des paramètres observés à La Réunion	16
2.2.1 Constitution des séries homogénéisées	16
2.2.2 Températures	17
2.2.2.1 Rappel sur les températures moyennes observées à La Réunion	17
2.2.2.2 Tendance annuelle sur 40 ans	18
2.2.2.3 Evolution saisonnière des températures sur 40 ans	20
2.2.2.4 Etude des indices climatiques	21
2.2.3 Précipitations	24
2.2.3.1 Rappel sur les précipitations moyennes observées à La Réunion	24
2.2.3.2 Tendance annuelle sur 40 ans	25
2.2.3.3 Tendances saisonnières sur 40 ans	26
2.2.3.4 Etude des indices climatiques	29
2.2.4 Activité cyclonique	32
2.2.4.1 La base de données cyclones	32
2.2.4.2 L'évolution des techniques d'observation et d'estimation d'intensité	32
2.2.4.3 Evolution de l'activité cyclonique sur le bassin	34
2.2.4.4 Evolution de l'activité cyclonique à proximité de La Réunion	37
2.2.4.5 Relations avec l'oscillation ENSO	38
2.2.4.6 Résolution des problèmes d'homogénéisation	40
2.2.5 Activité orageuse	42
2.2.5.1 Définition et détection des orages	42
2.2.5.2 Etude annuelle du nombre d'orages à Gillot	42
2.2.5.3 Etude saisonnière du nombre de jours d'orage	43



2.2.6 Houles australes et cycloniques	44
2.2.6.1 Rappels sur la houle	44
2.2.6.2 Les types de houle sur le rivage réunionnais	44
2.2.6.3 Holographes et satellites altimétriques	45
2.2.6.4 Etude des houles australes	46
2.2.6.5 Etude des houles cycloniques	48
3 Prévision globale de l'évolution du climat	50
3.1 La modélisation climatique	50
3.1.1 Généralités	50
3.1.1.1 Les modèles climatiques	50
3.1.1.2 Les différentes simulations des modèles climatiques	51
3.1.2 Les différents scénarios	51
3.2 Les projections pour le monde et le Sud-Ouest de l'océan Indien	54
3.2.1 Températures	54
3.2.2 Précipitations	55
3.2.3 Phénomènes extrêmes	56
3.2.4 Le problème des cyclones dans la modélisation climatique	57
3.2.5 Niveau de la mer	58
4 Projections régionales pour La Réunion	59
4.1 Limites de la régionalisation	59
4.2 Analyse des scénarios climatiques du GIEC	60
4.2.1 Températures	61
4.2.1.1 Simulation de l'évolution récente du climat	61
4.2.1.2 Simulation des températures pour le 21 ^{ème} siècle	61
4.2.2 Précipitations	63
4.2.2.1 Simulation de l'évolution récente du climat	63
4.2.2.2 Simulation des précipitations pour le 21 ^{ème} siècle	63
4.3 Analyse des scénarios d'ARPEGE Climat	67
4.3.1 Caractéristiques du modèle ARPEGE	67
4.3.2 Circulation générale : le régime des alizés	67
4.3.3 Températures	71
4.3.3.1 Simulations ARPEGE étiré	71
4.3.3.2 Simulation ARPEGE 50×50 km ² et indices climatiques	72
4.3.4 Précipitations	75
4.3.4.1 Simulations ARPEGE étiré	75
4.3.4.2 Simulation ARPEGE 50×50 km ² et indices climatiques	76
Références bibliographiques	78



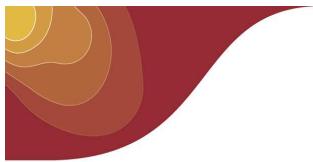
Introduction

Depuis 4 milliards et demi d'années que la Terre existe, le climat n'a cessé de changer à toutes les échelles de temps et ce pour des raisons naturelles. Le Soleil étant la seule source d'énergie de la machine climatique, il est évident que les grandes variations climatiques que notre monde a connu depuis sa naissance sont étroitement liées à des fluctuations concernant la forme de l'orbite terrestre, l'inclinaison de l'axe de la Terre par rapport à la direction du soleil et la période de l'année par rapport à laquelle la Terre est au plus près ou au plus loin du Soleil. L'alternance de périodes de glaciation et de périodes plus clémentes dites interglaciaires est la conséquence directe de ces fluctuations astronomiques.

La composition chimique de l'atmosphère joue également un rôle important dans l'équilibre radiatif de la Terre. Les gaz qui présentent une capacité importante d'absorption dans l'infrarouge thermique sont tous des gaz dits à « effet de serre » et l'augmentation de leur concentration conduit à une augmentation de l'effet de serre et par là même à une augmentation de la température moyenne du globe. Les fluctuations de ces concentrations se combinant aux fluctuations astronomiques peuvent ainsi accentuer les changements climatiques en « tirant » le climat vers le chaud ou le froid.

C'est dans les années 1970 que sont parues les premières publications scientifiques mettant en évidence une augmentation régulière et significative de la concentration atmosphérique en dioxyde de carbone depuis le milieu du XIXème siècle, début de l'ère industrielle. Les chercheurs se sont très rapidement intéressés à la question, les médias se sont faits l'écho des résultats obtenus, des polémiques et des inquiétudes, et enfin ce sont les politiques qui ont pris conscience du problème et ont commencé à discuter des moyens à mettre en œuvre pour limiter le réchauffement global attendu et ses conséquences sur divers éléments du climat.

Par delà les polémiques et l'opposition entre le « catastrophisme » et le discours du « tout va bien », il s'agit donc de faire le point régulièrement sur l'état des connaissances, de déterminer ce qui est maintenant indiscutable et ce qui pose encore question. L'objectif de ce rapport va bien dans ce sens.



Synthèse

L'impact des émissions anthropiques des gaz à effet de serre est l'un des problèmes environnementaux majeurs de notre société. Comment caractériser l'impact du changement climatique sur un territoire aussi réduit que l'Île de La Réunion ? Ce document décrit les méthodes et leurs marges d'incertitudes qui permettent d'évaluer et de prévoir l'évolution du climat avec le plus de rigueur possible. Et c'est à partir de ces méthodes, que des réponses peuvent être apportées sur l'évolution du climat passé et futur avec le moins d'ambiguïté possible, en partant de l'échelle mondiale jusqu'à l'échelle de La Réunion.

Les méthodes et leurs incertitudes pour évaluer le changement climatique

Les méthodes pour détecter les tendances du climat passé

Pour évaluer des tendances fiables sur l'évolution des paramètres météorologiques, le choix des postes de mesure de référence est primordial. L'objectif est de disposer de séries climatologiques les plus longues possibles avec une qualité suffisante pour être exploitables. Mais pour lever toutes ambiguïtés sur l'origine du signal détecté, les données doivent auparavant être homogénéisées en croisant les séries entre elles. L'objectif de cette homogénéisation est de détecter des ruptures introduites par des modifications telles que des changements de capteurs ou d'environnement des sites de mesure, et de corriger les biais pour ne laisser apparaître que le seul signal climatique. A l'échelle du globe, les postes de référence sont suffisamment nombreux pour établir des tendances sur le 20^{ème} siècle. Sur l'Île de La Réunion, l'étude réalisée dans ce rapport a porté sur la période 1969-2008 pour les paramètres température et précipitations. L'activité orageuse a également été étudiée.

Pour pallier au manque de moyens d'observation, une méthode consiste à étudier les données d'un paramètre, non pas observé, mais simulé à l'aide d'un modèle numérique. Une étude sur la fréquence des épisodes de houle australe a ainsi été entreprise grâce aux données ré-analysées du modèle numérique du centre européen pour les prévisions météorologiques à moyen terme (CEPMMT). Il faut toutefois rester prudent sur l'interprétation de ces données qui ne sont que simulées.

Le manque d'homogénéité des bases de données disponibles sur les cyclones est un véritable problème pour évaluer des tendances fiables sur l'évolution de l'activité cyclonique sur tous les bassins du monde et pour tenter d'établir un lien entre changement climatique et activité cyclonique. Malgré tout, une étude a pu être réalisée sur le bassin sud-ouest de l'océan Indien qui intéresse La Réunion.

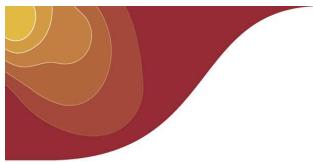
Les outils pour prévoir le climat futur

Les projections pour le climat futur sont réalisées à l'aide de modèles climatiques. Pour résoudre la complexité du système climatique, ces modèles prennent en compte l'atmosphère, les océans, les surfaces continentales, la banquise... Bien que ces modèles s'améliorent sans cesse, ils restent encore imparfaits et simulent difficilement certains paramètres physiques comme par exemple les nuages.

L'étude de l'évolution des changements climatiques à la Réunion s'est appuyée d'une part sur les simulations de 15 modèles différents, dont les résultats ont contribué à la rédaction du 4^{ème} rapport du Groupe d'Experts Intergouvernemental sur l'Evolution du Climat (GIEC), et d'autre part sur plusieurs configurations du modèle climatique développé par Météo-France.

Différents scénarios d'émissions de gaz à effet de serre sont introduits dans les modèles pour prendre en compte les incertitudes du développement mondial futur. Le GIEC a ainsi établi 40 scénarios. Mais, seuls 3 scénarios sont, en général, privilégiés pour réaliser les simulations climatiques :

- Le scénario A2 où les émissions de CO₂ continueront de croître jusqu'en 2100.
- Le scénario A1B où les émissions de CO₂ continueront de croître jusqu'en 2050, puis diminueront.



- Le scénario B1 où les émissions de CO₂ sont presque stabilisées dès l'année 2000, puis décroissent à partir de 2050.

Les modèles climatiques globaux effectuent généralement des calculs sur une grille de 300×300 km². Les différents microclimats de l'île ne peuvent donc pas être simulés directement par les modèles. Pour autant, c'est l'évolution du climat à grande échelle qui dicte l'évolution de ces microclimats. L'étude des données des modèles globaux est donc indispensable, d'autant plus qu'une analyse multi-modèles et multi-scénarios apporte un degré de confiance plus élevé aux résultats. Dans un futur proche, des techniques de « descente d'échelle » permettront d'accéder à des descriptions plus fines du climat. Pour ce rapport, une 1^{ère} technique de « descente d'échelle » assez fruste a été mise en œuvre à l'aide d'une simulation particulière du modèle climatique de Météo-France configuré avec une résolution de 50×50 km².

L'évolution passée et future du climat de l'échelle mondiale à l'échelle de La Réunion

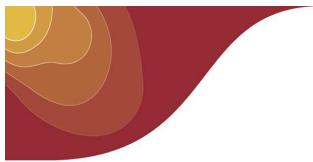
Les tendances observées

Le réchauffement du système climatique est sans équivoque. Dans son dernier rapport, en 2007, le GIEC évalue l'augmentation moyenne mondiale superficielle à +0,74°C sur 100 ans (1906-2005) avec un rythme qui s'est accéléré au cours des 50 dernières années pour atteindre 0,13°C par décennie. Mais la hausse n'est pas uniforme sur le globe. Ainsi, notre zone de l'océan Indien a connu un réchauffement moins rapide que beaucoup de régions du globe. L'étude sur l'évolution des températures sur la période 1969-2008 montre que les températures moyennes observées à La Réunion ont augmenté de 0,62°C en 40 ans. Ce réchauffement est identique à celui du globe mesuré sur la même période, moins important que celui de l'hémisphère Nord (+0,81°C) mais plus fort que celui de l'hémisphère Sud (+0,43°C). La hausse est plus marquée sur les températures maximales que les températures minimales. On constate également une hausse plus importante pendant la saison de l'automne austral (mars-avril-mai). Le pourcentage de journées ou nuits froides a diminué plus ou moins fortement selon les postes, tandis que le pourcentage de journées ou nuits chaudes a nettement augmenté.

Le changement climatique se manifeste dans des modifications des régimes de précipitations sur plusieurs régions du globe. Sur les vastes zones océaniques comme le Sud-Ouest de l'océan Indien, la rareté des points de mesure complique la détection d'un changement de régime des précipitations. Sur l'Île de La Réunion, l'étude sur l'évolution des précipitations a été possible grâce aux données de 51 postes pluviométriques répartis sur l'île. Bien que la grande variabilité interannuelle des précipitations sur notre bassin soumis à l'aléa cyclonique complique la détection de tendances robustes, on note une tendance sur 40 ans à la baisse des précipitations sur les régions de l'Ouest, du Sud-Ouest et du Sud de l'Île de La Réunion. Par contre, sur l'autre côté de l'île, sur la façade au vent, on observe une augmentation des jours de faibles précipitations accompagnée d'une baisse de la durée des épisodes secs, mais peu d'évolution sur les quantités. Les mois d'hiver austral ont connu une baisse généralisée des précipitations. Le nombre de jours de précipitations modérées baisse sur l'ensemble de l'île mais aucune tendance fiable ne peut être déduite sur la fréquence des épisodes de précipitations extrêmes.

L'étude sur l'activité cyclonique de 1967 à 2009 montre que 9,3 systèmes tropicaux se sont formés, en moyenne par an, sur le bassin du Sud-Ouest de l'océan Indien et 4,8 ont atteint le stade de cyclone tropical avec une forte variabilité interannuelle. Cette importante variabilité ne peut pas être expliquée de manière simple, mais par contre, il est clairement établi que le phénomène El Niño-Oscillation Australe (ENSO) joue un rôle dans le déplacement des zones préférentielles de cyclogenèses sur le bassin. Ces zones sont situées plus à l'Ouest lors d'épisodes ENSO. Les données disponibles ne sont pas, à l'heure actuelle, suffisamment homogènes pour dégager des tendances indiscutables sur l'évolution de l'activité cyclonique sur le bassin et à proximité des côtes de la Réunion.

En réponse au réchauffement climatique le niveau de la mer s'est élevé de 15 à 20 centimètres au cours du 20^{ème} siècle et l'élévation du niveau de la mer se poursuit à la vitesse de 3,2 mm par an depuis 1993 selon les mesures des satellites altimétriques.



Une étude sur l'évolution de l'activité orageuse a été effectuée à La Réunion. Elle montre que la station de Gillot a connu, de 1969 à 2008, 12,8 jours d'orage en moyenne par an essentiellement pendant la saison chaude (de décembre à mai). Sur cette même période, le nombre annuel de jours d'orages a baissé de 2 jours.

L'étude de la fréquence des épisodes de houle australe, réalisée à l'aide de données simulées, semble indiquer une légère augmentation des épisodes depuis 50 ans avec une accélération de cette augmentation dans les 20 dernières années.

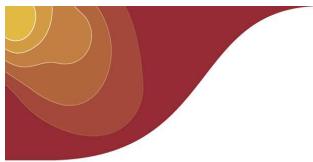
Les caractéristiques du climat futur

Pour le climat futur, les simulations des modèles climatiques indiquent une hausse des températures moyennes du globe de 1,8 à 4,0°C selon les scénarios. Sur l'océan Indien, le réchauffement est un peu plus faible avec des valeurs prévues comprises entre 1,4°C et 3,7°C. La hausse prévue des températures sur l'île de La Réunion est encore plus faible avec une fourchette comprise entre 1,0 et 3,2°C selon les scénarios et les modèles.

Les simulations climatiques prévoient une augmentation des précipitations très probable sous les hautes latitudes et des baisses probables sur la plupart des terres tropicales. Dans l'océan Indien, les projections des précipitations annuelles font apparaître une tendance de -2% à +20% selon les modèles par rapport au climat actuel. Sur La Réunion, la moyenne des modèles prévoit une légère baisse des précipitations pour la fin du 21^{ème} siècle qui varie entre -6 et -8% selon les scénarios mais avec une dispersion qui varie de -36% à +21% selon les modèles. En revanche, quels que soient les scénarios envisagés, les modèles semblent s'accorder sur une baisse plus marquée des précipitations pendant l'hiver austral.

Les projections de modèles climatiques à l'horizon 2100 montrent que le niveau de la mer va continuer de monter à un rythme d'environ 4 ± 2 mm/an soit une élévation de 20 à 60 centimètres en un siècle. Les modèles prédisent une forte variabilité régionale des changements du niveau de la mer pour le siècle à venir. Les résultats des simulations sont très différents d'un modèle à l'autre, si bien qu'il est difficile de dire, pour l'instant, quelle sera plus précisément la hausse du niveau de la mer sur les côtes de La Réunion.

Les modèles climatiques simulent l'évolution des grands centres d'action tels les anticyclones qui sont à l'origine des alizés qui soufflent sur les côtes de La Réunion une bonne partie de l'année. Dans le climat du 21^{ème} siècle, l'anticyclone des Mascareignes se renforcerait pendant l'hiver austral et devrait ainsi engendrer des alizés plus vigoureux. Pour autant, l'orientation des alizés ne varierait pas. Les côtes les plus ventées resteraient les façades Nord-Est et Sud-Ouest.



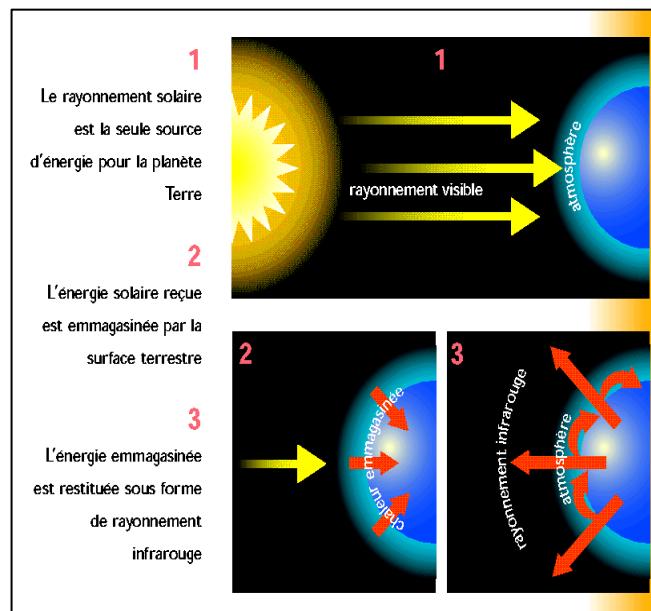
1 Rappel des causes du réchauffement global actuel

1.1 L'effet de serre

L'effet de serre est un phénomène naturel. Il piège une partie du rayonnement solaire et permet à la température de la basse atmosphère de se maintenir autour de 15°C en moyenne. Sans cet effet de serre, principalement dû à la vapeur d'eau, la température moyenne serait de -18°C et la vie sur Terre n'aurait pas connu un développement sous ses formes actuelles.

Mécanisme de l'effet de serre (Figure 1) :

- Le soleil émet un rayonnement avec des longueurs d'onde comprises entre 0,2 micromètre et 3 micromètres. La transparence de l'atmosphère dans le domaine visible (le rayonnement visible est compris entre 0,4 µm et 0,7 µm) permet au rayonnement solaire d'atteindre le sol et tend à réchauffer la surface terrestre.
- La surface terrestre, à son tour, rayonne sa chaleur. Compte tenu de sa température, ce rayonnement, dirigé vers le ciel, se situe dans le domaine de l'infrarouge (le rayonnement infrarouge est compris entre 5 et 10 µm).
- Les gaz à effet de serre (GES) ont la propriété d'absorber ce rayonnement infrarouge, piégeant ainsi l'énergie du soleil réémise par la surface terrestre et contribuant alors au réchauffement des basses couches de l'atmosphère.

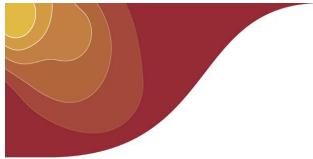


L'azote et l'oxygène sont quasiment transparents au rayonnement infrarouge. Ils ne sont pas impliqués dans l'effet de serre. La contribution à l'effet de serre la plus importante provient de la vapeur d'eau atmosphérique et représente à elle seule 55% du mécanisme. Les autres principaux gaz impliqués sont le dioxyde de carbone (CO₂), le méthane (CH₄), le protoxyde d'azote (N₂O), les chlorofluorocarbures et l'ozone (O₃).

La quantité de ces derniers gaz dans l'atmosphère s'accroît constamment depuis plusieurs décennies. Cet accroissement est dû essentiellement aux activités humaines, comme par exemple l'utilisation massive de combustibles fossiles qui rejette des quantités considérables de CO₂ dans l'atmosphère. On parle alors d'effet de serre additionnel pour décrire la contribution des activités humaines au réchauffement global.

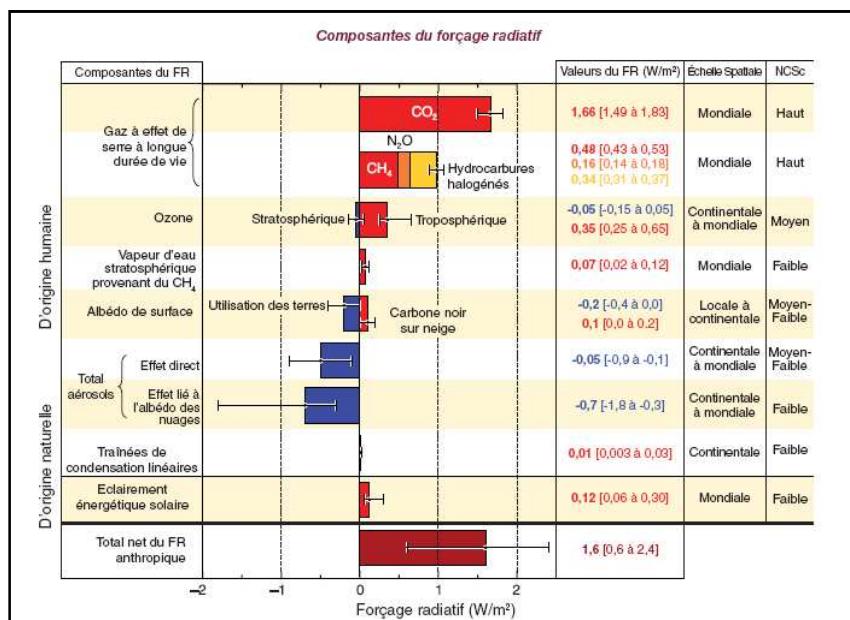
1.2 Définition du forçage radiatif du système climatique

L'augmentation des concentrations des gaz à effet de serre et l'augmentation de la présence d'aérosols (particules ou gouttelettes microscopiques en suspension dans l'air) tendent principalement à accroître l'absorption atmosphérique du rayonnement émis par la surface terrestre. De tels changements entraînent un « forçage radiatif » du système climatique. Des valeurs de forçage radiatif positives contribuent à l'aug-



mentation de la température de surface moyenne à l'échelle du globe, tandis que des valeurs négatives entraînent une diminution.

La Figure 2 liste les principales estimations des forçages radiatifs naturels ou anthropiques, exprimés en Watts par mètre carré (W.m^{-2}). Les contributions de chaque composante du forçage radiatif montrent leur efficacité à perturber l'équilibre radiatif. Parmi elles, les augmentations de CO_2 atmosphérique depuis les temps industriels sont responsables d'un forçage radiatif de $+1,66 \text{ W.m}^{-2}$. Cette contribution domine tous les autres agents de forçage radiatif. Les effets des éruptions volcaniques explosives sur le forçage radiatif sont aussi quantifiés. En augmentant considérablement la concentration d'aérosols dans l'atmosphère, elles peuvent refroidir le climat moyen mondial pendant quelques années.



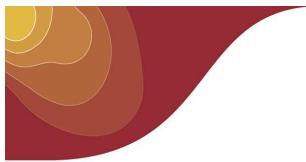
Le facteur prédominant dans le forçage radiatif du climat pendant l'ère industrielle est la concentration croissante dans l'atmosphère de divers gaz à effet de serre. Plusieurs des principaux gaz à effet de serre existent naturellement mais l'augmentation de leurs concentrations atmosphériques au cours des 250 dernières années est largement due aux activités humaines.

Parmi les gaz à effet de serre, on distingue ceux, à longue durée de vie (dioxyde de carbone : CO_2 , méthane : CH_4 , protoxyde d'azote : N_2O ...), qui sont stables chimiquement et persistent pendant de longues durées dans l'atmosphère, ce qui confère à leur émission une influence à long terme sur le climat, et ceux, à courte durée de vie (dioxyde de soufre : SO_2 , monoxyde de carbone : CO , ozone : O_3) qui sont réactifs chimiquement ou bien lavés par les précipitations.

1.3 Evolution des concentrations des gaz à effet de serre

La concentration de CO_2 atmosphérique a augmenté de presque 100 ppm¹ depuis 1750, passant d'une valeur préindustrielle d'environ 280 ppm à 379 ppm en 2005, alors qu'elle ne s'était accrue que de 20 ppm au cours des

¹ Partie par million



8 000 ans précédent l'industrialisation. Les causes de cette augmentation brutale sont l'utilisation des combustibles fossiles et les effets des changements d'affectation des terres sur le carbone des plantes et du sol.

La quantité de CH₄ en 2005, d'environ 1774 ppb², représente plus du double de sa valeur préindustrielle. Les concentrations de CH₄ atmosphérique ont varié lentement entre 580 et 730 ppb pendant les 10 000 dernières années, mais ont atteint environ 1000 ppb au cours des deux derniers siècles, ce qui représente le changement le plus rapide de concentration de ce gaz sur au moins les 80 000 dernières années. Les niveaux actuels de CH₄ s'expliquent par la poursuite des émissions anthropiques, lesquelles sont plus importantes que les émissions naturelles.

La concentration de N₂O en 2005 était de 319 ppb, soit 18% plus élevée que sa valeur préindustrielle. Cette augmentation est due principalement aux activités humaines, particulièrement à l'agriculture et aux changements d'affectation des sols correspondants.

Les chlorofluorocarbures (CFC) et les hydrochloro-fluorocarbures (HCFC) sont des gaz à effet de serre purement anthropiques. Les émissions de ces gaz ont diminué en raison de leur interdiction progressive par le Protocole de Montréal³ et les concentrations atmosphériques diminuent aujourd'hui en raison des processus d'élimination naturels.

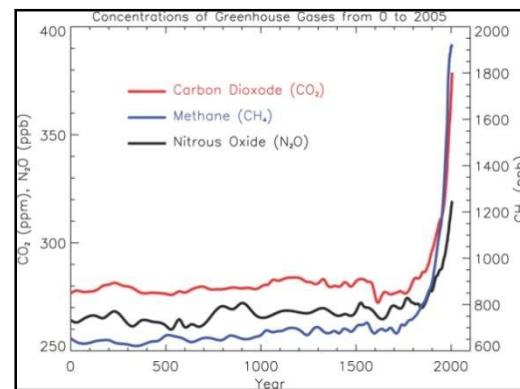
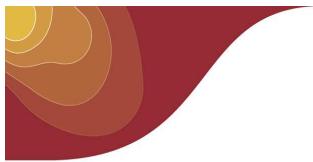


Figure 3 : évolution de la concentration des principaux gaz à effet de serre dans l'atmosphère depuis 2000 ans (IPCC, 2007)

Les changements de la teneur de l'atmosphère en gaz à effet de serre et en aérosols, du rayonnement solaire et des propriétés de la surface des terres altèrent le bilan énergétique du système climatique. Ces changements sont exprimés en termes de forçage radiatif, qui est utilisé pour comparer la façon dont une série de facteurs humains et naturels provoquent un réchauffement ou un refroidissement du climat mondial.

² Partie par milliard

³ Le protocole de Montréal, signé en 1987, est un accord international visant à réduire et à terme éliminer complètement les substances qui appauvrisent la couche d'ozone. Aujourd'hui 191 pays sont signataires du protocole de Montréal.



2 Analyse des valeurs observées à ce jour

2.1 Evolution des paramètres observés dans le monde et sur l'océan Indien

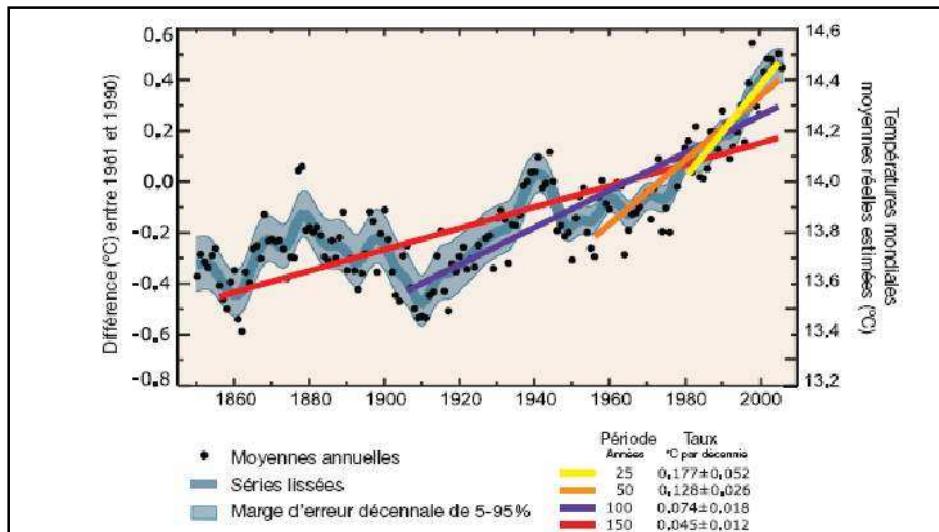
Grâce à l'amélioration des moyens d'observation et de leur calibrage, à des analyses plus détaillées de séries temporelles de plus en plus longues, l'évaluation du changement du système climatique s'améliore. Cette évaluation du climat prend désormais en compte, en plus de l'atmosphère, l'océan et la cryosphère. Les tendances, la variabilité et les processus du changement climatique aux échelles mondiales et régionales sont ainsi mieux appréhendés.

2.1.1 Températures

2.1.1.1 Températures moyennes

Dans son dernier rapport, le GIEC (Groupe d'Experts Intergouvernemental sur l'Evolution du Climat) évalue l'augmentation moyenne mondiale de la température superficielle à $+0,74^{\circ}\text{C}$ sur 100 ans (1906-2005). Ce réchauffement s'est fortement accéléré au cours des cinquante dernières années avec un rythme de $+0,13^{\circ}\text{C}$ par décennie et devient presque deux fois supérieur à celui des cent dernières années (**Figure 4**).

Figure 4 : Moyennes annuelles mondiales de températures et tendance linéaire. L'ordonnée de gauche montre les anomalies de température par rapport à la moyenne 1961-1990 et l'ordonnée de droite les températures réelles ($^{\circ}\text{C}$). Sont présentées les tendances linéaires pour les 25 (en jaune), 50 (en orange), 100 (en magenta) et 150 dernières années (en rouge). La courbe bleue lissée montre les variations par décennie.



2005 et 1998 sont les deux années les plus chaudes depuis le début des mesures instrumentales de la température de l'air en surface, c'est à dire 1850. Onze des douze années de la période 1995-2006 (l'exception étant 1996) se classent parmi les douze années les plus chaudes depuis 1850. Le graphique de la **Figure 4** montre des tendances de températures qui croissent quand elles sont évaluées sur les périodes les plus récentes.

Comme le montrent les cartes de tendances saisonnières calculées sur la période 1979-2005 (**Figure 5**), le réchauffement n'est pas uniforme sur le globe. Les températures de surface des régions continentales ont augmenté plus rapidement que celles des océans. Le réchauffement des trente dernières années affecte l'ensemble du globe mais il est plus important aux hautes latitudes de l'hémisphère Nord. Le plus fort réchauffement apparaît pendant l'hiver et le printemps de ce même hémisphère.

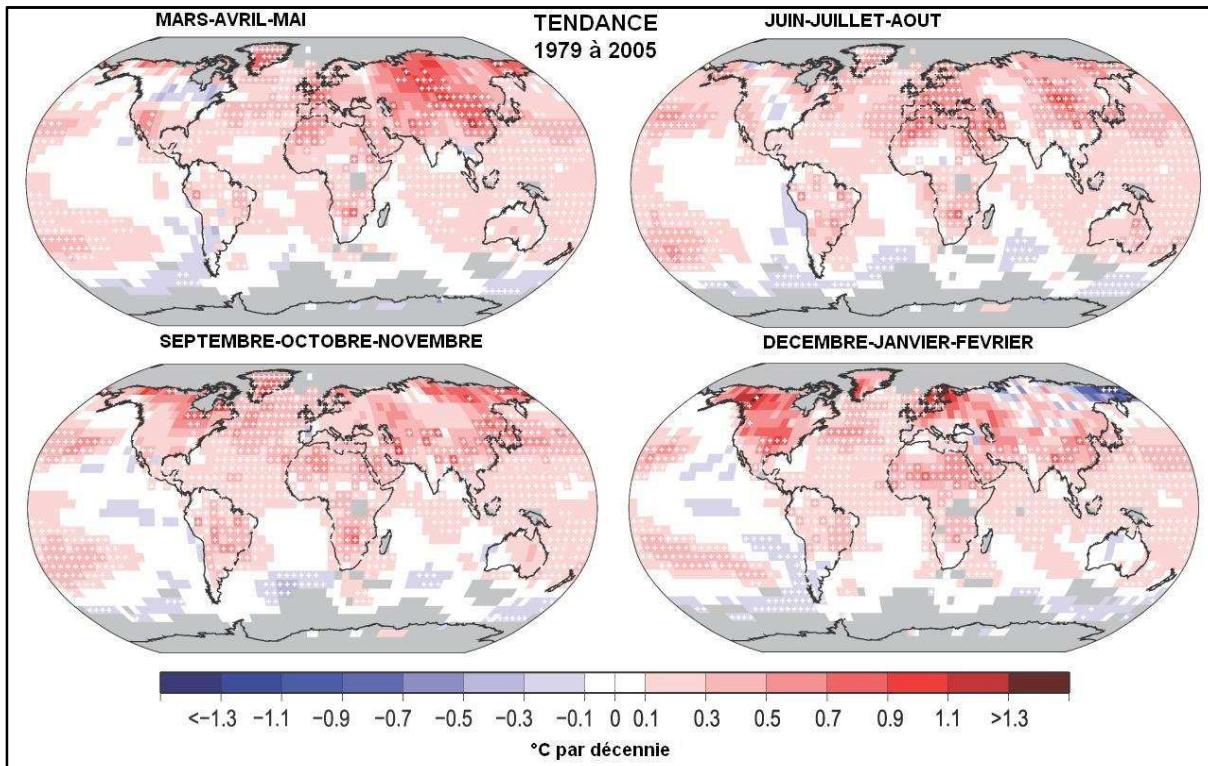
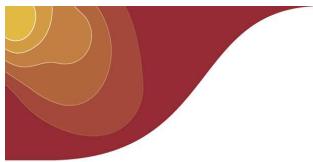


Figure 5 : Tendances mondiales linéaires de températures au cours de la période 1979 à 2005 par saison estimées à la surface. Le gris indique les secteurs où les données sont incomplètes (IPCC, 2007)

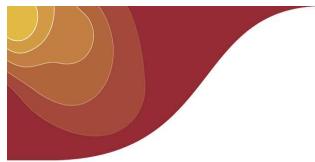
Si l'on observe de plus près les tendances des températures saisonnières de la Figure 5 sur l'océan Indien, on constate que celui-ci se réchauffe moins rapidement que la plupart des zones de l'hémisphère Nord. La Figure 6 montre les tendances annuelles des températures sur notre bassin. Certaines zones des latitudes australes ont une tendance quasi-nulle, tandis que les tendances augmentent quand on se dirige vers l'Equateur pour atteindre des valeurs supérieures à 0,3°C par décennie. Le secteur des Mascareignes est dans un prolongement de la zone des tendances faibles des latitudes australes.

Figure 6 : Tendances linéaires des températures au cours de la période 1979 à 2005 estimées à la surface. Le gris indique les secteurs où les données sont incomplètes. (IPCC, 2007)



2.1.1.2 Températures extrêmes

Les changements observés dans les extrêmes de température sont en accord avec le réchauffement global constaté. Les observations montrent une diminution généralisée du nombre de jours de gel aux latitudes moyennes, une augmentation du nombre de cas d'extrêmes chauds (10% des jours ou des nuits les plus chauds) et une réduction des cas d'extrêmes froids (10% des jours ou des nuits les plus froids). Les changements les plus



marqués s'observent pour les nuits froides, dont l'occurrence a baissé au cours de la période 1951-2003 pour toutes les régions où des données sont disponibles. La durée des vagues de chaleur a augmenté à partir de la deuxième moitié du 20^{ème} siècle. La vague de chaleur record sur l'Europe occidentale et centrale en été 2003 est un exemple de cas exceptionnel récent.

2.1.2 Précipitations

2.1.2.1 Précipitations moyennes

La vapeur d'eau troposphérique augmente. L'humidité spécifique superficielle a généralement augmenté depuis 1976 en relation proche avec les températures plus élevées tant sur la terre que sur l'océan. Cette vapeur d'eau atmosphérique supplémentaire engendre une disponibilité d'humidité accrue pour les précipitations. Toutefois, les précipitations varient fortement, tant dans l'espace que dans le temps, et des tendances robustes à long terme sont difficiles à établir. Cependant, des tendances à long terme des précipitations de 1900 à 2005 ont été observées sur beaucoup de grandes régions (Figure 7). Une augmentation significative des précipitations a été observée dans les parties orientales d'Amérique du Nord et en Asie du Nord et centrale. A contrario, un assèchement a été observé dans le Sahel, la Méditerranée, l'Afrique du Sud et des parties de l'Asie du Sud.

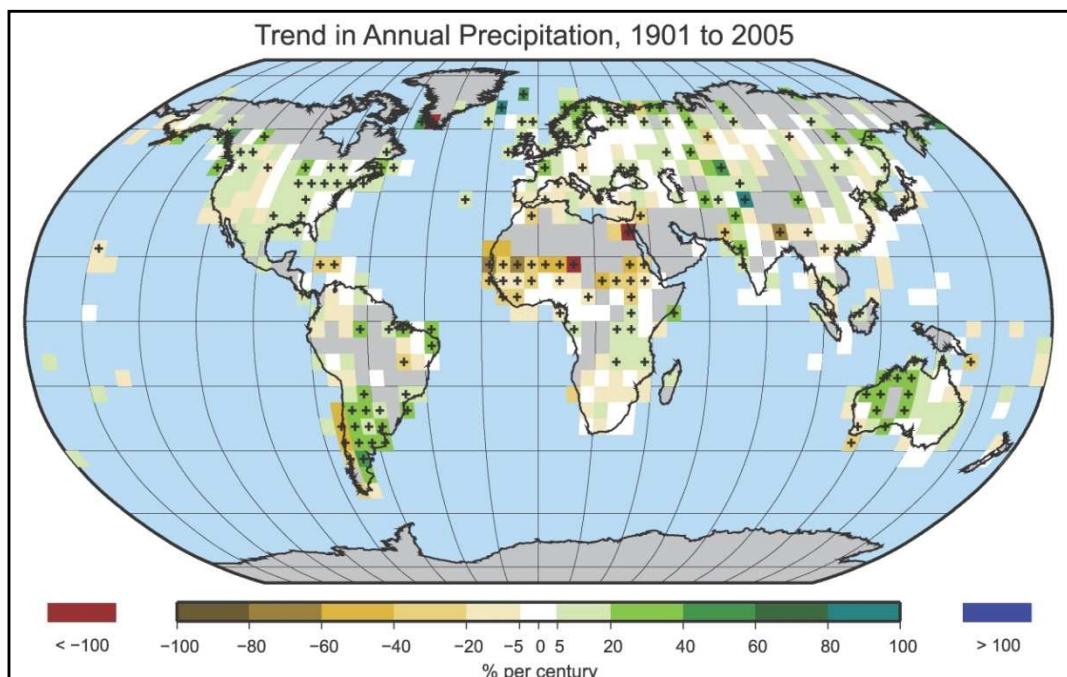
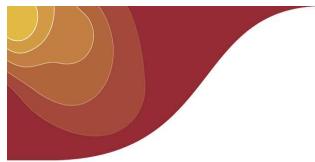


Figure 7 : Distribution des tendances linéaires dans le volume des précipitations annuelles sur les terres dans la période 1901-2005 (% par siècle). Les zones grisées indiquent qu'une insuffisance de données empêche de donner une tendance fiable (IPCC, 2007)

Il n'est pas possible d'établir des tendances de précipitations sur les vastes étendues océaniques qui se révèlent être de véritables déserts en termes de mesure des précipitations. Les quelques postes climatologiques présents sur l'océan Indien sont trop éloignés et ne possèdent pas toujours de séries suffisamment complètes pour établir une cartographie des tendances de précipitations sur cette partie du globe.



2.1.2.2 Précipitations extrêmes

Une fréquence accrue des événements de fortes précipitations a été observée. Cette augmentation est probable dans beaucoup de régions de la Terre depuis environ 1950, même dans les régions qui ont subi une réduction de la quantité totale des précipitations. Des sécheresses plus intenses et plus longues ont été observées dans des secteurs plus larges, particulièrement sous les Tropiques depuis les années 1970.

2.1.3 Tempêtes et cyclones

Concernant les tempêtes des zones tempérées, depuis 1950 on observe dans de nombreuses régions une augmentation du nombre de phénomènes de forte intensité. Sur le Nord-Ouest de l'Europe, un pic d'intensité a été identifié autour du début des années 1990. Mais il est à noter également que la variabilité inter décennale est importante.

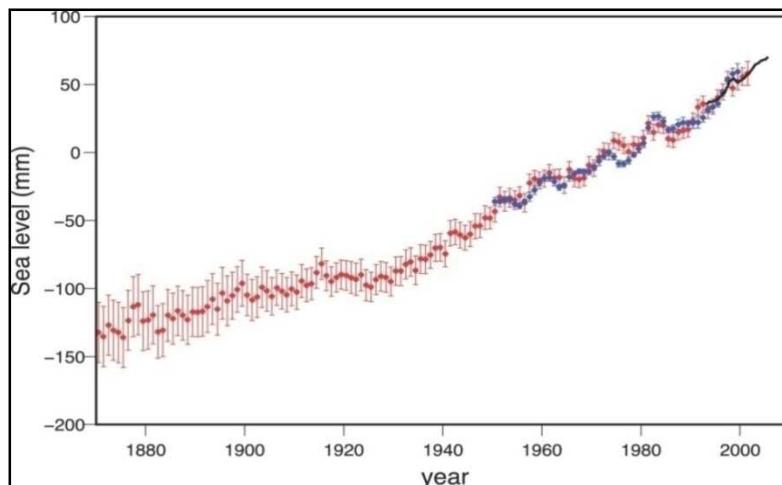
Chaque année, dans le monde, on recense entre 80 et 85 systèmes tropicaux ayant atteint le stade de tempête tropicale (voir paragraphe 2.2.4) et parmi ceux-ci plus de la moitié atteignent le stade de cyclone tropical. La variation interannuelle moyenne est faible et varie dans une fourchette de -8 à +8%. Il y a donc une stabilité étonnante à l'échelle globale du nombre de ces phénomènes (Lemée, Pierre-Yves, 1995). Mais cette stabilité ne se retrouve pas au niveau de chacun des sept bassins cycloniques.

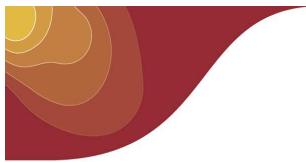
Les observations mettent en évidence une augmentation de l'activité des cyclones tropicaux intenses dans l'Atlantique Nord depuis environ 1970, corrélée avec l'augmentation des températures de surface de la mer (TSM) tropicales. Mais la variabilité sur plusieurs décennies et la faiblesse relative des moyens d'observation des cyclones tropicaux avant les observations satellitaires de routine (vers 1970), compliquent la détection de tendances à long terme de l'activité des cyclones tropicaux. C'est pourquoi il est difficile de dégager des tendances claires sur les autres bassins tels que le Sud-Ouest de l'océan Indien.

2.1.4 Niveau de la mer

Le niveau de la mer a peu varié dans les 3 000 dernières années en s'élevant de seulement quelques dizaines de centimètres. Puis, en réponse au réchauffement climatique, la hausse s'est accélérée au cours du 20^{ème} siècle au rythme de 15 à 20 centimètres par siècle (Figure 8). Cette valeur a été déduite des longues séries temporelles des marégraphes répartis le long des côtes du globe. La plus grande part de cette hausse est due à l'expansion thermique des océans sous l'effet de leur réchauffement qui explique entre 40 et 60% de la hausse (Alix, 2007). La deuxième cause est la fonte des glaciers de montagne qui explique 20 à 30% de la hausse. Puis viennent les calottes polaires, en particulier le Groenland, qui sont responsables de 10 à 20% de l'élévation du niveau de la mer.

Figure 8 : Moyennes annuelles du niveau moyen mondial de la mer sur la base de reconstructions de niveaux de zones de la mer (en rouge), mesures marégraphiques (en bleu), et altimétrie par satellite depuis 1992 (en noir). Les unités sont en mm. (IPCC, 2007)





Depuis 1992, les satellites altimétriques Topex-Poseidon (1992-2006), puis Jason-1 (lancé fin 2001), mesurent, en routine, les variations absolues du niveau de la mer, de manière globale avec une précision remarquable. Ces nouvelles observations spatiales révèlent que le niveau de la mer s'élève, en moyenne, à un rythme de 3,2 mm/an depuis 1993.

En outre, ces observations satellitaires ont permis de dresser des cartographies mondiales de la hausse du niveau de la mer. Ces cartes, comme celles de la **Figure 9**, montrent que le niveau de la mer ne monte pas de manière uniforme. L'explication de cette variabilité régionale provient en grande partie des changements de température de l'océan, et du transport non uniforme de ces masses d'eau ainsi réchauffées par la circulation océanique. D'autres phénomènes produisent également une distribution non uniforme des tendances comme des changements régionaux de la salinité ou des redistributions de masses d'eau.

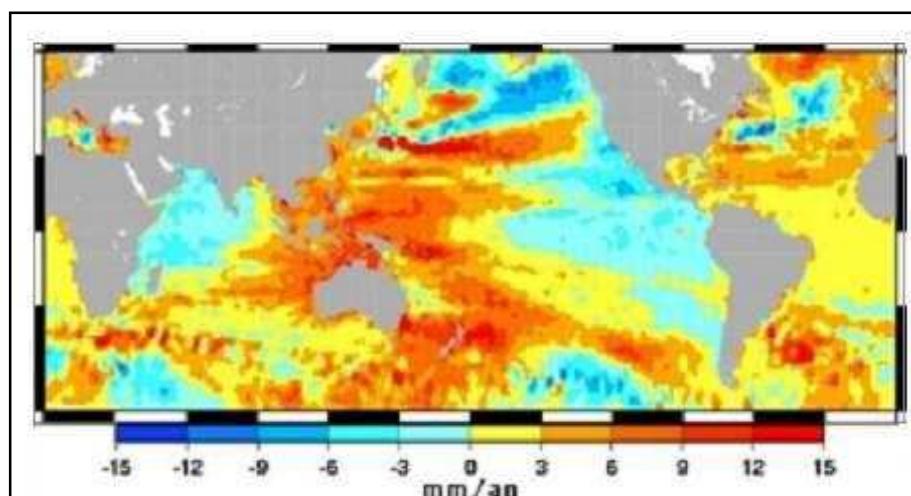
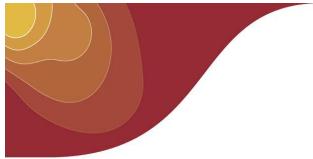


Figure 9 : Distribution géographique des variations du niveau de la mer mesurées par Topex-Poseidon entre 1993 et 2003. (IPCC, 2007)

Les observations mettent en évidence un réchauffement de la température moyenne mondiale, évalué à 0,74°C sur 100 ans, et une augmentation des cas de températures extrêmes chaudes. Les températures ont augmenté plus rapidement sur les continents que sur les océans. Ainsi la tendance des températures annuelles sur les Mascareignes est inférieure à 0,1°C par décennie pour la période 1979-2005, soit un réchauffement moins rapide que beaucoup de régions du globe.

Des tendances à long terme des précipitations, à la fois à la baisse et à la hausse ont été observées sur beaucoup de grandes régions. Mais, aucune tendance n'a pu être établie sur notre zone de l'océan Indien. De même, il est difficile d'établir des tendances claires sur l'évolution de l'activité cyclonique sur chaque grand bassin.

Le niveau de la mer s'est élevé de 15 à 20 centimètres au cours du 20^{ème} siècle. Les satellites altimétriques mesurent une hausse de 3,2 mm/an depuis 1993.



2.2 Evolution des paramètres observés à La Réunion

Comme on vient de l'évoquer à plusieurs reprises, les effets du changement climatique ne sont pas uniformes sur le globe. Avant d'aborder les projections du climat pour le 21^{ème} siècle, il est primordial d'étudier l'évolution du climat récent de notre île. Les premières mesures météorologiques instrumentalisées et archivées datent de 1947. Mais il faut attendre le début des années 1950 (1952-1953) pour que le réseau de mesure s'étoffe sur l'île. Pour bénéficier d'un nombre suffisant de postes, représentatifs des différents microclimats de l'île, nous avons dû restreindre notre étude à la période 1969-2008. La profondeur de l'étude, 40 ans, est ainsi la plus importante possible et les effets récents du changement climatique sont pris en compte.

Les paramètres étudiés sont la température et les précipitations. Pour chaque paramètre, les tendances sur 40 ans ont été calculées de façon annuelle puis saisonnière. Pour compléter cette description de l'état moyen du climat, l'étude a porté sur l'évolution des extrêmes de précipitations et de température. L'étude des extrêmes est réalisée à l'aide de plusieurs indices climatiques. Ces indices, définis par la communauté des climatologues au sein de l'Organisation Mondiale de la Météorologie, servent de base à la comparaison des changements climatiques sur les extrêmes d'une région à l'autre.

On distingue deux grands groupes d'indices :

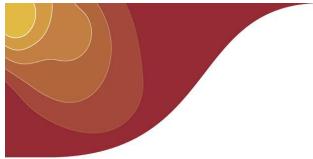
- ceux définis par des seuils fixes comme le nombre de jours où la température maximale dépasse 25°C, le nombre de jours de fortes précipitations... On s'intéresse alors au nombre de jours annuel dépassant le seuil étudié.
- ceux définis par des quantiles comme par exemple le décile supérieur des températures maximales calculé quotidiennement sur une station et une fenêtre glissante de 5 jours (tx90 ou décile chaud, la valeur dépassée par 10% des journées les plus chaudes pour une date donnée).

2.2.1 Constitution des séries homogénéisées

Analyser les évolutions climatiques à partir des mesures météorologiques exige de disposer de séries climatologiques suffisamment longues et dont les valeurs soient comparables dans le temps. Dans la réalité, la qualité des données originales n'est pas toujours irréprochable. Des erreurs de mesures ou de saisie peuvent avoir été introduites et les manques peuvent être fréquents. Les événements susceptibles d'introduire dans les séries des ruptures et donc de masquer le signal du changement climatique sont nombreux. Citons entre autres les déplacements des points de mesures ou la modification de leur environnement, les changements de capteurs.... Ces ruptures peuvent être du même ordre de grandeur que les phénomènes que l'on cherche à mettre en évidence. Il est donc indispensable avant toute analyse d'une série climatologique de s'assurer préalablement de la qualité des données, de rechercher les ruptures d'homogénéité dans la série et de les corriger.

La première étape de ce travail, consiste à choisir les postes de référence en fonction de la qualité des données, de la période d'ouverture, de la rareté des changements d'emplacement de ceux-ci et du faible taux de données manquantes. L'étape suivante consiste à détecter et à corriger les ruptures dues à la modification des conditions de mesure pour ne conserver que le signal de l'évolution climatique. Cette étape est réalisée à l'aide du logiciel PRODIGE (PROcédures de Détection d'Inhomogénéités Glissées dans un Echantillon), un outil statistique développé par Météo-France. La méthode utilisée a fait l'objet d'une thèse en 2000 à l'Université Paul Sabatier de Toulouse (Mestre, 2000). Un nombre minimum de séries est nécessaire pour que PRODIGE soit capable de détecter les ruptures et de les corriger.

La constitution de séries homogénéisées est indispensable pour évaluer l'ampleur du réchauffement climatique avec le moins d'ambiguïté possible. Pour les besoins de cette étude et afin de prendre en compte les effets récents du changement climatique, une homogénéisation a été effectuée sur la période 1969-2008 pour laquelle nous disposons d'un nombre suffisant de séries. Les tendances des températures et des précipitations indiquées dans les paragraphes suivants sont donc calculées sur cette période de 40 ans.



2.2.2 Températures

L'étude des séries de températures sur la période 1969-2008 n'a permis de retenir que six postes avec une qualité de données suffisante : Gillot, Le Port, Pierrefonds-Aéroport, Colimaçons, la Plaine des Palmistes et la Plaine des Cafres. Ces 6 postes sont localisés sur la Figure 10 (le nom de la commune et l'altitude du poste sont indiqués en italique). Face à la difficulté d'homogénéiser ces 6 séries, nous avons ajouté deux postes supplémentaires : Plaisance et Vacoas. Ces deux postes de référence de l'île Maurice, toute proche de La Réunion (250 km à l'Est et à peu près à la même latitude), permettent de consolider l'homogénéisation des séries. Les données de Vacoas et Plaisance ont été aimablement fournies par le service météorologique de l'île Maurice.

Les paramètres étudiés sont la température moyenne (Tm), la température minimale (Tn) et la température maximale (Tx). La température minimale du jour J est le minimum de température relevé sur la période du jour J-1 à 19h locale, au jour J 19h locale. La température maximale du jour J, elle, est la température maximale relevée sur la période du jour J à 7h locale, au jour J+1 à 7h locale. Sous les tropiques, les changements de masse d'air sont moins brusques qu'aux latitudes tempérées, on peut donc considérer que la température minimale est la température minimale de la nuit et la température maximale, la température maximale de la journée. La température moyenne est la somme des températures minimale et maximale divisée par 2.

2.2.2.1 Rappel sur les températures moyennes observées à La Réunion

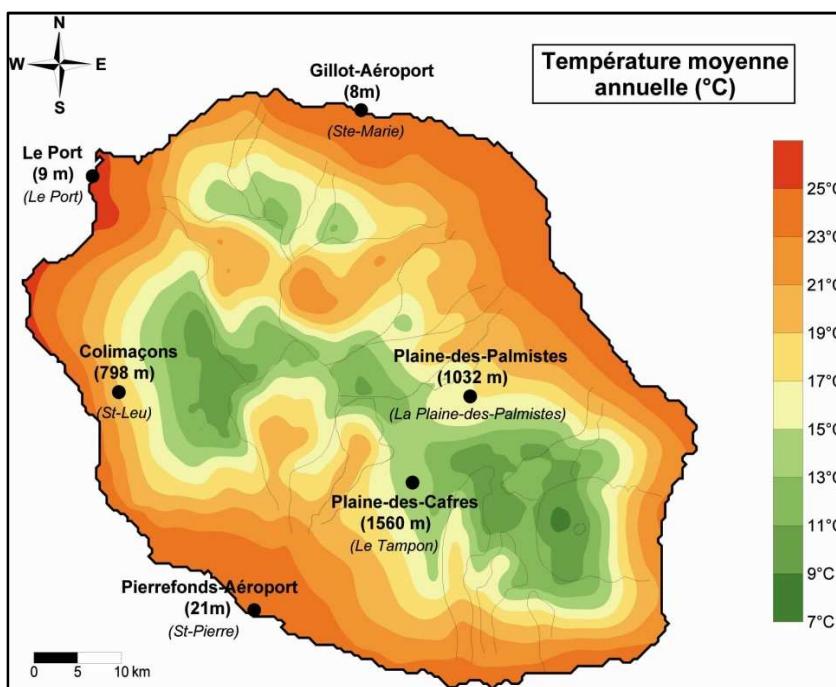
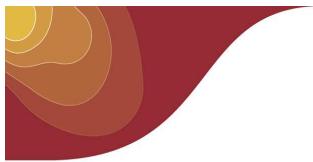


Figure 10 : Températures moyennes annuelles de La Réunion et stations étudiées suivies de la commune et de leur altitude

Le climat de La Réunion est caractérisé par la douceur de ses températures. La position géographique de l'île, ni trop près ni trop loin de l'équateur, et surtout le rôle régulateur de l'océan et des alizés, sont les principales causes de cette douceur. Les amplitudes thermiques dans les cycles quotidiens et annuels de variation de la température sont faibles et dépassent rarement les 10°C pour un lieu donné. Le phénomène important à La Réunion est la décroissance des températures avec l'altitude. Le long des pentes de l'île, ce gradient de température est de l'ordre de -0,7 à -0,8°C pour 100 m. Comme le relief est très accentué sur l'île, les isothermes suivent le plus souvent la carte hypsométrique (Figure 10).



2.2.2.2 Tendance annuelle sur 40 ans

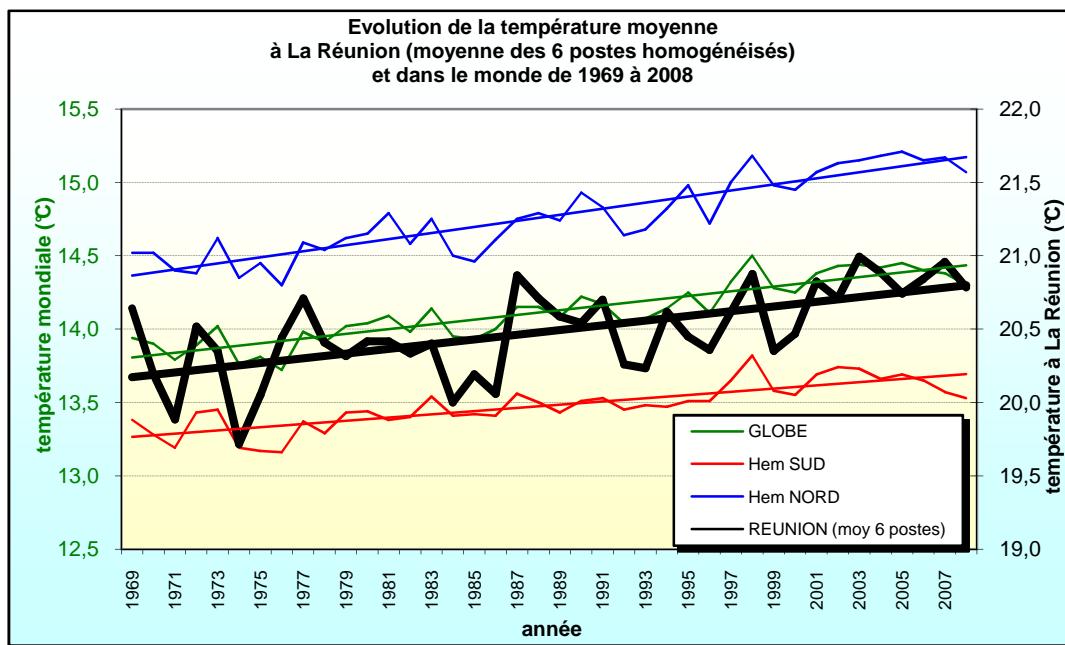
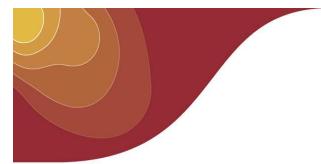


Figure 11 : évolution de la température moyenne à La Réunion (moyenne des 6 postes homogénéisés) et dans le monde de 1969 à 2008.

La Figure 11 montre l'évolution des températures moyennes à La Réunion (moyenne des 6 postes homogénéisés), dans l'hémisphère Nord, dans l'hémisphère Sud puis sur l'ensemble du globe sur la période 1969-2008. Pour faciliter la comparaison, l'échelle de droite a été utilisée pour La Réunion (19 à 22°C) et l'échelle de gauche pour le reste du monde (12,5 à 15,5°C). Les tendances sur 40 ans (1969-2008) des températures moyennes calculées à partir des données homogénéisées de ces six postes de La Réunion donnent les valeurs mentionnées dans le Tableau 1. A titre de comparaison, les tendances calculées sur l'ensemble du globe ainsi que sur les hémisphères Nord et Sud sont indiquées.

	Evolution des températures moyennes sur 40 ans	Tendance des températures moyennes (en °C par décennie)
Globe	+0,63°C	+0,16°C
Hémisphère Nord	+0,81°C	+0,20°C
Hémisphère Sud	+0,43°C	+0,11°C
Île de La Réunion	+0,62°C	+0,16°C
Gillot (8m)	+0,59°C	+0,15°C
Le Port (9m)	+0,61°C	+0,15°C
Pierrefonds-Aéroport (21m)	+0,64°C	+0,16°C
Colimaçons (798m)	+0,61°C	+0,15°C
Plaine des Palmistes (1032m)	+0,69°C	+0,17°C
Plaine des Cafres (1560m)	+0,62°C	+0,16°C

Tableau 1 : Evolution de la température moyenne sur la période 1969-2008



Ainsi le réchauffement constaté sur les 6 postes de La Réunion est conforme à celui du globe. Par contre, il est plus élevé que le réchauffement du seul hémisphère Sud.

Le Tableau 2, indique les tendances sur 40 ans des températures minimales (Tn) et des températures maximales (Tx). On constate que la tendance des températures maximales est plus élevée que celle des températures minimales.

	Evolution des températures minimales sur 40 ans	Evolution des températures maximales sur 40 ans
Gillot (8m)	+0,42°C	+0,75°C
Le Port (9m)	+0,45°C	+0,77°C
Pierrefonds-Aéroport (21m)	+0,57°C	+0,71°C
Colimaçons (798m)	+0,51°C	+0,71°C
Plaine des Palmistes (1032m)	+0,58°C	+0,80°C
Plaine des Cafres (1560m)	+0,55°C	+0,69°C
Moyenne Réunion	+0,51°C	+0,74°C

Tableau 2 : Evolution des températures minimales et maximales à La Réunion sur la période 1969-2008

Les graphiques des Figure 12 et Figure 13 illustrent l'évolution des températures minimales (Tn) et maximales (Tx) annuelles de 1969 à 2008 pour les 6 postes étudiés.

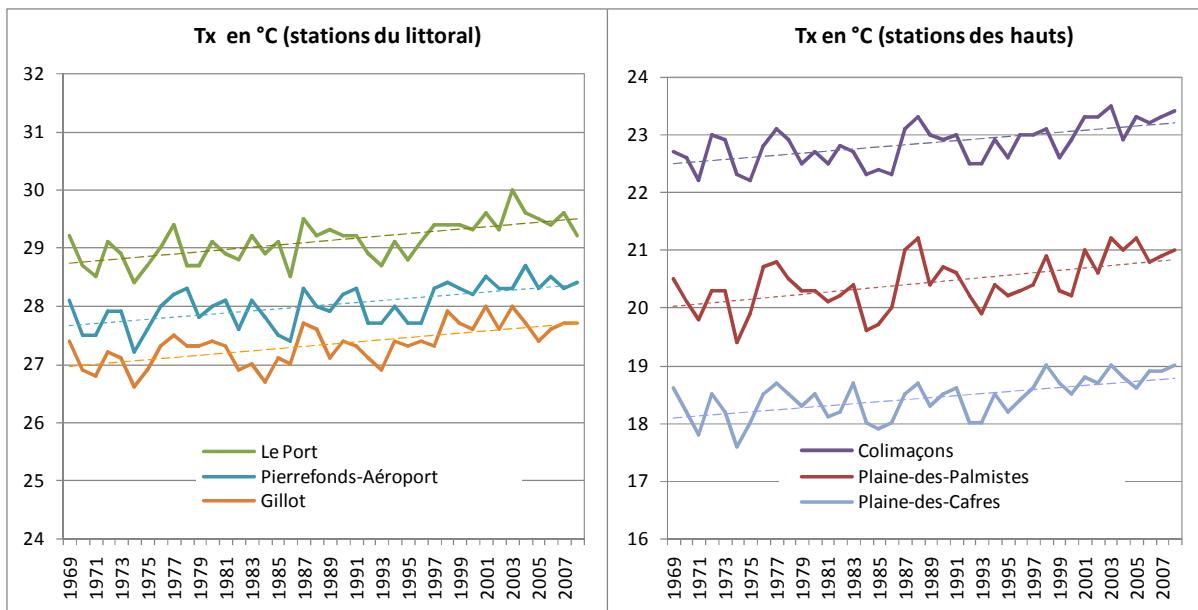


Figure 12 : Evolution des températures maximales moyennes annuelles par station sur la période 1969-2008. Le graphe de gauche regroupe les stations situées près du littoral. Le graphe de droite regroupe les stations situées dans les hauts.

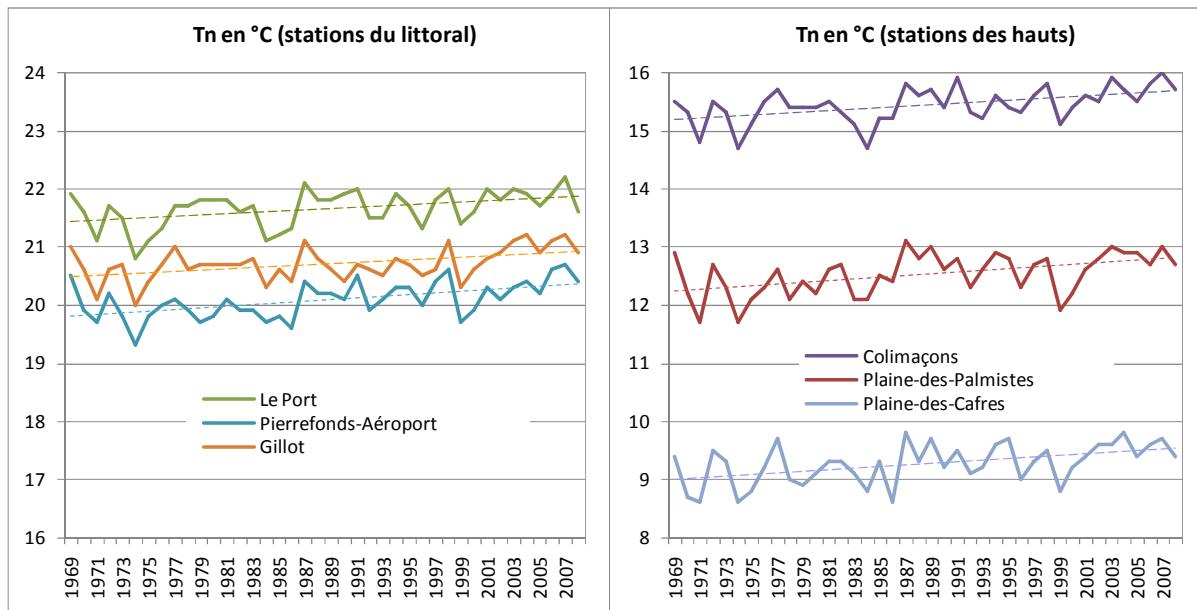
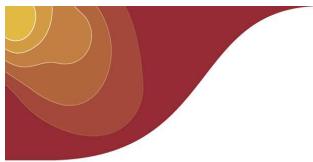


Figure 13 : Evolution des températures minimales moyennes annuelles par station sur la période 1969-2008. Le graphe de gauche regroupe les stations situées près du littoral. Le graphe de droite regroupe les stations situées dans les hauts.

2.2.2.3 Evolution saisonnière des températures sur 40 ans

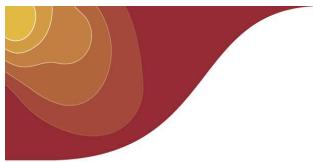
Le Tableau 3 indique les évolutions des températures en fonction des saisons pour la période 1969-2008. Pour chaque tendance calculée, un test statistique (test de Spearman⁴) indique si la valeur est significative ou pas. La significativité exprime un haut degré de confiance dans l'existence d'une tendance non nulle. Les valeurs significatives sont indiquées en gras.

DJF : décembre-janvier-février ; MAM : mars-avril-mai ; JJA : juin-juillet-août ; SON : septembre-octobre-novembre

	Evolution des Tn sur 40 ans				Evolution des Tx sur 40 ans			
	DJF	MAM	JJA	SON	DJF	MAM	JJA	SON
Gillot-Aéroport (8m)	+0,48°C	+0,51°C	+0,32°C	+0,40°C	+0,44°C	+1,05°C	+0,78°C	+0,89°C
Le Port (9m)	+0,51°C	+0,61°C	+0,31°C	+0,53°C	+0,84°C	+0,81°C	+0,85°C	+0,67°C
Pierrefonds-Aéroport (21m)	+0,65°C	+0,81°C	+0,33°C	+0,76°C	+0,52°C	+1,01°C	+0,76°C	+0,63°C
Colimaçons (798m)	+0,49°C	+0,68°C	+0,39°C	+0,52°C	+0,50°C	+0,95°C	+0,76°C	+0,58°C
Plaine des Palmistes (1032m)	+0,45°C	+0,82°C	+0,62°C	+0,57°C	+0,55°C	+1,04°C	+0,96°C	+0,68°C
Plaine des Cafres (1560m)	+0,64°C	+0,72°C	+0,41°C	+0,55°C	+0,54°C	+0,89°C	+0,83°C	+0,68°C
Moyenne Réunion	+0,54°C	+0,69°C	+0,40°C	+0,56°C	+0,57°C	+0,96°C	+0,82°C	+0,69°C

Tableau 3 : Evolution par saison des températures minimales (Tn) et maximales (Tx) sur la période 1969-2008.

⁴ Le test de Spearman permet de rejeter l'hypothèse d'une tendance nulle avec un certain degré de confiance (ici 95%). Si on se contentait d'un degré de confiance moindre (ex 90%), certaines tendances indiquées ci-dessus deviendraient significatives.



Les températures sont toutes à la hausse quelle que soit la saison. La plus forte hausse des températures s'est produite sur la période mars-avril-mai aussi bien pour les températures maximales que pour les minimales. Décembre-janvier-février est la période où les températures maximales ont connu la hausse la plus faible, tandis que les températures minimales ont connu cette moindre hausse pendant les mois de juin-juillet-août.

Les graphiques, ci-dessous (Figure 14), montrent l'évolution des températures minimales (Tn) et maximales (Tx) sur la période 1969-2008 par saison et par station. L'objectif est de comparer les évolutions des températures de chaque station entre elles.

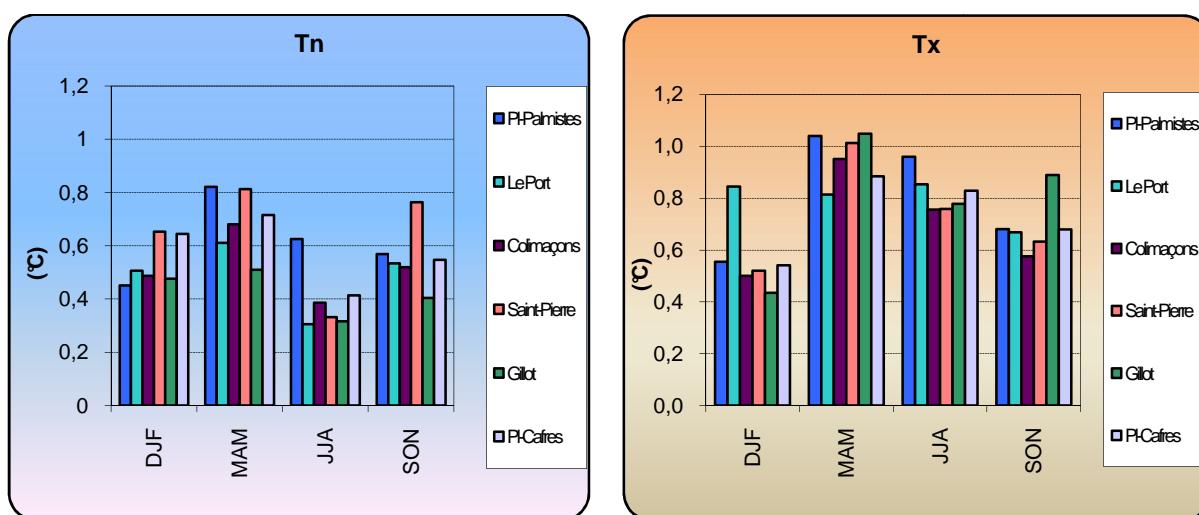


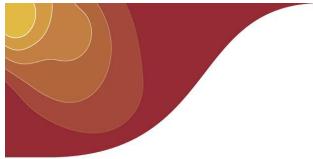
Figure 14 : Evolution, par saison et par station des températures minimales (Tn, graphe de gauche) et maximales (Tx, graphe de droite).

Le Port se démarque des autres stations pour la période décembre-janvier-février avec une hausse beaucoup plus forte des températures maximales. Idem pour les températures maximales de Gillot mais cette fois-ci pendant la période septembre-octobre-novembre. Quant à Pierrefonds-Aéroport, la station a connu une hausse des températures minimales plus forte que pour les autres stations pendant la période septembre-octobre-novembre. Ces différences sont peut-être dues à l'homogénéisation ou à des petites ruptures résiduelles dans les séries de données. On ne peut assurément pas conclure à un signal climatique différent selon les régions de La Réunion. Il est bien dommage d'avoir un nombre si réduit de stations pour l'étude de ce paramètre.

2.2.2.4 Etude des indices climatiques

Définition des indices annuels calculés selon l'Organisation Mondiale de la Météorologie (OMM) :

- $Tn \leq 0^{\circ}\text{C}$: nombre de jours où la température minimale est inférieure ou égale à 0°C .
- $Tn \geq 20^{\circ}\text{C}$: nombre de jours où la température minimale est supérieure ou égale à 20°C .
- $Tx \geq 25^{\circ}\text{C}$: nombre de jours où la température maximale est supérieure ou égale à 25°C .
- $Tn10p$: pourcentage de nuits relativement froides : Tn inférieure au 1^{er} décile calculé quotidiennement sur une fenêtre glissante de 5 jours, sur la période 1971-2000
- $Tn90p$: pourcentage de nuits relativement chaudes : Tn supérieur au dernier décile calculé quotidiennement sur une fenêtre glissante de 5 jours, sur la période 1971-2000.



- Tx10p : pourcentage de journées relativement froides : Tx inférieure au 1^{er} décile calculé quotidiennement sur une fenêtre glissante de 5 jours, sur la période 1971-2000.
- Tx90p : pourcentage de journées relativement chaudes : Tx supérieur au dernier décile calculé quotidiennement sur une fenêtre glissante de 5 jours, sur la période 1971-2000.

Pour « coller » au plus près du climat réunionnais, nous avons calculé 3 indices supplémentaires :

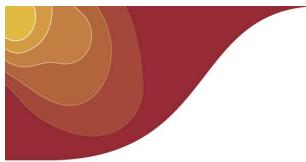
- Tn ≤ 10°C : nombre de jours où la température minimale est inférieure ou égale à 10°C.
- Tx ≥ 32°C : nombre de jours où la température maximale est supérieure ou égale à 32°C.
- Tx ≥ 35°C : nombre de jours où la température maximale est supérieure ou égale à 35°C

Ces 3 indices ne sont pas retenus par l'Organisation Mondiale de la Météorologie (OMM) mais ils permettent une meilleure description du climat tropical. En effet, une journée avec une température maximale supérieure à 25°C est très banale sur le littoral, alors qu'une température maximale supérieure à 32°C, voire 35°C indique un événement peu courant. De même, les jours où les températures minimales sont inférieures à 0°C sont inexistant sur une très grande partie de l'île. Ainsi, le seuil de 10°C est mieux adapté au climat réunionnais.

Les **Tableau 4** et **Tableau 5** indiquent les valeurs de ces indices, calculées pour les six postes de mesure de référence. Pour chaque poste, la moyenne par indice est calculée sur la période 1971-2000 puis la tendance pour la période 1969-2008 est indiquée.

Poste	Commune	indice -->	Tn ≤ 0°C	Tn ≤ 10°C	Tn ≥ 20°C	Tn10p	Tn90p
Gillot (8m)	Sainte-Marie	Moyenne 1971-2000	0,0	0,0	218,1	10,0%	10,0%
		Evolution 1969-2008	0,0	0,0	+9,7	-3,0%	+7,8%
Le Port (9m)	Le Port	Moyenne 1974-2000	0,0	0,0	251,3	10,0%	10,0%
		Evolution 1974-2008	0,0	0,0	+14,8	-8,6%	+7,9%
Pierrefonds-Aéroport (21m)	Saint-Pierre	Moyenne 1971-2000	0,0	0,0	183,2	10,0%	10,0%
		Evolution 1969-2008	0,0	0,0	+16,4	-8,0%	+8,1%
Colimaçons (798m)	Saint-Leu	Moyenne 1971-2000	0,0	1,4	8,9	10,0%	10,0%
		Evolution 1969-2008	0,0	-2,8	+6,3	-6,1%	+6,4%
Pl. des Palmistes (1032m)	Pl. des Palmistes	Moyenne 1971-2000	0,0	92,5	0,3	10,0%	10,0%
		Evolution 1969-2008	0,0	-32,6	+0,4	-3,6%	+7,9%
Pl. des Cafres (1560m)	Le Tampon	Moyenne 1971-2000	0,9	211,0	0,0	10,0%	10,0%
		Evolution 1969-2008	-0,7	-15,5	0,0	-1,9%	+6,2%

Tableau 4 : indices climatiques, par station, sur la période de référence 1971-2000 et leur évolution sur la période 1969-2008
(les indices sont calculés pour les températures minimales en nombre de jours ou en pourcentage annuel)



Poste	Commune	indice -->	Tx≥25°C	Tx≥32°C	Tx≥35°C	Tx10p	Tx90p
Gillot (8m)	Sainte-Marie	Moyenne 1971-2000	307,7	1,4	0,0	10,0%	10,0%
		Evolution 1969-2008	+44,7	+2,2	0,0	-7,1%	+13,8%
Le Port (9m)	Le Port	Moyenne 1974-2000	358,7	36,3	0,3	10,0%	10,0%
		Evolution 1974-2008	+5,7	+39,7	+3,3	-4,2%	+20,3%
Pierrefonds-Aéroport (21m)	Saint-Pierre	Moyenne 1971-2000	309,6	20,8	0,2	10,0%	10,0%
		Evolution 1969-2008	+31,2	+14,0	+0,2	-6,0%	+9,4%
Colimaçons (798m)	Saint-Leu	Moyenne 1971-2000	74,8	0,0	0,0	10,0%	10,0%
		Evolution 1969-2008	+35,7	0,0	0,0	-6,0%	+11,5%
Pl. des Palmistes (1032m)	Pl. des Palmistes	Moyenne 1971-2000	14,1	0,0	0,0	10,0%	10,0%
		Evolution 1969-2008	+21,8	0,0	0,0	-2,7%	+14,0%
Pl. des Cafres (1560m)	Le Tampon	Moyenne 1971-2000	0,3	0,0	0,0	10,0%	10,0%
		Evolution 1969-2008	+0,5	0,0	0,0	-2,0%	+13,5%

Tableau 5 : indices climatiques, par station, sur la période de référence 1971-2000 et leur évolution sur la période 1969-2008
(les indices sont calculés pour les températures maximales en nombre de jours ou en pourcentage annuel)

Compte tenu des différences d'altitude entre les postes, il est difficile de comparer leurs tendances pour les indices à seuil fixe (0°C, 10°C, 20°C, etc.) qui ne sont d'ailleurs pas toujours pertinents pour une station donnée (par exemple le nombre de jours où la température minimale est inférieure à 0°C à Pierrefonds-Aéroport). C'est pourquoi il vaut mieux se focaliser sur les indices basés sur les déciles (Tn10p, Tn90p, Tx10p, Tx90p). L'analyse de ces indices montre un réchauffement certain de la température au cours de la période 1969-2008, et ce, pour les six postes, sans distinction de zone géographique ou d'altitude.

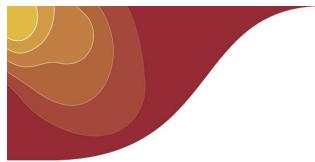
Comme à l'échelle mondiale, on note dans les tableaux la diminution des extrêmes froids (tn10p et tx10p) et l'augmentation des extrêmes chauds (tn90p et tx90p). La hausse la plus sensible concerne les températures maximales. En effet, la hausse observée des températures est essentiellement due à la tendance à la hausse du nombre de journées relativement chaudes (tx90p) comme le montre la tendance relativement élevée par rapport à celles des nuits relativement froides (tn10p), des nuits relativement chaudes (tn90p) et des journées relativement froides (tx10p). Par exemple, le nombre de jours relativement chauds par an à Gillot (Tx90p) est passé en 40 ans de 11,9 jours à 62,4 jours, soit une tendance de +50,5 jours (13,8% des 365 jours que compte une année).

Notons tout de même que les jours où la température descend en dessous de 0°C tendent à disparaître dans les Hauts jusqu'à l'altitude de la Plaine des Cafres, c'est à dire 1550 mètres.

Sur la période 1969-2008, la température moyenne à La Réunion a augmenté de +0,62°C, soit une tendance de +0,16°C par décennie. Le réchauffement constaté sur l'île a une valeur identique à celle du globe. Il est moins rapide que celui constaté dans l'hémisphère Nord (+0,81°C) et plus rapide que celui de l'hémisphère Sud (+0,43°C).

A La Réunion, les températures maximales ont augmenté plus rapidement que les températures minimales et c'est pendant les mois de mars-avril-mai que ces températures ont le plus augmenté.

De 1969 à 2008, le pourcentage de journées ou nuits froides a diminué plus ou moins fortement selon les postes, tandis que le pourcentage de journées ou nuits chaudes a nettement augmenté.



2.2.3 Précipitations

L'étude des séries de précipitations sur la période 1969-2008 a permis de retenir 51 postes de La Réunion. Les ruptures retenues pour homogénéiser les séries sont peu nombreuses si bien que les séries homogénéisées sont en général peu différentes des séries brutes. Ce grand nombre de postes retenus permet de cartographier les tendances de précipitations sur la période étudiée, et donc de régionaliser les tendances. Les 51 postes et leur altitude sont localisés sur la **Figure 15**. Les stations notées en rouge ont été choisies pour les calculs des indices climatiques (se reporter au paragraphe 2.2.3.4).

2.2.3.1 Rappel sur les précipitations moyennes observées à La Réunion

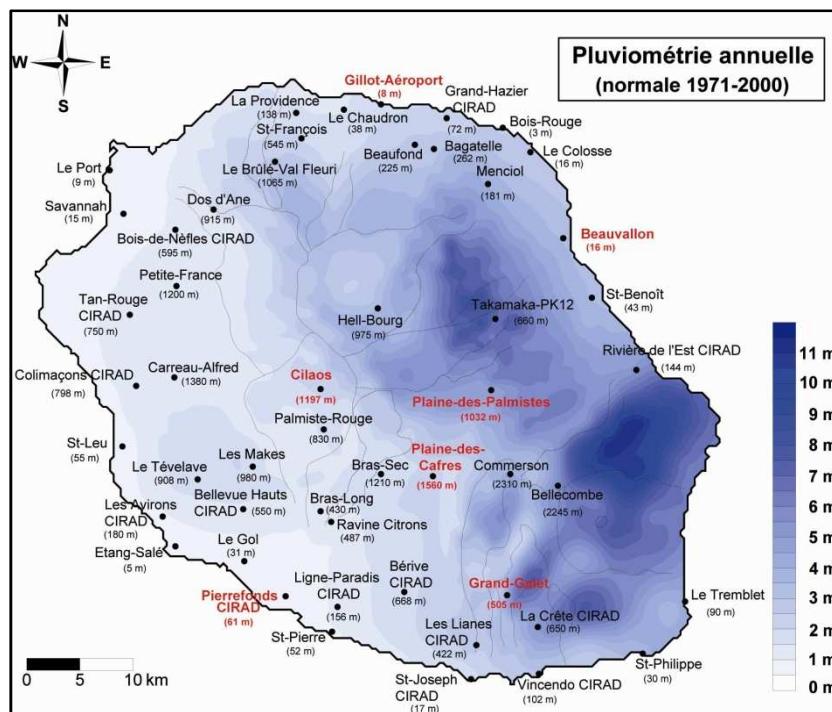


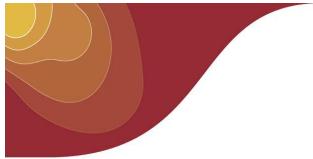
Figure 15 : Pluviométrie moyenne annuelle en mm sur l'île de La Réunion et stations étudiées suivies de leur altitude.

La carte des isohyètes annuelles de la **Figure 15** montre une grande dissymétrie entre l'Est et l'Ouest de La Réunion. A 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 tout à fait exceptionnel.

A l'Ouest, c'est sur le littoral qu'il pleut le moins, en particulier autour de St-Gilles-les-Bains (525 mm/an). Par contre la pluviosité augmente au fur et à mesure que l'on s'élève. On note ainsi, par exemple, un petit noyau pluvieux au niveau de la plaine des Makes (2 m/an).

Les précipitations sont à La Réunion le phénomène météorologique le plus remarquable. L'île possède tous les records mondiaux de pluies pour les périodes comprises entre 12 heures et quinze jours.

Le fait essentiel est la grande **variabilité spatio-temporelle** de ces précipitations. 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.



2.2.3.2 Tendance annuelle sur 40 ans

La carte des tendances des précipitations annuelles de la **Figure 16**, exprimées en pourcentage sur 40 ans (1969-2008), montre des tendances de signes opposés en fonction de l'orientation du relief de l'île par rapport aux alizés. La côte sous le vent (les façades Ouest et Sud-Ouest) souffre d'une diminution globale des quantités de précipitations, alors que la côte au vent (les façades Sud et Nord-Est) bénéficie d'une légère augmentation. Ce constat montre donc une tendance à l'accentuation du fort contraste existant déjà entre l'Est (pluvieux) et l'Ouest (sec) en termes de précipitations. La moyenne spatiale de la tendance calculée sur l'ensemble de La Réunion est de -7%, mais cette valeur, issue d'une méthode simple d'interpolation⁵, demeure approximative.

Il faut préciser que les noyaux de fortes tendances centrés sur Hell-Bourg (cirque de Salazie) et Commerson (massif du volcan) doivent en partie leur existence aux précipitations colossales déversées par la tempête tropicale « DIWA » en 2006 puis par le cyclone tropical « GAMEDE » en 2007. On se souvient que l'épisode pluvieux lié à GAMEDE avait établi de nouveaux records mondiaux de précipitations sur le poste de Commerson (Quetelard, Bessemoulin, Cerveny, Peterson, Burton, & Boodhoo, 2009). Ces épisodes de pluies exceptionnelles placés en fin de notre période d'étude impactent bien évidemment fortement la tendance. Cela montre à quel point il peut être hasardeux d'établir des tendances indiscutables sur des périodes relativement courtes pour des paramètres sujets à une forte variabilité interannuelle.

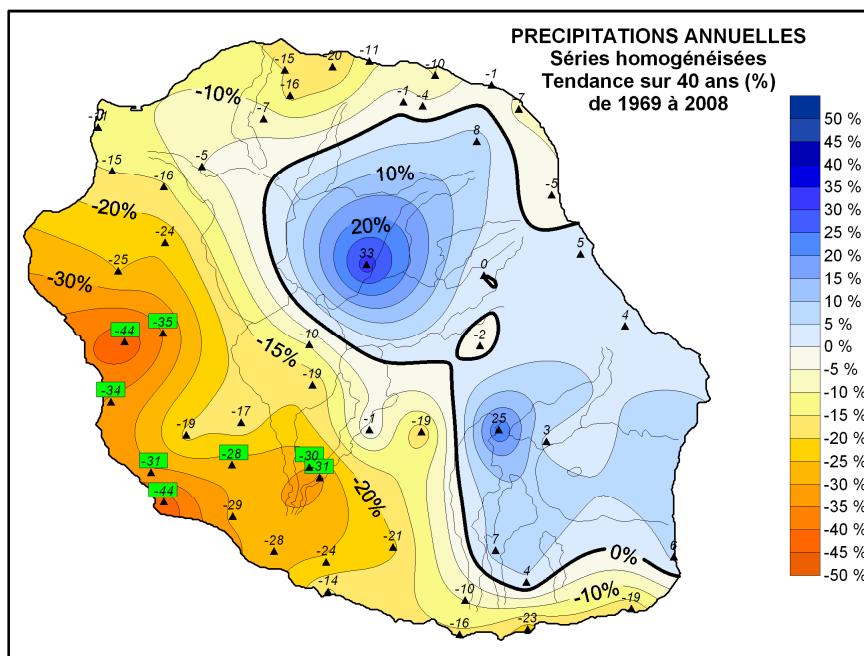
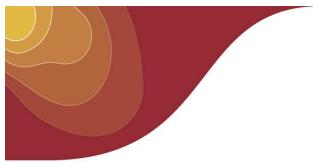


Figure 16 : Evolution des précipitations sur la période 1969-2008

C'est pourquoi il est indispensable de tester si les tendances sont significatives ou non. Le test statistique de Spearman, appliqué aux séries de précipitations annuelles, indique que seuls 8 postes sur les 51 étudiés présentent une tendance significative (carrés verts sur la carte). Le **Tableau 6**, ci-dessous, indique les postes et les

⁵ La méthode d'interpolation utilisée pour tracer les cartes de ce document est un krigage simple qui ne prend pas en compte le relief et d'autres paramètres environnementaux tels la distance à la mer qui influencent fortement la pluviométrie locale



valeurs des tendances significatives. Ces 8 postes sont situés dans l'Ouest et le Sud-Ouest où les tendances sont négatives (assèchement). Aucune hausse, sur la façade au vent, n'est significative.

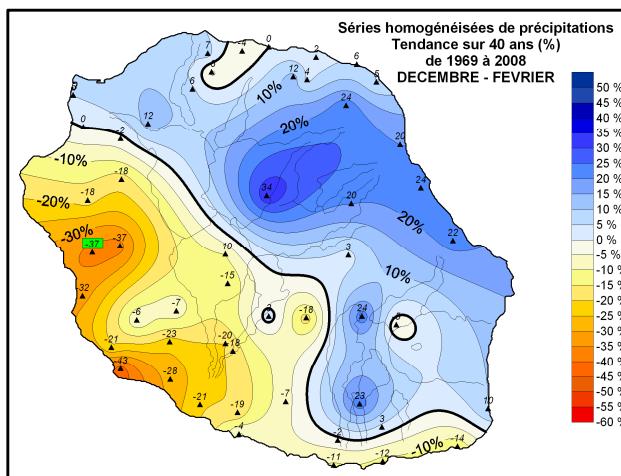
Poste	Altitude	Commune	Evolution significative sur 40 ans	Tendance significative (en % par décennie)
Etang-Salé	5 m	L'Etang-Salé	-44%	-11,0%
Saint-Leu	55 m	Saint-Leu	-34%	-8,5%
Les Avirons	180 m	Les Avirons	-31%	-7,8%
Bras-Long	430 m	L'Entre-Deux	-30%	-7,5%
Ravine Citrons	487 m	L'Entre-Deux	-31%	-7,8%
Bellevue hauts	550 m	Saint-Louis	-28%	-7,0%
Colimaçons	798 m	Saint-Leu	-44%	-11,0%
Carreau-Alfred	1380 m	Saint-Leu	-35%	-8,8%

Tableau 6 : Evolution et tendance significative des précipitations sur la période 1969-2008

2.2.3.3 Tendances saisonnières sur 40 ans

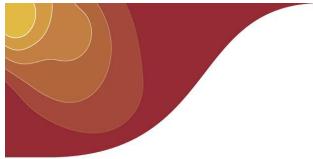
La saison des pluies (décembre à mai) apporte selon les régions 2 à 8 fois plus de précipitations que la saison dite sèche (juin à novembre). En conséquence, sur la carte précédente, les tendances de la saison sèche sont masquées par les tendances de la saison des pluies. Il est donc nécessaire de fragmenter l'année en 4 saisons. Les quatre figurines suivantes montrent les tendances des précipitations selon les saisons sur la période 1969-2008. Les tendances significatives sont notées dans un carré vert. Elles sont listées dans les tableaux situés à droite des cartes.

Décembre-Janvier-Février :



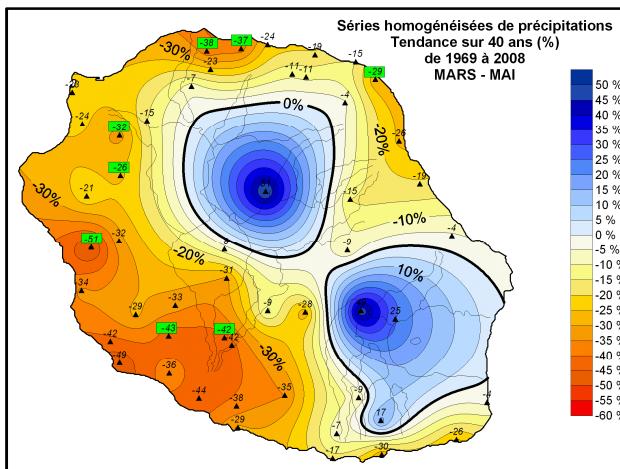
Poste	Altitude	Commune	Evolution significative sur 40 ans	Tendance significative (en % par décennie)
Colimaçons	798 m	Saint-Leu	-37%	-9,3%

Figure 17 : Evolution et tendance significative des précipitations sur la période 1969-2008 pour les mois de décembre, janvier et février.



La période de décembre-janvier-février se situe au cœur de la saison cyclonique, saison qui contribue le plus aux cumuls annuels de précipitations. Cette carte (Figure 17) est donc assez proche de celle des tendances de précipitations annuelles. Le contraste Nord-Est/Sud-Ouest est cependant plus marqué avec notamment des précipitations en hausse plus nette sur la côte est. Toutefois, cette saison est sujette à une très forte variabilité inter annuelle, ce qui se traduit par le fait qu'un seul poste sur 51 indique une tendance significative. Il s'agit du poste de Colimaçons, situé dans les hauts de l'Ouest. Notons tout de même la tendance en baisse, déjà remarquée sur les tendances annuelles, sur la façade sous le vent.

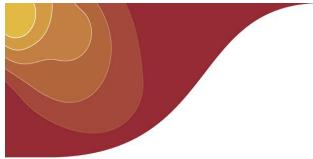
Mars-Avril-Mai :



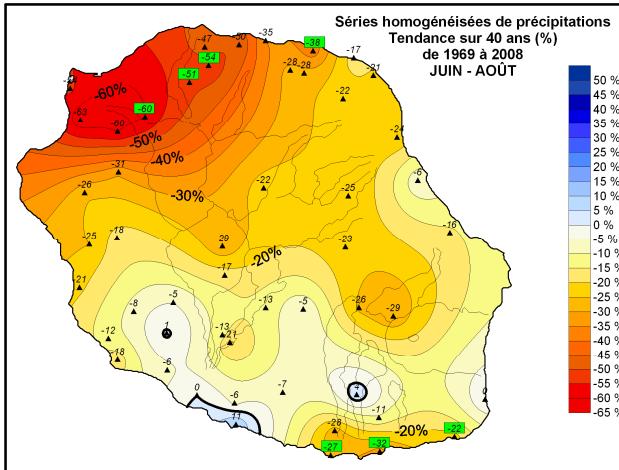
Poste	Altitude	Commune	Evolution significative sur 40 ans	Tendance significative (en % par décennie)
Le Colosse	16 m	Saint-André	-29%	-7,3%
Le Chaudron	38 m	Saint-Denis	-37%	-9,3%
La Providence	138 m	Saint-Denis	-38%	-9,5%
Bras Long	430 m	L'Entre-Deux	-42%	-10,5%
Bellevue hauts	550 m	Saint-Louis	-43%	-10,8%
BDN St-Paul	595 m	Saint-Paul	-32%	-8,0%
Colimaçons	798 m	Saint-Leu	-51%	-12,8%
Petite France	1120 m	Saint-Paul	-26%	-6,5%

Figure 18 : Evolution et tendance significative des précipitations sur la période 1969-2008 pour les mois de mars, avril et mai.

Le mois de mars fait partie intégrante de la pleine saison cyclonique, alors qu'avril et mai peuvent être considérés comme faisant partie d'une saison intermédiaire. Le poids de la pluviométrie de mars est donc plus important. Les deux noyaux de fortes tendances positives, centrés sur Hell-Bourg et Commerson sont essentiellement dus aux très fortes précipitations liées au passage de « DIWA » en mars 2006 (Figure 18). Le test de Spearman indique une tendance non significative sur ces deux postes. On pourra toutefois déplorer le manque de postes autour d'Hell-Bourg. Sur le reste de l'île, les tendances sont à la baisse. Les principaux noyaux de baisse occupent une fois de plus les façades Ouest et Sud-Ouest avec notamment des tendances significatives à Bois de Nèfles Saint-Paul (-32%) et à Bras long (-42%) situé sur la commune de l'Entre-Deux. On note deux autres noyaux de baisse significative, cette fois sur le Nord, de taille plus réduite, l'un situé à Saint-Denis (la Providence, le Chaudron), l'autre à Saint-André (le Colosse). Ces baisses significatives sont très importantes car elles se situent juste avant la saison sèche. Une saison sèche « normale » pourrait avoir ainsi un impact aggravé.



Juin-Juillet-Août :

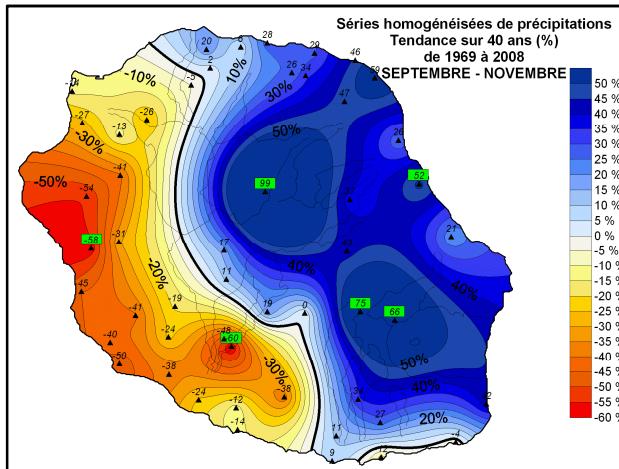


Poste	Altitude	Commune	Evolution significative sur 40 ans	Tendance significative (en % par décennie)
Saint-Joseph	17 m	Saint-Joseph	-27%	-6,8%
Saint-Philippe	30 m	Saint-Philippe	-22%	-5,5%
Grand-Hazier	72 m	Sainte-Suzanne	-38%	-9,5%
Vincendo	102 m	Saint-Joseph	-32%	-8,0%
Saint-François	545 m	Saint-Denis	-54%	-13,5%
Dos d'Âne	915 m	La Possession	-60%	-15,0%
Brûlé Val Fleuri	1065 m	Saint-Denis	-51%	-12,8%

Figure 19 : Evolution et tendance significative des précipitations sur la période 1969-2008 pour les mois de juin, juillet et août.

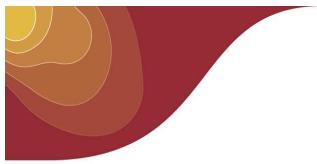
Pour ces trois mois de plein hiver austral, la quasi-totalité de La Réunion présente des tendances de précipitations négatives (Figure 19). Les baisses les plus prononcées concernent le Nord-Ouest, de Saint-Paul à Saint-Denis, avec des valeurs significatives à Dos d'Âne, le Brûlé et St-François. En valeur absolue, cela ne représente pas des quantités de précipitations importantes car cette zone est traditionnellement épargnée par les principaux systèmes pluvieux qui sévissent à cette époque, à savoir les fronts froids en provenance des latitudes Sud et les alizés chargés d'humidité. Le tiers sud-ouest (secteurs de Saint-Louis aux hauts de Saint-Joseph), présente des baisses très limitées grâce à l'apport régulier de précipitations générées par le passage des fronts froids. En revanche, le Sud Sauvage, à la fois exposé aux conséquences pluvieuses des fronts froids et des alizés, connaît des baisses plus significatives (Saint-Philippe, Saint-Joseph, Vincendo).

Septembre-Octobre-Novembre :



Poste	Altitude	Commune	Evolution significative sur 40 ans	Tendance significative (en % par décennie)
Saint-Benoît	43 m	Saint-Benoît	+52%	+13,0%
Ravine Citrons	487 m	L'Entre-Deux	-60%	-15,0%
Colimaçons	798 m	Saint-Leu	-58%	-14,5%
Hell-Bourg	975 m	Salazie	+99%	+24,8%
Bellecombe	2245 m	Sainte-Rose	+66%	+16,5%
Commercson	2310 m	Saint-Joseph	+75%	+18,8%

Figure 20 : Evolution et tendance significative des précipitations sur la période 1969-2008 pour septembre, octobre, novembre.



Une fois encore, la **Figure 20** montre une île scindée en deux. Le contraste Est/Ouest est très marqué. Les mois d'octobre et novembre sont traditionnellement les plus secs de l'année et situés en fin de saison sèche, ce qui les rend cruciaux en cas de déficits pluviométriques antérieurs. Il faut souligner que cette saison est la seule qui présente des tendances significatives à la hausse. Elles sont toutes situées sur la façade Est de l'île (Hell-Bourg, Bellecombe, Commerson, Saint-Benoît). Une fois de plus, l'Ouest et le Sud-Ouest sont marqués par des tendances significatives à la baisse (Ravine Citrons et Colimaçons). On retrouve le contraste façade au vent où l'on constate une hausse des précipitations (excepté le Sud Sauvage) et façade sous le vent où à l'inverse on observe une baisse.

2.2.3.4 Etude des indices climatiques

Le calcul des indices climatiques nécessite de disposer de séries quotidiennes les plus complètes possibles sur une période la plus étendue possible. Compte tenu de ces contraintes, seuls 7 postes ont été retenus : Gillot, Beauvallon, la Plaine des Palmistes, la Plaine des Cafres, Cilaos, Grand-Galet et Pierrefonds-Cirad pour la période 1969-2008 (postes notés en rouge sur la carte de la **Figure 15**).

Les **Tableau 7** et **Tableau 8** donnent les valeurs des indices climatiques calculés pour ces 7 postes.

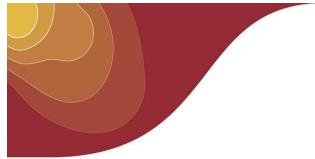
Indices calculés annuellement, définis par l'Organisation Mondiale de la Météorologie (OMM) :

- cdd : nombre maximal de jours secs consécutifs ($rr^6 < 1\text{mm}$)
- cwd : nombre maximal de jours consécutifs de pluie ($rr \geq 1\text{mm}$)
- rr1, rr10: nombre de jours de précipitations respectivement supérieures ou égales à 1mm, 10mm.
- r1d, r5d : maximum en mm des cumuls de précipitations respectivement sur 1 et 5 jours
- cumul : cumul annuel des précipitations quotidiennes supérieures à 1 mm
- sdii : cumul moyen par jour de pluie
- r95t : fraction des précipitations supérieures au demi-décile supérieur des précipitations

Nous avons complété cette liste, en calculant de nouveaux indices avec des seuils de précipitations plus élevés pour mieux prendre en compte les épisodes de fortes pluies qui affectent l'île pendant la saison des pluies :

- rr30, rr50, rr100 : nombre de jours de précipitations respectivement supérieures ou égales à 30mm, 50mm, 100mm
- r3d, r10d : maximum en mm des cumuls de précipitations respectivement sur 3 et 10 jours
- r99t : fraction des précipitations supérieures au centile supérieur des précipitations.

⁶ rr : cumul quotidien de précipitations.

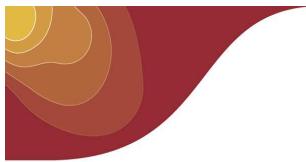


Poste	Commune	Indice →	cdd	cwd	rr1	r10	r30	r50	r100
Gillot (8 m)	Sainte-Marie	MOY 1971-2000	22,5	9,6	116,5	37,3	14,0	7,7	2,2
		EVOL 1969-2008	+5,5	-0,9	-0,7	-8,0	-0,9	-0,7	+0,1
Beauvallon (16 m)	Saint-Benoît	MOY 1971-2000	15,6	16,4	184,3	77,1	27,8	15,0	5,4
		EVOL 1969-2008	-4,1	-0,1	+21,1	-3,0	-1,6	-1,8	-2,1
Pierrefonds-Cirad (61 m)	Saint-Pierre	MOY 1971-2000	47,3	5,5	51,7	20,3	6,1	3,0	0,5
		EVOL 1969-2008	-21,7	+0,1	+19,4	-5,8	-3,8	-2,9	-0,6
Grand-Galet (505 m)	Saint-Joseph	MOY 1971-2000	22,4	10,2	126,9	54,8	27,0	16,3	7,2
		EVOL 1969-2008	-9,3	+1,7	+10,0	+1,5	+0,8	+1,4	-0,4
Pl. Palmistes (1032 m)	Pl. des Palmistes	MOY 1971-2000	13,2	16,8	199,5	79,6	32,3	20,2	9,3
		EVOL 1969-2008	-2,6	-2,2	+12,5	-2,2	-4,6	-2,2	-0,5
Cilaos (1197 m)	Cilaos	MOY 1971-2000	28,3	8,3	94,2	33,3	11,7	7,3	3,6
		EVOL 1969-2008	+0,6	-0,8	-14,8	-7,8	-5,1	-3,0	-1,4
Pl. Cafres (1560 m)	Le Tampon	MOY 1971-2000	19,9	9,7	128,4	35,7	13,3	7,7	3,7
		EVOL 1969-2008	-7,5	-0,3	-4,2	-7,3	-2,6	-1,9	-1,3

Tableau 7 : indices climatiques par poste sur la période de référence 1971-2000 et leur évolution sur la période 1969-2008
(les indices sont calculés en nombre de jours annuel)

Poste	Commune	Indice →	r1d	r3d	r5d	r10d	cumul	sdii	r95t	r99t
Gillot (8 m)	Sainte-Marie	MOY 1971-2000	175,9	298,4	348,3	435,5	1666,0	14,2	33,9%	10,9%
		EVOL 1969-2008	-40,8	+20,1	+25,7	+33,4	-193,3	-1,6	+1,8%	-1,7%
Beauvallon (16 m)	Saint-Benoît	MOY 1971-2000	226,0	397,5	464,9	622,6	3367,3	18,4	32,8%	11,1%
		EVOL 1969-2008	+14,2	+65,0	+37,4	-12,5	-161,1	-2,8	-6,0%	+1,7%
Pierrefonds-Cirad (61 m)	Saint-Pierre	MOY 1971-2000	97,3	145,9	164,8	196,2	725,6	14,0	25,6%	7,8%
		TEND 1969-2008	-35,5	-61,9	-51,0	-69,1	-238,6	-8,7	-17,6%	-6,4%
Grand-Galet (505 m)	Saint-Joseph	MOY 1971-2000	356,1	580,1	652,9	761,8	3163,6	24,8	37,9%	14,4%
		EVOL 1969-2008	+97,1	+120,3	+115,6	+110,3	+196,5	-0,1	+1,8%	+2,0%
Pl. Palmistes (1032 m)	Pl. des Palmistes	MOY 1971-2000	434,3	811,7	970,2	1193,0	4614,3	23,0	41,9%	15,8%
		EVOL 1969-2008	+91,7	+133,8	+207,1	+197,8	-131,4	-1,8	+3,8%	+3,8%
Cilaos (1197 m)	Cilaos	MOY 1971-2000	366,2	565,8	628,4	742,7	1881,9	19,7	43,1%	16,9%
		EVOL 1969-2008	+58,1	+177,3	+204,6	+90,4	-264,9	+1,8	-1,0%	+7,0%
Pl. Cafres (1560 m)	Le Tampon	MOY 1971-2000	372,9	592,2	660,2	767,3	2096,1	16,5	46,3%	19,9%
		EVOL 1969-2008	+15,0	+5,7	+39,1	-61,8	-506,3	-3,6	-3,0%	-2,8%

Tableau 8 : indices climatiques par poste sur la période de référence 1971-2000 et leur évolution sur la période 1969-2008
(les indices sont calculés en mm ou en pourcentage)



Les indices climatiques calculés sur les précipitations présentent un signal peu évident à interpréter. Les évolutions sont en majorité non significatives et les ordres de grandeurs sont faibles.

Bien que les cumuls annuels (cumul) et les cumuls de pluie moyens par jour de pluie (sdii) soient à la baisse pour tous les postes, à l'exception de Grand-Galet, la période sèche la plus longue (cdd) est en baisse pour 5 postes sur 7. La baisse la plus importante concerne Pierrefonds-Cirad avec une tendance négative sur 40 ans de 21,7 jours pour une moyenne 1971-2000 de 47,3 jours. Les 2 exceptions sont Cilaos avec une tendance très faible (0,6 jour) et Gillot (+5,5 jours). Cette baisse quasi-généralisée de la durée des périodes sèches est due, en partie, à l'augmentation du nombre de jours de pluie supérieure à 1 mm (rr1). Notons que les postes situés sur la façade au vent, exposés toute l'année à des précipitations transportées par les alizés connaissent une hausse nette de cet indice (Beauvallon, Plaine des Palmistes, Grand-Galet).

En revanche, les nombres de jours de précipitations supérieures ou égales aux seuils de 10 à 100 mm sont en baisse. Les épisodes pluvieux que l'on peut qualifier de modérés à forts semblent donc un peu moins fréquents.

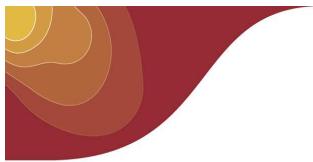
Les cumuls maximum de précipitations calculés sur des périodes de 1 à 10 jours sont quant à eux majoritairement en hausse à l'exception notable de Pierrefonds-Cirad où ils sont tous à la baisse. Toutefois les tendances de ces cumuls sont fortement impactées par l'activité cyclonique, notamment par le passage de GAMEDE et DIWA en fin de période d'étude comme on l'a vu précédemment et qui ont relativement épargné la région de Saint-Pierre.

Les tendances des fractions des précipitations supérieures au 95^{ième} et 99^{ième} centile (r95t et r99t), qui caractérisent les épisodes extrêmes et très extrêmes, ont des évolutions parfois contradictoires si bien qu'il est difficile d'en déduire une conclusion fiable sur les précipitations intenses. On note tout de même une baisse pour ces 2 indices pour les postes de Pierrefonds-Cirad et la Plaine des Cafres et une hausse pour Grand-Galet et la Plaine des Palmistes.

Les tendances de précipitations de 1969 à 2008 sont orientées à la baisse sur l'Ouest, le Sud-Ouest et le Sud sauvage et ce, quelle que soit la saison. Ces régions sont touchées par des sécheresses accrues.

Les mois d'hiver austral ont connu une baisse généralisée des précipitations sur la période étudiée. Sur la façade au vent, les tendances sont à la baisse pendant l'hiver austral et à la hausse de septembre à novembre. L'aléa cyclonique ne permet pas d'évaluer une tendance fiable pour la période de décembre à mai.

On note globalement une augmentation du nombre de jours de faibles précipitations sur la façade au vent, accompagnée d'une baisse de la durée des épisodes secs. Le nombre de jours de précipitations modérées à fortes baisse sur l'ensemble de l'île. Aucune tendance fiable ne peut être déduite sur la fréquence des épisodes de précipitations extrêmes.



2.2.4 Activité cyclonique

2.2.4.1 La base de données cyclones

Au niveau de l'OMM, des Centres Météorologiques Régionaux Spécialisés (CMRS) cyclones ont été identifiés pour assurer la surveillance des sept bassins cycloniques en termes d'élaboration et de diffusion des messages d'avertissements liés aux systèmes tropicaux. Pour le bassin sud-ouest de l'océan Indien, cette responsabilité incombe à la Direction Interrégionale de Météo-France à La Réunion (DIRRE). A ce titre, la DIRRE assure l'observation, le suivi et l'archivage des systèmes tropicaux sur sa zone de responsabilité. La base de données ainsi constituée est disponible de la saison cyclonique 1848-1849 jusqu'à nos jours.

Le graphique suivant (Figure 21) retrace l'évolution du nombre de systèmes dépressionnaires tropicaux par saison cyclonique de 1848 à 2009. Ce graphique met avant tout en lumière la grande variabilité interannuelle de l'activité cyclonique. On constate également que le nombre de systèmes est plus important sur la période récente. Malheureusement le manque d'homogénéité des données présentes dans la base, lié à l'évolution des techniques d'observations et d'estimation des intensités ne permet pas, à ce stade d'analyse très sommaire, de conclure quoi que soit en terme de tendance à long terme pour l'activité cyclonique sur le bassin.

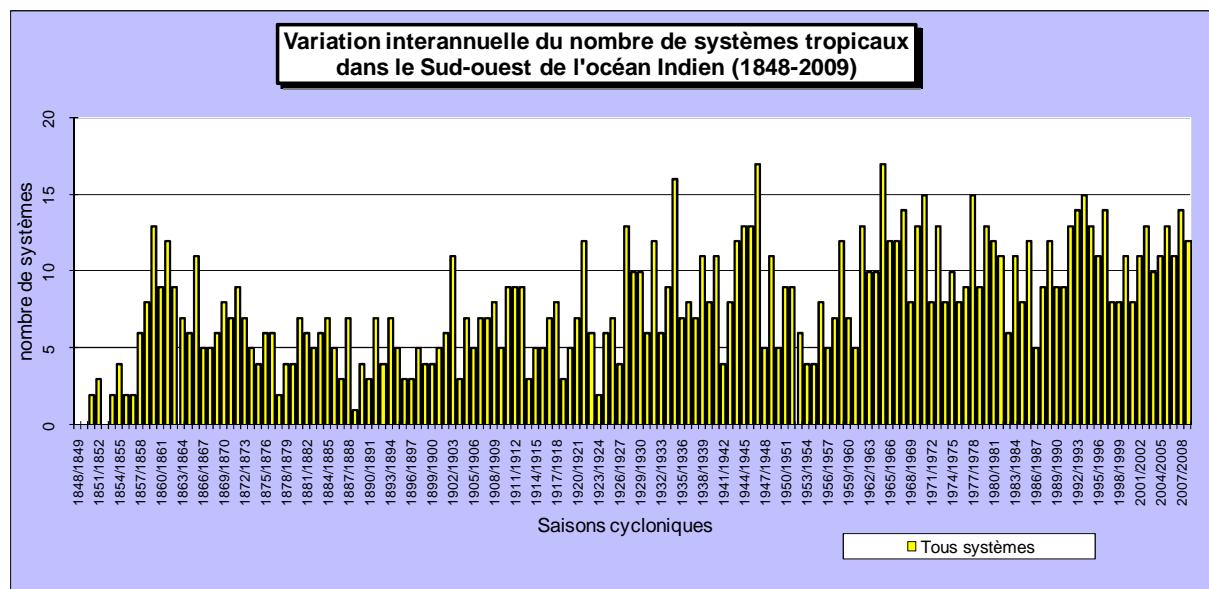
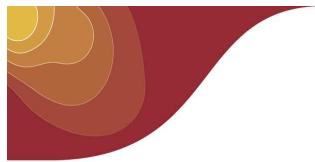


Figure 21 : nombre de systèmes tropicaux par saison cyclonique de 1848 à 2009

2.2.4.2 L'évolution des techniques d'observation et d'estimation d'intensité

L'amélioration des moyens de détection a permis d'affiner l'observation des systèmes dépressionnaires tropicaux et des cyclones. Le comptage systématique des cyclones a réellement été entrepris au cours du 20^{ème} siècle. Au début du siècle, ce comptage ne reposait que sur l'observation visuelle. Seuls les cyclones touchant l'activité humaine (îles ou navires) étaient répertoriés avec une intensité mal estimée. Les systèmes à l'écart des grandes routes maritimes passaient complètement inaperçus. On peut donc considérer que le nombre de cyclones a été systématiquement sous-estimé au cours de cette période, même s'il est difficile de préciser dans quelle mesure.



L'avènement des satellites météorologiques dans les années 60 va permettre de franchir un palier énorme dans l'observation des cyclones. Mais les premiers satellites à orbite polaire, à partir de 1967, couvrent de manière trop ponctuelle les zones tropicales. Le lancement de satellites géostationnaires au milieu des années 70 va remédier à ce problème en offrant une observation continue des bassins cycloniques. Cependant le bassin du Sud-Ouest de l'océan Indien n'est couvert que partiellement sur sa partie Ouest par le satellite METEOSAT et sur sa partie Est par le satellite japonais MTSAT. Il faut attendre mai 1998 pour qu'un des satellites METEOSAT soit dédié à la surveillance de l'océan Indien. A partir de 1999, de nouveaux capteurs installés sur les satellites à orbite polaire, utilisant des fréquences dans le domaine micro-onde, donnent accès à de nouvelles images sur la structure des cyclones. Enfin en 2005, le satellite géostationnaire METEOSAT 2^{nde} génération envoie des images toutes les 15 minutes sur la partie Ouest de notre bassin. Ces progrès technologiques améliorent sans cesse la détection et l'observation des perturbations tropicales et des cyclones.

A partir des images satellitaires, et de la configuration des bandes nuageuses des météores, des méthodes d'estimation de l'intensité ont été mises au point. La technique de Dvorak a été définitivement adoptée par le CMRS de La Réunion à partir de la saison cyclonique 1981-1982. Mais même après cette date, des modifications dans la méthode de Dvorak (1985) ou dans la classification des perturbations tropicales sur le bassin (1999) ont été apportées (Figure 22, classification en cours). Ces modifications se rajoutant à l'amélioration des moyens d'observation induisent toujours inévitablement des inhomogénéités. On peut par exemple craindre qu'avant 1998, certains pics d'intensité n'aient pu être vus par défaut d'images satellitaires de qualité disponibles au moment opportun.

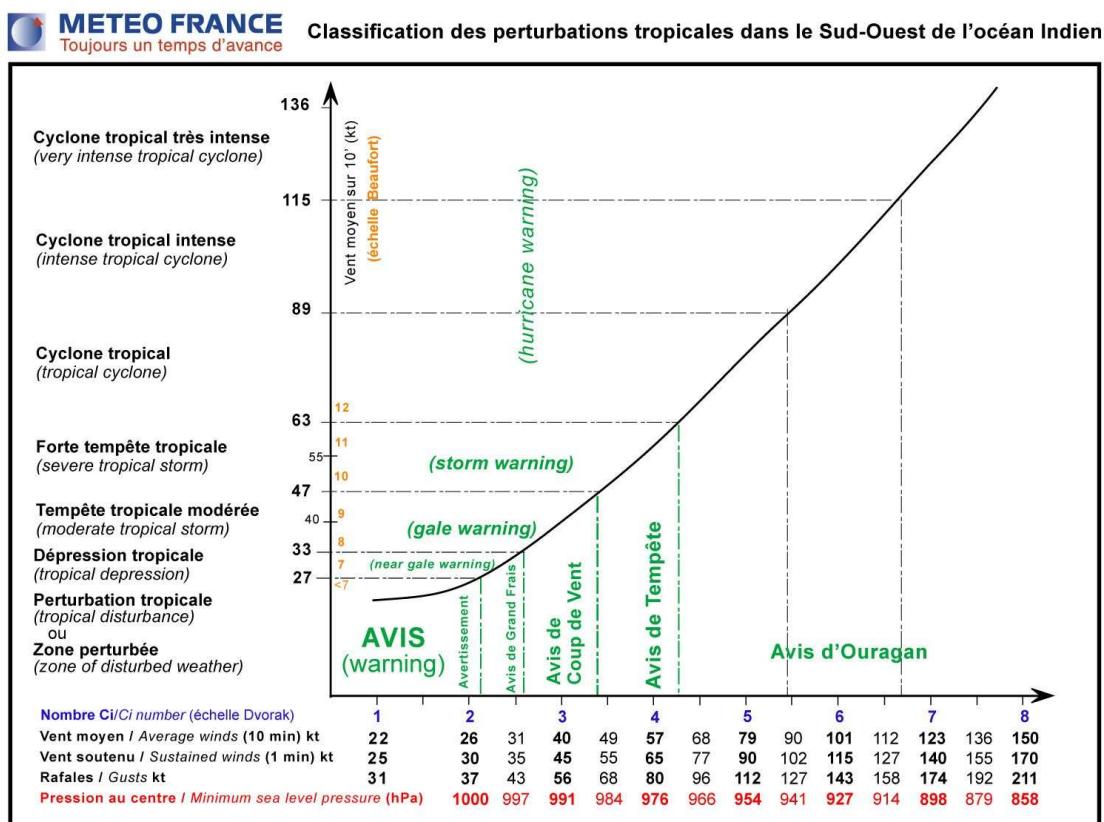
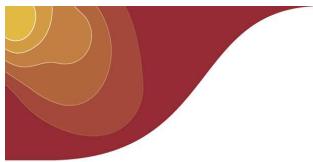


Figure 22 : classification en cours des perturbations tropicales dans le Sud-Ouest de l'océan Indien



2.2.4.3 Evolution de l'activité cyclonique sur le bassin

Dans ce sous-chapitre nous étudions néanmoins l'évolution de l'activité cyclonique sur la période de 1967 à 2009. Les statistiques présentées ne s'intéressent qu'aux systèmes ayant au moins atteint le stade de tempête tropicale modérée qui correspond également au seuil de baptême. C'est en effet à partir de ce seuil que l'on peut considérer qu'il y a une réelle activité cyclonique sur le bassin. D'autre part, pour améliorer l'homogénéité de l'échantillon, nous avons reclassifié les systèmes sur la période 1981-1999 en appliquant la nouvelle correspondance entrée en vigueur en 1999. La classification des perturbations tropicales (Figure 22) a en effet été modifiée depuis cette date dans le sens d'un décalage des intensités de Dvorak vers des valeurs de vents moyens sur 10 minutes plus élevées, ce qui a pour conséquence de classifier certains systèmes vers la classe supérieure (ex : tempête tropicale forte devenant cyclone tropical).

En l'état actuel des données disponibles, il n'est pas possible de reclassifier les systèmes antérieurs à 1981⁷, mais la correction que l'on a appliquée sur 1981-1999 est le meilleur compromis que l'on ait pu trouver pour travailler sur un échantillon suffisamment long.

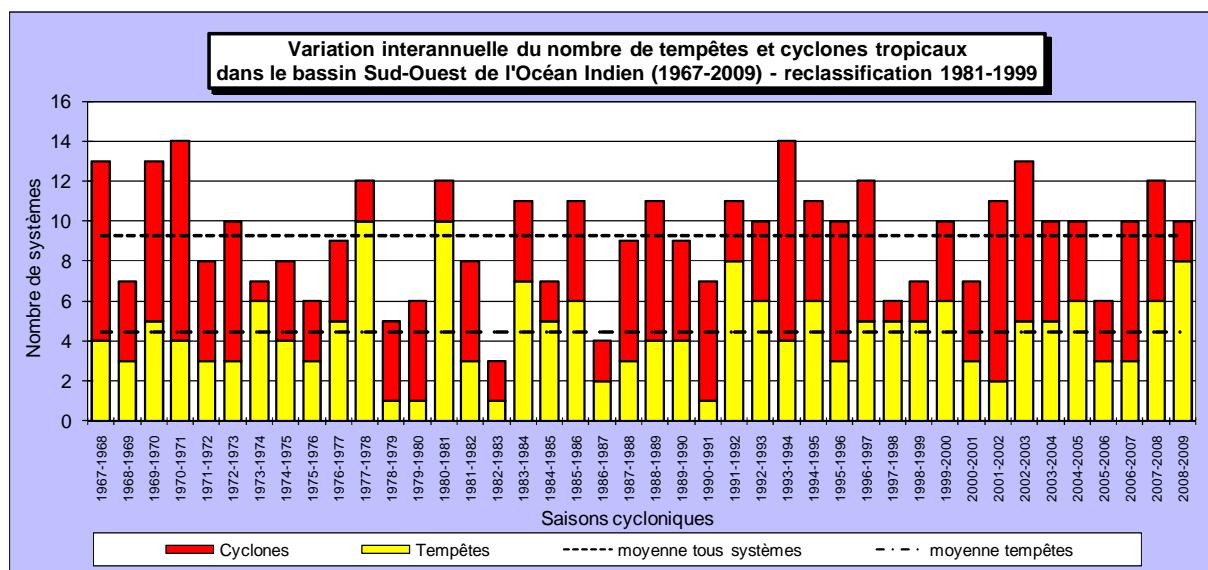
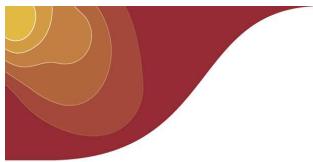


Figure 23 : nombre de tempêtes et cyclones tropicaux par saison cyclonique de 1967 à 2009 (données corrigées)

Le graphique ci-dessus (Figure 23) présente la variation interannuelle du nombre de tempêtes et de cyclones tropicaux sur le bassin de la saison cyclonique 1967-1968 à la saison 2008-2009. Sur cette période, on compte en moyenne 9,3 systèmes tropicaux par saison. Parmi eux, on dénombre 4,8 systèmes ayant atteint le stade de cyclone.

La variabilité interannuelle est forte puisque l'écart type atteint 2,7 pour l'ensemble des systèmes et 2,4 pour les cyclones. Les deux saisons les plus actives ont été 1970-1971 et 1993-1994 avec pas moins de 14 systèmes, mais c'est la saison 1970-1971 qui détient le record du nombre de cyclones avec 10 cas sur le bassin. A l'opposé, durant la saison 1982-1983, seuls 3 systèmes se sont développés dont 2 ont atteint tout juste le stade de cyclone (après correction).

⁷ Avant 1981, c'était la méthode Oliver qui était employée pour estimer l'intensité des phénomènes. Les vents moyens maximaux près du centre, utilisés pour classifier les systèmes comme on peut le voir sur la figure 22, étaient donc déduits de l'échelle Oliver. Il n'y a donc malheureusement pas d'informations dans la base de données sur la vitesse des vents maximaux avant 1981. Seul le type de système est disponible



Il est assez périlleux de faire apparaître des tendances compte tenu de l'hétérogénéité des données disponibles et de l'impossibilité de reclasser les systèmes antérieurs à 1981. On observe néanmoins une tendance quasi nulle sur le nombre de cyclones et une très légère tendance à la hausse sur le nombre total de systèmes (+0,7).

Si l'on veut aller plus loin pour étudier l'évolution de l'activité cyclonique sur le bassin, on peut aussi compter le nombre de jours où l'on constate la présence d'au moins un système tropical. On peut en effet rencontrer des saisons avec un nombre de systèmes important de durées de vie courtes et inversement avoir des saisons avec moins de systèmes mais de durées de vie plus longues. Pour réellement quantifier l'activité cyclonique il est d'ailleurs préférable de cumuler les jours où plusieurs systèmes sont présents simultanément sur la zone (comptage d'un jour pour chaque système). Les graphiques ci-dessous (**Figure 24** et **Figure 25**) présentent ces deux types de comptage avec reclassification des systèmes entre 1981 et 1999.

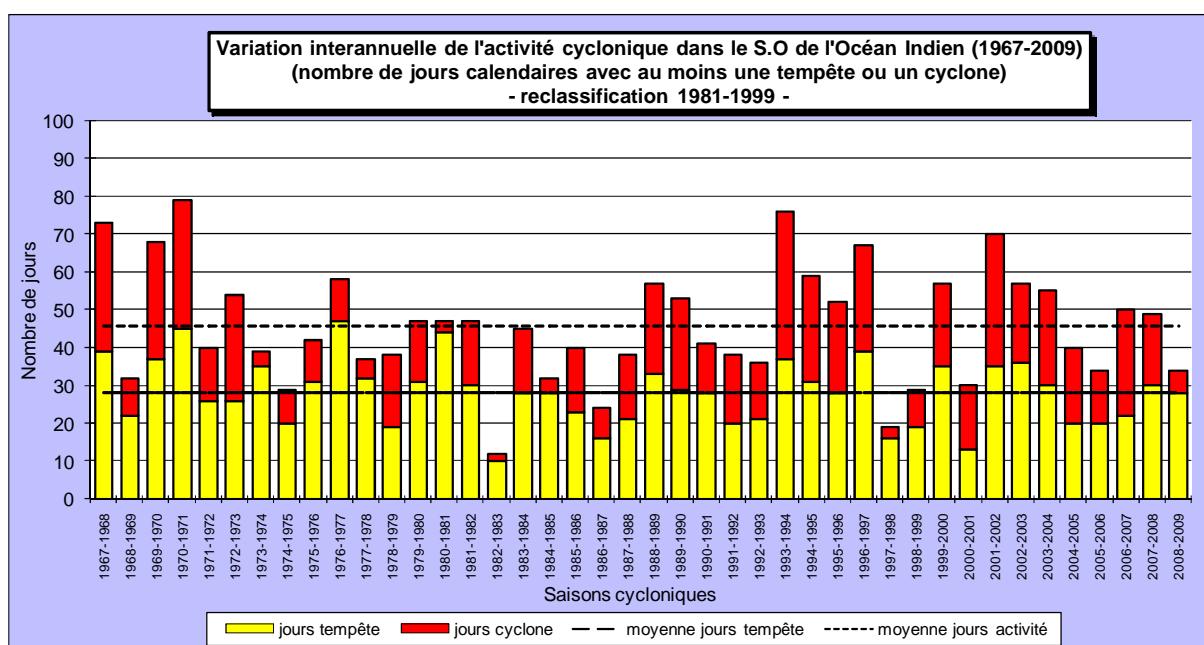


Figure 24 : nombre de jours où l'on constate une activité cyclonique par saison de 1967 à 2009 (données corrigées)

On dénombre en moyenne 46 jours avec activité cyclonique par saison, dont 18 jours avec un cyclone au moins présent sur la zone. La saison 1982-1983, très pauvre en systèmes tropicaux, n'a vu que 13 jours d'activité, soit près de six fois moins que la saison 1970-1971 qui constitue un record de jours d'activité sur la période considérée avec 79 jours. Par contre, en termes de nombre de jours avec présence d'un cyclone au moins, c'est 1993-1994 qui détient la palme avec 39 jours.

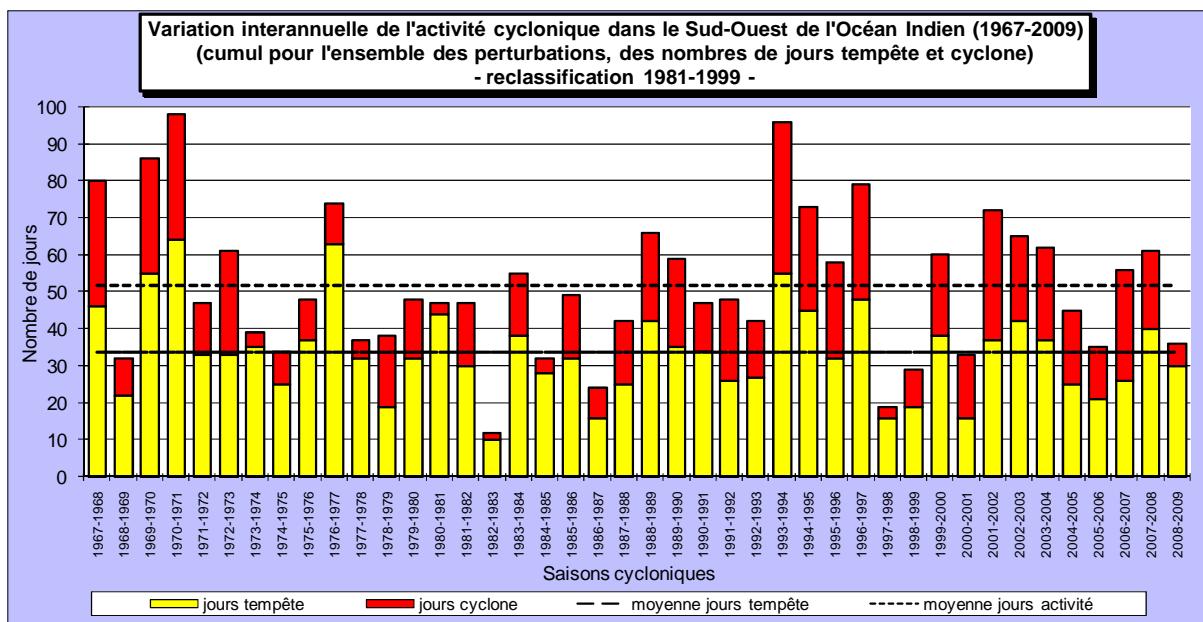
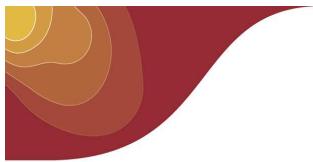


Figure 25 : nombre de jours cumulés pour l'ensemble des perturbations par saison de 1967 à 2009 (données corrigées)

Si l'on s'intéresse au nombre de jours cumulés d'activité, c'est-à-dire un jour par système existant sur la zone, les chiffres sont bien sûr un peu plus élevés mais les saisons extrêmes restent les mêmes.

On peut également calculer les tendances à partir de l'échantillon corrigé, bien que là encore l'exercice s'avère périlleux. On constate que le nombre de jours avec présence d'un cyclone (cumulés ou non cumulés) est en hausse assez nette, tandis que le nombre de jours d'activité tous systèmes confondus est en légère baisse. Ce qui laisse à penser que la durée de vie au stade de cyclone tendrait à augmenter (puisque leur nombre est stable).

Une autre piste d'étude consiste à utiliser un indice intitulé « Accumulated Cyclone Energy » (A.C.E). Cet indice est calculé pour une saison donnée à partir des valeurs de vent estimées toutes les six heures pour les systèmes ayant atteint ou dépassé le stade de tempête tropicale modérée. Il est très intéressant car il représente en quelque sorte l'énergie totale des systèmes sur toute leur durée de vie. La durée et l'intensité sont ainsi prises en compte simultanément. Le graphique de la Figure 26 montre l'évolution de cet indice sur la période 1983-2009. Les données disponibles sont malheureusement insuffisantes pour calculer l'indice avant 1983.

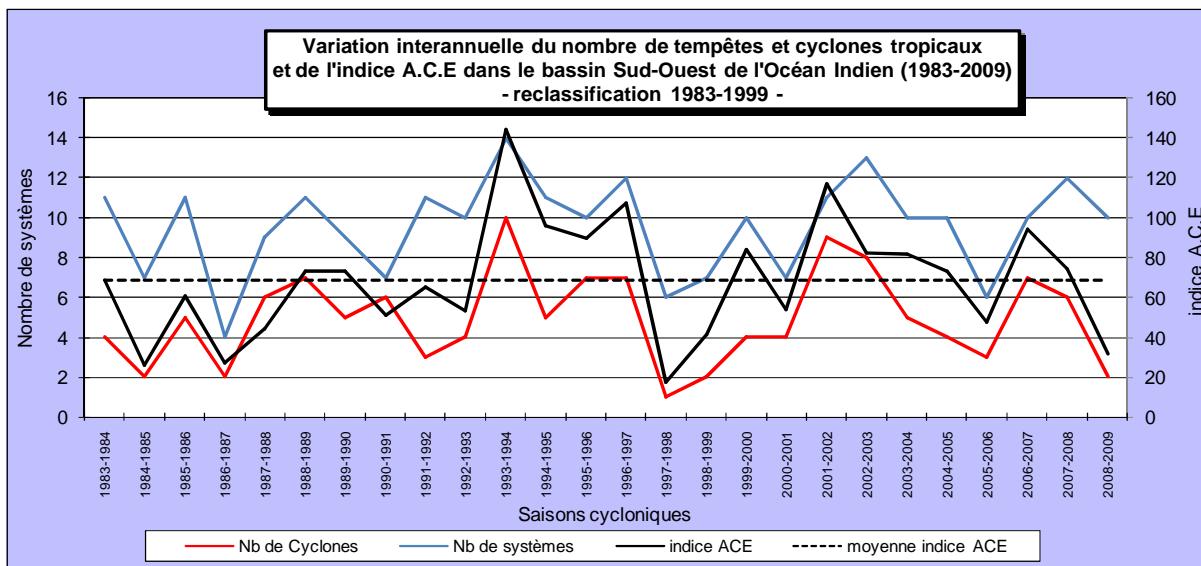
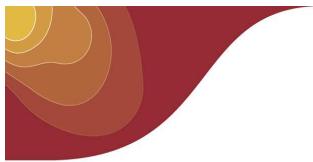


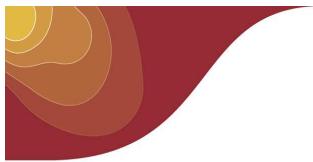
Figure 26 : variation interannuelle de l'indice A.C.E et du nombre de systèmes de 1983 à 2009 (données corrigées)

En superposant la courbe de cet indice avec les deux courbes représentant le nombre total de systèmes (tempêtes et cyclones) et le nombre de cyclones, on remarque que l'indice est mieux corrélé avec le nombre de cyclones que le nombre de tempêtes. C'est normal puisqu'un cyclone est plus énergétique qu'une tempête. Cet indice apporte toutefois des nuances importantes dans l'appréciation de l'activité globale d'une saison. On peut remarquer par exemple que la saison 2008-2009, bien que généreuse en nombre total de systèmes, présente un indice particulièrement bas. A noter que l'écart-type est très important par rapport à la moyenne (29,8 pour une moyenne de 68,3). En termes d'énergie, les variations interannuelles sont donc très fortes.

Les graphiques précédents (**Figure 23**, **Figure 24** et **Figure 25**) montrent clairement que l'activité cyclonique suit des cycles de plusieurs années d'activité alternativement forte et faible. La taille de l'échantillon sur lequel l'indice A.C.E est calculé est trop faible par rapport à ces cycles. Notamment, le début de l'échantillon correspond à un cycle de faible activité qui perturberait de manière excessive le calcul éventuel d'une tendance sur la période et pourrait nous amener à conclure sur des appréciations trompeuses. Ce problème venant d'ailleurs s'ajouter aux problèmes d'homogénéité évoqués à maintes reprises. Ce sont ces mêmes raisons qui nous ont incités à nous interdire de présenter l'évolution de l'intensité des cyclones en étudiant par exemple la proportion cyclone – cyclone intense par saison (information disponible sur la période 1981-2009).

2.2.4.4 Evolution de l'activité cyclonique à proximité de La Réunion

La distance à laquelle une tempête ou un cyclone tropical produit des effets sur les conditions météorologiques de l'île varie en fonction de la taille des systèmes. Mais, en général, les effets se font ressentir quand un météore se rapproche à moins de 300 kilomètres des côtes de l'île, soit par une augmentation de la force du vent, soit par l'arrivée de la houle cyclonique, soit par des précipitations liées aux bandes pluvieuses périphériques, soit par deux ou les trois effets simultanément. Il est donc intéressant d'étudier le nombre de tempêtes ou cyclones tropicaux qui ont transité dans ce cercle de 300 kilomètres centré sur La Réunion.



Sur la période étudiée 1967-2009, le nombre de cas annuel varie plus généralement entre 1 et 2, voire aucun cas certaines années (1 année sur 4). Deux années seulement comportent 2 et 3 cas. D'où l'impossibilité de calculer raisonnablement une tendance sur cette période. Le graphique ci-dessous (Figure 27) indique le nombre de tempêtes et cyclones tropicaux qui sont passés dans ce cercle de rayon 300 kilomètres. Pour compléter nous avons calculé l'indice A.C.E correspondant au passage des systèmes dans la zone délimitée et l'avons tracé sur le graphique de même que l'indice global du bassin. L'indice A.C.E « Réunion » a été multiplié par un facteur de 10 pour des raisons de lisibilité sur le graphique.

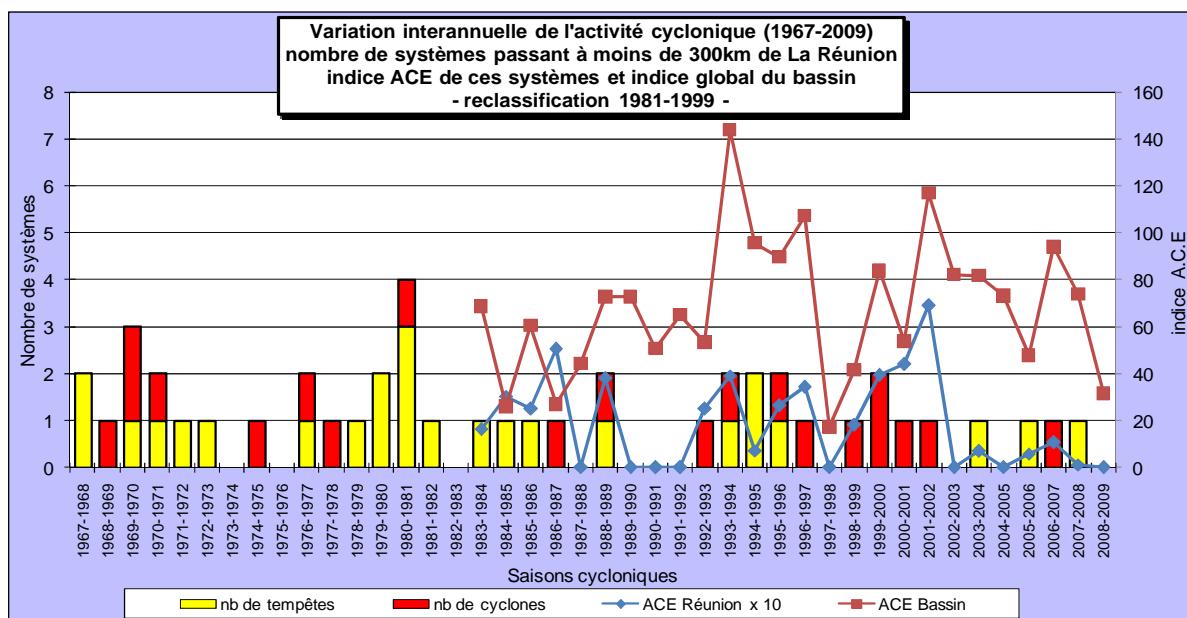


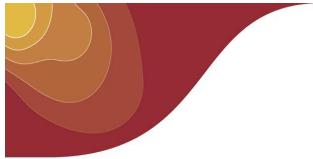
Figure 27 : Nombre de systèmes tropicaux par saisons cycloniques de 1967 à 2009, à moins de 300 km des côtes de La Réunion et indices ACE calculés pour ces systèmes (x10) et calculés pour l'ensemble du bassin de 1983 à 2009

Ce graphique montre bien qu'il n'y a pas de relation directe entre l'activité cyclonique intéressant de près La Réunion et l'activité cyclonique globale du bassin. Par exemple, les saisons 1986-1987 et 1993-1994 présentent respectivement un indice A.C.E global très inférieur et très supérieur à la moyenne, mais un indice A.C.E « Réunion » comparable, voire plus fort pour 1986-1987. En février 1987, La Réunion a été en effet très affectée par le système « CLOTILDA » dont la trajectoire atypique a occasionné des effets importants en termes de vent et surtout de pluies. En février 1994, c'est le cyclone « HOLLANDA », plus classique, qui a frôlé la pointe Sud-Est de l'île. Le record d'A.C.E « Réunion » est détenu par la saison 2001-2002 avec le passage du cyclone tropical intense « DINA » qui a durablement affecté le département.

En conclusion, une saison fortement active n'implique pas forcément un risque plus grand pour La Réunion en termes de danger cyclonique. A l'inverse, l'île peut être frappée durement par un cyclone lors d'une saison comportant peu de systèmes sur la zone.

2.2.4.5 Relations avec l'oscillation ENSO (El Niño-Southern Oscillation)

Il peut-être intéressant d'étudier les relations qu'il peut y avoir entre l'activité cyclonique sur le bassin du Sud-Ouest de l'océan Indien et les oscillations de grande ampleur de la circulation générale atmosphérique pour expliquer l'importante variabilité interannuelle constatée.



L'ENSO est la plus connue et la plus étudiée de ces oscillations dans le monde scientifique. C'est la principale source de la variabilité du système climatique aux échelles de temps interannuelles. ENSO est l'acronyme composé à partir des termes El Niño et Southern Oscillation (oscillation australe). El Niño (l'*Enfant Jésus*, ainsi nommé parce qu'il apparaît peu après Noël) désigne à l'origine un courant côtier saisonnier au large du Pérou et de l'Equateur, et par extension le phénomène climatique particulier qui diffère du climat usuel et qui se caractérise par une élévation anormale de la température de l'océan dans la partie est de l'océan Pacifique sud. La Niña succède fréquemment au phénomène El Niño et se traduit par une anomalie négative dans la même région de l'océan Pacifique.

L'ENSO constitue ainsi l'alternance entre El Niño - La Niña de périodes caractéristiques 5 à 7 ans, relié à l'oscillation australe qui est une bascule de la pression atmosphérique entre le Pacifique central (Tahiti) et le Pacifique ouest (Darwin). Pendant une année normale, la pression réduite au niveau de la mer à Tahiti est supérieure à celle de Darwin, alors que pendant un événement El Niño, ce gradient de pression diminue, s'annule, voire s'inverse pendant les événements El Niño les plus marqués. L'indice SOI (G. Walker, 1932), basé sur cette différence de pression, permet de quantifier l'ENSO. Il est négatif en période El Niño, proche de zéro en temps normal et positif pendant un événement La Niña.

Le graphique de la **Figure 28** présenté ci-dessous permet de visualiser l'indice SOI en relation avec l'activité cyclonique du bassin Sud-Ouest de l'océan Indien matérialisée par le nombre de systèmes (tempêtes et cyclones). On constate qu'il n'y a pas de corrélation évidente entre ces deux paramètres, hormis le fait qu'aux deux événements El Niño très marqués des saisons 1982-83 et 1997-98 correspondent une activité cyclonique faible sur le bassin⁸. Il est toutefois là encore hasardeux de tirer des conclusions indiscutables étant donné la rareté des événements en question.

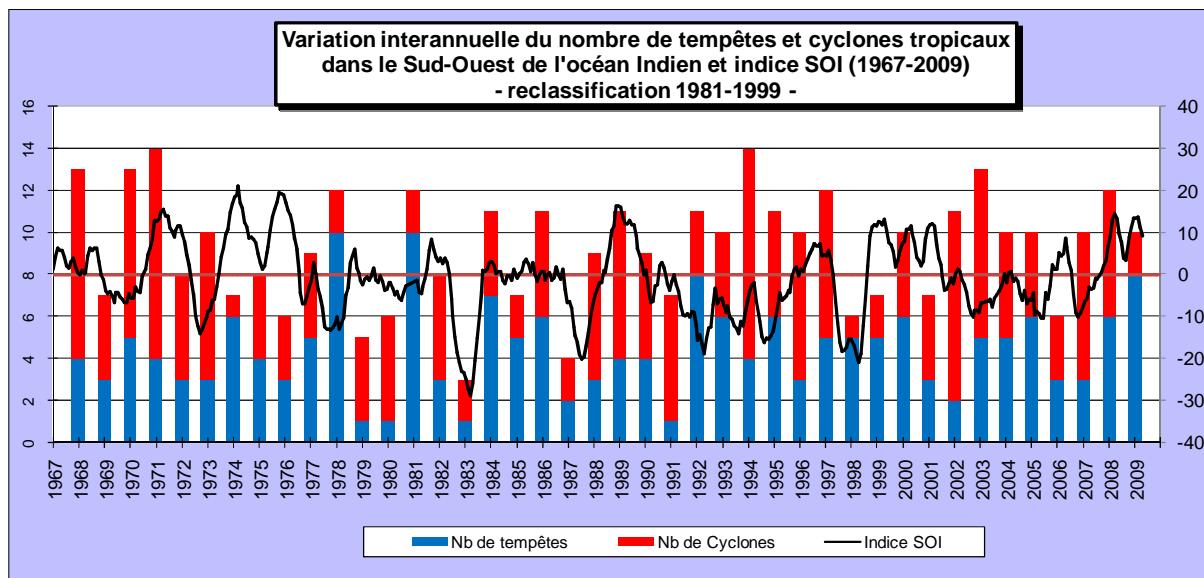
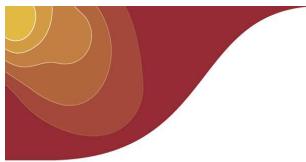


Figure 28 : Nombre de systèmes tropicaux (données corrigées) par saisons cycloniques de 1967 à 2009 et indice SOI

⁸ Pour la saison cyclonique 1997-1998, on constate que c'est encore plus net si l'on utilise l'indice A.C.E qui est très faible pour cette saison. En réalité, c'est d'ailleurs le plus faible sur toute la période disponible 1983-2009



Une étude très récente du service météorologique australien (Kuleshov, Chane Ming, Qi, Chouaibou, Hoareau, & Roux, 2009), montre qu'il y a une relation beaucoup plus évidente entre le positionnement des zones préférentielles de cyclogenèse sur le bassin et l'oscillation ENSO. La distribution géographique de certains paramètres contribuant de manière importante à la formation des cyclones tropicaux est en effet plus ou moins étroitement liée aux phénomènes El Niño - La Niña. On peut citer pour mémoire, la température de surface de la mer, l'humidité relative dans les couches moyennes de l'atmosphère, le cisaillement vertical des vents ou encore le tourbillon⁹.

La carte de la Figure 29 ci-dessous, aimablement fournie par le B.O.M australien (Bureau Of Meteorology), montre la répartition géographique des zones de cyclogenèses en situation neutre, en phase El Niño et enfin en phase La Niña, sur la période 1969-2006. On constate que lors d'un épisode El Niño, le maximum de cyclogenèses se situe vers l'ouest centré sur 15°S et 65°E, tandis qu'en phase La Niña, ce maximum est placé dans l'est, à l'extérieur du bassin, vers 15°S et 95°E. Il n'est pour autant pas facile d'en déduire de conséquences claires quant au risque encouru par les terres émergées de notre bassin lors d'un épisode El Niño (cyclogenèses plus proches, mais activité moindre lors d'un fort El Niño). Ce risque n'est d'ailleurs pas exclusivement lié à la proximité des cyclogenèses mais dépend aussi fortement de la trajectoire des cyclones, qui peut être très erratique sur notre bassin. L'exemple le plus frappant est celui de HYACINTHE qui s'est approché trois fois de La Réunion après avoir fait de nombreuses boucles.

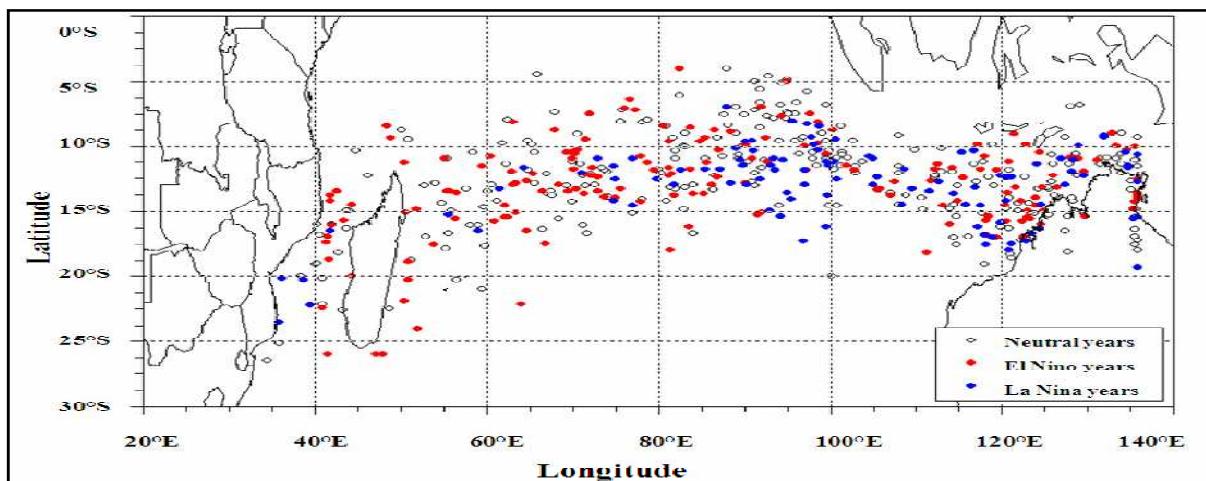
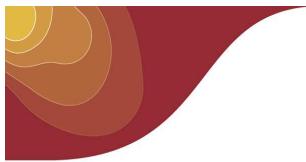


Figure 29 : Répartition géographique des cyclogenèses sur le bassin Sud-Ouest de l'océan Indien et indice SOI sur la période 1969-2006
(Bureau Of Meteorology australien - 2009)

2.2.4.6 Résolution des problèmes d'homogénéisation

Il a été répété à maintes reprises dans ce sous-chapitre traitant de l'activité cyclonique qu'il était très difficile d'identifier des tendances fiables sur les différents paramètres étudiés, du fait que la base de données dont dispose actuellement le CMRS de La Réunion n'est pas homogène, loin s'en faut. C'est bien dommage car si l'on veut progresser dans le domaine de la compréhension des liens qui peuvent exister entre le changement climatique en cours et l'activité cyclonique sur notre bassin, il faut pouvoir travailler à partir de données

⁹ Une façon simple de visualiser le paramètre tourbillon est de considérer un fluide en mouvement dans lequel on délimite un petit volume rigide. Si cette parcelle tourne par rapport à un référentiel au lieu de translater, elle tourbillonne.



d'intensité homogènes utilisables en termes de statistiques. L'homogénéisation de ces données apparaît donc comme un axe de recherche essentiel en la matière.

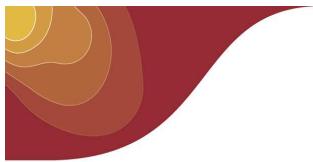
On peut citer sur ce sujet les travaux réalisés par une équipe de chercheurs américains (Kossin, Knapp, Vimont, Murnane, & Harper, 2007) sur l'ensemble des bassins cycloniques de la planète. Ces chercheurs ont mis au point une technique de ré-analyse automatique de l'intensité des systèmes tropicaux à partir d'images infrarouge de satellites géostationnaires. La technique a été appliquée sur tous les bassins et sur la période 1983-2005. L'algorithme utilisé a été fabriqué en croisant les données satellitaires avec celles observées à partir des avions de reconnaissance dans les cyclones de l'Atlantique Nord. Les résultats de ces travaux montrent qu'il y a une bonne cohérence entre les données historiques estimées par le NHC (National Hurricane Center) et les données ainsi ré-analysées sur les bassins Atlantique Nord et Pacifique Est. Ce qui est logique compte tenu de ce qui a été dit plus haut. Par contre, sur les 4 autres bassins, dont celui qui nous intéresse ici, on note un biais important dans le sens d'une surestimation relative des données estimées par le JTWC (Joint Typhoon Warning Center) depuis 1988. Le JTWC utilise des méthodes d'estimation différentes de celles du NHC. Au final, les Américains démontrent que la tendance générale à la hausse constatée sur l'intensité des systèmes (excepté le Pacifique Est) ne peut être validée que sur l'Atlantique Nord. Une ré-analyse réalisée récemment par Harper et Callaghan sur le Sud de l'océan Indien montre également qu'il y a une surestimation des tendances à la hausse observées sur les données estimées.

On comprend alors aisément que de tels biais constatés par divers travaux de recherche peuvent inciter à la plus grande prudence quant aux calculs de tendance sur l'intensité des systèmes dans notre bassin. Pour remédier partiellement à cela, le CMRS de La Réunion a lancé la mise en œuvre d'un projet de ré-analyse de la base historique de données cyclone à partir de la base d'images HURSAT du NCDC (National Climatic Data Center) de la NOAA (National Oceanic and Atmospheric Administration). La méthodologie consistera à faire ré-analyser les images disponibles avec la méthode Dvorak par des spécialistes du CMRS. Ces ré-analyses seront effectuées à partir de 1998 (début de l'ère satellitaire géostationnaire pour notre bassin) et progresseront en reculant dans le temps. Une collaboration est attendue sur ce projet de la part du B.O.M australien qui est bien entendu intéressé par une ré-analyse des systèmes concernant le Sud-Est de l'océan Indien. Les travaux, qui devraient prendre quelques années, permettront d'améliorer sensiblement la qualité de la base de données.

De 1967 à 2009, 9,3 systèmes tropicaux se sont formés, en moyenne par an, sur le bassin du Sud-Ouest de l'océan Indien et 4,8 ont atteint le stade de cyclone tropical avec une forte variabilité interannuelle. La base de données disponible actuellement n'est pas suffisamment homogène pour dégager des tendances indiscutables sur l'échantillon étudié. La communauté scientifique s'intéresse particulièrement à ce problème et de nombreux travaux de recherche portent sur ce sujet. Sur le bassin du Sud-Ouest de l'océan Indien, des travaux vont débuter pour améliorer la qualité des données.

Il n'y a pas de relation directe entre l'activité cyclonique globale du bassin et le risque cyclonique encouru pour La Réunion. Une saison de faible activité peut engendrer un cyclone destructeur pour l'île, tandis qu'une saison très active peut ne voir aucun système intéresser La Réunion.

L'importante variabilité interannuelle ne peut pas être expliquée de manière simple, mais par contre, il est clairement établi que l'oscillation ENSO joue un rôle dans le déplacement des zones préférentielles de cyclogenèses sur le bassin. Ces zones sont situées plus à l'Ouest lors d'épisodes El Niño.



2.2.5 Activité orageuse

2.2.5.1 Définition et détection des orages

Un orage est un phénomène atmosphérique caractérisé par une série d'éclairs et de coups de tonnerre. Un éclair peut se déclencher à l'intérieur du nuage, entre deux nuages, ou entre le nuage et le sol (c'est le coup de foudre).

L'orage est toujours lié à la présence d'un nuage de type cumulonimbus, dit aussi nuage d'orage. Il est souvent accompagné par un ensemble de phénomènes violents : rafales de vent, précipitations intenses parfois de grêle et quelquefois vents rabattants, ou bien trombes ou tornades.

L'Organisation Mondiale de la Météorologie (OMM) définit précisément l'orage comme un météore caractérisé par deux bruits de tonnerre consécutifs et audibles de la surface terrestre. Les orages sont donc détectés à partir du son du tonnerre par l'intermédiaire d'une observation humaine. Pour pallier l'absence d'observateur, des réseaux de capteurs de foudre sont capables de localiser les impacts nuages/sol lors des épisodes orageux. A partir de ces données on peut alors envisager une étude de l'activité orageuse sur des domaines géographiques entiers et non plus sur des sites ponctuels. En France métropolitaine, le réseau de détection de la foudre est composé de 18 capteurs. Il est géré par Météorage, une filiale de Météo-France. En l'absence d'un tel équipement sur l'île de La Réunion, l'étude de l'activité orageuse, de ce document, se limitera à celle de la station de Gillot, située sur l'aéroport et seule station qui a conservé une observation humaine 24h/24.

L'étude porte sur la période 1969-2008 pour être cohérente avec les analyses réalisées sur les températures et les précipitations.

2.2.5.2 Etude annuelle du nombre d'orages à Gillot

Le graphique de la Figure 30 montre l'évolution du nombre d'orages à Gillot, année par année, de 1969 à 2008. La moyenne sur notre période d'étude s'élève à 12,8 jours d'orages par an. La tendance calculée sur la période 1969-2008 indique un nombre annuel en baisse de 2 jours. Par ailleurs, on semble observer des cycles avec des années très prolifiques en jours d'orages qui alternent avec des années beaucoup plus pauvres. Ainsi la moyenne de la décennie 1990-1999 est basse avec seulement 9 jours par an, contrairement à celles de la décennie 1970-1979 et de la période 2000-2008 qui s'élèvent toutes les deux à 15 jours d'orages par an.

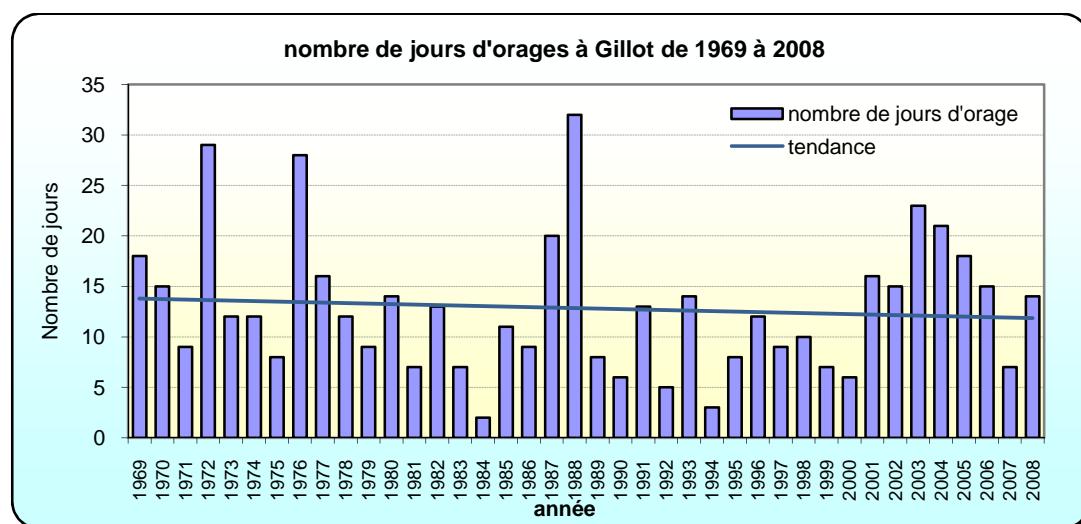
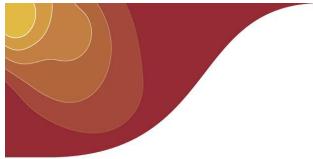


Figure 30 : Nombre annuel de jours d'orage à Gillot sur la période 1969-2008



2.2.5.3 Etude saisonnière du nombre de jours d'orage

Les orages se développent dans une atmosphère « instable ». Plusieurs conditions sont nécessaires pour que les orages se forment. L'une d'entre-elles est la présence dans les basses couches de l'atmosphère d'une masse d'air chaude et humide. Cette condition se rencontre le plus souvent pendant l'été (DJF : décembre-janvier-février) puis pendant l'automne austral (MAM : mars-avril-mai). Le graphique de la Figure 31 montre, effectivement, des occurrences élevées d'orages pendant ces 2 saisons et plus particulièrement au cœur de la saison chaude pendant les mois de décembre-janvier-février. La moyenne annuelle du nombre d'orages pour les saisons d'été et d'automne s'élève respectivement à 7,5 et 4,3 jours. Pendant l'hiver austral et le printemps, les basses couches de l'atmosphère sont plus fraîches et surtout la pression atmosphérique est plus élevée, ce qui ne favorise pas le développement des nuages d'orages : les cumulonimbus. Exceptionnellement, on observe un orage pendant la saison fraîche mais la moyenne annuelle du nombre d'orages pour ces 2 saisons est inférieure à 1.

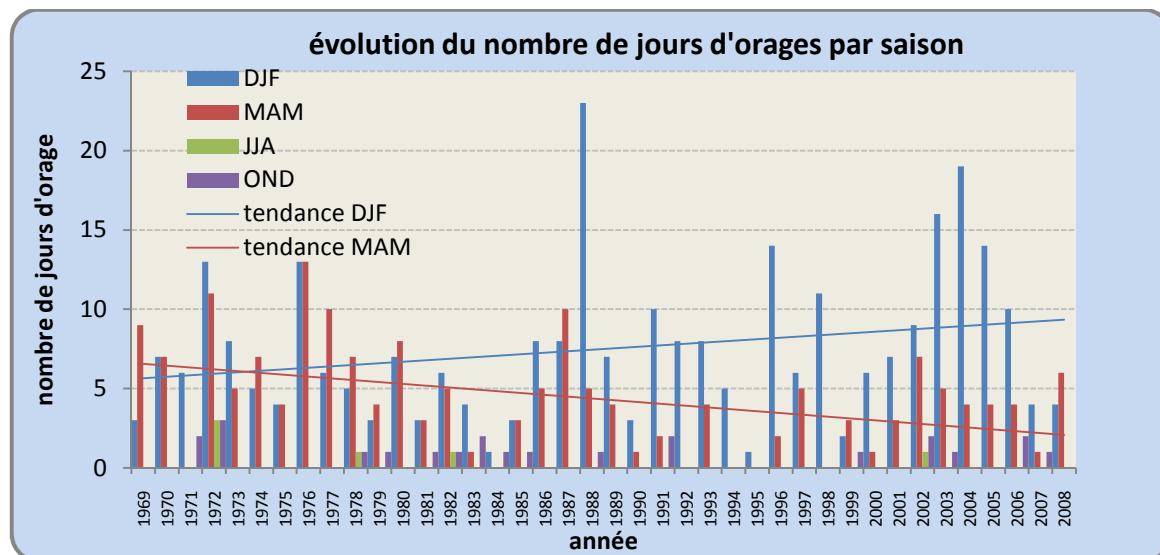
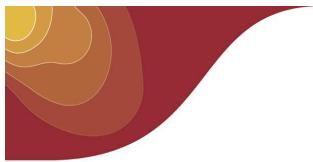


Figure 31 : Nombre annuel de jours d'orage à Gillot par saison

Si la tendance du nombre annuel d'orages est en légère baisse (Figure 30), l'évolution du nombre saisonnier de jours d'orage (Figure 31) présente des évolutions différentes pour les 2 principales saisons orageuses. Ainsi les mois de décembre-janvier-février ont connu une augmentation de 3,7 jours, alors que pendant les mois de mars-avril-mai les jours d'orages ont diminué de 4,5 jours sur la période 1969-2008. La période propice à la formation d'orage semble donc se réduire tout en devenant plus active.

La station de Gillot a connu, de 1969 à 2008, 12,8 jours d'orage en moyenne par an répartis essentiellement sur la saison chaude (de décembre à mai). Sur cette même période, le nombre de jours d'orage par an a baissé de 2 jours. Mais le nombre de jours d'orage a augmenté en début de saison chaude (décembre-janvier-février) : +3,7 jours, alors qu'il a baissé en fin de saison (mars-avril-mai) : -4,5 jours.



2.2.6 Houles australes et cycloniques

2.2.6.1 Rappels sur la houle

L'état de la mer résulte de la superposition de multiples types de vagues qui se propagent selon leurs propriétés individuelles. Les vagues se forment sous l'action continue du vent. Elles deviennent d'autant plus hautes et puissantes que le vent est fort et qu'il souffle longtemps sur ces vagues. On appelle cette réponse locale et à court terme de l'océan : la mer du vent. Une fois formées, ces vagues se propagent parfois dans une direction différente de celle de la tempête et s'échappent ainsi de la zone de vent fort. Ces vagues deviennent alors de la houle. La houle est donc une partie de l'état de la mer qui se caractérise par son absence de relation avec le vent local. Une fois générées dans les tempêtes, les houles de grande période peuvent se propager sur plusieurs milliers de kilomètres.

La houle se caractérise essentiellement par 2 grandeurs :

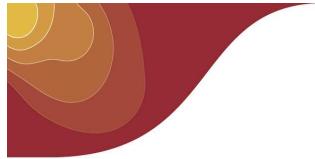
- une hauteur H : c'est la distance verticale entre un creux et une crête successifs. Toutes les vagues qui composent la houle n'ont pas tout à fait des hauteurs identiques. Pour décrire la hauteur de la houle, on utilise une grandeur qui définit la hauteur significative des vagues. C'est le $H_{(1/3)}$: moyenne du 1/3 des vagues les plus hautes. Le $H_{(1/3)}$ correspond à la hauteur de la houle appréciée visuellement par les marins. Notons que dans certains cas la hauteur maximale des vagues (H_{\max}) peut atteindre 2 fois la hauteur significative ($H_{(1/3)}$). Dans les bulletins de prévision, la terminologie, définie par l'OMM, est la suivante : on parle de petite houle quand le $H_{(1/3)}$ est inférieur à 2 mètres, de houle modérée quand le $H_{(1/3)}$ est compris entre 2 et 4 m et de grande houle quand le $H_{(1/3)}$ est supérieur à 4 m.
- une période T : c'est l'intervalle de temps s'écoulant entre le passage de 2 creux ou 2 crêtes successifs au même point d'observation. Les houles les plus longues, de période supérieure à 15 secondes, sont générées par les plus fortes tempêtes. Plus la période de la houle est élevée, plus la houle est puissante et par conséquent, plus elle est potentiellement dangereuse pour les sites côtiers exposés.

2.2.6.2 Les types de houle sur le rivage réunionnais

Le rivage de l'Île de La Réunion est sous l'influence de 3 grands types de houles :

- Les houles d'alizés : engendrées par les alizés, elles abordent l'île par les flancs du volcan sur la façade Est et Sud-Est. Leur période est comprise entre 5 et 10 secondes et leur hauteur dépasse rarement 2 mètres.
- Les houles australes : ce sont généralement des houles de grande longueur d'onde abordant La Réunion par le quart Sud-Ouest et affectant principalement les côtes Sud et Ouest de l'île, de la Pointe de la Table à la Pointe des Galets. Elles sont créées par les dépressions polaires qui circulent le long des latitudes 40° et 50° Sud ou bien les dépressions qui se creusent au Sud de Madagascar et qui évoluent entre 25° et 35° Sud. Ces houles australes se caractérisent par une période qui varie de 12 à 15 secondes mais peut atteindre 16 à 20 secondes. Les hauteurs significatives sont en moyenne de 2 à 4 m mais elles peuvent parfois atteindre 6 m. Les houles australes intéressent La Réunion environ 17 fois par an (Morville, 1989) dont la moitié des événements se produit pendant les mois de juin à septembre.

L'épisode de houle exceptionnel du 12 au 14 mai 2007 était un épisode de houle austral. Les valeurs maximales enregistrées ont atteint 6,4 m pour la hauteur significative des vagues, 11,3 m pour la hauteur maximale et 17,7 secondes pour la période significative maximale.



- Les houles cycloniques : ce sont des houles relativement peu fréquentes mais elles peuvent être très importantes (largement plus de 10 mètres au large). Leur fréquence et leur force sont aléatoires. En moyenne 4 houles cycloniques sont ressenties par an. La période peut atteindre 12 secondes ou plus. La direction est également aléatoire et évolue avec la marche du cyclone mais le plus souvent, c'est la moitié Nord de l'île qui est le plus sévèrement touchée.

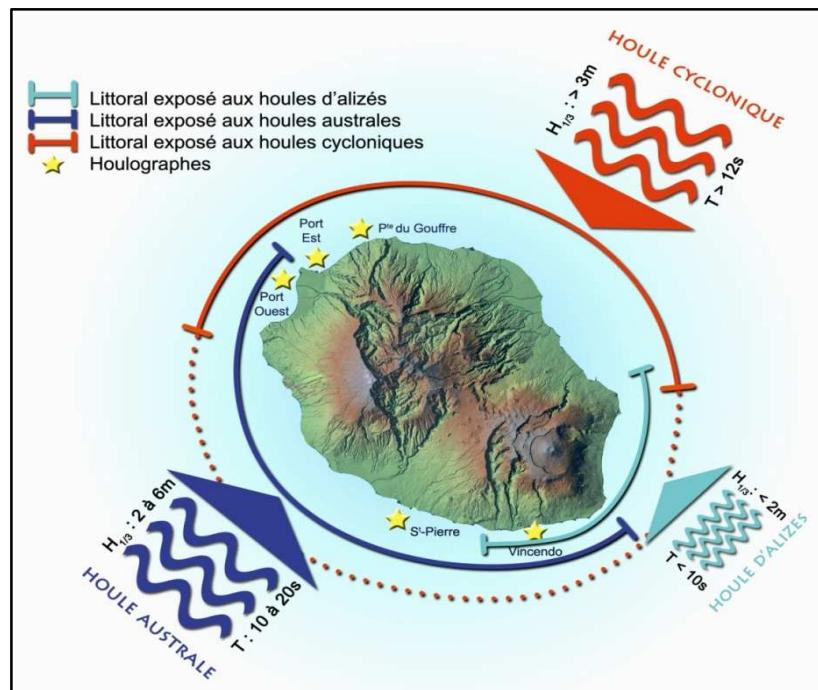


Figure 32 : rivages les plus exposés de La Réunion selon le type de houle

2.2.6.3 Houlographes et satellites altimétriques

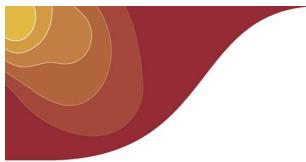
Les houlographes sont des appareils enregistreurs, flottants ou posés sur le fond, qui mesurent et enregistrent les mouvements de la surface de la mer. La hauteur significative et maximale, la période de la mer totale sont mesurées, *in situ*, par ces instruments.

A La Réunion, 5 houlographes mesurent l'état de la mer (Figure 32). Ils sont gérés et maintenus par le service des phares et balises de la Direction Départementale de l'Équipement (DDE). Ils sont situés :

- A la Pointe du Gouffre, à proximité de Saint-Denis
- Devant le Port-Est, proche de La Possession
- Devant le Port-Ouest, à proximité du Port
- Au large de Saint-Pierre
- Au large de Vincendo, entre Saint-Joseph et Saint-Philippe

Bien que nommés houlographes, ces instruments mesurent plus exactement l'état de la mer complet. Ils ne peuvent pas distinguer la mer du vent de la houle. En pratique, il est possible de discriminer le type de vagues mesuré par le houlographe. En effet, la période de la mer du vent est bien plus faible que celle de la houle. Par conséquent, quand les périodes mesurées sont grandes, la houle est prédominante et à l'inverse, quand elles sont petites, la mer du vent l'emporte et la houle est petite ou absente.

Le 1^{er} houlographe a été ancré en juillet 1986 à proximité de l'entrée du Port Ouest. Depuis cette date, d'autres instruments ont été installés. Ils ont connu des fortunes diverses : disparition après le passage d'un cyclone,



exploitation abandonnée suite à des pannes récurrentes Ces mésaventures et une faible profondeur annuelle de données empêchent d'établir des statistiques sur l'évolution de la houle à partir des données de ces instruments.

Des instruments embarqués sur des satellites océanographiques mesurent la hauteur instantanée de la mer avec une précision inférieure à 5 cm. A partir de cette mesure, des traitements permettent d'obtenir la hauteur significative de la mer totale. L'historique des données disponibles selon les satellites est le suivant :

- Topex-Poseidon (CNES¹⁰): de Septembre 1992 à Octobre 2005,
- Ers-1 et Ers-2 (ESA¹¹): depuis Janvier 1992,
- Geosat Follow-On (NOAA¹²): depuis Janvier 2000,
- Jason (CNES): depuis Janvier 2002,
- Envisat (ESA): depuis Avril 2002.

Les satellites océanographiques sont des satellites à orbite très basse. Ils survolent la même région seulement 2 fois en 24h. Ils ne permettent donc pas un suivi quasi-continu de la surface terrestre, comme peuvent le faire les satellites géostationnaires.

Les mesures satellitaires sont encore trop jeunes pour établir des statistiques sur l'évolution de la houle sur les côtes réunionnaises à partir de ces données.

2.2.6.4 Etude des houles australes

Les modèles numériques de prévision du temps simulent de façon très réaliste l'état de la mer. Ils sont capables, en outre, de discerner la mer du vent et la houle. Il y a quelques années, le centre européen pour les prévisions météorologiques à moyen terme (CEPMMT) a entrepris de ré-analyser l'ensemble des situations météorologiques quotidiennes à l'aide de toutes les observations disponibles sur la période 1958-2001 (ERA-40). Les produits obtenus se prêtent à des études climatologiques de fond du fait de la couverture, qui est planétaire, et de la longueur des séries temporelles (45 ans). Plus récemment, un jeu de ré-analyse a été réalisé sur la période 1989-2008 (ERA-Intérim). Le modèle du CEPMMT, qui a été utilisé pour ces ré-analyses, intègre un modèle de vagues pour simuler l'état des océans. L'état de la mer, de la mer du vent et de la houle sont ainsi des paramètres qui sont ré-analysés.

La résolution des ré-analyses n'est pas assez fine pour reproduire de façon réaliste la plupart des cyclones. La houle générée par ces météores est donc mal simulée. En revanche, les grandes tempêtes des latitudes élevées, génératrices des houles australes, sont parfaitement reproduites. En conséquence, les données des ré-analyses ERA-40 et ERA-Intérim ne peuvent être utilisées que pour l'étude de la houle austral.

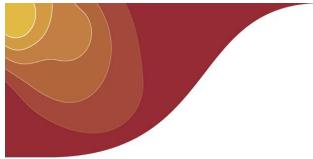
Les données de vague fournies par ERA-40 ne sont malheureusement pas parfaitement homogènes. L'assimilation des données altimétriques commence en 1992 et s'améliore dans les années suivantes. Les données issues d'ERA-Intérim semblent à priori meilleures et plus homogènes, mais la période disponible est beaucoup plus courte. Nous avons donc décidé de travailler sur deux périodes disjointes ; 1958-1991 en utilisant ERA-40 et 1992-2008 avec ERA-Intérim.

La difficulté réside ensuite dans la détection des épisodes de houle australe à partir des jeux de données du modèle pour La Réunion. Pour définir au mieux des critères permettant de réaliser cette détection, nous nous sommes appuyés sur une étude réalisée à partir de données d'observation de la station du Port sur la période 1978-1987 (Morville, 1989). Dans cette étude, les critères retenus étaient une hauteur significative dépassant les

¹⁰ Centre National d'Etudes Spatiales - France

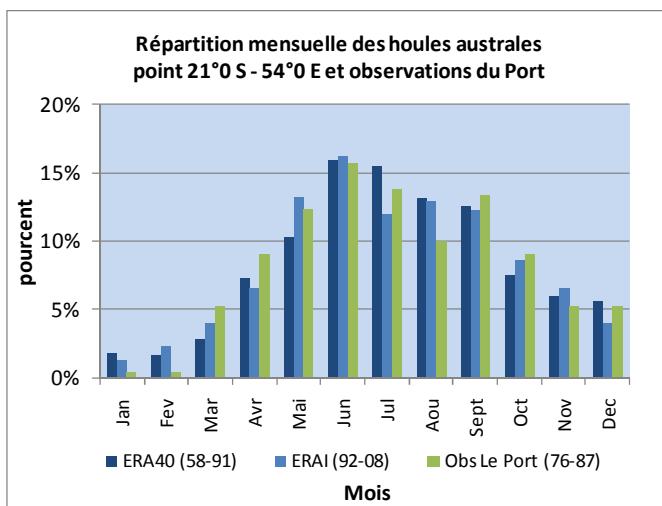
¹¹ European Space Agency - Europe

¹² National Oceanographic and Atmospheric Agency – United States of America



1,5 mètres et une provenance située entre 200 et 260 degrés (sud-sud-ouest à ouest). Les cas de houle cyclonique sont exclus de l'échantillon ainsi constitué. Une analyse comparative très fine sur la même période entre les données modèle ERA-40 et les données observées, nous a amené à choisir le point situé par 21°S et 54°E avec comme critères discriminants une hauteur significative de 2 mètres (houle plus forte au large), une période ayant dépassé 10 secondes à un moment quelconque de l'épisode et une provenance située entre 180 et 260°. Les données ERA-40 étant disponibles toutes les six heures, un épisode est défini à partir du moment où les critères sont dépassés pendant au moins deux analyses successives. La répartition saisonnière présentée dans le graphique de la Figure 33 pour les différents jeux de données montre que les critères choisis semblent adaptés. Pour ERA-Intérim, nous avons repris les mêmes critères, exceptés pour la hauteur significative qui a été relevée à 2,5 mètres, sachant que le modèle actuel a tendance à surestimer ces hauteurs.

Figure 33 : Répartition saisonnière des houles australes vue par les observations du Port (1978-1987), les ré-analyses ERA-40 (1958-1991, point 21°S-54°E) et les ré-analyses ERA-Intérim (1992-2008, point 21°S-54°E)



Nous nous sommes ainsi intéressés à quelques statistiques sur les deux échantillons séparés. Le graphique ci-dessous (Figure 34) montre qu'il y a une importante variabilité inter annuelle du nombre d'épisodes avec une moyenne qui s'élève à environ 15 jours par an (1958-1991). A noter que sur la période 1976-87, la moyenne se monte à 16 jours par an, soit une valeur très proche des 17 jours observés au Port sur la même période. Sur les 34 ans de l'échantillon, on observe une légère tendance à la hausse (+2 épisodes).

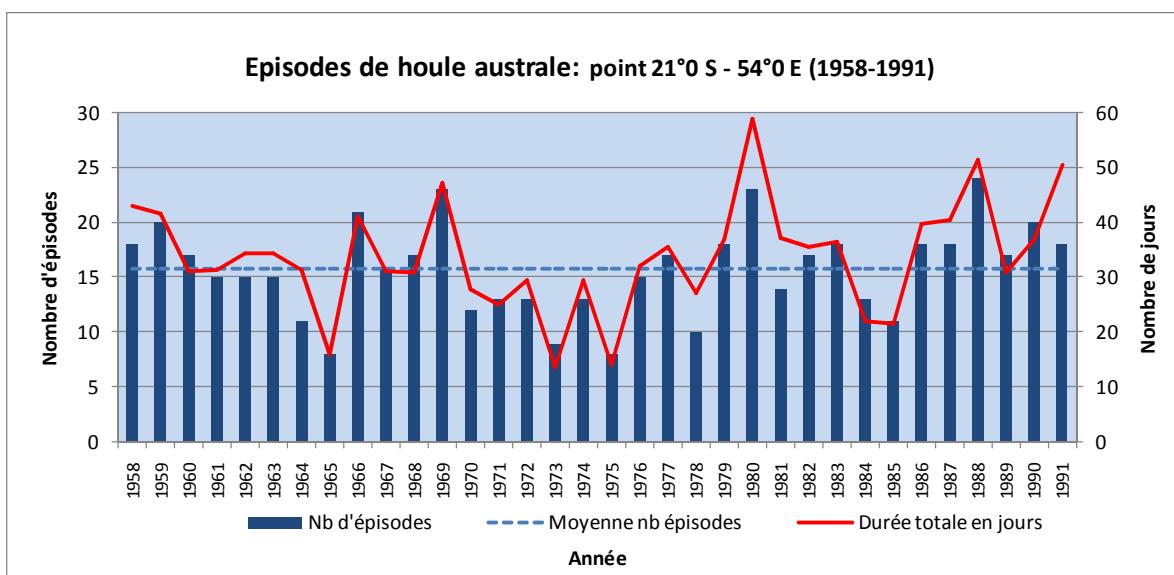
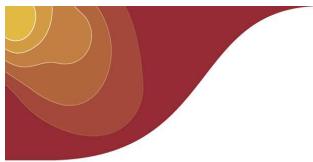


Figure 34 : Evolution annuelle du nombre d'épisodes de houle austral et du nombre de jours associé de 1958 à 1991. Statistiques calculées à partir des données toutes les six heures issues des ré-analyses ERA-40 sur le point 21°S et 54°E



Le graphique suivant (Figure 35) présente les mêmes statistiques pour la période plus récente de 1992 à 2008 calculées à partir du jeu de données des ré-analyses d'ERA-Intérim. Même s'il est délicat de comparer les statistiques des deux jeux de données (seuil de hauteur différencié un peu arbitrairement), on observe une moyenne voisine de 18 jours par an, mais surtout une nette tendance à la hausse de 4 jours sur 17 ans. Il semblerait donc que la tendance à la hausse déjà observée de 1958 à 1991 se poursuive en s'accentuant.

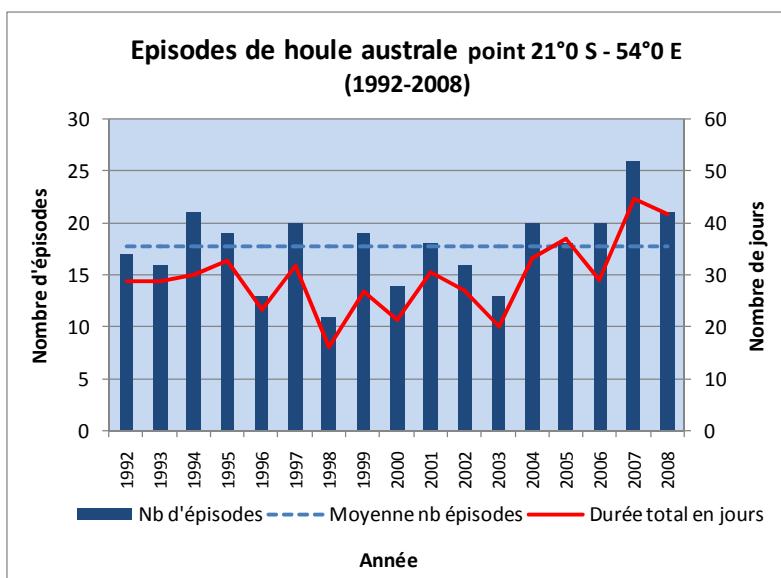


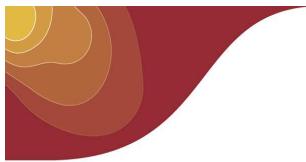
Figure 35 : Evolution annuelle du nombre d'épisodes de houle australe et du nombre de jours associé de 1992 à 2008. Statistiques calculées à partir des données toutes les six heures issues des ré-analyses ERA-Intérim sur le point 21°S et 54°E

Sur les graphiques apparaît également le nombre de jours annuel où l'on détecte de la houle australe. Nous nous sommes interdit d'interpréter ces données compte tenu de l'incertitude engendrée par l'effet de seuil défini sur la hauteur (qui est moins sensible sur le nombre d'épisodes).

Concernant la possibilité d'évaluer une quelconque tendance sur l'« intensité » des houles australes, une étude réalisée pour le projet de la future route du littoral (EGIS Eau, 2008) montre que les données issues des ré-analyses ERA-40 présentent des valeurs inférieures à celles issues des observations des navires qui elles mêmes peuvent être sujettes à caution. Il est connu que les modèles éprouvent une grande difficulté à simuler les phénomènes extrêmes et il semble donc illusoire d'utiliser les ré-analyses pour étudier ces phénomènes. On peut simplement signaler que dans nos deux échantillons, on ne remarque pas d'évolution en ce qui concerne les hauteurs significatives maximales annuelles simulées.

2.2.6.5 Etude des houles cycloniques

La génération des houles cycloniques dépend bien évidemment étroitement de l'activité cyclonique. Hors nous avons vu au paragraphe 2.2.4 toute la difficulté (et le risque) qu'il y a à tenter d'établir des tendances indiscutables dans ce domaine. Par voie de conséquence, il en est donc bien entendu de même pour les houles cycloniques. Il a été dit également dans ce sous-chapitre que les modèles simulaient très mal les cyclones du fait d'une maille insuffisante. Il n'y a donc pas possibilité de réaliser une étude statistique sérieuse sur les épisodes de houle cyclonique ayant touché la Réunion depuis une cinquantaine d'années.



On peut citer pour mémoire une étude réalisée pour le compte de la Région avec le concours de Météo-France pour la future route du littoral (EGIS Eau - DHI, 2007) visant à évaluer le risque lié à la houle (et à la surcote¹³) cyclonique sur le littoral entre Saint-Denis et Le Port. Cette étude sort un peu du cadre de ce rapport, mais on peut tout de même signaler qu'elle utilise deux approches différentes d'évaluation dont la plus intéressante (simulation du cas le plus défavorable possible pour la zone étudiée) fournit des valeurs maximales de hauteur significative proche de 14 mètres et de surcote voisine de 1 mètre. D'autre part, la Région a également sollicité le BRGM¹⁴ pour réaliser une étude de risque lié à la houle cyclonique sur les quatre façades maritimes de La Réunion. Les résultats de cette étude devraient être disponibles d'ici la fin 2009.

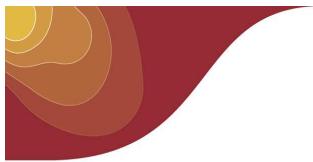
Une étude statistique a été réalisée à partir de données simulées de hauteur de houle basées sur une ré-analyse du modèle numérique développé au Centre Européen pour les Prévisions Météorologiques à Moyen Terme.

Selon cette étude, il semblerait que la fréquence des épisodes de houle australe ait tendance à légèrement augmenter depuis 50 ans avec une accélération de cette augmentation dans les 20 dernières années. Toutefois, et bien que le modèle numérique soit très performant, l'usage de données de hauteur de houle simulées, et non pas directement observées, limitent la confiance que nous pouvons apporter à ces résultats.

Ces ré-analyses simulant mal les cyclones, il n'est pas possible de réaliser une telle étude sur les houles cycloniques dont la fréquence et l'intensité sont en tout premier lieu très dépendantes de l'activité cyclonique sur le bassin.

¹³ La surcote cyclonique est une élévation anormale du niveau de la mer. Elle est provoquée conjointement par la forte baisse des pressions au centre du cyclone et par l'intensité des vents à la périphérie de l'œil, qui repoussent l'eau à l'avant du cyclone. L'élévation du niveau de la mer dépend fortement de la configuration du littoral, de la topographie des fonds marins et du déplacement relatif du cyclone par rapport à la côte.

¹⁴ Bureau de Recherches Géologiques et Minières



3 Prévision globale de l'évolution du climat

3.1 La modélisation climatique

3.1.1 Généralités

3.1.1.1 Les modèles climatiques

Les modèles climatiques sont l'outil de préférence utilisé par les chercheurs pour comprendre et attribuer les variations climatiques du passé, et pour faire des projections sur l'avenir. Ces modèles présentent de nombreuses similitudes avec les modèles de prévision météorologique. Ils reposent sur des formulations et des méthodes de calcul proches, et partagent un certain nombre d'outils logiciels. Néanmoins, la première préoccupation des modèles de prévision est de « coller » au plus près avec l'état réel de l'atmosphère, à un instant donné alors que le modèle climatique évolue totalement librement sans être rappelé vers les observations. Il reçoit de l'énergie sous forme de rayonnement solaire et en perd sous forme de rayonnement infrarouge. Le climat simulé (vent, température...) est le résultat de cet ajustement entre énergie reçue et énergie perdue. On comprend alors qu'une erreur sur les flux de chaleur à la surface des continents ou des océans se traduit directement par un écart entre la température de surface simulée et celle observée.

La modification de la concentration des gaz à effet de serre dans l'atmosphère, introduit des modifications de l'équilibre radiatif. Il faut donc calculer précisément l'effet d'une perturbation particulière (tel un changement de la concentration d'un gaz) sur le bilan énergétique de la surface en supposant que les autres caractéristiques de l'atmosphère et de la surface restent fixes. Cette grandeur s'appelle le forçage radiatif¹⁵ de la perturbation. Le modèle climatique détermine les effets des forçages radiatifs sur la température de la Terre.

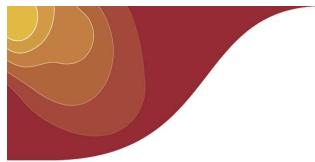
Des difficultés supplémentaires apparaissent alors. Dans la réalité, dès que l'on change le bilan d'énergie de la surface, toutes les variables climatiques (vent, humidité, nuages, pluies,...) sont modifiées. Or ces variables influencent fortement les processus de rayonnement et induisent des rétroactions. Ces rétroactions sont dites positives lorsqu'elles ont pour effet d'amplifier les perturbations initiales et dites négatives dans le cas contraire. Des études ont montré l'importance cruciale de ces mécanismes de rétroactions sur l'amplitude du réchauffement climatique.

Les océans jouent aussi un rôle important dans l'équilibre énergétique. Pour résoudre les différentes composantes du système climatique, les modèles prennent en compte, non seulement la réponse de l'atmosphère, mais aussi celle des océans, des surfaces continentales, de la banquise... La contrepartie de ce gain de cohérence est de rendre les modèles climatiques de plus en plus complexes.

Les modèles climatiques progressent sans cesse. Aujourd'hui plus de vingt modèles issus de différents centres sont disponibles pour effectuer des simulations climatiques. Bien que les dynamiques à grande échelle de ces modèles soient très complètes, le paramétrage est encore utilisé pour y faire figurer des processus physiques non résolus, tels que la formation des nuages et des précipitations, le mélange des eaux océaniques par les ondes et la formation de masses d'eau. L'incertitude du paramétrage est la principale raison pour laquelle les projections climatiques diffèrent suivant le modèle utilisé.

Les progrès réalisés dans la formulation des modèles ont mené à une amélioration de la simulation de nombreux aspects du climat moyen actuel. Les simulations des précipitations, de la pression au niveau de la mer et de la température de surface se sont toutes améliorées en règle générale, mais des lacunes subsistent, notamment en ce qui concerne les précipitations tropicales. Alors que des lacunes significatives demeurent dans la simulation des nuages (et dans la rétroaction correspondante qui impacte la réactivité du climat), certains modèles ont montré des améliorations dans la simulation de certains régimes de nébulosité. La simulation des

¹⁵ Voir paragraphe 1.2



événements extrêmes (en particulier les températures extrêmes) s'est améliorée, mais les modèles simulent généralement trop peu de précipitations pour les événements les plus extrêmes.

3.1.1.2 Les différentes simulations des modèles climatiques

Avant d'entreprendre l'étude du climat futur plusieurs simulations sont réalisées dans le but de comprendre les mécanismes climatiques et de contrôler le modèle numérique.

- Simulation de contrôle : elle permet de vérifier la stabilité et l'équilibre énergétique du modèle. Tous les paramètres de cette simulation sont maintenus constants à leur valeur de l'époque préindustrielle définie comme celle de 1860. La différence entre les résultats d'une simulation perturbée, par exemple par les forçages dus aux activités humaines et de la simulation de contrôle permet d'identifier l'effet de ces forçages sur le climat.
- Simulation de l'évolution récente du climat : elle permet de comparer l'évolution du climat simulé par les modèles à celle observée depuis 1860 jusqu'à nos jours et détermine un état initial pour les simulations de changement climatique futur selon différents scénarios.
- Simulations de l'évolution future du climat
- Simulations de stabilisation : dans ces simulations, les forçages après avoir évolué selon différents scénarios, sont maintenus constants et le climat continue à évoluer du fait de son inertie thermique.

3.1.2 Les différents scénarios

En introduisant dans ces modèles l'évolution de la concentration en gaz à effet de serre en fonction des diverses évolutions économiques possibles, on peut simuler l'évolution possible du climat au cours du prochain siècle. Le Groupe d'Experts Intergouvernemental sur l'Evolution du Climat (GIEC) a élaboré un ensemble de scénarios pour prendre en compte les incertitudes des émissions des gaz à effet de serre futures. Chaque scénario représente une évolution différente aux plans démographique, social, économique, technologique et environnemental. Au total, 40 scénarios ont été élaborés par les modélisateurs. Ces 40 scénarios sont classés selon quatre grandes familles : A1, A2, B1 et B2 (**Figure 36**).

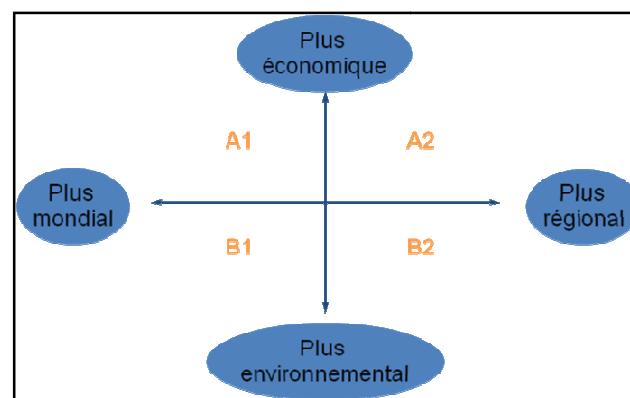
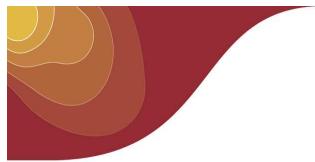


Figure 36 : Les 4 grandes familles des scénarios climatiques et leurs orientations (GIEC, SRES-200)

Les scénarios A1

Le monde connaît une croissance économique rapide avec une réduction des différences régionales, la population mondiale passe par un maximum au milieu du siècle pour décliner ensuite et de nouvelles technologies sont rapidement mises en place. La famille A1 se scinde en trois groupes décrivant des directions possibles de l'évolution technologique dans le système énergétique. A1FI pour une forte consommation d'énergies fossiles, A1T pour une utilisation d'énergie autres que fossiles et A1B qui est une voie intermédiaire entre les deux premiers (plusieurs sources d'énergie).



Les scénarios A2

Le monde reste très hétérogène. La fécondité des différentes régions converge lentement avec pour résultat un accroissement continu de la population mondiale. Le développement économique a une orientation principalement régionale, la croissance économique et l'évolution technologique sont plus fragmentées et plus lentes que pour les autres scénarios.

Les scénarios B1

Le monde converge vers une uniformisation avec une population mondiale culminant au milieu du siècle et déclinant ensuite, comme A1, mais avec des changements rapides des structures économiques vers une économie de service et d'information, l'introduction de technologies propres et l'utilisation des ressources de façon efficiente, mais sans initiative supplémentaire pour gérer le climat.

Les scénarios B2

C'est un monde où l'accent est placé sur des solutions locales dans le sens de la viabilité économique, sociale et environnementale. La population croît de manière continue mais à un rythme plus faible que pour A2. Le développement économique, social et technologique est moins rapide que dans les autres scénarios car très variable entre les régions. Il en est de même pour la protection de l'environnement.

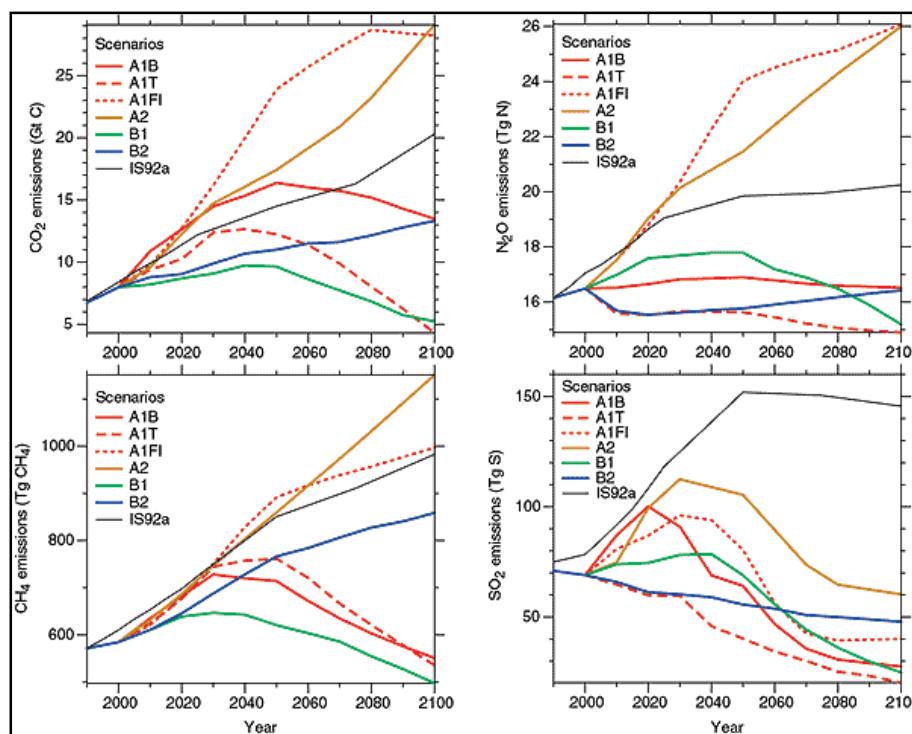
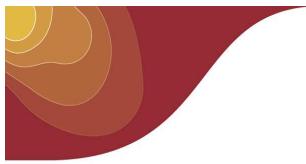


Figure 37 : Evolution des émissions dues aux activités humaines pour les principaux gaz ayant une influence sur le climat, selon les scénarios (IPCC, 2001)

Tout scénario comporte des éléments subjectifs mais aucun jugement n'est exprimé sur telle ou telle préférence et aucune probabilité ne leur est attribuée.

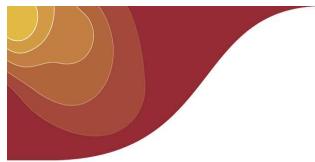


Pour les simulations climatiques trois scénarios ont été privilégiés :

- le scénario A2 où les émissions de CO₂ continuent de croître jusqu'en 2100;
- le scénario A1B où les émissions de CO₂ continuent de croître jusqu'en 2050, puis décroissent;
- le scénario B1 où les émissions de CO₂ sont presque stabilisées dès l'année 2000, puis décroissent à partir de 2050.

Les projections pour le climat futur sont réalisées à l'aide de modèles climatiques. Pour résoudre la complexité du système climatique, dont les composantes interagissent entre elles, ces modèles prennent en compte l'atmosphère, les océans, les surfaces continentales, la banquise... Bien que ces modèles climatiques s'améliorent sans cesse, ils restent encore imparfaits et simulent difficilement certains processus physiques comme par exemple ceux induits par la présence des nuages.

Différents scénarios d'émissions de gaz à effet de serre sont introduits dans les modèles climatiques pour prendre en compte le développement mondial futur. Le GIEC a ainsi établi 40 scénarios. Pour faciliter leur interprétation, seuls 3 scénarios sont en général privilégiés pour réaliser les simulations climatiques. Il s'agit des scénarios A2, A1B, B1.



3.2 Les projections pour le monde et le Sud-Ouest de l'océan Indien

3.2.1 Températures

Les simulations des modèles climatiques indiquent que la température moyenne annuelle du globe continuera à s'élèver au cours des prochaines décennies et le réchauffement atteindra en moyenne 1,8°C à 4,0°C à la fin du siècle, suivant les scénarios d'émission des gaz à effet de serre. Il est à noter que même dans l'éventualité où les concentrations de tous les gaz à effet de serre et des aérosols resteraient constantes par rapport au niveau de l'année 2000, la température s'élèverait d'environ 0,1°C par décennie.

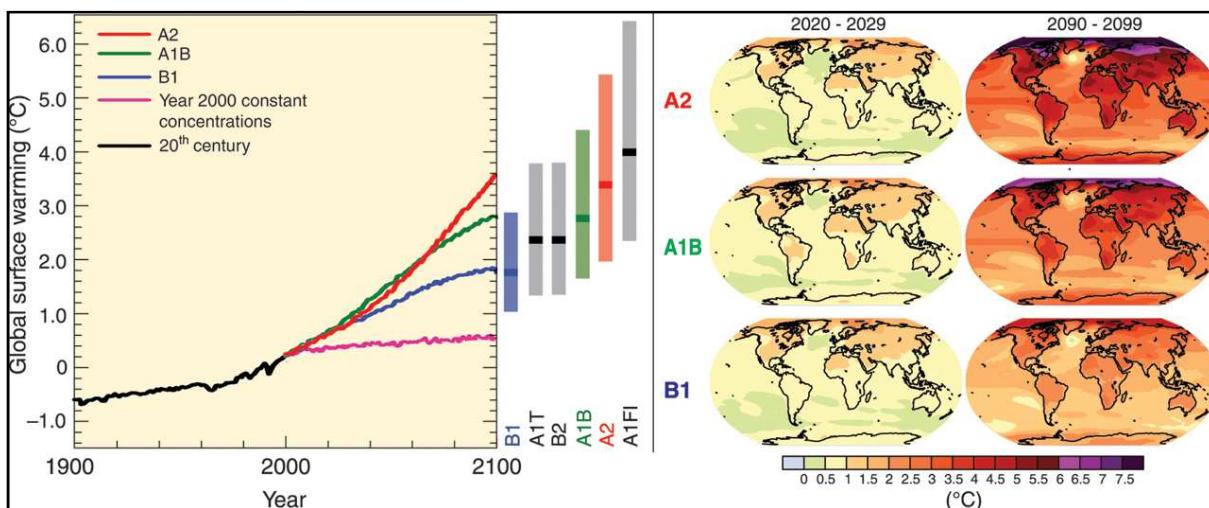


Figure 38 : A gauche : les courbes correspondent aux moyennes mondiales multi-modèles du réchauffement en surface (par rapport à la période 1980-1999) pour les scénarios A2, A1B et B1, dans la continuité des simulations relatives aux 20^{ème} siècle. Les barres au milieu de la figure indiquent les valeurs les plus probables et les fourchettes probables selon 6 scénarios de référence pour la période 2090-2099 par rapport à 1980-1999. **A droite :** Evolution projetée de la température en surface pour le début et la fin du 21^{ème} siècle par rapport à la période 1980-1999 selon les projections moyennes de plusieurs modèles. (IPCC, 2007)

L'évolution de la température ne sera pas identique pour chaque région du globe. Les cartes de la Figure 38 montrent la variation de température prévue sur l'ensemble du globe pour les décennies 2020-2029 et 2090-2099 pour les trois scénarios. On constate qu'aucune région n'échappera à une augmentation de la température mais le réchauffement sera plus important au-dessus des terres et dans les latitudes les plus élevées de l'hémisphère Nord pendant l'hiver, et sera de plus en plus importante au fur et à mesure que l'on passe des zones côtières à l'intérieur des terres. Enfin, dans des zones géographiques similaires, le réchauffement est généralement plus important dans les régions arides que les régions humides.

Par contraste, c'est dans les océans austraux et dans certaines parties de l'Atlantique nord que le réchauffement est le moins important.

Sur l'océan Indien, l'ensemble des simulations numériques indique que les températures moyennes projetées pour la fin du siècle vont augmenter dans une fourchette comprise entre 1,4° et 3,7°C avec une valeur moyenne de 2,1°C. Plus de la moitié des modèles prévoient des valeurs de réchauffement proches de cette valeur moyenne. En outre, tous les modèles indiquent que le réchauffement sera semblable quelle que soit la saison (Figure 39) et que les petites îles isolées de l'océan Indien connaîtront un réchauffement d'une moindre ampleur que les grandes régions continentales.

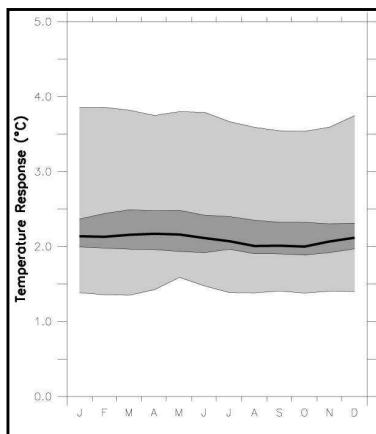
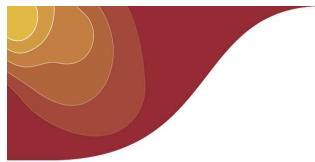


Figure 39 : cycle annuel de la température moyenne sur l'océan Indien pour la période 2080-2099 par rapport à la période 1980-1999 sous le scénario A1B. La zone de gris foncé correspond aux valeurs des quartiles 25 et 75% des 21 modèles. La surface en gris clair délimite les valeurs minimales et maximales des 21 modèles. (IPCC, 2007)

3.2.2 Précipitations

Le dernier rapport du GIEC conclut au sujet des précipitations mondiales qu'une augmentation de la quantité des précipitations est très probable¹⁶ sous les hautes latitudes tandis que des baisses sont probables dans la plupart des terres subtropicales (jusqu'à moins 20% en 2100 dans le scénario A1B). Les cartes de la Figure 40 montrent les variations de précipitations pour les saisons d'hiver et d'été, pour la période 2090-2099, simulées par les modèles numériques forcés par les hypothèses des émissions de gaz à effet de serre du scénario A1B. On observe, dans les hautes latitudes supérieures à 50°, des précipitations moyennes qui augmentent. Cette variation est due à une augmentation de la concentration en vapeur d'eau dans l'atmosphère et à l'augmentation dans le transport de vapeur d'eau en provenance des latitudes plus basses. En direction de l'Équateur, il y a une transition jusqu'à une baisse générale des précipitations dans la zone subtropicale (entre 20° et 40° de latitude). En raison de l'augmentation du transport de vapeur d'eau en dehors de la zone subtropicale et d'une expansion des systèmes de haute pression subtropicaux en direction des pôles, la tendance à un climat plus sec est particulièrement prononcée sur la frange de haute latitude de la zone subtropicale.

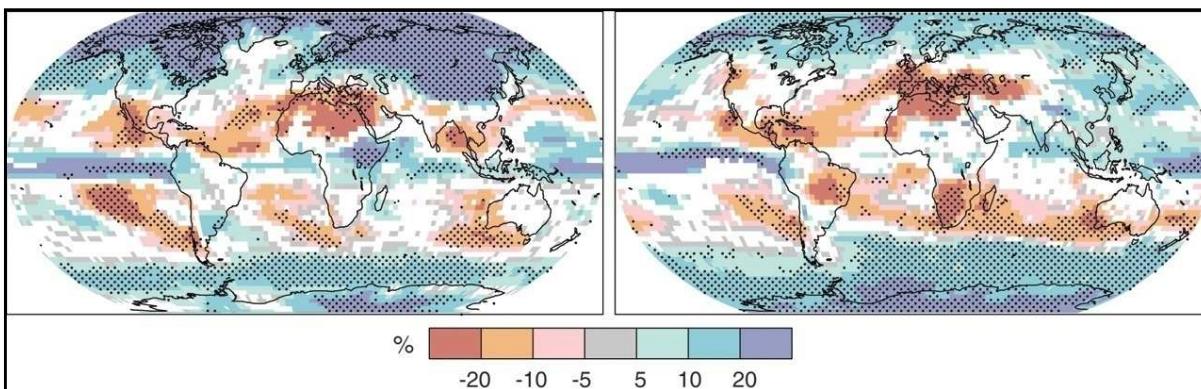
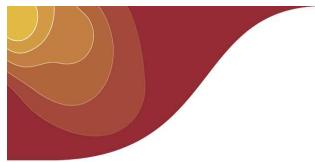


Figure 40 : Variations relatives du régime des précipitations (%) pour la période 2090-2099, par rapport à la période 1980-1999. Les valeurs indiquées sont des moyennes tirées de plusieurs modèles, obtenues à partir du scénario A1B pour des périodes allant de décembre à février (à gauche) et de juin à août (à droite). Les zones en blanc correspondent aux régions où moins de 66% des modèles concordent sur le sens de la variation et les zones en pointillé à celles où plus de 90% des modèles concordent sur celui-ci. (IPCC, 2007)

¹⁶ Les termes « très probable », « probable » ont été précisément définis par la communauté du GIEC pour définir la probabilité d'un résultat lorsque celui-ci peut-être évalué de manière probabiliste. « Très probable » indique une probabilité du résultat supérieure à 90% et « probable » indique une probabilité supérieure 66%



Dans l'océan Indien, les projections de précipitations annuelles prévoient des variations (relatives au climat actuel) de -2 à +20% selon le modèle étudié avec une médiane située à +4%. La moitié des modèles prévoient une légère augmentation des précipitations comprise entre 3 et 5%. Cette augmentation est particulièrement visible dans la partie Nord de l'océan Indien aux environs des Maldives (Figure 41). La Réunion, se situe dans la zone de transition en bordure Nord de la zone subtropicale où l'on constate surtout un assèchement pendant les mois d'hiver.

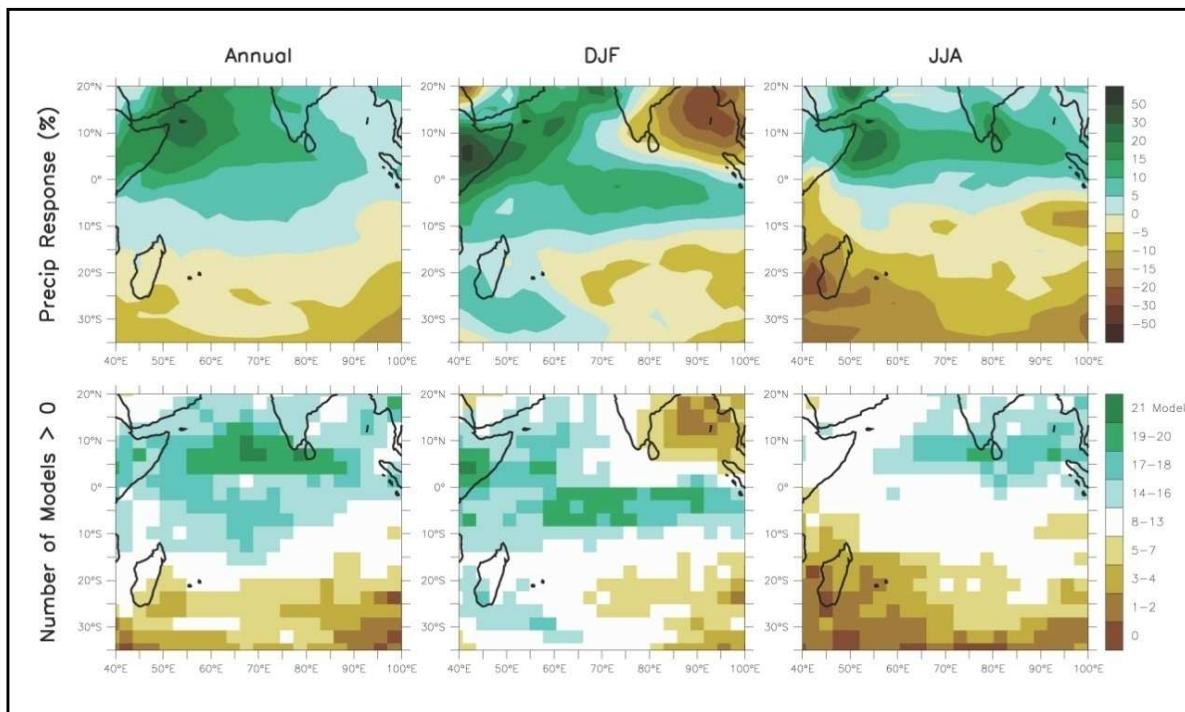


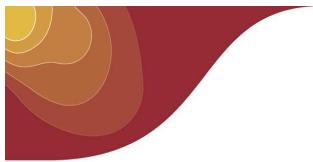
Figure 41 : variations relatives du régime de précipitations sur l'océan Indien obtenues à partir du scénario A1B. **Cartes du haut :** moyenne de 21 modèles des variations sur l'année, sur la période de décembre à février et sur la période de juin à juillet pour la période de 2080 à 2099 par rapport à la période 1980-1999. **Cartes du bas :** nombre de modèles sur les 21 où les variations de précipitations sont positives. (IPCC, 2007)

3.2.3 Phénomènes extrêmes

L'étude de la fréquence des vagues de chaleur montre qu'à la fin du 21^{ème} siècle, la probabilité de chaleurs saisonnières extrêmes¹⁷ atteint environ 90% dans beaucoup de zones tropicales, et atteint environ 40% ailleurs. Des études récentes sont parvenues à la conclusion que dans le climat futur, les vagues de chaleur seront plus intenses, dureront plus longtemps et seront plus fréquentes. A contrario, dans un climat futur plus chaud, les modèles projettent un déclin de 50 à 100% de la fréquence des irruptions d'air froid par rapport au présent, au cours des hivers de l'hémisphère Nord dans la plupart des régions.

Les recherches indiquent une tendance à l'augmentation des jours de pluie intense au sein de nombreuses régions, y compris dans celles où la moyenne des chutes de pluie baissera selon les projections. Dans ces derniers cas, la baisse du volume des chutes de pluie est souvent attribuable à un nombre de jours de pluie moindre, plutôt qu'à une baisse de l'intensité de la pluie.

¹⁷ le terme « extrême » est défini comme se trouvant au-delà du 95^{ème} centile de la distribution simulée des températures au 20^{ème} siècle



Dans le contexte d'un changement climatique, les caractéristiques des dépressions des moyennes latitudes risquent de changer. Les modèles numériques semblent s'accorder sur une double tendance : baisse du nombre de dépressions mais augmentation des fortes dépressions à l'origine des tempêtes.

3.2.4 Le problème des cyclones dans la modélisation climatique

La simulation climatique directe des cyclones à l'aide de modèle numérique se heurte au problème de la résolution spatiale élevée qui serait nécessaire et qui reste inaccessible pour de longues simulations dans l'état actuel des ressources informatiques. Dans les simulations utilisées classiquement dans les études du climat, notamment celles qui ont été réalisées pour le 4^{ème} rapport du GIEC, la taille de la maille est généralement de $300 \times 300 \text{ km}^2$, soit à peu près 100 fois la taille de l'œil d'un cyclone moyen.

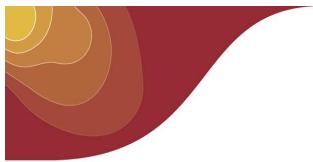
Pour tenter de simuler l'activité cyclonique future, les chercheurs misent sur deux types de méthodes :

- La simulation explicite des cyclones tropicaux (méthode directe) :
Elle s'effectue à l'aide de modèles numériques avec une résolution plus fine en effectuant des simulations plus courtes. On réduit ainsi les temps de calcul et les besoins de stockage. Parmi les centres qui possèdent les moyens informatiques d'effectuer ce type de simulations, le Centre National de Recherche Météorologique (CNRM) de Météo-France a réalisé deux expériences de dix ans chacune avec une résolution de $50 \times 50 \text{ km}^2$ sur le bassin de l'Atlantique Nord (André, Royer, & Chauvin, 2008). Cependant, il apparaît que cette résolution reste encore trop grande. Une résolution de $20 \times 20 \text{ km}^2$ semble nécessaire pour espérer voir les résultats converger. Nul doute que les contraintes de puissance de calcul seront levées avec l'arrivée, dans un proche avenir, de calculateurs toujours plus puissants.
- Approche par la grande échelle (méthodes indirectes) :
La résolution insuffisante des modèles ne permet pas toujours d'employer la méthode directe. On peut néanmoins se faire une idée du changement dans la cyclogenèse par un moyen détourné qui consiste à regarder comment les conditions de grande échelle, favorables à la cyclogenèse, évoluent lorsque les conditions de forçage changent. En effet, on sait de façon climatologique que les cyclones tropicaux ne peuvent naître qu'au-dessus de zones océaniques où la température de surface est suffisamment élevée (26°C), avec la présence d'un tourbillon cyclonique et en l'absence de cisaillement vertical de vent. En combinant tous ces paramètres, on obtient un indice qui reproduit bien la répartition des cyclogenèses dans les différents bassins au cours des 50 dernières années. Cette méthode n'a pas encore été mise en œuvre pour l'étude de l'activité cyclonique sur le bassin du Sud-Ouest de l'océan Indien.

A l'heure actuelle, les études sur la relation entre activité cyclonique et réchauffement climatique ont bien du mal à converger. Toutefois, les dernières études effectuées par des modèles à haute résolution tendraient à orienter le discours des scientifiques sur une baisse du nombre de cyclones avec en contrepartie, une augmentation des cyclones intenses et des précipitations associées. En d'autres termes, l'évolution des conditions de grande échelle pourrait devenir moins favorable au déclenchement cyclonique, mais la hausse des températures de surface de la mer permettrait une alimentation accrue des systèmes générés.

Au-delà de la question du nombre ou de l'intensité, des études commencent à s'intéresser à la manière dont les trajectoires pourraient être infléchies par le réchauffement climatique. Cette approche du problème est primordiale car, contrairement à la question du nombre ou de l'intensité, des changements dans les trajectoires pourraient avoir comme effet de rendre vulnérable des populations jusque là épargnées par les phénomènes cycloniques.

Il faudra attendre les toutes prochaines simulations du climat futur avec des résolutions spatiales suffisamment élevées pour que leurs résultats soient interprétables de façon non ambiguë.



3.2.5 Niveau de la mer

Les projections des modèles climatiques à l'horizon 2100 indiquent que le niveau de la mer va continuer à monter, à un rythme d'environ 4 ± 2 mm/an soit une élévation de 20 à 60 centimètres en un siècle (Figure 42). Ces modèles prévoient que les contributions respectives des causes climatiques seront sensiblement similaires à celles observées actuellement avec une contribution dominante de l'expansion thermique (70 à 75%). L'incertitude majeure vient de la contribution des calottes polaires, qui pourrait s'accélérer et serait alors sous-estimée dans ces projections. Ceci dit, une étude récente montre un ralentissement de fonte au Groenland et met en lumière une forte variabilité interannuelle. De même, les chercheurs du GIEC indiquent que l'accumulation de neige sur l'Antarctique devrait augmenter au cours de ce siècle, compensant ainsi les pertes de masse de la calotte groenlandaise. Les deux hypothèses – augmentation ou ralentissement des pertes de masses des calottes polaires – demeurent ouvertes.

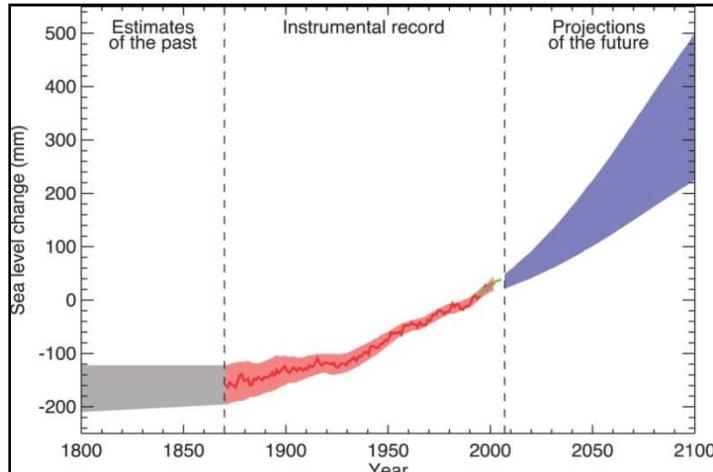


Figure 42 : Evolution du niveau moyen de la mer par rapport à la moyenne de la période 1980-1999, estimée avant 1870, mesurée entre 1870 et 2000 puis simulée par les modèles forcés sous les hypothèses du scénario A1B. Les plages de couleur montrent les incertitudes de chaque type de données. (IPCC, 2007)

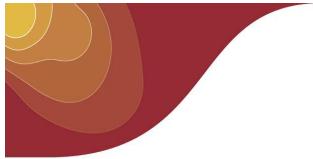
Comme dans les observations passées, les modèles prédisent une forte variabilité régionale des changements du niveau de la mer pour le siècle à venir. Les résultats sont très différents d'un modèle à l'autre si bien qu'il est difficile de dire, pour l'instant, quelles régions seront les plus touchées au cours des prochaines décennies. Les chercheurs tentent encore de mieux comprendre les mécanismes à l'origine de cette variabilité régionale, afin de mieux les modéliser et donc les prédire.

Les simulations des modèles climatiques indiquent une hausse des températures moyennes du globe de 1,8 à 4,0°C, selon les scénarios, pour la fin du siècle avec des vagues de chaleur plus intenses et plus fréquentes. Dans l'océan Indien, le réchauffement est un peu plus faible avec des valeurs prévues comprises entre 1,4 et 3,7°C.

Une augmentation des précipitations est très probable sous les hautes latitudes, tandis que des baisses sont probables sur la plupart des terres subtropicales. Les recherches indiquent une tendance à l'augmentation des jours de pluie intense au sein de nombreuses régions. Dans l'océan Indien, les projections de précipitations annuelles prévoient une variation relative de -2% à +20% selon les modèles.

Les relations entre activité cyclonique et réchauffement climatique ne sont pas établies de façon très claire. Il semblerait tout de même qu'on observe dans le climat futur une baisse du nombre de cyclones avec en contrepartie une augmentation des systèmes intenses et des précipitations associées.

La hausse du niveau de la mer va se poursuivre pour atteindre 20 à 60 cm à la fin du siècle avec une forte variabilité régionale.



4 Projections régionales pour La Réunion

4.1 Limites de la régionalisation

Les modèles de climat globaux ont une maille de $300 \times 300 \text{ km}^2$. Les données de ces modèles représentent des valeurs moyennes sur cette maille et ils ne peuvent pas fournir d'informations directes sur le climat à des échelles plus petites que leur résolution. Compte-tenu de sa taille, l'île de La Réunion n'est donc pas représentée dans ces modèles. Pourtant, le relief imposant de l'île génère des contraintes sur la circulation atmosphérique à l'origine de la formation d'une multitude de microclimats. Les données simulées des modèles globaux sont donc parfois très différentes de celles mesurées par un poste dont les caractéristiques climatologiques sont fortement influencées par la topographie locale.

Les modèles climatologiques globaux, s'ils ne sont pas en mesure de prévoir l'évolution du climat sur un point précis de l'île, renseignent tout de même sur l'évolution à grande échelle du climat. Or c'est bien cette évolution de grande échelle qui va se répercuter à des échelles de plus en plus fines, jusqu'à celles du point de mesure de référence. L'étude de ces modèles est donc primordiale pour la compréhension de l'évolution du climat et est même un point de départ incontournable pour la régionalisation des études d'impacts du changement climatique.

Deux approches majeures permettent de procéder à des « descentes d'échelle » pour régionaliser les études d'impacts :

- Approche dynamique : elle consiste à emboîter des modèles sur des domaines limités avec une résolution de plus en plus fine et avec comme point de départ les données des modèles globaux. Ce type de modèle permet de réaliser des simulations multi-décennales à des résolutions de 10 à 20 km en prenant en compte les mécanismes d'interactions agissant à l'échelle régionale. L'approche dynamique permet d'obtenir des valeurs cohérentes physiquement entre elles avec une forte résolution spatiale et adaptée à l'étude des extrêmes de températures et de précipitations. En revanche, elle nécessite des ressources informatiques très importantes.
- Approche statistique : elle consiste à identifier des relations entre les sorties du modèle et les variables observées à partir du climat actuel et à les appliquer au climat futur. Cette approche est conditionnée par l'hypothèse forte mais non vérifiable que les relations statistiques ne sont pas modifiées dans le climat futur. L'information locale est obtenue à partir d'un modèle statistique qui relie les variables de grande échelle (appelées « prédicteurs ») aux variables locales (appelées « prédictants »). L'approche statistique nécessite peu de temps de calcul et permet d'obtenir une information localisée et précise sur un ou plusieurs sites. En revanche, elle ne renseigne pas sur la distribution spatiale des variables sur l'ensemble d'un territoire.

Des études d'impacts associées à des techniques de « descente d'échelle » ont été récemment réalisées ou sont en cours. Parmi elles, citons le projet RIVAGE dont l'objectif est la recherche sur l'impact hydrologique du changement climatique sur les grands bassins versants métropolitains ou le projet REXHYSS : impact du changement climatique sur les ressources en eau et les extrêmes hydrologiques dans les bassins de la Seine et de la Somme.... Enfin, une étude d'impact sur les risques liés à l'eau, les ressources en eau et la biodiversité vient de débuter à la direction Interrégionale Antilles-Guyane de Météo-France avec l'aide de nombreux partenaires (IRD, DIREN, BRGM....). Les résultats sont attendus fin 2012.

Pour adapter une méthode de descente d'échelle à un territoire, de longs travaux d'études doivent être menés au préalable. Ces études ne peuvent pas être réalisées dans les délais impartis à la rédaction de ce document. Les paragraphes suivants se limiteront donc à analyser les données des modèles climatiques globaux sur la zone de La Réunion avec toutes les réserves que cela implique sur l'évolution propre de chaque microclimat de l'île. Toutefois, une des simulations du modèle français ARPEGE-CLIMAT, configuré avec une maille de $50 \times 50 \text{ km}^2$, forcé selon les hypothèses des émissions de gaz à effet de serre du scénario A2, a permis de mettre en œuvre une



méthode de correction appelée « quantile-quantile » (Déqué, 2007). Cette correction (cf paragraphe 4.3.1), appliquée aux données quotidiennes, permet une étude plus fine des valeurs extrêmes, notamment les températures, inaccessibles avec les modèles globaux de grande échelle.

Les méthodes de descente d'échelle sont particulièrement adaptées aux études d'impacts du réchauffement climatique sur des territoires à la topographie complexe. L'objectif de la direction interrégionale de Météo-France à La Réunion, avec l'appui des spécialistes du centre de Toulouse, est de mettre en œuvre ces techniques dans un futur proche pour mieux appréhender les effets du réchauffement climatique sur l'île.

Les modèles climatiques globaux calculent les valeurs moyennes de paramètres sur des pavés de 300×300 km². Les différents microclimats de l'île ne sont donc pas simulés directement par les modèles. Pour décrire plus finement le climat futur réunionnais, il est nécessaire de mettre en œuvre des techniques de « descente d'échelle ». La suite de ce document propose une première technique réalisée à l'aide d'une simulation particulière du modèle climatique de Météo-France configuré avec une résolution de 50×50 km².

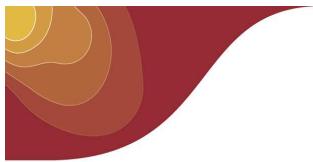
4.2 Analyse des scénarios climatiques du GIEC

En 2004, le GIEC a lancé un vaste programme pour évaluer les modèles numériques, les comparer et étudier leurs réponses à des perturbations d'origine naturelle (activité solaire, éruptions volcaniques...) ou anthropique (émission de CO₂, d'aérosols....). Pour faire partie des contributeurs de l'exercice, les modélisateurs devaient réaliser un certain nombre de simulations selon un protocole précis. La banque de données ainsi constituée regroupe 58 simulations provenant de 15 modèles numériques différents. Parmi ces 15 modèles, on retrouve deux modèles français : celui développé par l'Institut Pierre-Simon Laplace (IPSL) et celui développé par Météo-France. Les analyses ont servi de support à la rédaction du 4^{ème} rapport du GIEC, paru en 2007.

Ces modèles climatiques ont une maille de l'ordre de 300×300 km². Ils ne permettent donc pas de prendre en compte les caractéristiques du relief de l'île de La Réunion si importantes dans la définition du, ou plutôt, des climats réunionnais. En contrepartie, le caractère multi-modèles permet de dégager des tendances robustes du climat futur à grande échelle quand un consensus se dégage de ces 15 sources de données.

Les paramètres étudiés de ces simulations sont la température et les précipitations. Pour le climat futur, ils sont exprimés en anomalies par rapport aux mêmes paramètres calculés par le modèle climatique sur une période de référence, en l'occurrence 1971-2000. On s'affranchit ainsi des biais du modèle.

Les données sont issues du département de géographie et d'environnement de l'Université d'Oxford (McSweeney, New, & Lizcano, 2007). Elles sont disponibles sur le site internet de l'Université (voir bibliographie). Les données trimestrielles calculées par l'Université d'Oxford regroupent les mois de janvier-février-mars (JFM), avril-mai-juin (AMJ), juillet-août-septembre (JAS), octobre-novembre-décembre (OND). On observe un mois de décalage par rapport aux saisons déjà étudiées dans ce rapport.



4.2.1 Températures

4.2.1.1 Simulation de l'évolution récente du climat

Comme évoqué dans le paragraphe 3.1.1.2, la simulation récente du climat a pour objectif de comparer les caractéristiques du climat simulé à celles observées ces dernières années. Le Tableau 9 ci-contre montre les variations simulées des températures sur le point de grille correspondant à La Réunion par chacun des 15 modèles pour la période 1969-2008.

La moyenne des 15 modèles s'élève à +0,57°C avec un écart-type de 0,17°C. Elle est bien proche de la variation moyenne réellement observée pour les 6 postes de l'île étudiés au paragraphe 2.2.2.2 qui s'élève, elle, sur la même période à +0,62°C.

Tableau 9 : évolution de la température simulée par les modèles du GIEC sur la période 1969-2008

modèle	évolution de la température simulée par le modèle sur la période 1969-2008
bccr_bcm2_0	+0,70°C
ccma_cgcm3	+0,66°C
cnrm_cm3	+0,65°C
csiro_mk3_0	+0,49°C
csiro_mk3_5	+0,61°C
gfdl_cm2_0	+0,43°C
gfdl_cm2_1	+0,51°C
inmcm3_0	+0,74°C
ipsl_cm4	+0,81°C
miub_echo_g	+0,60°C
mpi_echam5	+0,54°C
mri_cgcm2_3	+0,25°C
ncar_ccsm3	+0,76°C
ukmo_hadcm3	+0,27°C
moyenne	+0,57°C
écart-type	+0,17°C
évolution observée à La Réunion	+0,62°C

4.2.1.2 Simulation des températures pour le 21^{ème} siècle

Les graphiques, ci-dessous (Figure 43), montrent l'évolution des anomalies de températures par décennie par rapport à la période de référence 1971-2000 prévue par les quinze modèles pour les trois scénarios (A2, A1B, B2). Les données de l'ensemble des modèles ont été transférées sur une grille régulière de 2.5°×2.5° soit environ 300×300 km². Les points du graphique sont issus du point de cette grille qui englobe La Réunion.

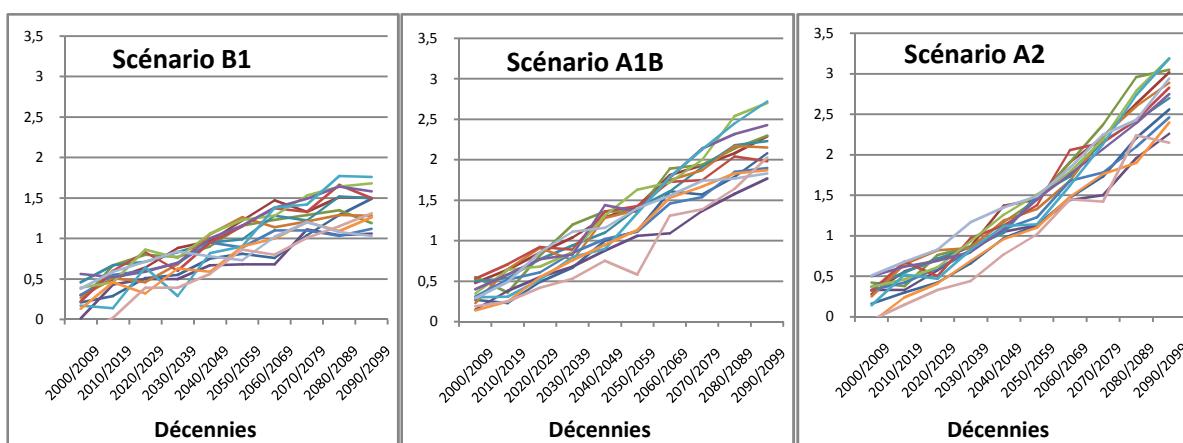
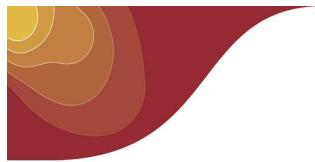


Figure 43 : Anomalies de température des 15 modèles par décennie par rapport à la période 1971-2000



Tous les modèles sont en accord pour prévoir une augmentation régulière de la température dont l'amplitude dépend du scénario envisagé. Le réchauffement le plus important se produit pour le scénario A2, le scénario le plus pessimiste en termes d'émissions de gaz à effet de serre.

En notant la valeur médiane des 15 modèles pour chaque décennie et en relevant, pour chaque décennie, la valeur la plus basse prévue par les modèles puis la plus haute, on obtient le graphique de la Figure 44.

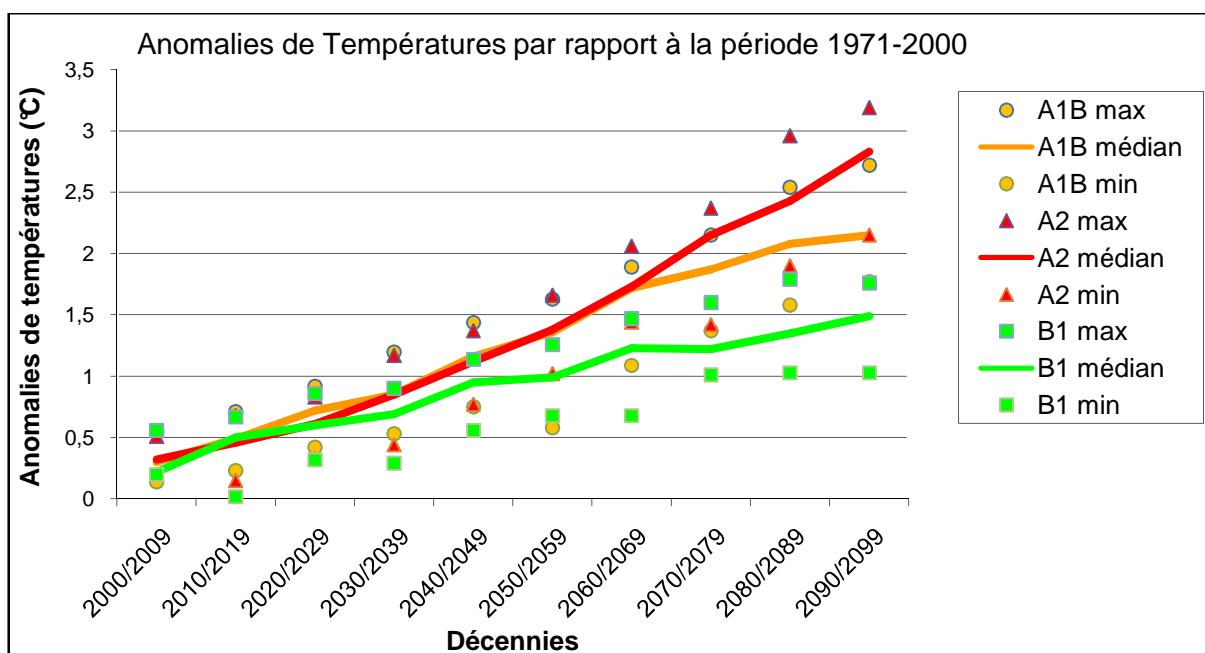


Figure 44 : Anomalies de température médianes, minimales et maximales des 15 modèles par décennie par rapport à la période 1971-2000

Pour la période 2090/2099, le réchauffement projeté par la moyenne des 15 modèles atteint 1,5 °C pour le scénario B1, 2,1°C pour le scénario A1B et 2,8°C pour le scénario B2 avec une fourchette absolue entre le modèle le plus optimiste pour le scénario B1 et le plus pessimiste pour le scénario A2 comprise entre 1,0°C et 3,2°C.

L'évolution (Figure 45) des anomalies de températures des 15 modèles par saison (JFM : Janvier-Février-Mars, AMJ : Avril-Mai-Juin, JAS : Juillet-Août-Septembre, OND : Octobre-Novembre-Décembre) ne montre pas de caractéristiques notables selon les saisons et les scénarios. Le réchauffement au cours du 21^{ème} siècle, prévu par les modèles du GIEC, est relativement identique pour les 4 saisons.

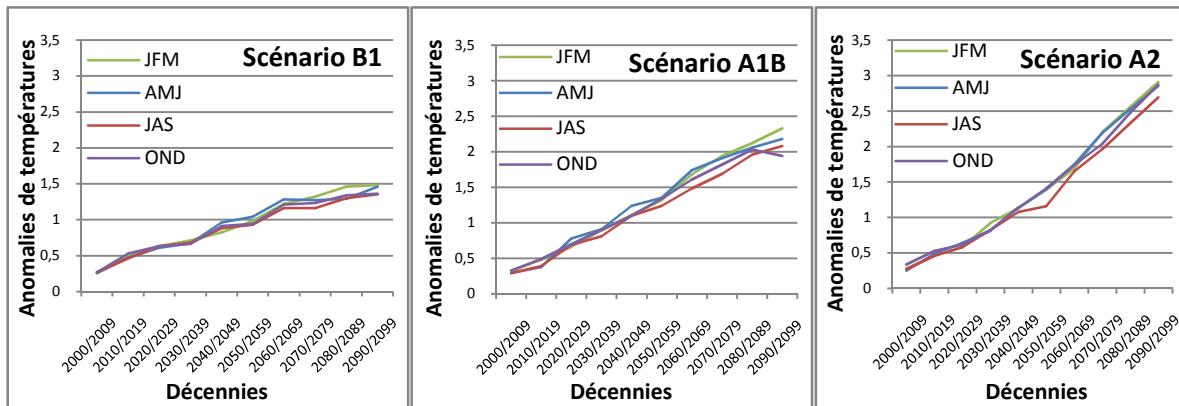
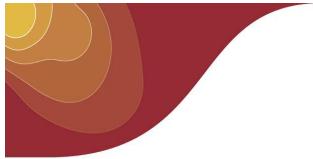


Figure 45 : anomalies de températures par rapport à la période 1971-2000 : moyenne des 15 modèles par saison.

4.2.2 Précipitations

4.2.2.1 Simulation de l'évolution récente du climat

Le Tableau 10 ci-contre récapitule les évolutions de précipitations simulées par les modèles sur la période 1969-2008. La moyenne des modèles est faible ; elle s'élève à 1,1%. Par contre, l'écart-type, égal à 4,8%, montre que tous les modèles ne sont pas en accord sur le signe des tendances simulées de précipitations. Comme nous l'avons vu au paragraphe 2.2.3.2, l'évolution moyenne des précipitations (calculée spatialement) réellement observée par les postes pluviométriques indique une baisse de 7%. Contrairement à la température, la simulation des précipitations est moins réaliste. Mais, rappelons que ce paramètre dépend fortement des caractéristiques propres des modèles et que ces modèles ne prennent pas en compte le relief de l'île, si important dans la répartition des pluies.

Tableau 10 : Evolution en pourcentage des précipitations simulées par les modèles sur la période 1969-2008

modèle	évolution des précipitations simulée par le modèle sur la période 1969-2008
bccr_bcm2_0	-4,5%
cccmca_cgcm3	+3,1%
cnrm_cm3	+5,6%
csiro_mk3_0	+4,2%
csiro_mk3_5	-3,5%
gfdl_cm2_0	+6,2%
gfdl_cm2_1	-4,6%
inmcm3_0	+9,3%
ipsl_cm4	+2,2%
miub_echo_g	-4,3%
mpi_echam5	-2,4%
mri_cgcm2_3	-3,4%
ncar_ccsm3	+6,0%
ukmo_hadcm3	+1,6%
moyenne	+1,1%
écart-type	+4,8%
évolution observée à La Réunion	-7,0%

4.2.2.2 Simulation des précipitations pour le 21^{ème} siècle

Les trois graphiques de la Figure 46 montrent les anomalies de précipitations par décennie, en pourcentage, par rapport à la période de référence 1971-2000 pour le 21^{ème} siècle. Chaque courbe de couleur correspond aux données d'un des 15 modèles du GIEC selon les trois scénarios.

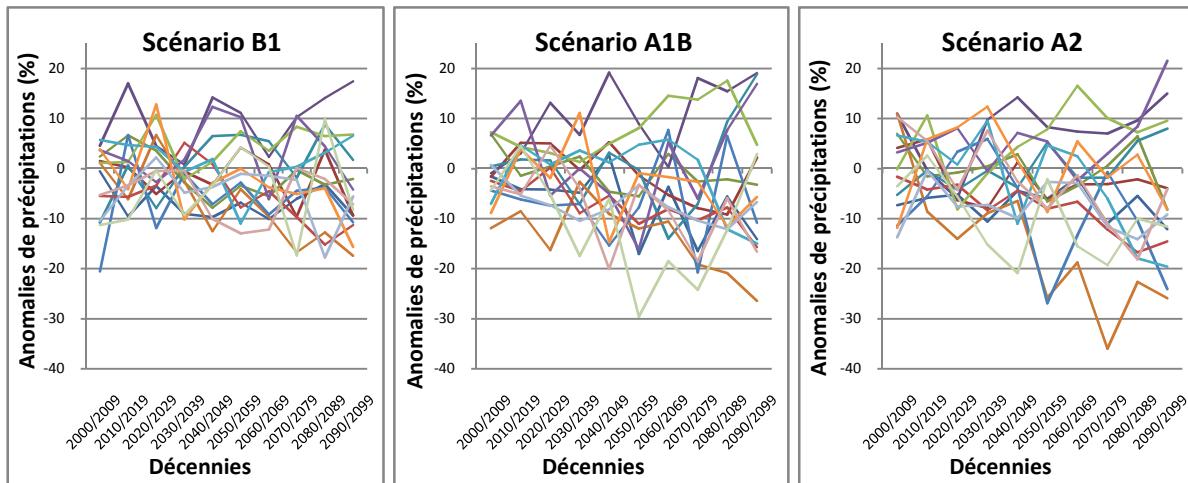
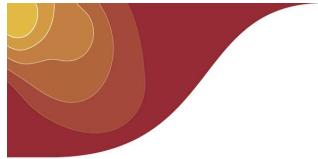


Figure 46 : Anomalies de précipitations des 15 modèles par décennie par rapport à la période 1971-2000

Contrairement à l'évolution simulée des températures, il est bien difficile à partir de ces graphiques de déduire une tendance pour la pluviométrie du 21^{ème} siècle. Chaque modèle propose une évolution qui lui est propre. De même, la variabilité inter-décennale des anomalies de précipitations au sein de chaque modèle complique l'interprétation des tendances.

L'une des raisons de la variabilité des résultats des modèles provient de la façon dont les données de précipitations des modèles numériques sont calculées. En effet, un modèle ne peut pas prendre en compte la multitude des processus physiques qui peuvent provoquer des précipitations. Et notamment, il ne prend pas en compte ceux dont les échelles sont inférieures à celles de sa propre maille. Pour rendre les modèles plus réalistes, ces processus physiques de petites échelles non résolus sont introduits sous forme paramétrée. Ces paramétrisations varient d'un modèle à l'autre et sont sans cesse améliorées par les chercheurs pour rendre les modèles de plus en plus réalistes. Les précipitations sont des paramètres très sensibles aux changements de paramétrisations. Les données simulées de précipitations varient donc sensiblement d'un modèle à l'autre et même d'une version d'un même modèle à l'autre.

La variabilité inter-décennale d'un même modèle peut s'expliquer par la climatologie même du bassin du Sud-Ouest de l'océan Indien. Les Mascareignes, soumises à l'aléa cyclonique, subissent de fortes variations de précipitations d'une saison cyclonique à l'autre.

En notant la valeur médiane des 15 modèles pour chaque décennie et en relevant, pour chacune d'elles, la valeur la plus basse prévue par les modèles puis la plus haute, on obtient le graphique de la Figure 47.

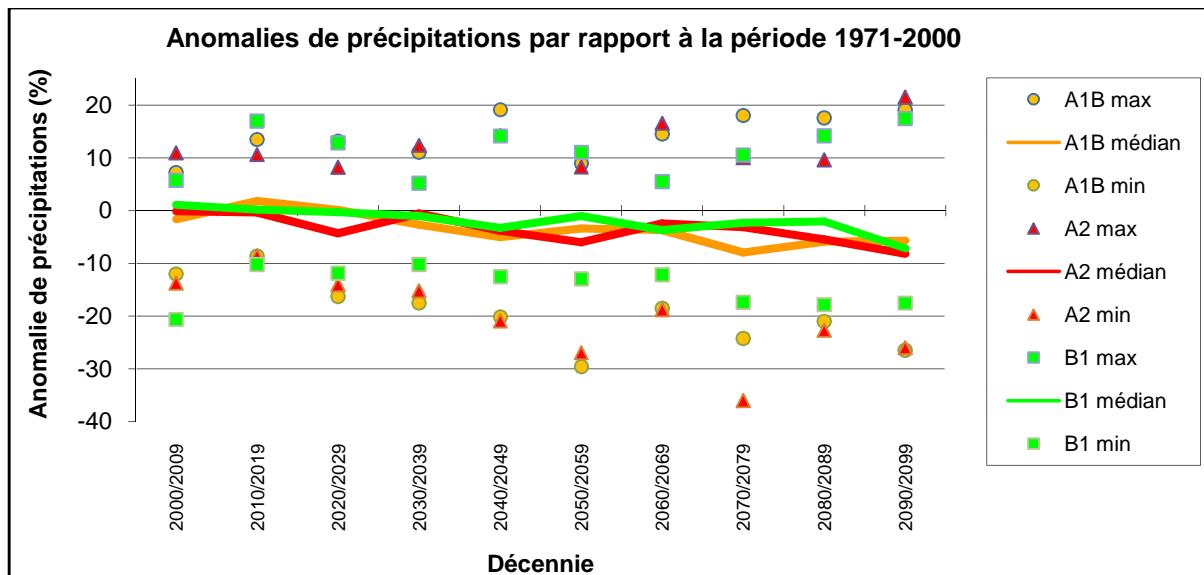
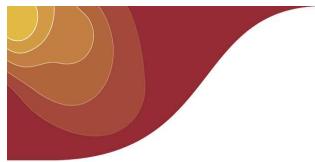


Figure 47 : Anomalies des précipitations médianes, minimales et maximales des 15 modèles par décennie par rapport à 1971-2000. Les trois scénarios des moyennes des anomalies de précipitations des 15 modèles sont en accord pour prévoir une légère baisse des précipitations pour la fin du 21^{ème} siècle. Cette baisse atteint 7% pour le scénario B1, 6% pour le scénario A1B et 8% pour le scénario A2.

Cette tendance est à relativiser, d'une part en tenant compte des remarques précédentes sur la façon dont les modèles climatiques simulent les précipitations et d'autre part par la dispersion des modèles dont les valeurs varient de -36% à +21%.

Les trois graphiques de la Figure 48 montrent l'évolution des anomalies de précipitations de la moyenne des 15 modèles par saison (JFM : Janvier-Février-Mars, AMJ : Avril-Mai-Juin, JAS : Juillet-Août-Septembre, OND : Octobre-Novembre-Décembre).

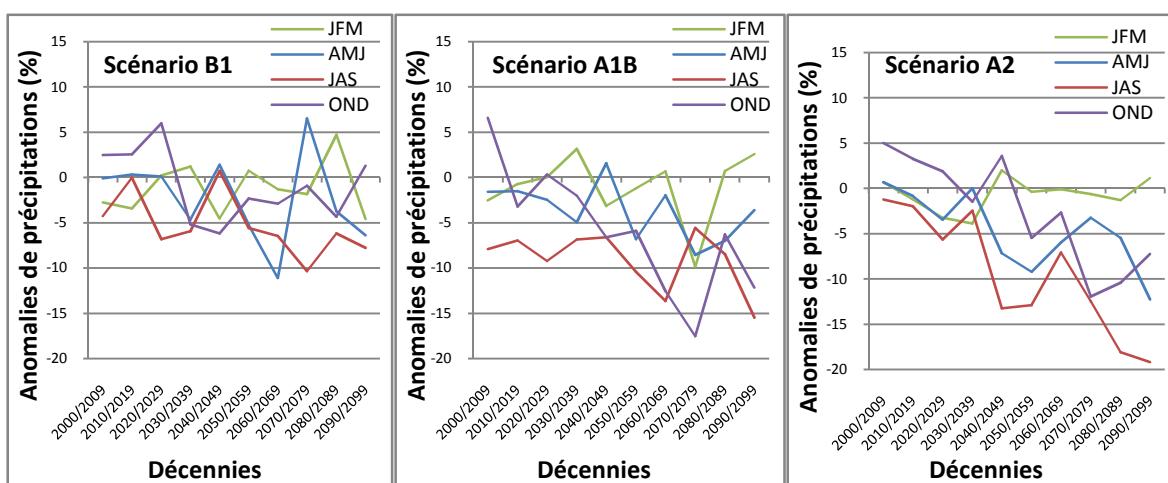
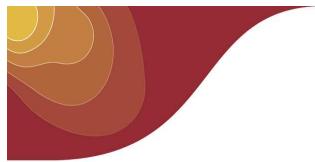


Figure 48 : anomalies de précipitations par rapport à la période 1971-2000 : moyennes des 15 modèles par saison



L'étude des tendances par trimestre montre une baisse des précipitations pour la période allant d'avril à décembre avec une baisse plus marquée entre juillet et septembre. Mis à part avril et décembre qui sont des mois de transition entre la saison sèche et la saison des pluies, cette période correspond aux mois les plus secs de l'année. Il y a donc de fortes présomptions que les quantités de précipitations diminuent pendant la saison sèche au cours du siècle. Cette tendance rejoint celle mise en valeur sur les données de précipitations observées sur la période 1969-2008 qui indique une baisse généralisée à l'ensemble de l'île des quantités de pluies.

Pendant les mois de janvier, février et mars, c'est à dire en pleine saison des pluies, la tendance est plus neutre et montre même une légère augmentation pour le scénario A2 compensant ainsi une partie du déficit de la saison sèche.

Encore une fois, ces conclusions doivent être relativisées par la dispersion des modèles dont les valeurs simulées varient parfois de +50 % à -50% pour une seule décennie et un seul scénario. Le graphique de la Figure 49, ci-dessous, montre un exemple de dispersion pour les mois d'octobre, novembre, décembre.

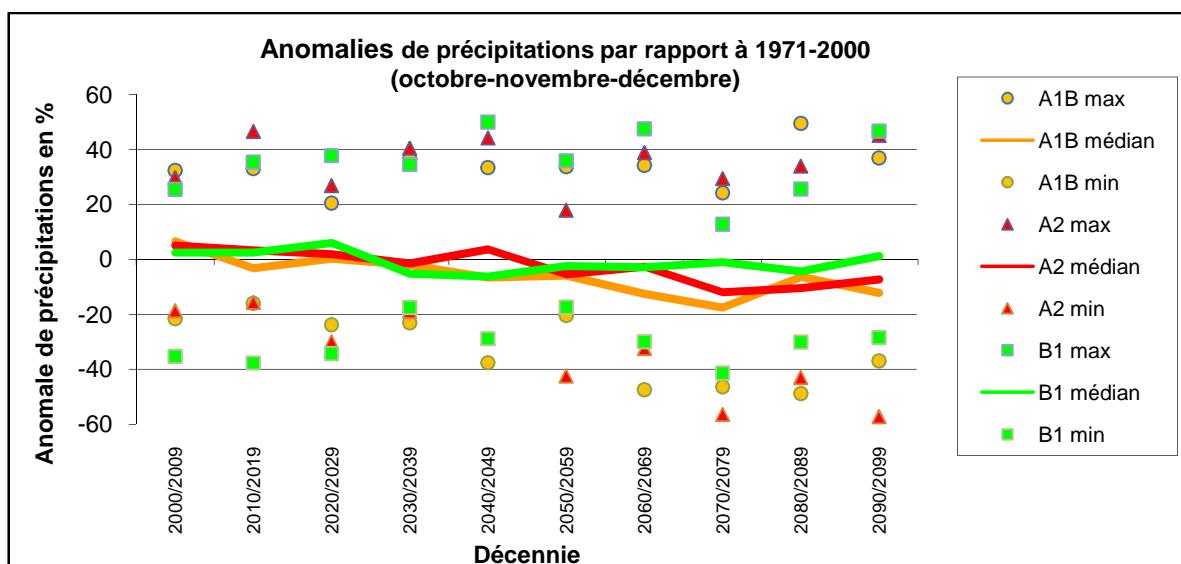
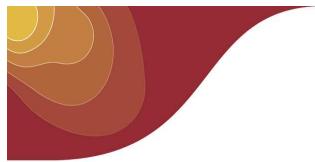


Figure 49 : anomalies des précipitations par rapport à la période 1971-2000 : moyenne des 15 modèles pour les mois d'octobre, novembre, décembre.

Sur La Réunion, les 15 modèles du GIEC sont en accord pour prévoir une augmentation régulière de la température qui atteindra à la fin du siècle en moyenne 1,5 °C pour le scénario B1, 2,1°C pour le scénario A1B et 2,8°C pour le scénario B2 avec une fourchette absolue entre le modèle le plus optimiste pour le scénario B1 et le plus pessimiste pour le scénario A2 comprise entre 1,0°C et 3,2°C.

La moyenne des modèles prévoit une légère baisse des précipitations pour la fin du 21^{ème} siècle qui varie entre 6 et 8% selon les scénarios mais avec une dispersion qui varie de -36% à +21% selon les modèles. La baisse des précipitations semble être plus marquée pendant la saison sèche.



4.3 Analyse des scénarios d'ARPEGE Climat

4.3.1 Caractéristiques du modèle ARPEGE

Le modèle climatique de Météo-France, développé par le Centre National de Recherches Météorologiques (CNRM) est l'un des 15 modèles qui ont servi de support à la rédaction du 4^{ème} rapport du GIEC. Le modèle du CNRM « ARPEGE-CLIMAT » est une version du modèle de prévision météorologique de Météo-France spécifiquement adaptée pour les études climatiques. Pour prendre en compte toutes les composantes de la machine climatique, il est couplé, d'une part, à un modèle de surface continentale qui inclut une représentation de la végétation et, d'autre part, à un modèle océanique qui gère aussi l'évolution de la glace de mer.

La particularité du modèle réside dans l'utilisation d'une grille étirée. Près du pôle d'étirement, la résolution du modèle atteint $50 \times 50 \text{ km}^2$ puis augmente au fur et à mesure que l'on s'éloigne de ce pôle. Cette grille variable permet d'obtenir des données à haute résolution près du pôle d'étirement tout en réduisant les coûts de calcul. Sur les Mascareignes, la résolution de la grille est légèrement inférieure à $200 \times 200 \text{ km}^2$, soit une grille plus fine que les modèles du GIEC mais encore insuffisante pour prendre en compte l'île de La Réunion.

Une dernière configuration d'ARPEGE-CLIMAT a permis de réaliser une simulation à haute résolution sur l'ensemble du globe avec une maille de $50 \times 50 \text{ km}^2$. C'est pour des raisons de coût de calcul, qu'une seule simulation a été réalisée avec les forçages des émissions de gaz à effet de serre du scénario A2. La Réunion est représentée de façon minimaliste par cette configuration du modèle et un seul point de grille y est situé. Mais c'est, aujourd'hui, la seule simulation qui dispose d'un point de grille terrestre sur l'île. Cette simulation présente tout de même un grand intérêt puisqu'elle permet de mettre en œuvre la méthode de correction « quantile-quantile » pour le calcul des indices climatiques de températures et de précipitations (Déqué, 2007). Cette méthode permet de corriger les biais du modèle et gomme en partie ses faiblesses pour représenter les phénomènes extrêmes. Elle consiste, dans un premier temps, à déterminer une relation simple entre les valeurs des quantiles sur le point de grille du modèle et ceux calculés à partir des observations d'un poste de référence donné. Cette relation est calculée par saison sur une période commune pour laquelle une simulation du modèle est disponible (simulation du climat récent). Dans un deuxième temps, les quantiles fournis par le modèle sur la simulation du climat futur sont alors corrigés en utilisant la relation calculée au préalable et on peut ainsi reconstituer des séries débiaisées en fonction du poste de référence utilisé. La méthode est assez bien adaptée aux extrêmes et possède une bonne cohérence temporelle pour l'étude, par exemple, des périodes de sécheresse ou du nombre de jours consécutifs de fortes précipitations ou de fortes/faibles températures.

Les projections d'ARPEGE-CLIMAT étiré sont étudiées pour deux périodes du 21^{ème} siècle : 2021-2050 et 2071-2100 pour les trois scénarios. La projection d'ARPEGE-CLIMAT haute résolution prend en compte la période 2041-2070 du scénario A2. Pour cette dernière simulation, il est nécessaire d'attirer l'attention sur le fait que le modèle n'a été forcé que par un seul scénario d'émissions de gaz à effet de serre. Or les scénarios sont définis pour prendre en compte l'incertitude des émissions futures des gaz à effet de serre. On se prive donc de l'évaluation de l'incertitude, déterminée par une étude multi-scénarios, qui est un élément très important lorsqu'on veut étudier le climat futur.

4.3.2 Circulation générale : le régime des alizés

Les alizés sont générés par le gradient de pression entre les hautes pressions de l'anticyclone des Mascareignes et les basses pressions équatoriales. On comprend bien que des modifications de localisation et de force de ces deux centres d'actions dans le climat futur influeront sur le régime des vents. Par ailleurs, la direction des alizés par rapport au relief de l'île définit les limites de la côte au vent et de la côte sous le vent et module de façon indirecte la répartition géographique des précipitations.

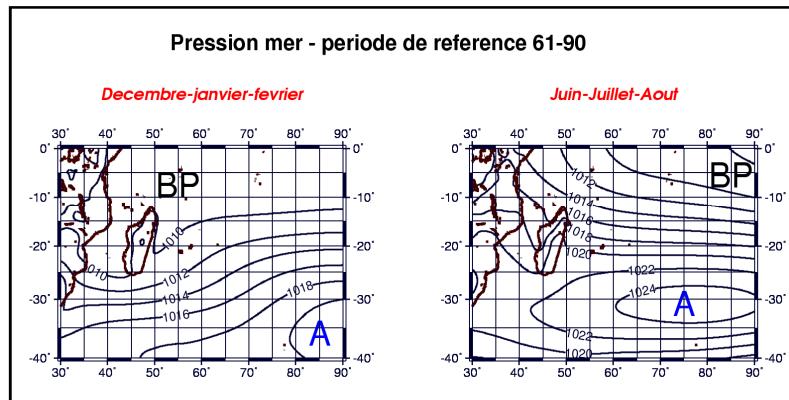
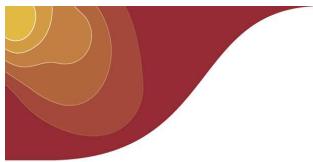


Figure 50 : Pression au niveau de la mer moyenne sur la période 1961-1990

Dans le climat présent, ces deux centres d'action connaissent un déplacement méridien saisonnier qui suit le mouvement apparent du soleil par rapport à la Terre. Les positions les plus au Nord sont atteintes en hiver et les plus au Sud en été.

Ainsi en hiver, la position moyenne de l'anticyclone (Figure 50) se rapproche de La Réunion en se décalant à la fois vers le Nord et vers l'Ouest tandis que sa pression moyenne au centre se renforce. Les basses pressions équatoriales, elles, se déplacent vers le Nord et l'Est en suivant le même mouvement. La pression atmosphérique à La Réunion est de l'ordre de 1020 hPa. Le gradient de pression moyen est à son maximum et engendre des alizés vigoureux de secteur Est qui atteignent fréquemment 70 km/h en rafales sur les côtes Nord et Sud de l'île.

L'été, l'anticyclone perd de sa vigueur et s'éloigne vers le Sud-Est tandis que les basses pressions équatoriales s'étendent vers le Sud. La pression moyenne à La Réunion est de l'ordre de 1011 hPa. C'est la période de l'année où le gradient moyen de pression est le plus faible entraînant une baisse significative des alizés qui disparaissent même certains jours.

Les projections pour le climat futur sont illustrées par les cartes de la Figure 51. Elles ne montrent pas de changement fondamental sur les positions saisonnières des deux centres d'action. Les 3 scénarios étudiés sur les périodes 2021-2050 puis 2071-2100 confirment ce point. Il est fort probable que la direction moyenne des alizés varie peu à l'horizon 2100. Ce point nous permet de dégager deux autres caractéristiques du climat futur :

- les côtes Nord-Est et Sud-Ouest resteront les côtes les plus exposées aux alizés tandis que les côtes Nord-Ouest et Ouest resteront le plus souvent déventées.
- il n'y aura pas de bouleversement géographique sur le régime des précipitations. La façade Est conservera son climat humide tandis que la façade Ouest restera plus sèche.

Si la position de l'anticyclone subtropical ne varie pas, les cartes d'anomalies de pression montrent que celui-ci se renforce. Ce renforcement est particulièrement notable pendant les mois de juin-juillet-août où il atteint plus de 4 hPa à l'horizon 2071-2100 pour le scénario A2, le plus pessimiste. La pression moyenne sur l'île, elle, ne varierait pas de plus de 1hPa pour la même période. Le gradient de pression sur la zone qui conditionne la force du vent voit donc sa valeur augmenter. En conséquence, les alizés souffleront plus fort sur les côtes exposées pendant les mois d'hiver, une saison déjà bien ventée. Il est difficile d'estimer la force moyenne des alizés pour le climat futur. En effet, la force du vent résulte à la fois du gradient de pression mais aussi de l'effet d'accélération créé par le relief en déviant le flux. Pour résoudre ces différents termes, les modèles numériques doivent prendre en compte le plus fidèlement possible le relief de La Réunion ce qui n'est actuellement pas le cas pour les modèles de climat.

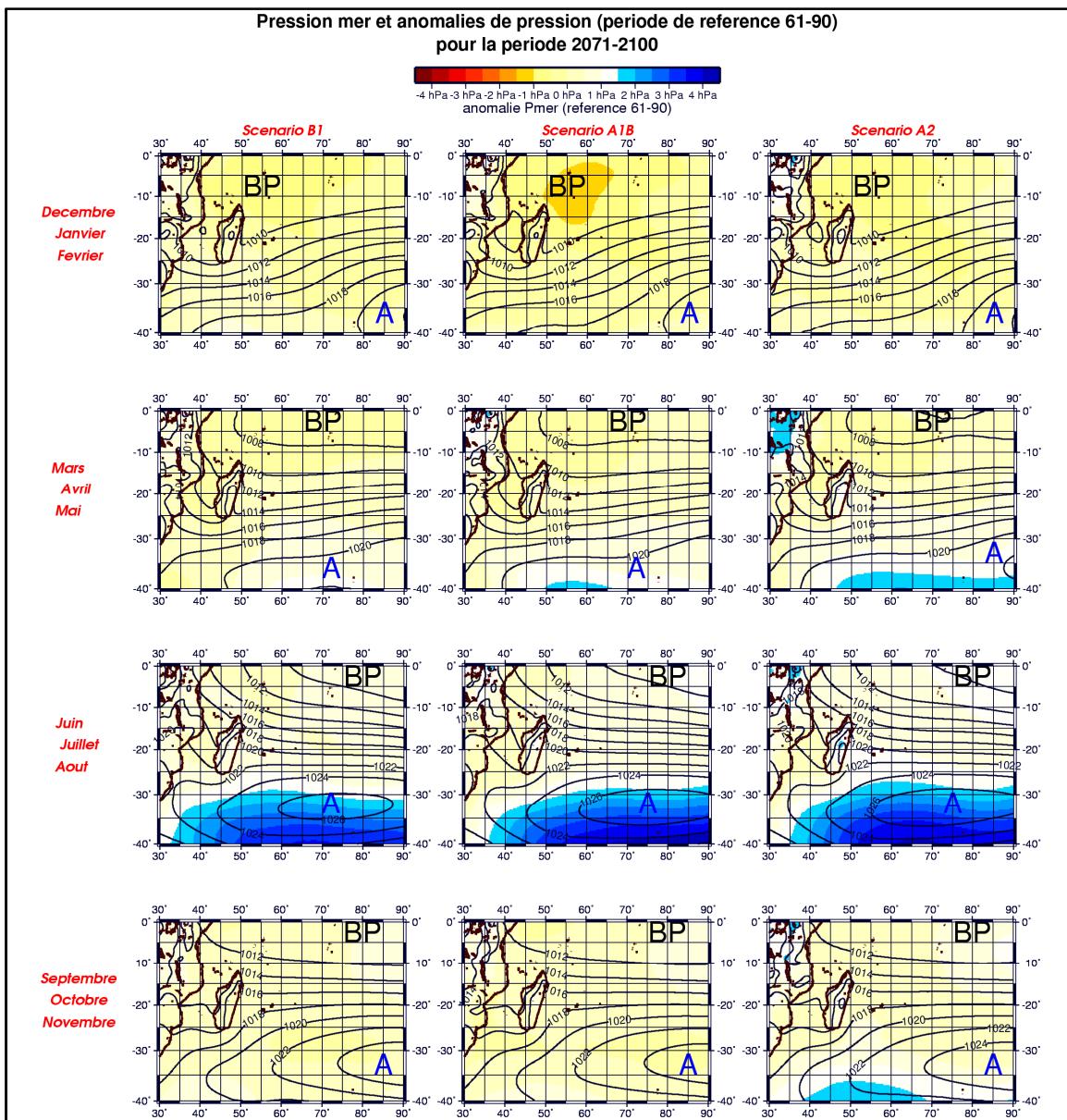
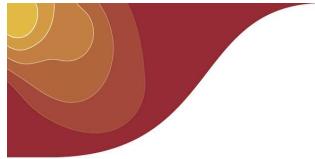
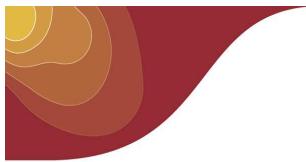


Figure 51 : simulations du modèle Arpège étiré de la pression au niveau de la mer par saison et par scénario pour la période 2071-2100

Pendant les mois d'été, on note un léger affaiblissement des basses pressions équatoriales pendant les mois de décembre-janvier-février affectant même les Mascareignes pour la fin du siècle. Mais les valeurs des anomalies sont trop faibles pour que l'on puisse en déduire des conclusions sur le régime des alizés déjà faibles à cette période.

Les cartes des saisons de transition (mars-avril-mai et septembre-octobre-novembre) montrent le renforcement puis l'affaiblissement progressif de l'anticyclone des Mascareignes autour des mois d'hiver comme c'est bien entendu le cas dans le climat actuel.



METEO FRANCE
Toujours un temps d'avance

Etude pour l'identification des évolutions des changements climatiques à
La Réunion (version finale)

REF : version 1.0

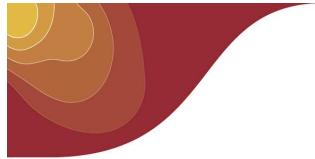
Date : 29-sept.-09

L'étude fine de l'évolution du régime des alizés est un axe primordial de recherche pour la compréhension du climat réunionnais futur, tant l'influence de ce régime prédominant est importante sur la répartition géographique des nuances microclimatiques rencontrées sur l'île. L'angle d'attaque de ces alizés par rapport au relief, leur force et leur degré plus ou moins important d'humidité sont autant de critères qui agissent sur la répartition des microclimats.

Le modèle ARPEGE-CLIMAT de grande échelle fait ressortir quelques premiers éléments sur l'évolution du régime des alizés pour cette fin de siècle :

- *vigueur plus marquée pendant les mois d'hiver austral en liaison avec le renforcement de l'anticyclone des Mascareignes*
- *peu de variation à attendre en ce qui concerne la direction moyenne de provenance*

Cependant, cette étude menée à partir des cartes moyennes de pression au niveau de la mer, reste encore insuffisante. Des études complémentaires, plus lourdes, devront être engagées pour mieux connaître le régime des alizés du 21^{ème} siècle.



4.3.3 Températures

4.3.3.1 Simulations ARPEGE étiré

Les cartes (Figure 52) montrent une distribution géographique de l'accroissement de températures à peu près similaire pour les différents scénarios. Comme sur le reste du globe, l'accroissement des températures est plus élevé sur les continents que sur les océans. Ce phénomène est bien visible sur Madagascar dont certaines régions vont connaître un réchauffement conséquent alors que sur notre zone océanique, le réchauffement reste plus modéré et plus uniforme.

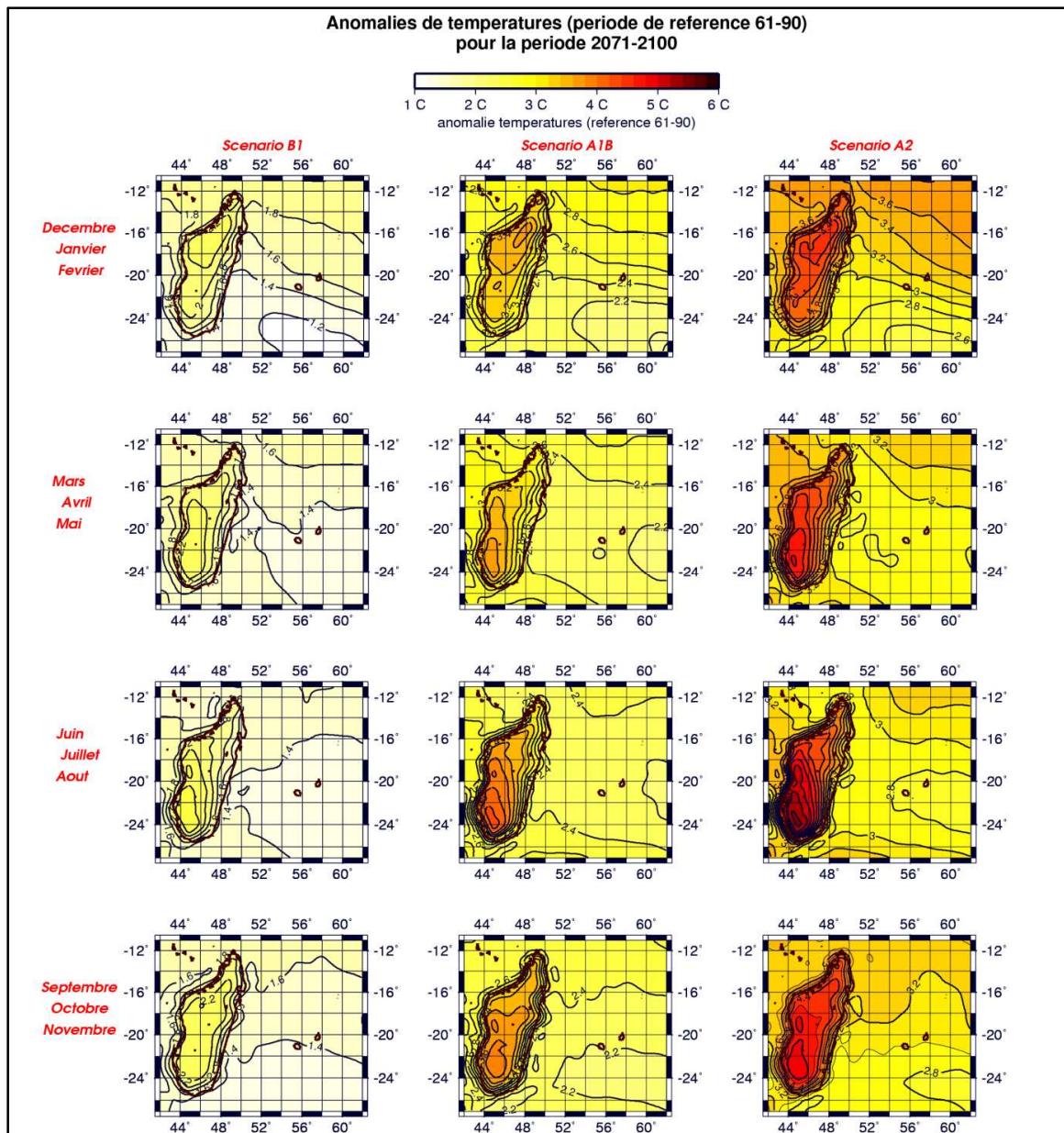
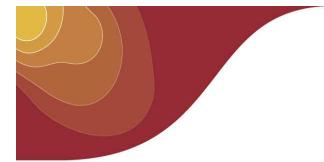


Figure 52 : Anomalies de températures, simulées par le modèle Arpège étiré, par saison et par scénario pour la période 2071-2100



L'explication de ce phénomène provient des différences dans l'évaporation. Le phénomène d'évaporation吸吸收 de la chaleur et par conséquent refroidit la surface. Sur l'océan, la quantité d'eau disponible pour l'évaporation n'est pas limitée, alors qu'elle l'est sur les continents par le contenu en eau du sol, lui-même lié à la quantité totale de précipitations. Le refroidissement n'est donc pas limité sur les océans ce qui atténue les effets du réchauffement climatique.

A proximité de La Réunion, le modèle ARPEGE prévoit un réchauffement compris entre 1,4°C et 3,0°C selon les scénarios et la saison, soit une fourchette similaire à celle des 15 modèles du GIEC.

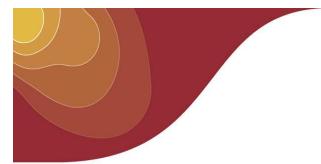
4.3.3.2 Simulation ARPEGE 50×50 km² et indices climatiques

La version du modèle à la résolution de 50×50 km² permet d'appliquer la méthode quantile-quantile sur les 6 postes de l'île dont les données ont été homogénéisées : Gillot, le Port, Pierrefonds-Aéroport, Colimaçons, Plaine des Palmistes, Plaine des Cafres. Leur répartition géographique sur l'île (se reporter à la carte de la Figure 10) prend en compte la variabilité du climat réunionnais entre les hauts et les bas mais aussi entre la côte au vent et la côte sous le vent.

Le Tableau 11 récapitule les moyennes observées sur la période 1971-2000, les moyennes simulées par le modèle et corrigées par la méthode quantile-quantile pour la période 2041-2070, les anomalies de températures déduites des deux précédentes valeurs ; le tout calculé pour les quatre saisons pour les températures minimales (Tn) et les températures maximales (Tx).

Poste	Commune	période	Tn (°C)				Tx (°C)			
			DJF	MAM	JJA	SON	DJF	MAM	JJA	SON
Gillot (8m)	Sainte-Marie	Moyenne 1971-2000	23,0	21,7	18,2	19,6	29,3	28,2	25,0	26,4
		Moyenne 2041-2070	25,0	23,4	19,7	21,2	31,3	30,0	26,5	28,3
		Anomalie/1971-2000	+2,0	+1,6	+1,5	+1,6	+2,0	+1,9	+1,5	+1,9
Le Port (9m)	Le Port	Moyenne 1974-2000	24,1	22,9	19,0	20,3	31,2	30,3	26,7	28,1
		Moyenne 2041-2070	26,0	24,4	20,4	21,9	33,6	32,2	28,5	29,9
		Anomalie/1971-2000	+2,0	+1,5	+1,4	+1,6	+2,4	+1,9	+1,8	+1,8
Pierrefonds-Aéroport (21m)	Saint-Pierre	Moyenne 1971-2000	22,7	21,2	17,4	18,7	30,6	28,9	25,1	21,7
		Moyenne 2041-2070	25,5	23,4	19,6	21,1	33,0	31,3	27,1	24,0
		Anomalie/1971-2000	+2,8	+2,2	+2,2	+2,4	+2,3	+2,4	+2,0	+2,2
Colimaçons (798m)	Saint-Leu	Moyenne 1971-2000	18,0	16,7	12,7	13,9	25,2	23,8	20,2	19,0
		Moyenne 2041-2070	20,2	18,5	14,2	15,6	28,0	26,1	22,3	21,4
		Anomalie/1971-2000	+2,2	+1,7	+1,4	+1,6	+2,8	+2,3	+2,1	+2,3
Pl. des Palmistes (1032m)	Plaine des Palmistes	Moyenne 1971-2000	15,3	13,8	9,6	11,0	22,8	21,7	17,7	18,0
		Moyenne 2041-2070	18,2	16,1	11,7	13,0	25,6	24,6	20,1	20,5
		Anomalie/1971-2000	+2,8	+2,2	+2,1	+2,1	+2,9	+2,9	+2,4	+2,6
Pl. des Cafres (1560m)	Le Tampon	Moyenne 1971-2000	12,5	10,8	6,0	7,6	20,8	19,6	15,3	27,1
		Moyenne 2041-2070	15,9	13,4	8,6	10,3	23,2	22,0	17,7	29,3
		Anomalie/1971-2000	+3,5	+2,7	+2,6	+2,7	+2,4	+2,4	+2,4	+2,2

Tableau 11 : Anomalies des températures minimales (Tn) et maximales (Tx) pour la période 2041-2070 par rapport à la période de référence 1971-2000, par saison, pour 6 postes de La Réunion (le nom des postes est suivi de son altitude et sa commune)



Si l'on étudie les anomalies de températures par saison (graphiques de la Figure 53), on constate que les anomalies les plus importantes, à la fois pour les maximales et pour les minimales, se produisent pendant les mois décembre-janvier-février, indépendamment du poste étudié. A l'inverse, les anomalies les plus basses se produisent pendant les mois juin-juillet-août. Les effets du changement climatique se ressentiront donc d'autant plus que le réchauffement le plus important se produira pendant les mois les plus chauds de l'année. En revanche, les mois les plus frais, juin-juillet-août, bénéficieront d'une hausse relativement modérée.

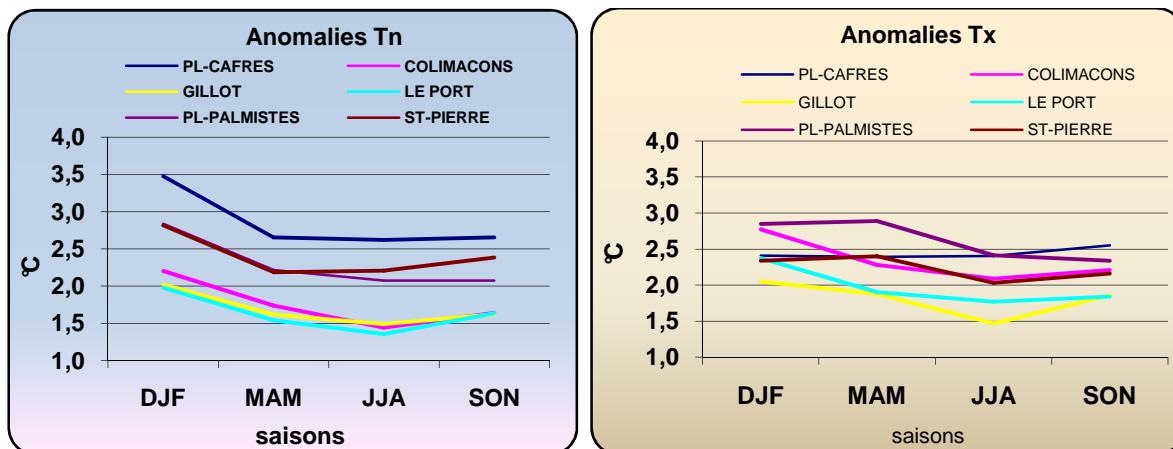
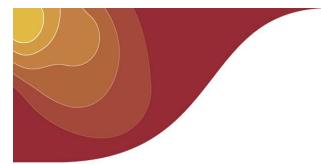


Figure 53 : Anomalies des températures minimales (à gauche) et maximales (à droite) par saison et par poste, pour la période 2041-2070 par rapport à la période de référence 1971-2000

L'étude des indices climatiques pour la période 2041-2070 est dans la continuité de l'évolution constatée au cours de la période 1969-2008. Les Tableau 12 et Tableau 13, ci-dessous, reprennent les valeurs de ces indices calculés sur la période 2041-2070 ainsi que leur évolution par rapport à la période 1971-2000. Les valeurs en rouge traduisent un réchauffement ; celles en bleu, un refroidissement.

Poste	Commune	Indice -->	Tn ≤ 0°C	Tn ≤ 10°C	Tn ≥ 20°C	Tn10p	Tn90p
Gillot (8m)	Sainte-Marie	Moyenne 2041-2070	0,0	0,0	289,2	0,6%	54,5%
		Anomalie/1971-2000	0,0	0,0	+71,1		
Le Port (9m)	Le Port	Moyenne 2041-2070	0,0	0,0	315,8	0,7%	56,7%
		Anomalie/1971-2000	0,0	0,0	+64,5		
Pierrefonds-Aéroport (21m)	Saint-Pierre	Moyenne 2041-2070	0,0	0,0	246,8	0,8%	55,7%
		Anomalie/1971-2000	0,0	0,0	+63,5		
Colimaçons (798m)	Saint-Leu	Moyenne 2041-2070	0,0	0,0	70,2	0,8%	55,4%
		Anomalie/1971-2000	0,0	-1,4	+61,3		
Pl. des Palmistes (1032m)	Pl. des Palmistes	Moyenne 2041-2070	0,0	27,6	16,8	0,6%	50,8%
		Anomalie/1971-2000	0,0	-65,0	+16,6		
Pl. des Cafres (1560m)	Le Tampon	Moyenne 2041-2070	0,0	119,6	0,5	0,8%	49,9%
		Anomalie/1971-2000	-0,9	-91,4	+0,5		

Tableau 12 : indices climatiques pour la période 2041-2070 (le nom du poste est suivi de son altitude)
(les indices sont calculés pour les températures minimales en nombre de jours ou en pourcentage annuel)



Poste	Commune	Indice -->	Tx≥25°C	Tx≥32°C	Tx≥35°C	Tx10p	Tx90p
Gillot (8m)	Sainte-Marie	Moyenne 2041-2070	357,6	33,5	0,5	1,2%	67,1%
		Anomalie/1971-2000	+49,9	+32,1	+0,5		
Le Port (9m)	Le Port	Moyenne 2041-2070	364,8	145,3	12,8	1,2%	65,5%
		Anomalie/1971-2000	+6,1	+109,0	+12,5		
Pierrefonds-Aéroport (21m)	Saint-Pierre	Moyenne 2041-2070	356,2	121,9	4,0	1,2%	65,7%
		Anomalie/1971-2000	+46,5	+101,2	+3,7		
Colimaçons (798m)	Saint-Leu	Moyenne 2041-2070	172,6	0,5	0,0	1,0%	64,9%
		Anomalie/1971-2000	+97,8	+0,5	0,0		
Pl. des Palmistes (1032m)	Pl. des Palmistes	Moyenne 2041-2070	114,7	0,0	0,0	0,8%	63,9%
		Anomalie/1971-2000	+100,6	0,0	0,0		
Pl. des Cafres (1560m)	Le Tampon	Moyenne 2041-2070	11,5	0,0	0,0	1,3%	64,3%
		Anomalie/1971-2000	+11,1	0,0	0,0		

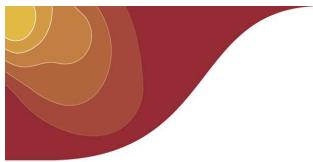
Tableau 13 : indices climatiques pour la période 2041-2070 (le nom du poste est suivi de son altitude)
(les indices sont calculés pour les températures maximales en nombre de jours ou en pourcentage annuel)

Tous les indices, sans exception, traduisent un réchauffement. A l'horizon 2041-2070, les températures inférieures à 0°C disparaissent à la Plaine des Cafres. L'altitude des gelées est encore en hausse comme le montre déjà l'évolution de cet indice sur la période 1969-2008. De même, le nombre de jours par an où la température minimale est inférieure à 10°C diminue de près de la moitié à la Plaine des Cafres et, il est divisé par 3 à la Plaine des Palmistes. Au Port, dans les bas, le nombre de jours où la température maximale dépasse 35°C, quasi nul à notre époque, atteint 12,5 jours par an en moyenne pour la période future. Toujours sur le littoral, le nombre de jours où la température maximale dépasse 32°C est multiplié par 4 pour la station du Port, par 6 pour la station de Pierrefonds-Aéroport et à Gillot, ce nombre, quasi nul de nos jours, passe à 33 dans le futur. Dans les hauts, le nombre de jours par an où la température maximale dépasse 25°C est multiplié par 7 pour la station de la Plaine des Palmistes et atteint 11,1 jours par an à la Plaine des Cafres alors qu'il est quasi nul à notre époque.

La tendance observée sur la période 1969-2008 se confirme. On note une diminution des extrêmes froids (tn10p et tx10p) et une augmentation des extrêmes chauds (tn90p et tx90p). Les journées et les nuits relativement froides définies selon les seuils de notre époque contemporaine disparaissent presque et leurs proportions ne représentent qu'un peu moins de 1% dans le futur. Les pourcentages de journées et de nuits relativement chaudes sont en hausse sensible. A l'horizon 2041-2070, une nuit sur deux paraîtrait chaude relativement aux critères de notre époque tandis que 2 journées sur 3 paraîtront chaudes selon les mêmes critères.

La hausse des températures est moins importante sur les océans que sur les continents. Ainsi, la fourchette des anomalies des températures prévues par le modèle ARPEGE, pour la période 2071-2100 à proximité de La Réunion, est comprise entre 1,4°C (scénario B1) et 3,0°C (scénario A2).

La simulation du modèle ARPEGE 50x50 km² forcé selon les hypothèses du scénarios A2, montre que, pour la période 2041-2070, l'été austral serait la saison qui connaîtrait le plus fort réchauffement, alors que pendant l'hiver la hausse des températures serait plus modérée. Les journées et les nuits relativement froides, définies selon les seuils de notre époque contemporaine, disparaîtraient presque et leurs proportions ne représenteraient qu'un peu moins de 1% dans le futur. Une nuit sur deux paraîtrait chaude, relativement aux critères de notre époque, tandis que 2 journées sur 3 paraîtront chaudes selon les mêmes critères.



4.3.4 Précipitations

4.3.4.1 Simulations ARPEGE étiré

Les cartes des anomalies de précipitations sur la zone des Mascareignes et de Madagascar (Figure 54) montrent l'assèchement de part et d'autres de 21°S pendant les mois d'hiver. Cette zone est la plus étendue et la plus intense pour le scénario A2, le plus pessimiste. Seule cette saison montre des caractéristiques convergentes pour les trois scénarios.

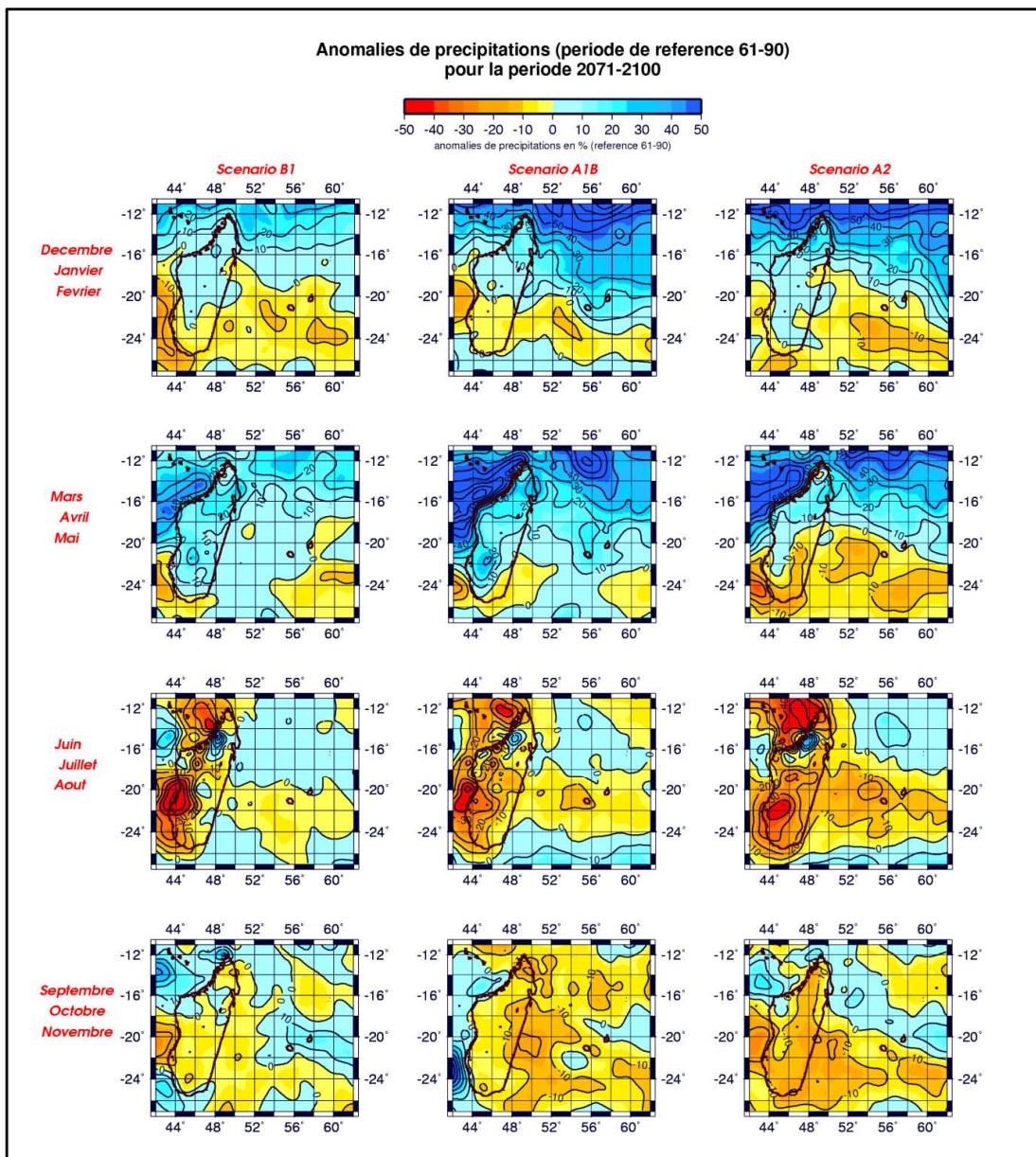
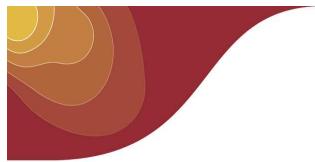


Figure 54 : Anomalies des précipitations, simulées par le modèle Arpège étiré, par saison et par scénario pour la période 2071-2100.



4.3.4.2 Simulation ARPEGE 50×50 km² et indices climatiques

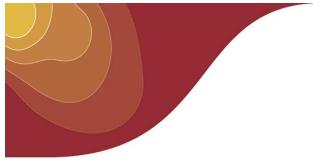
Comme pour les températures, la version du modèle ARPEGE à la résolution de 50×50 km² permet d'appliquer la méthode quantile-quantile sur 7 postes de l'île déjà étudiés : Gillot, Beauvallon, la Plaine des Palmistes, la Plaine des Cafres, Cilaos, Pierrefonds-Cirad et Grand-Galet. Leur répartition géographique sur l'île prend en compte la variabilité du climat réunionnais entre les hauts et les bas mais aussi entre la côte au vent et la côte sous le vent. Les Tableau 14 et Tableau 15 montrent l'évolution des valeurs des indices climatiques, déjà vu au paragraphe 2.2.3.4, pour la période future 2041-2070 par rapport à la période contemporaine 1971-2000. Les valeurs sur un fond orangé traduisent un assèchement ; les valeurs sur un fond bleuté, une augmentation des précipitations.

La majorité des indices climatiques vont dans le sens d'un assèchement pour la période 2041-2070. Le cumul annuel moyen des précipitations (cumul) est en baisse pour les 7 postes étudiés. Le nombre maximal annuel moyen de jours secs consécutifs (cdd) est en hausse pour ces mêmes 7 postes. L'augmentation de cet indice laisse à penser que les périodes de sécheresse seront plus longues dans le climat futur. Notons que les augmentations les plus importantes de cet indice concernent des postes peu arrosés pendant la saison sèche (Pierrefonds-Cirad : +24,1 jours, Cilaos : +20,2 jours, et dans une moindre mesure Gillot : +13 jours). A contrario, les postes situés sur la façade Est, c'est à dire la moitié de l'île la plus humide, connaîtront une hausse du nombre maximal de jours consécutifs de pluies (cwd). C'est le cas de la Plaine des Palmistes (+3,3 jours) et de Beauvallon (+1,9 jours).

Poste	Commune	Indice →	cdd	cwd	rr1	r10	r30	r50	r100
Gillot (8 m)	Sainte-Marie	Moyenne 2041-2070	35,5	9,8	109,4	35,5	13,0	5,5	1,5
		Anomalie/1971-2000	+13,0	+0,2	-7,1	-1,8	-1,0	-2,2	-0,6
Beauvallon (16 m)	Saint-Benoît	Moyenne 2041-2070	19,7	18,3	176,4	72,0	27,8	14,2	3,7
		Anomalie/1971-2000	+4,1	+1,9	-7,9	-5,1	0,0	-0,8	-1,7
Pierrefonds-Cirad (61 m)	Saint-Pierre	Moyenne 2041-2070	71,4	5,0	48,4	17,7	4,2	1,8	0,7
		Anomalie/1971-2000	+24,1	-0,5	-3,3	-2,6	-1,9	-1,2	+0,1
Gd-Galet (505 m)	Saint-Joseph	Moyenne 2041-2070	28,3	10,0	121,3	50,2	23,5	12,5	5,1
		Anomalie/1971-2000	+5,9	-0,2	-5,6	-4,6	-3,5	-3,8	-2,2
Pl. Palmistes (1032 m)	Pl. des Palmistes	Moyenne 2041-2070	17,6	20,1	180,8	73,1	31,5	19,8	7,0
		Anomalie/1971-2000	+4,4	+3,3	-18,6	-6,5	-0,8	-0,4	-2,4
Cilaos (1197 m)	Cilaos	Moyenne 2041-2070	48,4	8,0	87,7	30,7	10,2	5,1	2,7
		Anomalie/1971-2000	+20,2	-0,3	-6,5	-2,7	-1,5	-2,2	-0,9
Pl. Cafres (1560 m)	Le Tampon	Moyenne 2041-2070	29,3	11,2	120,4	35,4	12,1	5,4	2,7
		Anomalie/1971-2000	+9,4	+1,5	-8,0	-0,4	-1,2	-2,3	-1,0

Tableau 14 : indices climatiques pour la période 2041-2070 (le nom du poste est suivi de son altitude)
(les indices sont calculés en nombre de jours annuel)

Les nombres de jours de précipitations supérieures ou égales à 1mm, 10mm, 30mm, 50mm, 100mm sont tous, à une seule exception près, en baisse pour les 7 postes. En revanche, les cumuls maximum sur 1, 3, 5, 10 jours (respectivement r1d, r3d, r5d, r10d) à l'exception notable de la Plaine des Palmistes et surtout de Grand-Galet sont en hausse. Cette remarque indiquerait que les contributions des précipitations extrêmes seront donc plus



importantes dans le cumul annuel pour ces 5 postes dans le climat futur. Effectivement, si l'on étudie la fraction des précipitations supérieures au centile supérieur (r99t), soit la contribution des 3 ou 4 jours les plus pluvieux de chaque année, on s'aperçoit que la fraction est en hausse, à l'exception du seul poste de Grand-Galet. On note également que cette hausse est la plus élevée pour les postes situés sur la façade sèche (Pierrefonds-Cirad : +4,8%, Cilaos : +4,3%).

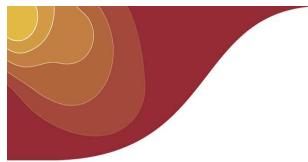
Poste	Commune	Indice →	r1d	r3d	r5d	r10d	cumul	sdii	r95t	r99t
Gillot (8 m)	Sainte-Marie	Moyenne 2041-2070	187,1	310,2	359,3	420,5	1558,0	14,4	29,3%	13,3%
		Anomalie/1971-2000	+11,2	+11,8	+11,0	-14,9	-108,0	+0,1	-4,6%	+2,4%
Beauvallon (16 m)	Saint-Benoît	Moyenne 2041-2070	243,6	426,1	503,9	606,9	3177,3	18,0	28,8%	11,4%
		Anomalie/1971-2000	+17,6	+28,6	+39,0	-15,7	-190,0	-0,4	-3,9%	+0,2%
Pierrefonds-Cirad (61 m)	Saint-Pierre	Moyenne 2041-2070	104,2	164,4	185,9	207,3	644,9	13,4	21,4%	12,6%
		Anomalie/1971-2000	+6,9	+18,5	+21,1	+11,1	-80,7	-0,6	-4,3%	+4,8%
Gd-Galet (505 m)	Saint-Joseph	Moyenne 2041-2070	319,2	469,4	566,4	656,3	2750,0	22,7	32,2%	13,8%
		Anomalie/1971-2000	-36,9	-110,6	-86,5	-105,5	-413,6	-2,1	-5,6%	-0,6%
Pl. Palmistes (1032 m)	Pl. des Palmistes	Moyenne 2041-2070	459,4	792,6	925,9	1079,2	4237,8	22,7	37,9%	15,9%
		Anomalie/1971-2000	+25,2	-19,1	-44,2	-113,8	-376,4	-0,3	-3,9%	+0,1%
Cilaos (1197 m)	Cilaos	Moyenne 2041-2070	432,3	679,9	756,3	835,5	1854,1	21,6	39,5%	21,2%
		Anomalie/1971-2000	+66,1	+114,1	+127,9	+92,8	-27,9	+1,9	-3,5%	+4,3%
Pl. Cafres (1560 m)	Le Tampon	Moyenne 2041-2070	439,6	706,4	786,1	878,7	2080,7	17,0	38,9%	21,1%
		Anomalie/1971-2000	+66,6	+114,2	+125,9	+111,4	-15,4	+0,5	-7,4%	+1,2%

Tableau 15 : indices climatiques pour la période 2041-2070 (le nom du poste est suivi de son altitude)
(les indices sont calculés en mm ou en pourcentage)

Les anomalies de précipitations des 3 scénarios, prévues par le modèle ARPEGE pour la période 2071-2100, sont convergentes pour la seule saison d'hiver. Le modèle indique pour cette période de l'année une baisse des précipitations qui varie de -5 à -18% (par rapport au climat actuel) selon les scénarios.

La simulation ARPEGE 50x50 km², forcée selon les hypothèses du scénario A2 (le plus pessimiste) pour la période 2041-2070 montre une baisse du cumul annuel de précipitations sur l'ensemble de l'île. Les périodes sèches seraient plus longues, particulièrement sur la façade sous le vent, aggravant ainsi les épisodes de sécheresse sur une zone déjà peu arrosée pendant la saison sèche.

Les précipitations faibles à modérées seraient plus rares mais les épisodes pluvieux extrêmes, un peu plus prolifiques en quantité.



Références bibliographiques

- Alix, L. (2007). Les variations actuelles du niveau de la mer : observations et causes climatiques. *La Météorologie, 8ième série 59*, pp. 13-21.
- André, J., Royer, J., & Chauvin, F. (2008). Les cyclones tropicaux et le changement climatique. *C.R. Géoscience 340*.
- Déqué, M. (2007). Frequency of precipitation and temperature extremes over France in an anthropogenic scenario: model results and statistical correction according to observed values. *Glob. Planet. Change 57*, pp. 16-26.
- Dufresne, J.-L., Salas y Melia, D., Denvil, S., Tyteca, S., Arzel, O., Bony, S., et al. (2006). simulation du climat récent et futur par les modèles du CNRM et de l'IPSL. *La Météorologie, 8ième série 55*, pp. 45-59.
- GIEC. (2007). *Bilan 2007 des changements climatiques. Contribution des Groupes de travail I, II et III au quatrième Rapport d'évaluation du Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat [Équipe de rédaction principale, Pachauri, R.K. et Reisinger, A. (publié sous la direction de ~)].* GIEC, Genève, Suisse, ..., 103 pages.
- IPCC. (2001). *Climate Change 2001 : The Scientific Basis. Contribution of working group I to the Third Assessment Report of the intergovernmental Panel on Climate Change.* Cambridge, UK, New York, US, Cambridge University Press.
- IPCC. (2007). *Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Solomon, S., D. Qin, M. Manning, Z. Chen, M. Marquis, K.B. Averyt, M. Tignor and H.L. Miller (eds.)].* Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 996 pp.
- Kossin, J., Knapp, K., Vimont, D., Murnane, R., & Harper, B. (2007). A globally consistent reanalysis of hurricane variability and trends. The American Geophysical Union.
- Kuleshov, Y., Chane Ming, F., Qi, L., Chouaibou, I., Hoareau, C., & Roux, F. (2009). Tropical cyclone genesis in the Southern Hemisphere and its relationship with the ENSO. Copernicus Publications on behalf of the European Geosciences Union.
- Lemée, Pierre-Yves. (1995). *Les cyclones tropicaux.* Centre des Cyclones Tropicaux de La Réunion - Sainte-Clotilde, La Réunion, France: Ecole Nationale de la Météorologie.
- McSweeney, C., New, M., & Lizcano, G. (2007). *UNDP Climate Change Country Profiles.* Retrieved from School of Geography and The Environment: <http://country-profiles.geog.ox.ac.uk>
- Mestre, O. (2000). *Méthodes statistiques pour l'homogénéisation de longues séries climatiques, thèse de doctorat de l'Université Paul Sabatier (Toulouse III).* Université Paul Sabatier (Toulouse III).
- Morville, Y. (1989). *Une approche des houles australes à la Pointe des Galets, concours professionnel d'accès au grade de chef technicien de la météorologie.* Saint-Denis de La Réunion: service météorologique régional de La Réunion.
- Quetelard, H., Bessemoulin, P., Cerveny, R., Peterson, T., Burton, A., & Boodhoo, Y. (2009). World-record rainfall during tropical cyclone Gamede. *Bull. Amer. Met. Soc., Volume 80, Issue 5 (May 2009)*, pp. 603-607.
- Troadec, R. (1991). *Courantologie et sédimentologie des baies de St-Paul et de la Possession à l'île de La Réunion, thèse de doctorat de l'Université d'Aix-Marseille II.* Université d'Aix-Marseille II.