



MINISTÈRE DE L'ÉCOLOGIE, DU DÉVELOPPEMENT DURABLE
ET DE L'ÉNERGIE



Hydrologie de surface

B3 – Hydrologie DOM

Octobre 2012



Présent
pour
l'avenir



Le rapport final du lot Hydrologie de Surface du projet Explore 2070 comporte les documents suivants.

A - Synthèse des travaux

- A0 Note de synthèse de 4 pages
 - A1 Rapport de synthèse
 - A2 Graphiques et Cartes de présentation des résultats
-

B - Rapports thématiques détaillés

- B1 Rapport détaillé Climatologie Métropole
- B2a Rapport détaillé Hydrologie Métropole
- B2b Rapport détaillé Hydrologie Métropole - Zooms

B3 Rapport détaillé DOM

- B4 Rapport Thermie
- B5 Synthèse Bibliographique

Le présent document constitue le rapport surligné en gris.

Il présente :

- ▶ les méthodes mises en œuvre pour les projections climatiques dans les départements d'Outre-mer (Guadeloupe, Martinique, Guyane, île de la Réunion) à l'horizon 2040-2070 ;
- ▶ l'analyse des résultats en termes d'évolutions climatiques possibles dans les départements d'Outre-mer ;
- ▶ les méthodes mises en œuvre pour la modélisation hydrologique dans les départements d'Outre-mer.

B3 – RAPPORT DÉTAILLÉ DOM

1. RESUME DE SYNTHESE DU PRESENT RAPPORT	1
1.1 Rappel de la démarche générale	1
1.1.1 Méthodologie générale	1
1.1.2 Spécificités des départements d'Outre-mer	1
1.2 Principaux résultats	3
1.2.1 Climatologie	3
1.2.2 Hydrologie	3
2. INTRODUCTION GENERALE	4
2.1 Objectifs	4
2.2 Démarche generale	4
2.3 Méthodologie	5
2.4 Points spécifiques pour les départements d'outre mer	9
2.5 Contenu du rapport	10
3. TERRITOIRES ETUDIES	11
4. CARACTERISATION DU CLIMAT ACTUEL DANS LES DOM	16
4.1 Les séries homogénéisées	16
4.2 Description plus détaillée du climat present	17
4.2.1 Les Antilles	17
4.2.2 La Guyane	21
4.2.3 L'île de La Réunion	25
4.3 les données d'observation météorologiques mises à disposition dans le cadre du projet Explore 2070	32
5. CARACTERISATION DES EVOLUTIONS CLIMATIQUES POSSIBLES A L'HORIZON 2050-2070 DANS LES DOM.....	36
5.1 Méthodologie	36
5.1.1 Scénario d'émission de gaz à effet de serre	37
5.1.2 Modélisation climatique globale	39
5.1.3 Descente d'échelle	41
5.1.4 Prise en compte des incertitudes	45
5.2 Synthèse des données mises à disposition pour le projet	46
5.3 Analyse des évolutions climatiques possibles a l'horizon 2040-2070	49
5.3.1 Formalisme de présentation des résultats	49

5.3.2 Les Antilles (par défaut : les points de Trinidad et Porto Rico)	51
5.3.3 La Guyane	56
5.3.4 L'île de La Réunion	60
6. SIMULATIONS DE DEBITS DANS LES DOM.....	63
6.1 Démarche générale	63
6.2 Synthèse des données climatiques disponibles	64
6.2.1 Données d'observations météorologiques	64
6.2.2 Données de simulations climatiques utilisées dans les simulations hydrologiques	64
6.3 Données hydrologiques utilisées et sélection des bassins versants	65
6.3.1 L'île de la Réunion	65
6.3.2 La Martinique	67
6.3.3 La Guadeloupe	68
6.3.4 La Guyane	69
6.4 Constitution des bases de données	70
6.4.1 Pour les observations	70
6.4.2 Pour les simulations	71
6.5 Modélisation hydrologique	73
6.5.1 Le modèle hydrologique GR4J	73
6.5.2 Approche multi-paramétrages en zones cycloniques	77
6.5.3 Méthodologie	79
6.5.4 Synthèse des méthodologies retenues pour chaque DOM	84
6.6 Evaluation de la fiabilité du modèle hydrologique GR4J dans les DOM	85
6.6.1 La Guyane	85
6.6.2 La Martinique	86
6.6.3 La Guadeloupe	86
6.6.4 La Réunion	87
6.7 Calcul d'indicateurs et analyse statistique	88
6.8 Présentation des résultats	97
6.9 Analyse des évolutions hydrologiques futures possibles	97
7. L'ACTIVITE CYCLONIQUE : PEUT-ON ANTICIPER DES EVOLUTIONS ?	98
7.1 Rétrospective	98
7.1.1 Les Antilles (source www.meteo.gp)	98
7.1.2 L'île de la Réunion	102
7.2 Etat des lieux des connaissances sur l'activité cyclonique globale et ses conséquences sur les départements d'outremer (F. Chauvin, CNRM-GAME, GMGEC/VDR)	105
7.2.1 L'activité cyclonique et la difficulté à simuler sa possible évolution liée au changement climatique	105
7.2.2 Rétrospective : incertitude de la détection des tendances en termes d'activités cycloniques	107
7.2.3 Cyclones tropicaux et réchauffement climatique	108

8. ACTIONS ET ETUDES EN COURS A METEO FRANCE DANS LES DOM SUR LE CHANGEMENT CLIMATIQUE	109
8.1 Antilles et Guyane	109
8.2 Île de la Réunion	110
9. CONCLUSION GENERALE.....	111
10. REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES ET SOURCES	112
10.1 Climatologie	112
10.2 Hydrologie de surface	113
ANNEXES.....	115
Annexe A : Détail des données d'observations météorologiques fournies	117
Annexe B : Présentation des résultats du rapport « Etude pour l'identification des évolutions des changements climatiques à La Réunion » rédigé par météo-France pour le conseil régional de l'île de la Réunion	125
Annexe C : Reconstitution des chroniques climatiques à l'échelle des bassins versant	141

TABLE DES ILLUSTRATIONS

FIGURES :

Figure 1 : Principe de la démarche du lot hydrologie de surface pour la simulation des écoulements	4
Figure 2 : Vue globale de la démarche adoptée par le lot Hydrologie de Surface	5
Figure 3 : Schéma de la démarche générale adoptée par le lot Hydrologie de Surface.....	8
Figure 4 : Etat des ressources en eau superficielles à la Réunion, <i>Office de l'Eau de la Réunion, 2010</i>	11
Figure 5 : Les principaux cours d'eau de la Martinique, <i>Observatoire de l'eau de la Martinique, 2009</i>	13
Figure 6 : Présentation du district hydrographique de la Guadeloupe, <i>Etat des lieux, Directive Cadre, Comité de Bassin de la Guadeloupe, 2005</i>	14
Figure 7 : Carte générale de la Guyane, <i>SDAGE 2010-2015, Comité de Bassin de Guyane</i>	15
Figure 8 : Evolution de la température moyenne à la Martinique sur la période 1965-2009.....	18
Figure 9 : Moyenne annuelle de température minimale quotidienne en Martinique entre 1965 et 2009.....	19
Figure 10 : Moyenne annuelle de température maximale quotidienne en Martinique entre 1965 et 2009.....	19
Figure 11 : Moyenne des précipitations à la station du Lamentin sur la période 1962-2005	19
Figure 12 : Température moyenne annuelle en Martinique- Normales [1961-1990].....	20
Figure 13 : Précipitations annuelles moyennes en Martinique- Normales [1961_1990]	20
Figure 14 : Précipitations moyennes annuelles sur la Guadeloupe – 1981_2000	21
Figure 15 : Evolution de la température moyenne en Guyane sur la période 1955-2009.....	22
Figure 16 : Moyenne annuelle de la température minimale quotidienne en Guyane entre 1965 et 2009.....	23
Figure 17 : Moyenne annuelle de la température maximale quotidienne en Guyane entre 1965 et 2009.....	23
Figure 18 : Précipitations annuelles moyennes en Guyane- Normales [1971-2000].....	24
Figure 19 : Moyenne mensuelle des précipitations entre 1967 et 2004.....	24
Figure 20: Températures moyennes annuelles de La Réunion et stations étudiées suivies de la commune et de leur altitude.....	26
Figure 21 : Evolution de la température moyenne à La Réunion (moyenne des 6 postes homogénéisés) et dans le monde de 1969 à 2008.....	26
Figure 22 : Evolution des températures maximales quotidiennes en moyennes annuelles de l'île de La Réunion par station sur la période 1969-2008.	28
Figure 23 : Evolution des températures minimales quotidiennes en moyennes annuelles de l'île de La Réunion par station sur la période 1969-2008.	28
Figure 24 : Pluviométrie moyenne annuelle en mm sur l'île de La Réunion sur la période 1971-2000 et stations étudiées suivies de leur altitude.....	30
Figure 25 : Evolution des précipitations annuelles sur l'île de La Réunion sur la période 1969-2008	31
Figure 26: Position des stations météorologiques fournies pour le calage du modèle hydrologique sur la départements d'Outre-mer	34
Figure 27 : Vue globale de la chaîne de modélisation climatique	36
Figure 28 : Scénarios d'émission de gaz à effet de serre de l'AR4	38
Figure 29 : Evolutions des concentrations de CO2 pour les différents scenarii utilisés par le GIEC (source : http://www.ipcc-data.org).....	39
Figure 30 : Processus et maillage des modèles de climat.....	39
Figure 31 : La problématique de la désagrégation. Source Climate Research Unit, University of East Anglia	42
Figure 32 : Simulation ARPEGE climat pôle Etats-Unis	43

Figure 33 : Diagramme quantile-quantile pour les températures minimales à Paris en hiver (°C). Les quantiles du modèle sont en abscisse et ceux de l'observation sont en ordonnée	44
Figure 34 : Exemple d'évolution d'une distribution (en vert pour le climat présent, en rouge pour le climat futur, en pointillé pour les valeurs corrigées par la méthode quantile-quantile et en trait continu pour les sorties brutes du modèle)	45
Figure 35: Points de grille des simulations pour les départements d'Outre-mer	48
Figure 36 : Exemple de restitution de résultat de modèle.....	50
Figure 37 : Rapport de valeur moyenne annuelle du cumul de précipitations pour la Guyane entre simulations 2040-2070 et référence 1961-1990-A1B ou 1979-2003-A2. Intervalle de confiance et valeurs extrêmes. Pour ARPEGE climat V4 globe 50km, scénario A1B et A2. En % par rapport à la valeur de référence.	50
Figure 38 : Ecarts de valeur moyenne annuelle de la température maximale quotidienne simulée pour la Guyane entre simulations 2040-2070 et référence 1961-1990-A1B ou 1979-2003-A2. Intervalle de confiance et valeurs extrêmes. Pour ARPEGE climat V4 globe 50km, scénario A1B et A2. En°C	57
Figure 39 : Ecarts de valeur moyenne annuelle de la température minimale quotidienne simulée pour la Guyane entre simulations 2040-2070 et référence 1961-1990-A1B ou 1979-2003-A2. Intervalle de confiance et valeurs extrêmes.. Pour ARPEGE climat V4 globe 50km, scénario A1B et A2. En °C	58
Figure 40 : Rapport de valeur moyenne annuelle du cumul de précipitations pour la Guyane entre simulations 2040-2070 et référence 1961-1990-A1B ou 1979-2003-A2. Intervalle de confiance et valeurs extrêmes. Pour ARPEGE climat V4.6 globe 50km, scénario A1B et A2. En % par rapport à la valeur de référence.	59
Figure 41 : Ecarts de valeur moyenne annuelle de la température maximale quotidienne simulée pour le point de l'île de la Réunion entre simulations 2040-2070 et référence 1961-1990-A1B ou 1979-2003-A2. Intervalle de confiance et valeurs extrêmes. Pour ARPEGE climat V4 globe 50km, scénario A1B et A2. En°C.	60
Figure 42 : Ecarts de valeur moyenne annuelle de la température minimale quotidienne simulée pour le point de l'île de la Réunion entre simulations 2040-2070 et référence 1961-1990-A1B ou 1979-2003-A2. Intervalle de confiance et valeurs extrêmes. Pour ARPEGE climat V4 globe 50km, scénario A1B et A2. En°C.	61
Figure 43 : Rapport du cumul de précipitations moyen annuel pour le point de l'île de la Réunion entre simulations 2040-2070 et référence 1961-1990-A1B ou 1979-2003-A2. Intervalle de confiance et valeurs extrêmes. Pour ARPEGE climat V4 globe 50km, scénario A1B et A2. En % par rapport à la moyenne de référence	62
Figure 44 : Points de calculs et bassins versants associés pour la Réunion.....	66
Figure 45: Points de calculs et bassins versants associés pour la Martinique	67
Figure 46 : Points de calculs et bassins versants associés pour la Guadeloupe.....	68
Figure 47: Points de calculs et bassins versants associés pour la Guyane.....	70
Figure 48 : Structure schématique du modèle GR4J.....	74
Figure 49: Relation entre le critère de Nash et le critère borne C2M.....	77
Figure 50 : Modélisation hydrologique à la station « Le Verdoube à Tautaval », en période de hautes eaux, pour différents paramétrage du modèle GR4J	78
Figure 51 : Modélisation hydrologique à la station « Le Verdoube à Tautaval », en période de basses eaux, pour différents paramétrage du modèle GR4J	79
Figure 52 : allure de la fonction $\alpha(P)$, utilisée comme coefficient de pondération pour l'approche multi-paramétrage.....	80
Figure 53 : Performances moyennes sur l'ensemble des bassins versants des DOM pour les six modélisations	81
Figure 54 : Performances des modélisations « NRQ » et « MPluie » pour les bassins de la Réunion	83
Figure 55 : Performances des modélisations « NRQ » et « MPluie » pour les bassins de la Martinique.....	83
Figure 56 : Performances des modélisations « NRQ » et « MPluie » pour les bassins de la Martinique.....	83
Figure 57 : Performances en validation du modèle GR4J – Critère C2MLQ pour la Guyane.....	85
Figure 58 : Performances en validation du modèle GR4J – Critère C2MQ pour la Guyane.....	85
Figure 59 : Performances en validation du modèle GR4J – Critère C2MLQ pour la Martinique.....	86
Figure 60 : Performances en validation du modèle GR4J – Critère C2MQ pour la Martinique.....	86

Figure 61 : Performances en validation du modèle GR4J – Critère C2MLQ pour la Guadeloupe	86
Figure 62 : Performances en validation du modèle GR4J – Critère C2MQ pour la Guadeloupe	86
Figure 63 : Performances en validation du modèle GR4J – Critère C2MLQ pour la Réunion	87
Figure 64 : Performances en validation du modèle GR4J – Critère C2MQ pour la Réunion	87
Figure 65 : Exemple de fiche de synthèse.....	89
Figure 66 : Evolution des coefficients mensuels de débit - écoulement mensuel moyen qm divisé par l'écoulement annuel moyen qa (qa et qm en mm) - pour deux classes de régime définissant la transition entre régime nival (à gauche) et régime pluvial (à droite), extrait de Sauquet et al., 2008	96
Figure 67 : carte des occurrences cycloniques sur les Caraïbes de 1970 à 2009.....	100
Figure 68 : Nombre de cyclones observés en Atlantique et dans le monde de 1989 à 2009 (crédit : Météo-France).....	101
Figure 69 : Quadrant d'origine à 100, 300 et 600 km des tempêtes et cyclones passés à moins de 100 km de La Réunion (1967-2010)	104
Figure 70: position des stations météorologiques retenues pour le calage des modèles hydrologiques sur la Martinique.	117
Figure 71: position des stations météorologiques retenues pour le calage des modèles hydrologiques sur la Guadeloupe (Grande-Terre).....	120
Figure 72 : liste des stations météorologiques de Guadeloupe Basse-Terre (Météo-France et association APCG) utilisées pour le calage de modèles hydrologiques et disponibilités en températures et précipitations sur la période 1980-2010.	120
Figure 73: Position des stations météorologiques retenues pour le calage des modèles hydrologiques sur la Guadeloupe (Basse-Terre).....	122
Figure 74: Position des stations météorologiques retenues pour le calage des modèles hydrologiques sur la Guyane.....	124
Figure 75 : Evolution, par saison et par station de l'île de la Réunion des températures minimales (T_n , graphe de gauche) et maximales (T_x , graphe de droite).....	126
Figure 76 : Evolution et tendance significative des précipitations sur l'île de la Réunion sur la période 1969-2008 pour les mois de décembre, janvier et février.	129
Figure 77 : Evolution et tendance significative des précipitations sur l'île de la Réunion sur la période 1969-2008 pour les mois de mars, avril et mai.	129
Figure 78 : Evolution et tendance significative des précipitations sur l'île de la Réunion sur la période 1969-2008 pour les mois de juin, juillet et août.	130
Figure 79 : Evolution et tendance significative des précipitations sur l'île de la Réunion sur la période 1969-2008 pour septembre, octobre, novembre.	130
Figure 80 : Anomalies des températures minimales (à gauche) et maximales (à droite) de l'île de la Réunion par saison et par poste, pour la période 2041-2070 par rapport à la période de référence 1971-2000.....	135
Figure 81 : Polygones de Thiessen pour la désagrégation des observations pluviométriques à l'échelle des bassins versants de la Guadeloupe	141
Figure 82: Polygones de Thiessen pour la désagrégation d'observations pluviométriques à l'échelle des bassins versants de la Martinique	142
Figure 83 : Polygones de Thiessen pour la désagrégation des observations de températures à l'échelle des bassins versants de la Martinique	143
Figure 84 : Polygones de Thiessen pour la désagrégation des observations pluviométriques à l'échelle des bassins versants de la Réunion	144
Figure 85 : Polygones de Thiessen pour la désagrégation des observations de températures à l'échelle des bassins versants de la Réunion	144
Figure 86 : Polygones de Thiessen pour la désagrégation des observations météorologique à l'échelle des bassins versants de la Guyane	145
Figure 87 : Pluviométrie annuelle moyenne en Guyane. Source : IRD, ex-ORSTOM, Atlas des départements d'Outre mer, 1978.	146

TABLEAUX :

Tableau 1 : Evolution de la température moyenne sur l'île de La Réunion sur la période 1969-2008.....	27
Tableau 2 : Evolution des températures minimales et maximales quotidiennes moyennées par année sur l'île de La Réunion sur la période 1969-2008.....	27
Tableau 3 : Evolution et tendance significative des précipitations sur la période 1969-2008 sur l'île de La Réunion.....	31
Tableau 4 : Synthèse des données d'observations météorologiques fournies pour caractériser une période de référence sur les DOM.....	33
Tableau 5 : Moyenne des températures maximales quotidiennes par saison et en moyenne annuelle, pour la période de référence et écarts entre simulations 2040-2070 et référence. Intervalle de confiance pour la valeur moyenne, valeurs extrêmes entre parenthèses. Pour les simulations ARPEGE Climat V4.6-scénario A1B pour les points de Guyane. En °C.....	56
Tableau 6 : Moyenne des températures maximales quotidiennes par saison et en moyenne annuelle, pour la période de référence et écarts entre simulations 2040-2070 et référence. Intervalle de confiance pour la valeur moyenne, valeurs extrêmes entre parenthèses. Pour les simulations ARPEGE Climat V4.6-scénario A2 pour les points de Guyane. En °C.....	56
Tableau 7 : Moyenne des températures minimales quotidiennes par saison et en moyenne annuelle, pour la période de référence et écarts entre simulations 2040-2070 et référence. Intervalle de confiance pour la valeur moyenne, valeurs extrêmes entre parenthèses. Pour les simulations ARPEGE Climat V4.6-scénario A1B pour les points de Guyane. En °C.....	57
Tableau 8 : Moyenne des températures minimales quotidiennes par saison et en moyenne annuelle, pour la période de référence et écarts entre simulations 2040-2070 et référence. Intervalle de confiance pour la valeur moyenne, valeurs extrêmes entre parenthèses. Pour les simulations ARPEGE Climat V4.6-scénario A2 pour les points de Guyane. En °C.....	58
Tableau 9 : Cumul de précipitations par saison et par année, en mm, pour la période de référence et rapport entre simulations 2040-2070 et référence, en pourcentage. Intervalle de confiance pour la valeur moyenne, valeurs extrêmes entre parenthèses. Pour les simulations ARPEGE Climat V4.6-scénario A1B pour les points de Guyane.....	58
Tableau 10 : Cumul de précipitations par saison et par année, en mm, pour la période de référence et rapport entre simulations 2040-2070 et référence, en pourcentage. Intervalle de confiance pour la valeur moyenne, valeurs extrêmes entre parenthèses. Pour les simulations ARPEGE Climat V4.6-scénario A2 pour les points de Guyane.....	59
Tableau 11 : Moyenne des températures maximales quotidiennes par saison et en moyenne annuelle, pour la période de référence et écarts entre simulations 2040-2070 et référence. Intervalle de confiance pour la valeur moyenne, valeurs extrêmes entre parenthèses. Pour les simulations ARPEGE Climat V4.6-scénario A1B et A2 pour le point de l'île de la Réunion. En °C.....	60
Tableau 12 : Moyenne des températures minimales quotidiennes par saison et en moyenne annuelle, pour la période de référence et écarts entre simulations 2040-2070 et référence. Intervalle de confiance pour la valeur moyenne, valeurs extrêmes entre parenthèses. Pour les simulations ARPEGE Climat V4.6-scénario A1B et A2 pour le point de l'île de la Réunion. En °C.....	61
Tableau 13 : Cumul de précipitations par saison et par année, en mm, pour la période de référence et rapport entre simulations 2040-2070 et référence, en pourcentage. Intervalle de confiance pour la valeur moyenne, valeurs extrêmes entre parenthèses. Pour les simulations ARPEGE Climat V4.6-scénario A1B et A2 pour le point de l'île de la Réunion.....	61
Tableau 14 : Synthèse des données d'observations fournies pour le calage des modèles hydrologiques sur les départements d'Outre-mer.....	64
Tableau 15 : Synthèse des données de simulations fournies pour les départements d'Outre-mer.....	64
Tableau 16 : Points de calculs et bassins versants associés pour la Réunion.....	66
Tableau 17 : Points de calculs choisis pour la Martinique.....	67
Tableau 18 : Points de calculs choisis pour la Guadeloupe.....	68
Tableau 19 : Points de calculs choisis pour la Guyane.....	69
Tableau 20 : Anomalies (°C) calculées pour les points de simulations climatiques de Porto Rico et Trinidad.....	73
Tableau 21 : Bassins versants étudiés à la Réunion.....	87

Tableau 22 : Description des indicateurs produits pour chaque bassin versant et figurant dans la fiche de synthèse.....	90
Tableau 23 : Cyclones à moins de 300 km de La Réunion (1967-2010).....	102
Tableau 24 : Tempêtes et cyclones à moins de 100 km de La Réunion (1967-2010).....	103
Tableau 25 : liste des stations météorologiques de Martinique (Météo-France et Conseil Général de Martinique) utilisées pour le calage de modèles hydrologiques et disponibilités en températures et précipitations sur la période 1980-2010.	118
Tableau 26 : liste des stations météorologiques de Guadeloupe (Grande-Terre) (Météo-France et association APCG) utilisées pour le calage de modèles hydrologiques et disponibilités en températures et précipitations sur la période 1980-2010.	119
Tableau 27 : position des stations météorologiques retenues pour le calage des modèles pluie-débit sur la Guyane	123
Tableau 28 : Evolution par saison des températures minimales (Tn) et maximales (Tx) sur la période 1969-2008.....	125
Tableau 29 : Indices climatiques, par station de l'île de la Réunion, sur la période de référence 1971-2000 et leur évolution sur la période 1969-2008.....	127
Tableau 30 : Indices climatiques, par station de l'île de la Réunion, sur la période de référence 1971-2000 et leur évolution sur la période 1969-2008.....	128
Tableau 31 : Indices climatiques par poste de l'île de la Réunion sur la période de référence 1971-2000 et leur évolution sur la période 1969-2008 (les indices sont calculés en nombre de jours annuel).....	132
Tableau 32 : Indices climatiques par poste de l'île de la Réunion sur la période de référence 1971-2000 et leur évolution sur la période 1969-2008 (les indices sont calculés en mm ou en pourcentage).....	133
Tableau 33 : 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).....	134
Tableau 34 : Indices climatiques de Tn de l'île de la Réunion 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)	135
Tableau 35 : Indices climatiques des Tx l'île de la Réunion 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)	136
Tableau 36 : Indices climatiques de l'île de la Réunion pour la période 2041-2070 (le nom du poste est suivi de son altitude) (les indices sont calculés en nombre de jours annuel)	137
Tableau 37 : Indices climatiques de l'île de la Réunion pour la période 2041-2070 (le nom du poste est suivi de son altitude) (les indices sont calculés en mm ou en pourcentage).....	138

1. RESUME DE SYNTHESE DU PRESENT RAPPORT

La tâche principale attendue du Lot Hydrologie de surface est une évaluation de l'impact possible du changement climatique à l'horizon 2070 sur les ressources en eau superficielles en France métropolitaine et sur les départements d'Outre-mer.

Le présent rapport détaille les travaux réalisés sur les Départements d'Outre-mer, les résultats finaux étant présentés dans le rapport général A1.

Nous présenterons dans ce qui suit la démarche générale de modélisation proposée, la nature des résultats obtenus, ainsi que la façon dont les incertitudes ont été appréhendées. Une attention particulière devra être portée aux limites des travaux de modélisation effectués sur les DOM, confrontés à un manque critique de données hydroclimatiques comparativement à la métropole dans le cadre de cette étude.

1.1 RAPPEL DE LA DEMARCHE GENERALE

1.1.1 Méthodologie générale

Le Lot Hydrologie de surface a mis en place une chaîne de calcul au droit de **35 bassins versants dans les départements d'Outre-mer** (Guadeloupe, Guyane, Martinique et Réunion), afin d'établir des projections de débits à l'horizon 2070.

Cette chaîne de calcul est construite selon l'idée suivante :

- ▶ des modèles climatiques sont utilisés pour simuler le climat présent et le climat futur possible au droit des points de calcul, sous la forme de précipitations, températures et évapotranspiration potentielle (ETP) ;
- ▶ ces données de sorties des modèles climatiques sont utilisées en entrée des modèles hydrologiques afin de simuler les débits présents et futurs possibles aux exutoires des bassins, et donc d'appréhender les changements hydrologiques possibles en ces points.

Cette chaîne de calcul fait intervenir plusieurs modèles dans le but de cerner une part de l'incertitude inhérente à ce type d'approche. Cette chaîne de calcul produit et utilise des chroniques simulées de précipitation, évapotranspiration potentielle et débit au pas de temps journalier, sur deux périodes : 1962-1991 et 2046-2065. Les différences entre les résultats des simulations sur ces deux périodes permettent d'identifier des évolutions climatiques et hydrologiques possibles.

Les résultats ne constituent pas des prévisions mais des projections visant à donner une image des états possibles des cours d'eau français à l'horizon 2050-2070. Il sera essentiel de garder à l'esprit que de nombreuses incertitudes sont attachées à tous les résultats produits. Le lecteur est invité à la plus grande prudence quant à leur utilisation.

1.1.2 Spécificités des départements d'Outre-mer

La méthodologie mise en œuvre pour les modélisations hydrologiques dans les DOM (Guadeloupe, Guyane, Martinique et Réunion) ne peut suivre exactement celle présentée pour la Métropole. Les principales spécificités relatives aux DOM sont résumées ci-après.

DES DONNEES CLIMATIQUES ET HYDROLOGIQUES LIMITEES

La première spécificité à noter pour le travail concernant les DOM est une disponibilité des données moindre par rapport à la Métropole, que ce soit :

- ▶ les données hydrométriques ;
- ▶ les données d'observations météorologiques ;
- ▶ les données de simulations climatiques.

En effet, le nombre de stations hydrométriques existantes et présentant des séries de données journalières jugées fiables sur une période suffisamment longue est assez restreint pour les DOM.

Les données d'observations météorologiques posent aussi des difficultés pour les modélisations hydrologiques (peu de points d'observation, forte variabilité spatiale due à l'orographie et à l'existence d'épisodes cycloniques sur certains DOM).

Les données de simulations climatiques sont particulièrement pauvres. Les résolutions sont moins fines que pour la métropole, et les points de référence sont parfois situés en dehors des territoires concernés. Pour traiter les Antilles, au démarrage du projet, on disposait uniquement de simulations climatiques à Porto Rico et à Trinidad.

Ce manque de données a de nombreuses conséquences dans la démarche suivie par le Lot Hydrologie de surface :

- ▶ Le territoire d'étude et de modélisation hydrologique sera limité aux bassins versants pour lesquels on dispose de données hydrométriques et climatiques suffisantes. L'ensemble des bassins versants étudiés ne couvre donc qu'une partie limitée des territoires des DOM.
- ▶ La période de référence considérée doit être adaptée à la disponibilité des données météorologiques et hydrométriques. Cette période ne sera donc pas systématiquement l'intervalle 1961-1990 retenu pour la métropole, elle sera définie pour chaque DOM, avec le souci de rester aussi proche que possible de la période 1961-1990, tout en tenant compte des données disponibles.
- ▶ La qualité des calages du modèle hydrologique, et donc la fiabilité des modélisations hydrologiques, pourraient être très amoindries, notamment pour les bassins versants présentant des données météorologiques peu denses.
- ▶ Les incertitudes liées aux simulations hydrologiques sont accrues du fait de la pauvreté des simulations climatiques disponibles. En particulier, les résultats des modélisations hydrologiques pour les Antilles devront être reçus avec une très grande prudence.

MODELES CLIMATIQUES ET HYDROLOGIQUES UTILISES

Dans le cadre des travaux menés sur les territoires de Départements d'Outre-mer, l'approche multimodèle adoptée pour la Métropole ne peut pas être suivie en raison du manque de données disponibles :

- ▶ Un seul modèle hydrologique, le modèle GR4J d'Irstea, est utilisé ;
- ▶ Un seul modèle climatique, le modèle ARPEGE-Climat de Météo-France, est utilisé. Deux expériences de régionalisation climatiques ont été utilisées (EtireEU et Global 50km), fournissant ainsi deux jeux de données de simulations climatiques.

DES CONTEXTES CLIMATIQUES SPECIFIQUES

En outre, le contexte climatique des DOM constitue une spécificité essentielle à prendre en compte.

En particulier, la Martinique, la Guadeloupe et la Réunion présentent une activité cyclonique importante, avec des événements de crue très spécifiques dus aux très fortes pluies correspondantes (plusieurs centaines de mm en quelques heures). Les performances du modèle hydrologiques pourraient être amoindries en contexte cyclonique, du fait de la spécificité de ces événements délicats à mesurer (tant en pluie qu'en débit) et de la difficulté de les simuler au même titre que les conditions hydrologiques plus courantes. En conséquence, une approche « multi-paramétrages », intégrant la dynamique événementielle des précipitations, sera mise en place afin d'améliorer les performances des modélisations sur l'île de la Réunion.

1.2 PRINCIPAUX RESULTATS

1.2.1 Climatologie

Sur l'île de la Réunion, les simulations climatiques projettent une augmentation des températures supérieure à 1°C en moyenne.

Sur la Guyane, les simulations à l'horizon 2040-2070 projettent un réchauffement moyen supérieur à 1°C, mais l'amplitude de ce réchauffement diffère fortement selon les modèles utilisés.

Sur les îles de la Martinique et de la Guadeloupe, on ne dispose pas de simulation climatique à ce jour. Les simulations réalisées aux points de Porto-Rico et Trinidad projettent un réchauffement marqué pour les températures, supérieur à 1°C voire 2°C pour les températures minimales.

L'analyse des simulations sur tous ces territoires ne permet pas de dégager de tendance significative sur les précipitations.

1.2.2 Hydrologie

Les travaux de modélisation réalisés sur les DOM ont été affectés de fortes incertitudes, à la fois sur le niveau d'information climatique (peu de projections, pas de méthode de descente d'échelle fine, présence d'événements cycloniques très délicats à modéliser, etc.) et sur les performances de la modélisation hydrologiques, qui restent globalement assez modestes.

Compte tenu de ces incertitudes et des résultats obtenus, il semble délicat de dégager des tendances claires à l'échelle de chacun de ces DOM, à part peut-être pour l'île de la Réunion. Pour la Réunion, une tendance générale à la baisse des débits moyens annuels de l'ordre de 10% en moyenne est simulée, mais ce résultat est très incertain, et est issu d'un calcul mono-modèle. Il semble nécessaire de poursuivre ces travaux dans le cadre de projets de recherche spécifiques si l'on souhaite dégager des tendances avec plus de confiances sur ces régions. La modélisation du cycle de l'eau en contexte tropical reste en effet un domaine très complexe, et reste très largement perfectible (voir par ex. le récent numéro spécial de Journal of Hydrology (Vol. 462-463) à ce sujet).

2. INTRODUCTION GENERALE

2.1 OBJECTIFS

OBJECTIF PRINCIPAL

La tâche principale attendue du Lot Hydrologie de surface est une évaluation de l'impact possible du changement climatique à l'horizon 2070 sur les ressources en eau superficielles à l'échelle nationale.

Un bassin versant est un système ouvert qui transforme les signaux climatiques en un signal de sortie « écoulement » en intégrant son état de surface, les échanges avec les eaux souterraines, les prélèvements, les rejets et la gestion des ouvrages de transfert et/ou de régulation. La question clé posée au Lot Hydrologie de surface est : **Comment des changements sur les signaux d'entrée (précipitation et températures) liés au changement climatique peuvent ils impacter le signal de sortie « ruissellement » ?**

AUTRES OBJECTIFS

Le Lot Hydrologie de surface est également chargé de caractériser, à l'échelle nationale, les évolutions climatiques possibles à l'horizon 2070 (données d'entrée pour ce Lot) et de participer aux réflexions sur les mesures d'adaptation. Enfin, le Lot s'est vu confié la réalisation de modélisations de la température de l'eau pour estimer son évolution future probable.

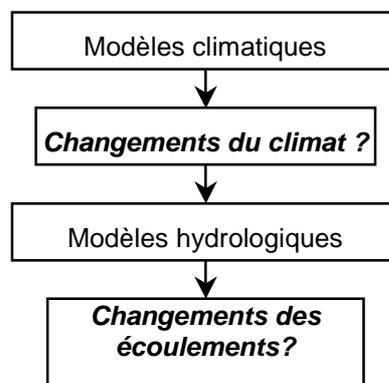
2.2 DEMARCHE GENERALE

Pour répondre à cette question, le lot met en place une chaîne de calcul au droit de **1522 bassins versants en Métropole et 35 bassins versants dans les départements d'Outre-mer**, afin d'établir de **projections de débits à l'horizon 2070**.

Cette chaîne de calcul est construite selon l'idée suivante :

- ▶ Des **modèles climatiques** permettent de simuler le climat présent et le climat futur au droit des points de calcul, sous la forme de signaux de précipitations, températures et évapotranspiration potentielle.
- ▶ Ces signaux sont utilisés en entrée des **modèles hydrologiques** afin de simuler les débits présents et futurs possibles aux exutoires des bassins, et donc **d'appréhender les changements hydrologiques possibles en ces points**.

Figure 1 : Principe de la démarche du lot hydrologie de surface pour la simulation des écoulements



Cette chaîne de calcul fait intervenir plusieurs modèles climatiques et hydrologiques afin de prendre en compte l'incertitude inhérente aux résultats.

Cette chaîne de calcul produit et utilise des chroniques simulées de précipitation, évapotranspiration et débit au pas de temps journalier, sur deux périodes, période de référence et période future (2046-2065 en métropole et variable pour les DOM selon la disponibilité des données). Les différences entre les simulations sur ces deux périodes permettent d'identifier des évolutions climatiques et hydrologiques possibles.

A l'issue de ces simulations, un travail d'analyse statistique de ces simulations fournit des éléments de réponse aux interrogations suivantes : **Quels pourront être les impacts du changement climatique sur la ressource en eau ? sur le risque de crues ?**

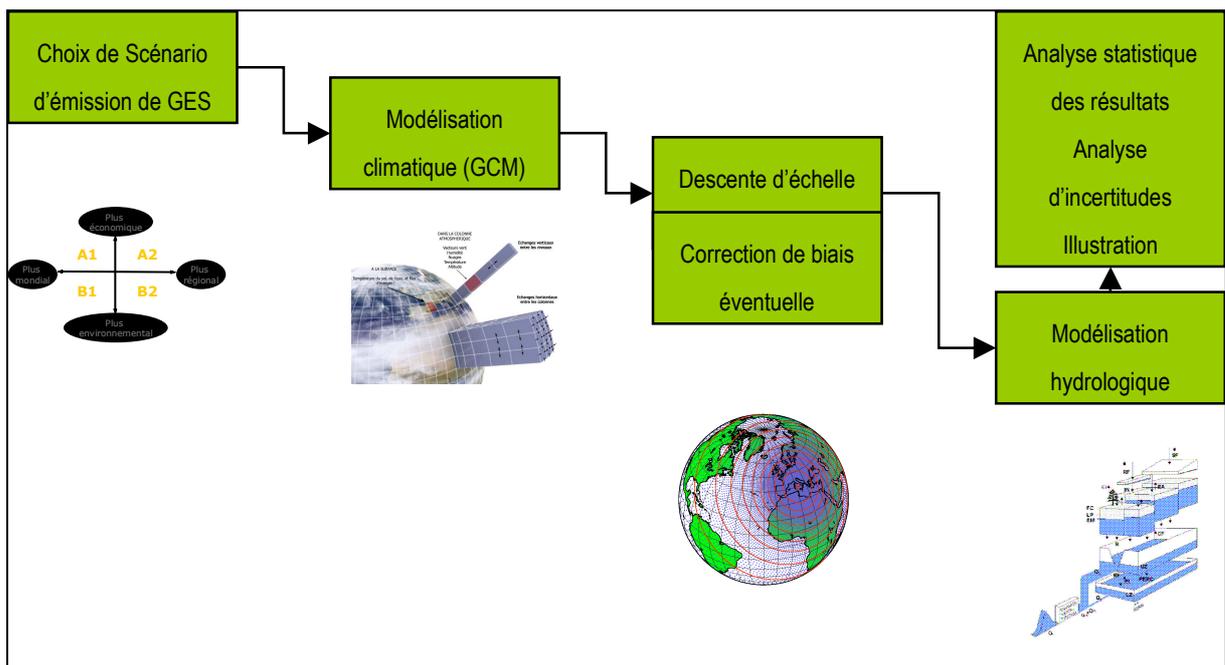
Il est essentiel de garder à l'esprit que de nombreuses incertitudes sont attachées à tous les résultats produits.

2.3 METHODOLOGIE

METHODOLOGIE GENERALE

La méthodologie générale adoptée par le lot hydrologie de Surface suit l'organisation schématisée ci-dessous.

Figure 2 : Vue globale de la démarche adoptée par le lot Hydrologie de Surface



A partir d'une hypothèse d'émission de gaz à effet de serre, on mobilise des modèles climatiques (modèles de circulation général GCM) qui produisent des simulations de pluie et température sur un large maillage (de l'ordre de 300km). Une méthode de descente d'échelle et un débiaisage de ces simulations permet l'obtention de simulation climatiques sur un maillage plus fin et donc, après agrégation, à l'échelle des bassins versants étudiés.

Ces données servent de données d'entrée aux modèles hydrologiques qui produisent des séries de débits journaliers à partir desquels on réalise des analyses statistiques. Chacune de ces étapes repose sur un ensemble d'hypothèses et de choix méthodologiques importants, qui induisent des incertitudes de différentes natures.

METHODOLOGIE POUR LES PROJECTIONS CLIMATIQUES

La démarche mise en œuvre pour la production de simulations climatiques exploitables pour l'étude d'impact sur l'hydrologie de surface mobilise une série d'étape que l'on peut résumer comme suit :

- ▶ **Etape 1 : Construction de scénario d'émission et/ou de concentration en gaz à effet de serre.** Ces scénarios sont la résultante de facteurs socio-économiques à considérer à l'échelle du globe : démographie, choix énergétique, croissance économique, politiques agricoles, ...
- ▶ **Etape 2 : Modélisation des changements climatiques avec des modèles globaux (planétaires) à large maille.** Ces modèles simulent le système global de circulation atmosphérique (avec ses interactions végétation-sols/océans/atmosphère) et l'impact des gaz à effet de serre sur ce système. Pour les départements d'Outre-mer, le modèle utilisé est le modèle Arpège-Climat de Météo-France.
- ▶ **Etape 3 : Descente d'échelle.** Il s'agit d'obtenir, à partir des données de sortie des modèles globaux, par diverses méthodes possibles, des résultats de projections climatiques à un pas d'espace plus fin, compatible avec les objets sur lesquels on va étudier les impacts du changement climatique (en l'occurrence ici des bassins versants).

A l'issue de cette démarche, la comparaison des simulations climatiques passées et futures permet de caractériser les évolutions climatiques possibles. Ces simulations climatiques sont ensuite injectées dans les modèles hydrologiques afin de réaliser les projections hydrologiques.

METHODOLOGIE POUR LES PROJECTIONS HYDROLOGIQUES

Pour cette étape, **le modèle hydrologique conceptuel GR4J de l'IRSTEA (ex Cemagref) a été mobilisé sur les départements d'Outre-mer.**

La mesure de l'impact se fait en comparant les sorties du modèle pour une période représentant le climat de référence (on injecte dans le modèle les précipitations et évapotranspirations de la période de référence) et une période de temps représentant un climat futur possible (on injecte dans le modèle les précipitations et évapotranspirations possibles de la période future). La comparaison est faite à partir des sorties des modèles pour différentes grandeurs statistiques calculées sur ces périodes respectives. Il s'agit par exemple du débit moyen (module), des débits moyens mensuels, de descripteurs d'étiages (par exemple QMNA5) ou de crue (par exemple QJX10), etc ...

La méthodologie pour les projections hydrologiques suit donc les 4 grandes étapes suivantes :

- ▶ **Etude de fiabilité des modèles** : Il s'agit d'évaluer la capacité des modèles à reproduire les débits passés. Cela fournira une première quantification de l'incertitude associée aux modèles hydrologiques.
- ▶ **Calage des modèles** : Des données d'observations météorologiques et hydrologiques passées permettent de caler ou ajuster les modèles hydrologiques. Pour le modèle GR4J, ce calage permet de paramétrer le modèle au droit de chaque bassin versant, paramétrage qui est ensuite réutilisé en temps futur.
- ▶ **Simulations des débits passés et futurs**: En chaque point d'étude, on effectue les simulations des débits passés et futurs, au pas de temps journalier.
- ▶ **Calcul d'indicateurs et analyse statistique** :
Afin de caractériser les évolutions hydrologiques entre la période de référence et la période future, un ensemble de descripteurs ont été calculés à partir des simulations de débits journaliers. Ils s'agit d'une quinzaine d'indicateurs qui rendent compte :

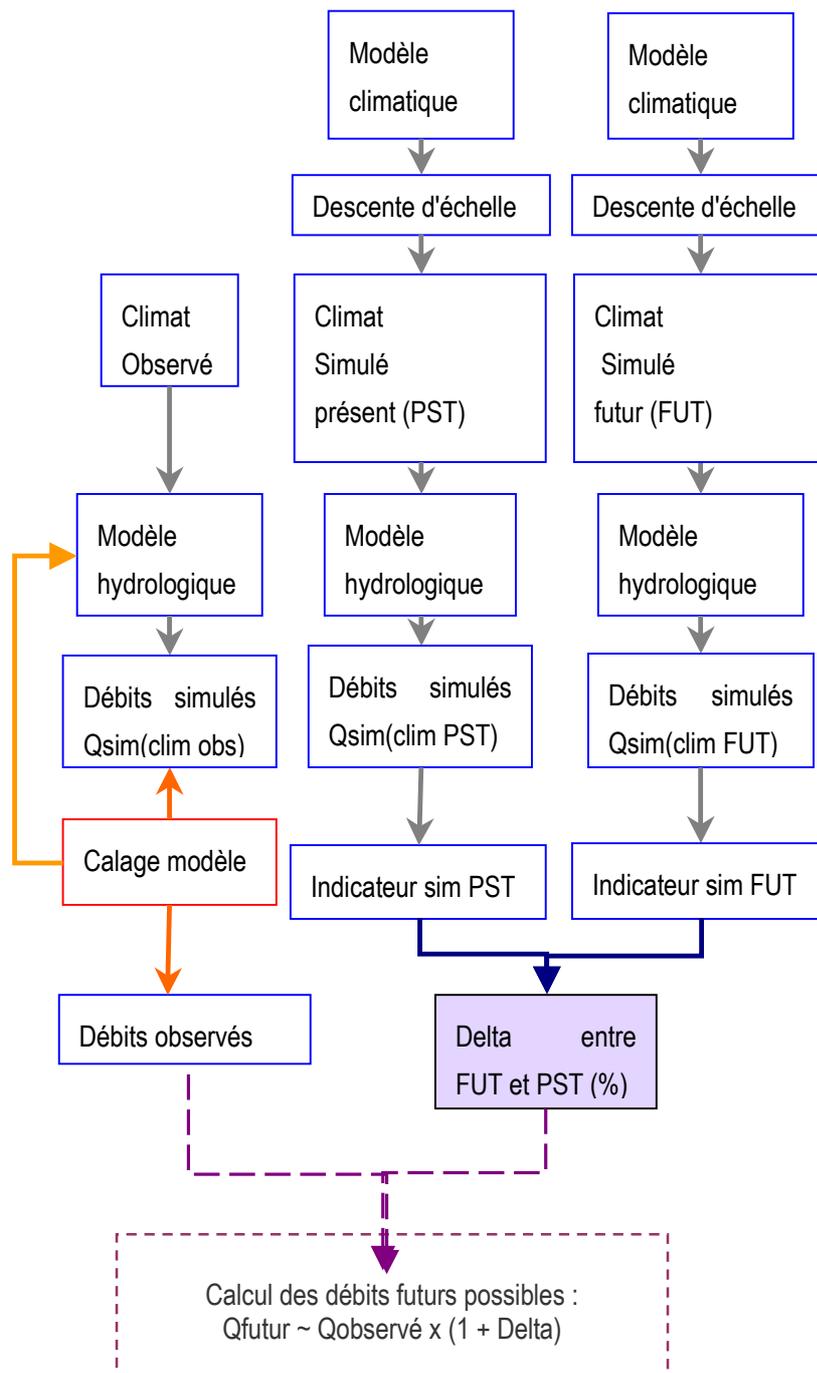
-
- des régimes hydrologiques (Module, débits mensuels, débit annuel quinquennal sec,...) ;
 - des étiages (QMNA5, VCN30, ...) ;
 - des crues (QJXA10, ...).

On calcule pour chaque indicateur, à chaque bassin versant, la variation entre période de référence et période future : ces deltas rendent compte des évolutions hydrologiques possibles.

Une analyse statistique des résultats permet de dégager les grandes tendances et les incertitudes associées.

Le schéma ci-dessous résume la démarche effectuée pour les projections hydrologiques en chaque point de calcul et pour chaque modèle.

Figure 3 : Schéma de la démarche générale adoptée par le lot Hydrologie de Surface



2.4 POINTS SPECIFIQUES POUR LES DEPARTEMENTS D'OUTRE MER

La méthodologie mise en œuvre pour les modélisations hydrologiques dans les DOM ne peut suivre exactement celle suivie pour la Métropole. Les principales spécificités relatives aux DOM sont résumées ci-après.

DES DONNEES HYDROLOGIQUES ET CLIMATIQUES LIMITEES

La première spécificité à noter pour le travail concernant les DOM est le manque de données disponibles, que ce soit :

- ▶ les données hydrométriques ;
- ▶ les données d'observations météorologiques ;
- ▶ les données de simulation climatiques.

En effet, le nombre de stations hydrométriques existantes et présentant des séries de données journalières fiables pour une période suffisamment longue est assez restreint pour les DOM.

Les données d'observations météorologiques posent aussi des difficultés qui seront détaillées plus bas, on peut noter cependant :

- ▶ le très faible nombre de pluviomètres en Guyane, compte tenu de l'étendue du territoire, ce qui cause une faible représentativité spatiale des données de pluies à l'échelle des bassins versants ;
- ▶ le manque de stations pluviométriques en altitude dans les Antilles.

Les données de simulations climatiques, présentées plus bas, sont particulièrement pauvres, comparativement aux données disponibles pour la Métropole. Les résolutions sont moins fines que pour la métropole, et les points de références sont parfois situés en dehors des territoires. En particulier, on ne dispose que de 4 points de simulations climatiques corrigées pour la Guyane. Pour traiter les Antilles, on dispose uniquement de simulations climatiques à Porto Rico et à Trinidad.

Ce manque de données a de nombreuses conséquences dans la démarche suivie par le lot hydrologie de surface :

- ▶ Le territoire d'étude et de modélisation hydrologique sera limité aux bassins versants pour lesquels on dispose de données hydrométriques et climatiques suffisantes. L'ensemble des bassins versants étudiés ne couvre donc qu'une partie limitée des territoires des DOM ;
- ▶ La période de référence considérée doit être adaptée à la disponibilité des données météorologiques et hydrométriques. Cette période ne sera donc pas systématiquement l'intervalle 1961-1990 retenu pour la métropole, elle sera re-définie pour chaque DOM, avec le souci de rester « proche » de la période 1961-1990, tout en tenant compte des données disponibles ;
- ▶ La qualité des calages du modèle hydrologique, et donc la fiabilité des modélisations hydrologiques, pourraient être très amoindries, notamment pour les bassins versants présentant des données météorologiques peu denses ;
- ▶ Les incertitudes liées aux simulations hydrologiques sont démultipliées du fait de la pauvreté des simulations climatiques disponibles. En particulier, **les résultats des modélisations hydrologiques pour les Antilles devront être reçus avec une très grande prudence.**

MODELES CLIMATIQUE ET HYDROLOGIQUE UTILISES

Dans le cadre des travaux menés sur les territoires de Départements d'Outre-mer, l'approche multi-modèles adoptée pour la Métropole ne peut pas être suivie en raison du manque de données disponibles :

- ▶ **un seul modèle hydrologique**, le modèle GR4J de l'Irstea, **est utilisé** ;

- **un seul modèle climatique**, le modèle ARPEGE-Climat, **est utilisé**. Deux expériences de régionalisation climatiques ont été utilisées (EtireEU et Global 50km), fournissant ainsi deux jeux de données de simulations climatiques.

DES CONTEXTES CLIMATIQUES SPECIFIQUES

En outre, le contexte climatique des DOM, présenté au paragraphe 4.2, constitue une spécificité essentielle à prendre en compte.

En particulier, **la Martinique, la Guadeloupe et la Réunion présentent une activité cyclonique importante, avec des événements de crue très spécifiques dus aux très fortes pluies correspondantes** (plusieurs centaines de mm en quelques heures). Les performances du modèle hydrologiques pourraient être amoindries en contexte cyclonique, du fait de la spécificité de ces événements et de la difficulté de les simuler au même titre que les conditions hydrologiques plus courantes. En conséquence, une approche « multi-paramétrages », intégrant la dynamique événementielle des précipitations, sera mise en place afin d'améliorer les performances des modélisations.

2.5 CONTENU DU RAPPORT

Le présent rapport est constitué de deux parties principales :

- **Les chapitres relatifs à la climatologie dans les départements d'Outre-mer.**

Trois grandes catégories de données sont produites et utilisées par le lot Hydrologie de Surface, afin de caractériser les évolutions climatiques probables dans les Départements d'Outre-mer et ses impacts en terme de changements hydrologiques possibles.

- D'une part des données d'observations météorologiques, permettent de caractériser le climat actuel dans les départements d'Outre-mer. Ces données permettent aussi de caler le modèle hydrologique et de caractériser l'état actuel de la ressource en eau au droit des bassins versants étudiés dans le projet. Les méthodes mises en œuvre pour produire ces données, et l'analyse du climat actuel qui en résulte est détaillée au chapitre 6 du présent rapport.
- D'autre part des données de simulations climatiques passées et futures. La comparaison de ces simulations permet de caractériser les évolutions climatiques possibles à l'horizon 2040-2070 dans les DOM. De plus ces données seront utilisées en entrée des modèles hydrologiques afin de produire des simulations de débits passés et futurs. Les méthodes mises en œuvre pour la production de ces simulations, et l'analyse des évolutions climatiques possibles qui en résulte sera présentée au chapitre 7. Ces résultats intégreront une évaluation de l'incertitude.

- **Le chapitre relatif à l'hydrologie dans les départements d'Outre-mer.**

Dans le chapitre 6 sont détaillées les méthodes mises en œuvre pour la simulation des débits dans les DOM, c'est-à-dire :

- la sélection de points de calcul,
- la constitution des bases de données hydroclimatiques,
- la modélisation par le modèle GR4J,
- l'évaluation de la fiabilité du modèle sur les bassins versants étudiés.

L'analyse des résultats en termes d'évolutions hydrologiques possibles est présentée dans le Rapport de Synthèse (A1).

3. TERRITOIRES ETUDIÉS

Les travaux du lot hydrologie de surface sur les DOM ont été menés pour les quatre départements que sont la Guyane française, la Réunion, la Guadeloupe et la Martinique. L'île de Mayotte, devenue DOM en mars 2011 n'a pas été incluse à l'étude.

Les éléments suivants sont majoritairement issus des SDAGE 2010-2015 de chaque département.

LA REUNION ¹

L'île de la Réunion est située dans le Sud-ouest de l'Océan Indien et fait partie de l'archipel des Mascareignes. D'une longueur maximale de 70 km, elle a une superficie de 2 512 km².

Relief et Climat

La Réunion est une île volcanique, montagneuse et tropicale. Elle est dominée par deux massifs volcaniques : le Piton des Neiges (3 069 m) et le Piton de la Fournaise (2 631 m). L'intérieur de l'île est creusé par les trois cirques de Cilaos, Salazie et Mafate.

Le climat de La Réunion est tropical humide. Mais il se singularise surtout par de grandes variabilités spatiales liées à la géographie de l'île. L'influence du relief est tout aussi fondamentale que les effets de l'insularité.

Il existe deux saisons marquées à La Réunion. La saison "des pluies" qui peut être définie entre janvier et mars et la saison "sèche", plus longue, qui débute au mois de mai pour s'achever au mois de novembre.

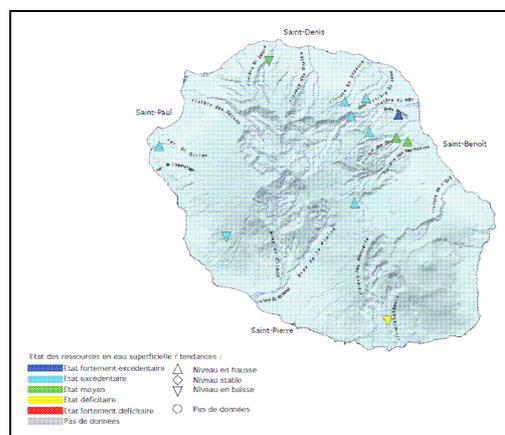
De plus, la Réunion est soumise à des aléas cycloniques.

Hydrologie

Le réseau hydrographique de l'île de La Réunion est extrêmement dense ; il est composé de nombreuses ravines sèches hors période de pluies, de 13 rivières principales, de trois étangs littoraux ainsi que de plusieurs petits plans d'eau intérieurs.

Du fait des fortes pentes, les cours d'eau ont généralement un écoulement torrentiel, avec des crues extrêmes et rapides pendant la saison des pluies (décembre à avril). Les bassins situés sur la côte au vent reçoivent des précipitations suffisantes toute l'année, ceux situés sur la côte ouest bénéficient d'apport en eaux souterraines.

Figure 4 : Etat des ressources en eau superficielles à la Réunion, *Office de l'Eau de la Réunion, 2010.*



¹ Éléments issus du « SDAGE REUNION », Comité de Bassin de la Réunion, 2010

LES ANTILLES : CLIMAT

La Martinique et La Guadeloupe sont situées au cœur de l'Archipel des Petites Antilles développé au Nord-Est de la côte vénézuélienne. Cet archipel tient lieu de frontière entre l'Océan Atlantique à l'Est et la Mer des Caraïbes à l'Ouest.

La Guadeloupe et La Martinique bénéficient d'un climat de type maritime, caractérisé par une forte variabilité spatiale et temporelle du régime des précipitations. Des phénomènes à grande échelle (cyclones, lignes de grains, par exemple), ou à échelle locale (convection diurne favorisant le développement de nuages vecteurs d'averses souvent violentes et orageuses), provoquent parfois de très fortes intempéries.

On peut distinguer deux saisons principales : une saison sèche, «le carême», et «l'hivernage» caractérisé par des pluies fréquentes et intenses. Les saisons sont découpées de la façon suivante :

- ▶ février à avril : saison sèche (dite carême) ;
- ▶ mai à juin : intersaison ;
- ▶ juillet à octobre : saison humide (dite hivernage) ou saison cyclonique ;
- ▶ novembre à janvier : intersaison.

LA MARTINIQUE : HYDROLOGIE ¹

Le réseau hydrographique de la Martinique est marqué par un nombre important de cours d'eau et bassins versants indépendants. Le plus important d'entre eux est celui de la Lézarde, mais la majorité des bassins ne couvrent que quelques km². La majeure partie de la ressource (90 %) est donc concentrée sur seulement 6 à 7 bassins.

A l'échelle de l'île peuvent être distingués les grands ensembles hydrographiques suivants :

- ▶ Au nord, les rivières issues de la Montagne Pelée et des Pitons du carbet sont marquées par de fortes pentes (supérieure à 4%) et caractérisées par un écoulement torrentiel. Les étiages sont soutenus par d'importants apports souterrains ;
- ▶ Au sud, les reliefs sont beaucoup moins marqués, les écoulements des rivières sont nettement plus lents. La nature argileuse des sols s'allie à la faible pluviométrie pour engendrer des étiages très faibles.

¹ Eléments issus du « SDAGE MARTINIQUE », DIREN, 2010 ; et du « Profil Environnemental », DIREN, 2008.

Figure 5 : Les principaux cours d'eau de la Martinique, *Observatoire de l'eau de la Martinique, 2009*

LA GUADELOUPE : HYDROLOGIE ¹

La Guadeloupe se compose de huit îles. Les deux principales sont Basse-Terre à l'Ouest et Grande-Terre à l'Est, séparée par un petit bras de mer. Basse-Terre couvre sur des terrains essentiellement volcaniques une superficie de 850 km² environ. Grande-Terre, dont l'origine est liée à des dépôts sédimentaires couvre une superficie de 590 km². Plusieurs îles de superficies plus réduites viennent compléter l'archipel de la Guadeloupe : la Désirade, Marie-Galante, l'Archipel des Saintes, Saint-Barthélemy et Saint-Martin.

Compte tenu des données hydrologiques disponibles pour les modélisations, seuls des bassins versants situés sur Basse-Terre seront modélisés.

La forte irrégularité spatiale des précipitations et la disparité des reliefs sont à l'origine du réseau hydrographique très diversifié de l'archipel de la Guadeloupe. L'île volcanique Basse-Terre est drainée par plus de 50 cours d'eau à écoulement permanent.

Le réseau hydrographique de Basse-Terre est dense et caractérisé par des cours d'eau de faible linéaire et des bassins versants de petite taille (10 à 30 km²). Seule exception, le bassin versant de la Grande Rivière à Goyaves dont la surface atteint 158 km², soit près d'un cinquième de la superficie de Basse-Terre.

La quasi-totalité des cours d'eau est issue du massif montagneux volcanique de Basse-Terre. Ils montrent de fortes pentes (6% à 10%) et leur régime hydrologique est de type torrentiel, largement influencé par les pluies journalières et les variations climatiques saisonnières.

¹ Élément issu de l' « Etat des lieux, Directive Cadre », DIREN Guadeloupe, 2005

Relief et Climat

La Guyane, située entre 2° et 6° de latitude Nord, est soumise à un climat de type équatorial.

Les saisons guyanaises se distinguent ainsi :

- ▶ la saison sèche, de début juillet à mi-novembre ;
- ▶ la petite saison des pluies de mi-novembre à mi-février ;
- ▶ le petit été de mars (petite saison sèche) : mi-février à fin mars ;
- ▶ la grande saison des pluies : de début avril à fin juin.

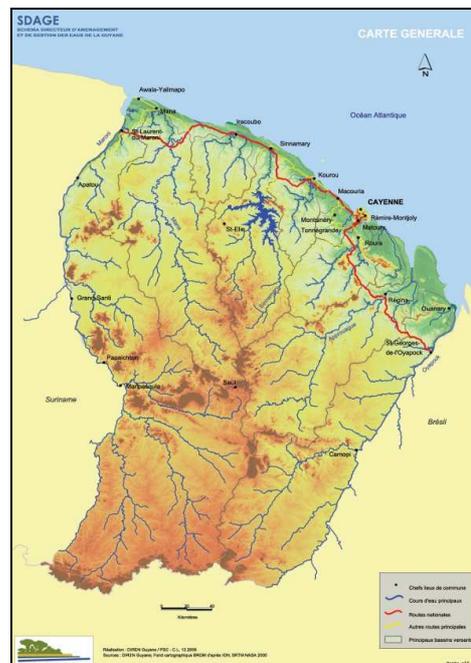
L'altitude moyenne de la Guyane est comprise entre 100 et 200 m et les secteurs dont les altitudes sont supérieures à 500 m sont considérés comme des montagnes dominant le relief collinaire. L'altitude s'y élève au maximum à 851 m (Montagne Bellevue de l'Inini).

Hydrologie

Avec un réseau hydrographique d'environ 35 000 km pour les seuls principaux cours d'eau et un linéaire de côte de 350 km, l'eau constitue un patrimoine naturel très présent et d'une grande richesse. D'après l'Unesco, la Guyane est au second rang mondial en termes d'eau douce disponible avec un volume de 800 000 m³/hab/an.

Le district de la Guyane présente un réseau hydrographique très dense. L'ensemble des fleuves de Guyane se jette au Nord du district, dans l'océan Atlantique. Les principaux fleuves de la Guyane sont le Maroni, l'Oyapock, la Mana, l'Approuague le Sinnamary et la Comté. Leurs débits présentent des variations annuelles quasi unimodales avec des hautes eaux en mai et un étiage marqué en octobre. Cette tendance annuelle est toutefois marquée par une légère baisse des débits durant la période dite du petit été de mars.

Figure 7 : Carte générale de la Guyane, SDAGE 2010-2015, Comité de Bassin de Guyane



4. CARACTERISATION DU CLIMAT ACTUEL DANS LES DOM

4.1 LES SERIES HOMOGENEISEES

Toutes les séries d'observation ne sont pas exploitables pour l'analyse du changement climatique. En effet, l'évolution des conditions de mesure ou de l'emplacement des stations météorologiques peut introduire des hétérogénéité dans les séries, et conduire à des conclusions erronées. 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'origine métrologique dans la série et de les corriger.

Les techniques d'homogénéisation ont pour objectif d'identifier les ruptures d'homogénéité des longues séries de données climatologiques (ruptures générées par les changements de capteurs ou de pratiques d'observation, par le déplacement des sites d'observation, ou par les modifications de leur environnement) et de les corriger. Elles permettent donc d'extraire le signal climatique en supprimant au mieux les effets de poste.

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.

Les graphes du paragraphe suivant ont été réalisés à partir de séries homogénéisées.

4.2 DESCRIPTION PLUS DETAILLÉE DU CLIMAT PRESENT

4.2.1 Les Antilles

4.2.1.1 Description générale du climat

Guadeloupe et Martinique bénéficient d'un **climat de type maritime**. Les conditions climatiques sont directement commandées par les positions respectives de l'anticyclone des Açores, qui dirige l'alizé d'Est à Nord-Est, et de la Zone de Convergence InterTropicale (Z.C.I.T.). Cette zone dépressionnaire suit avec un retard d'un mois ou deux le balancement saisonnier du soleil.

La **variabilité spatiale et temporelle du régime des précipitations**, imposée par la morphologie des îles, l'échelle et la fréquence des perturbations atmosphériques, constitue la principale particularité du climat tropical et humide de ces îles. Des phénomènes à grande échelle (cyclones, lignes de grains, par exemple), ou à échelle locale (convection diurne favorisant le développement de nuages vecteurs d'averses souvent violentes et orageuses), provoquent parfois de très fortes intempéries, sources d'inondations parfois catastrophiques ou de coups de vent tout aussi dévastateurs. La saison cyclonique type s'étend normalement de début juin à fin octobre, mais peut se prolonger jusqu'à fin novembre.

Quelques particularités :

- ▶ en Guadeloupe : Le plateau calcaire de la Grande-Terre et les îles connaissent régulièrement des épisodes de sécheresse. En Basse-Terre, le relief, perpendiculaire au flux des alizés, régule le régime des pluies.
- ▶ en Martinique : Sous le vent, protégée par l'effet de foehn, la côte caraïbe connaît de faibles précipitations. Quant aux parties plates comme l'extrême sud de la Martinique, elles sont nettement moins arrosées.

4.2.1.2 Les saisons

On peut distinguer deux saisons principales : une saison sèche, «le carême», et «l'hivernage» caractérisé par des pluies fréquentes et intenses. Carême et hivernage sont séparés par deux intersaisons plus ou moins marquées. Ainsi, les saisons sont découpées de la façon suivante :

- ▶ février à avril : saison sèche (dite carême),
- ▶ mai à juin : intersaison,
- ▶ juillet à octobre : saison humide (dite hivernage) ou saison cyclonique,
- ▶ novembre à janvier : intersaison.

Les recherches sur ENSO (El Niño Southern Oscillation) montrent que les épisodes Niña génèrent de plus fortes précipitations sur les Antilles par passage de perturbations plus formées ou plus nombreuses, en liaison avec une saison cyclonique généralement beaucoup plus active que la normale sur l'Atlantique et la Caraïbe.

A l'inverse El Niño génère une sécheresse relative sur le bassin Caraïben et une activité cyclonique réduite.

4.2.1.3 Caractérisation du climat actuel

4.2.1.3.1 La Martinique

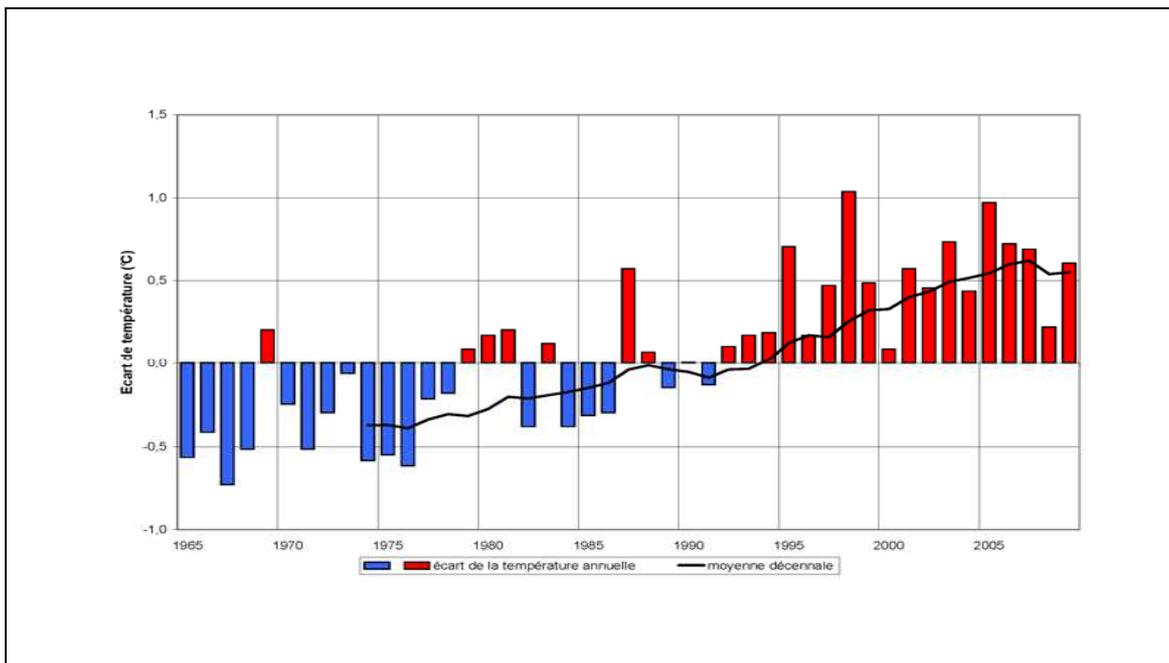
La **température moyenne annuelle** à la Martinique est représentée sur la figure suivante. Elle est obtenue à partir des trois séries homogénéisées pour les températures minimale et maximale à la Martinique sur la période 1965-2009. Le graphe présente l'évolution de la température moyenne annuelle sous forme d'écart à la moyenne des années 1971-2000.

Cet indicateur est disponible sur le site internet de l'ONERC, réactualisé chaque année.

On peut formuler les observations suivantes :

- ▶ **La température moyenne annuelle est en hausse.**
- ▶ **L'augmentation est de l'ordre de 0.28 degrés par décennie sur la période 1965-2009.**
- ▶ Le réchauffement atteint 0.33 degrés par décennie sur la période 1979-2005.
- ▶ Ce réchauffement est moindre qu'en métropole où la hausse des températures moyennes annuelles atteint 0.55 degrés par décennie sur cette même période 1979-2005 ; il est comparable à celui de la Guyane où le réchauffement atteint 0.34 degrés par décennie sur cette période.
- ▶ Les fluctuations observées attestent à la fois du changement climatique et de la variabilité climatique naturelle.

Figure 8 : Evolution de la température moyenne à la Martinique sur la période 1965-2009



La Figure 9, la Figure 10 et la Figure 11 présentent respectivement l'évolution des températures minimales et maximales annuelles en Martinique ainsi que les précipitations de la station du Lamentin.

Figure 9 : Moyenne annuelle de température minimale quotidienne en Martinique entre 1965 et 2009

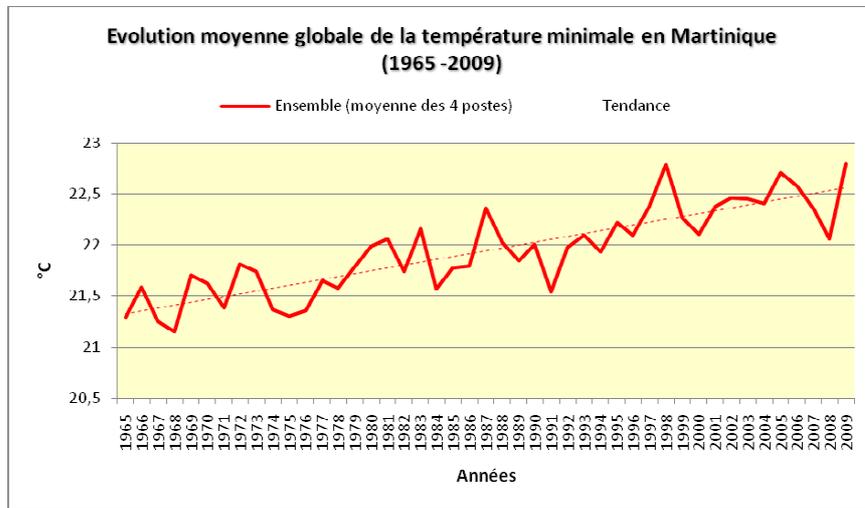


Figure 10 : Moyenne annuelle de température maximale quotidienne en Martinique entre 1965 et 2009

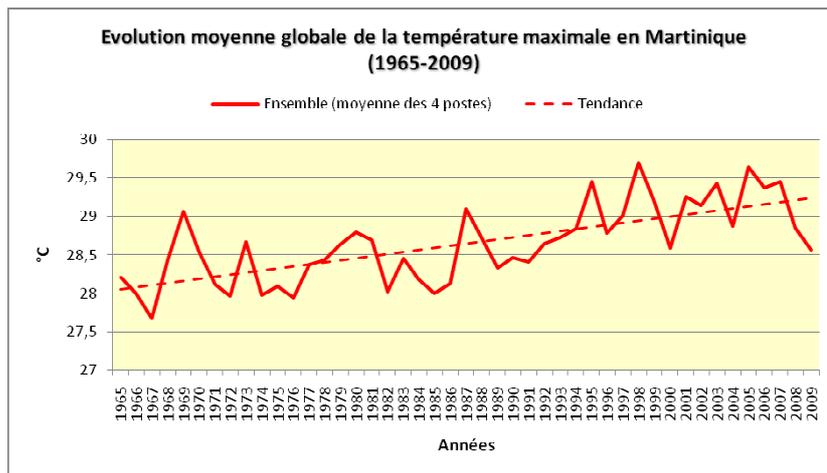
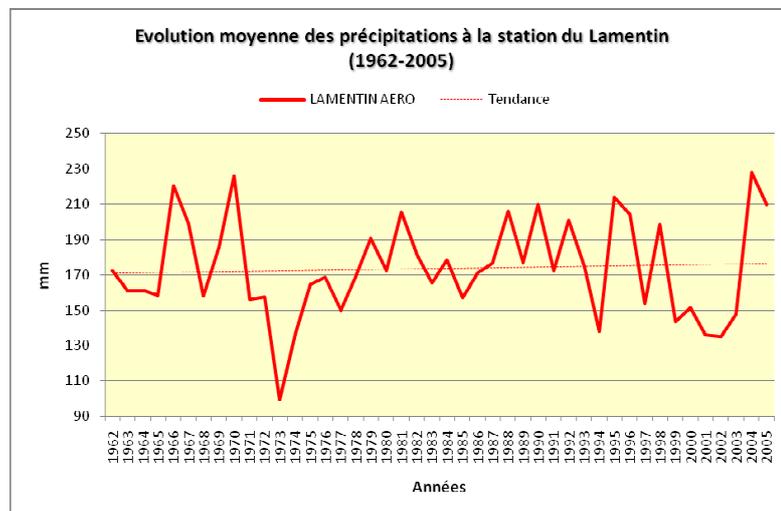


Figure 11 : Moyenne des précipitations à la station du Lamentin sur la période 1962-2005



La Figure 12 et la Figure 13 montrent la répartition géographique des températures moyennes et des précipitations sur le département de la Martinique.

Figure 12 : Température moyenne annuelle en Martinique- Normales [1961-1990]

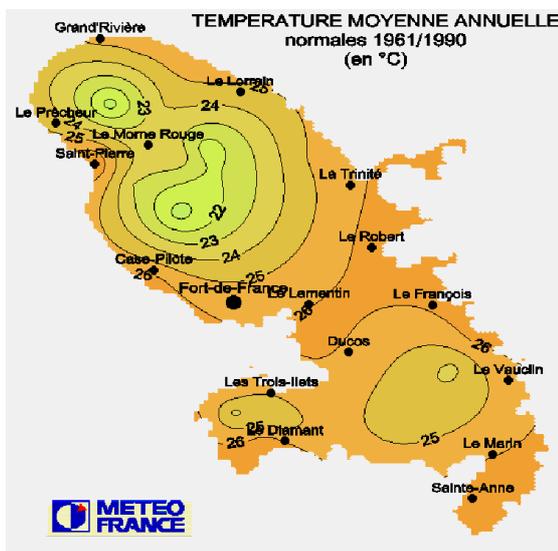
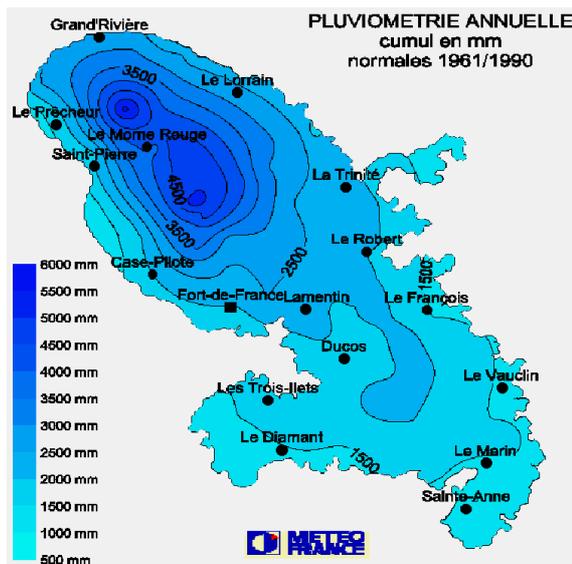


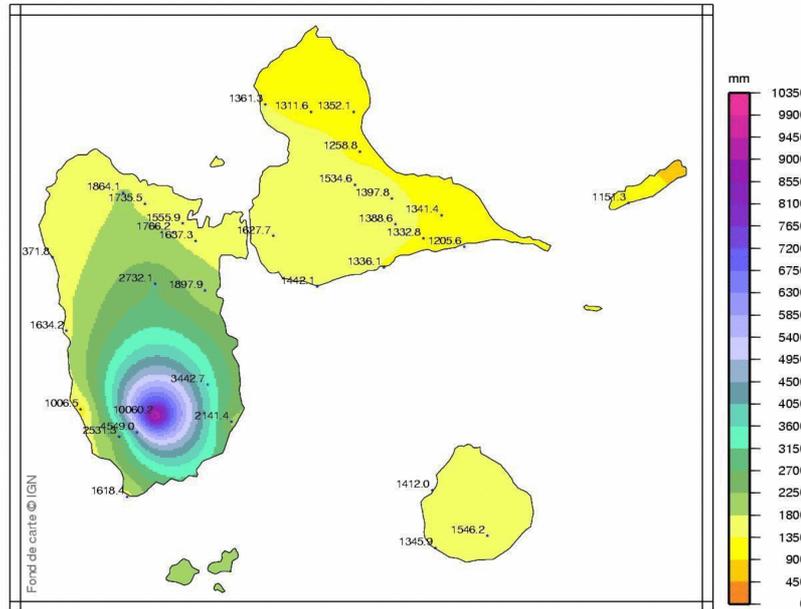
Figure 13 : Précipitations annuelles moyennes en Martinique- Normales [1961-1990]



4.2.1.3.2 La Guadeloupe

La Figure 14 représente la répartition géographique des précipitations moyennes annuelles sur la Guadeloupe, issue de séries non homogénéisées pour la période 1981-2000.

Figure 14 : Précipitations moyennes annuelles sur la Guadeloupe - 1981_2000



4.2.2 La Guyane

4.2.2.1 Description générale du climat

La Guyane située entre 2° et 6° de latitude Nord est soumise à un **climat de type équatorial**.

La convergence des flux d'alizés générés par les anticyclones des Açores et de St Héléne et le conflit qui en résulte, ont pour conséquence la création et l'entretien quasi permanent de la Zone de Convergence Intertropicale (ZCIT). Cette zone de convergence est constituée de nombreuses cellules convectives, génératrices de fortes précipitations. La ZCIT est animée d'un mouvement oscillatoire, Nord/Sud, lié au basculement saisonnier de la terre. Elle survole la Guyane deux fois par an durant des périodes plus ou moins longues.

4.2.2.2 Les saisons

Ce sont les mouvements et le positionnement de la ZCIT par rapport au département, qui rythment les saisons guyanaises. On distingue ainsi :

- ▶ la saison sèche, de début juillet à mi-novembre,
- ▶ la petite saison des pluies de mi-novembre à mi-février
- ▶ le petit été de mars (petite saison sèche) : mi-février à fin mars,
- ▶ la grande saison des pluies : de début avril à fin juin.

Ce découpage sera utilisé dans la suite de ce document.

Variabilité interannuelle et ENSO

Le rythme des saisons décrit ci-dessus est toutefois soumis à une grande variabilité interannuelle : en effet d'une année sur l'autre, le début et la fin des saisons ne se produisent jamais rigoureusement aux mêmes dates et peuvent parfois différer de plusieurs semaines. Il a été mis en évidence que, dans la ceinture tropicale – et donc particulièrement en Guyane – des liens existent entre oscillations australes ENSO et climat.

Lorsque El Niño est établi, le climat guyanais est plus sec et plus chaud, alors que La Niña entraîne plutôt une aggravation des précipitations accompagnée de températures plus fraîches.

4.2.2.3 Caractérisation du climat actuel

4.2.2.3.1 Températures

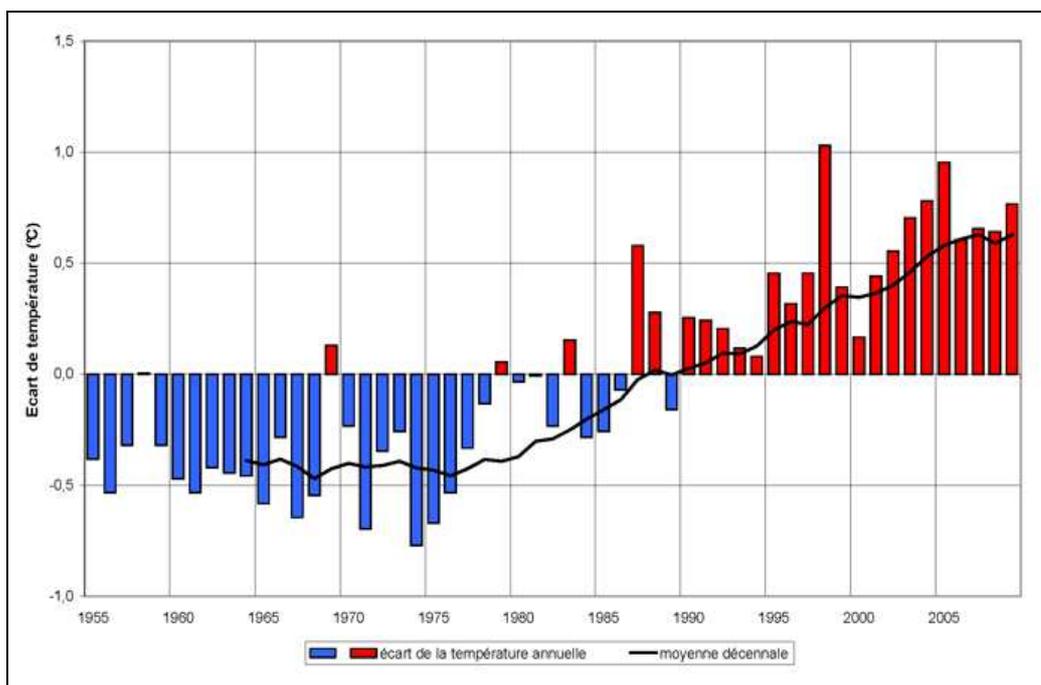
Sur la Figure 15 est représentée l'évolution de la température moyenne annuelle en Guyane. Elle est analysée à partir des séries homogénéisées disponibles sur la période 1955-2009 à Matoury (aéroport de Cayenne), Saint Georges, Saint Laurent du Maroni et Maripasoula. Le graphe présente l'évolution de la température moyenne annuelle sous forme d'écart à la moyenne des années 1971-2000.

Cet indicateur est disponible sur le site internet de l'ONERC, réactualisé chaque année.

On observe que :

- ▶ **La température moyenne annuelle est en hausse.**
- ▶ **L'augmentation est de l'ordre de 0.24 degrés par décennie sur la période 1955-2009.**
- ▶ **Le réchauffement s'accélère sur les dernières décennies.**
- ▶ **L'augmentation de la température moyenne annuelle atteint 0.34 degrés par décennie sur la période 1979-2005.**

Figure 15 : Evolution de la température moyenne en Guyane sur la période 1955-2009



Les graphiques des Figure 16 et la Figure 17 illustrent les évolutions des températures minimales et maximales annuelles en Guyane.

A noter que les différences régionales de température en Guyane sont très faibles.

Figure 16 : Moyenne annuelle de la température minimale quotidienne en Guyane entre 1965 et 2009

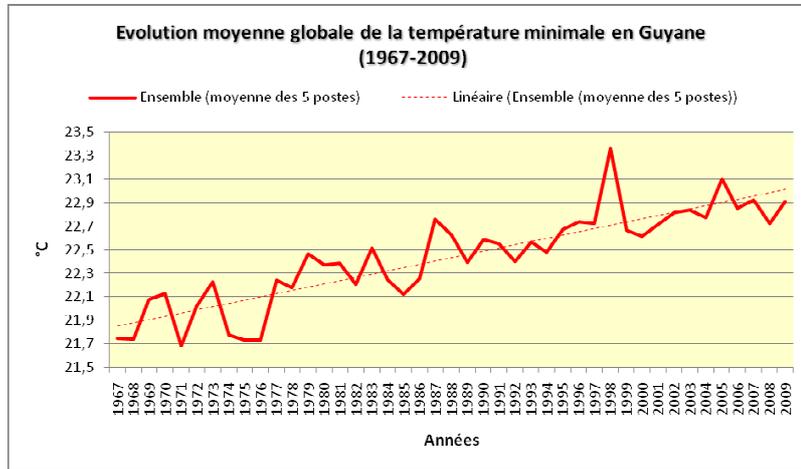
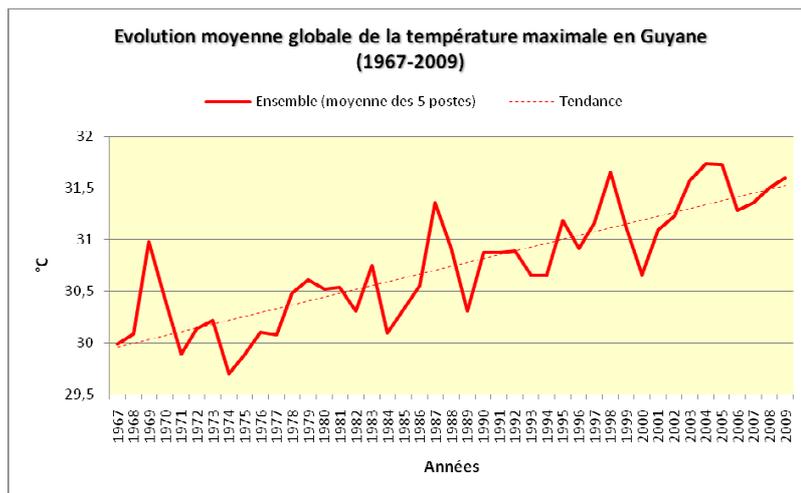
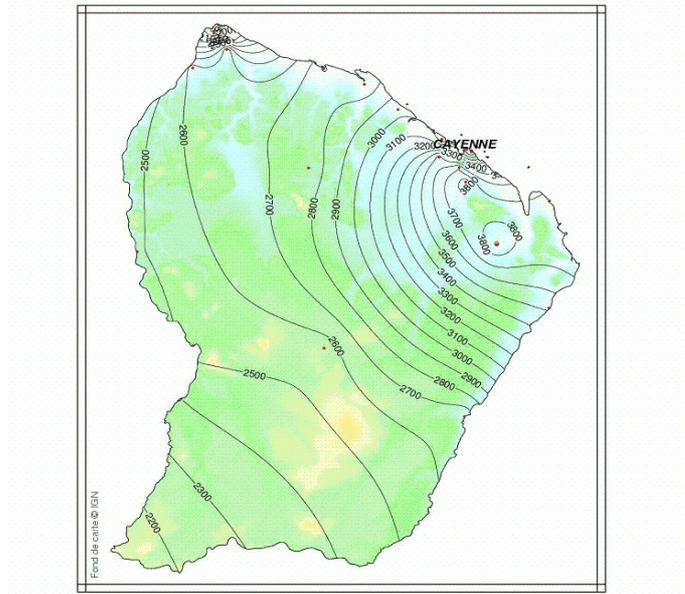


Figure 17 : Moyenne annuelle de la température maximale quotidienne en Guyane entre 1965 et 2009



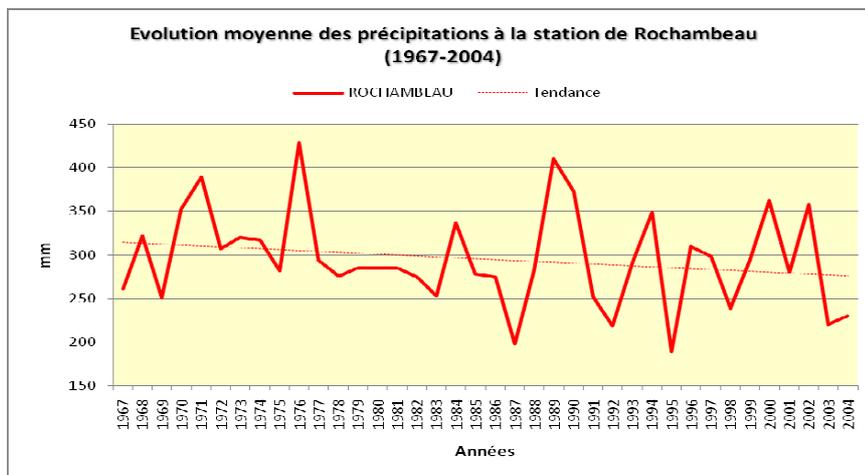
La région la plus arrosée au nord-est de la Guyane reçoit un peu moins de 4000 mm par an en moyenne, comme le montre la Figure 18.

Figure 18 : Précipitations annuelles moyennes en Guyane- Normales [1971-2000]



La Figure 19 montre les précipitations de la station de Rochambeau entre 1967 et 2004.

Figure 19 : Moyenne mensuelle des précipitations entre 1967 et 2004



4.2.3 L'île de La Réunion

4.2.3.1 Description générale du climat

Le climat de La Réunion est **tropical humide**. Mais il se singularise surtout par de **grandes variabilités** liées à la géographie de l'île. L'influence du relief est tout aussi fondamentale que les effets de l'insularité.

La pluviométrie moyenne annuelle 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 les cumuls de pluie augmentent, jusqu'à atteindre des valeurs dépassant 10 mètres par an, ce qui est tout à fait exceptionnel à l'échelle mondiale. Les hauts reliefs de l'île, massifs du Piton des Neiges et du Piton de la Fournaise, sont la cause de cette dissymétrie Est/Ouest. Qu'elles soient d'origine advective ou d'évolution diurne, les précipitations tendent à se concentrer sur les régions directement exposées à l'humidité océane apportée par les alizés de secteur est. On parle de région "au vent". A l'inverse, les régions "sous le vent", qui bénéficient de l'abri du relief, sont beaucoup plus sèches et les régimes de brise y sont prédominants. Pour un secteur donné, quand on s'élève du littoral au sommet de l'île, les foyers de précipitations les plus intenses se rencontrent aux altitudes intermédiaires, entre 1000 et 2000 m.

4.2.3.2 Les saisons

Il existe deux saisons marquées à La Réunion. La saison "des pluies" qui peut être définie entre janvier et mars et la saison "sèche", plus longue, qui débute au mois de mai pour s'achever au mois de novembre. Même en saison sèche, les précipitations restent importantes sur l'Est. Avril et décembre sont des mois de transition. Novembre à avril est la période où se forment la plupart des dépressions tropicales.

Ce découpage saisonnier sera utilisé dans le paragraphe 5.3.4 consacré à la restitution de simulations ARPEGE Climat.

4.2.3.3 Caractérisation du climat actuel

Dans le cadre de l'« *Etude pour l'identification des évolutions des changements climatiques à La Réunion* », des tendances sur 40 ans ont été calculées de façon annuelle puis saisonnière à partir de séries homogénéisées.

Ce sont ces travaux qui sont présentés dans ce paragraphe et en annexe A pour les analyses saisonnières.

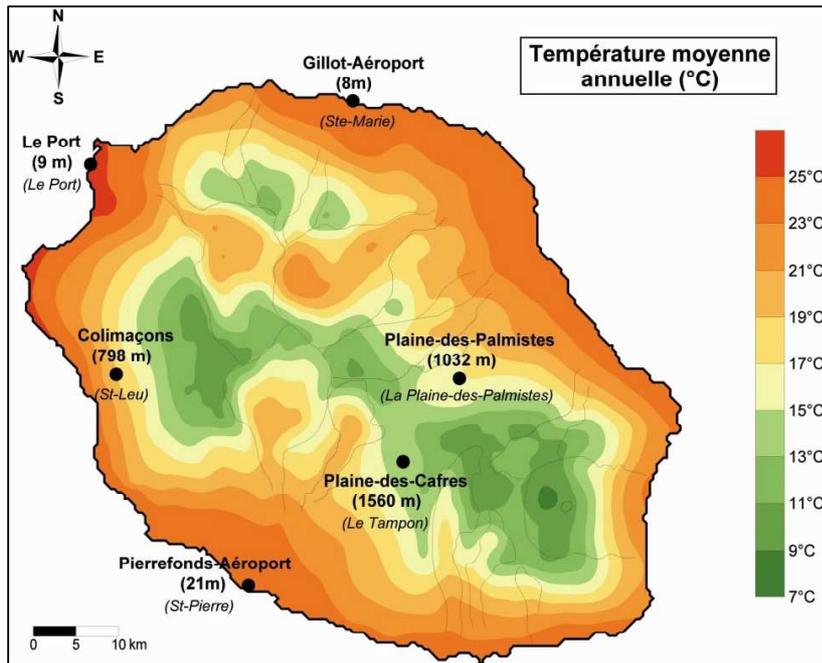
4.2.3.3.1 Températures

RAPPEL SUR LES TEMPERATURES MOYENNES OBSERVEES A LA REUNION

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 2022 (le nom de la commune et l'altitude du poste sont également indiqués). Face à la difficulté d'homogénéiser ces 6 séries, deux postes supplémentaires ont été ajoutés : 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 paramètres étudiés sont la température moyenne (T_m), la température minimale (T_n) et la température maximale (T_x).

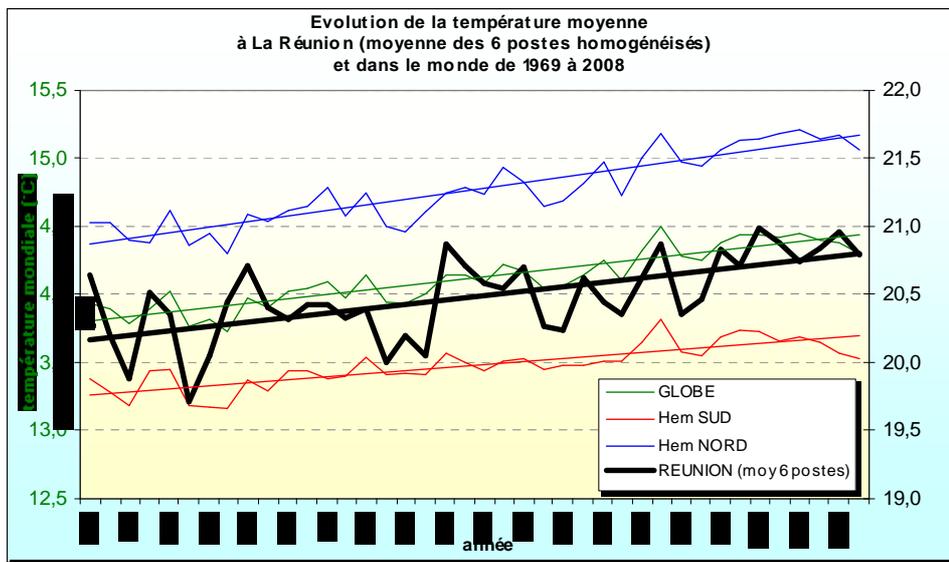
Figure 20: Températures moyennes annuelles de La Réunion et stations étudiées suivies de la commune et de leur altitude



TENDANCE ANNUELLE SUR 40 ANS

La figure ci-après 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 Le Tableau 2. A titre de comparaison, les tendances calculées sur l'ensemble du globe ainsi que sur les hémisphères Nord et Sud sont indiquées.

Figure 21 : Evolution de la température moyenne à La Réunion (moyenne des 6 postes homogénéisés) et dans le monde de 1969 à 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.

Tableau 1 : Evolution de la température moyenne sur l'île de La Réunion sur la période 1969-2008

Station	Evolution des températures moyennes sur 40 ans	Tendance des températures moyennes (en °C par décennie)
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
Île de La Réunion	+0,62°C	+0,16°C
Globe	+0,63°C	+0,16°C
Hémisphère Nord	+0,81°C	+0,20°C
Hémisphère Sud	+0,43°C	+0,11°C

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.

Tableau 2 : Evolution des températures minimales et maximales quotidiennes moyennées par année sur l'île de La Réunion sur la période 1969-2008

Colonne1	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

Les graphiques des Figure 22 et Figure 23 illustrent l'évolution des températures minimales (T_n) et maximales (T_x) quotidiennes moyennées par année de 1969 à 2008 pour les 6 postes étudiés.

Figure 22 : Evolution des températures maximales quotidiennes en moyennes annuelles de l'île de La Réunion 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.

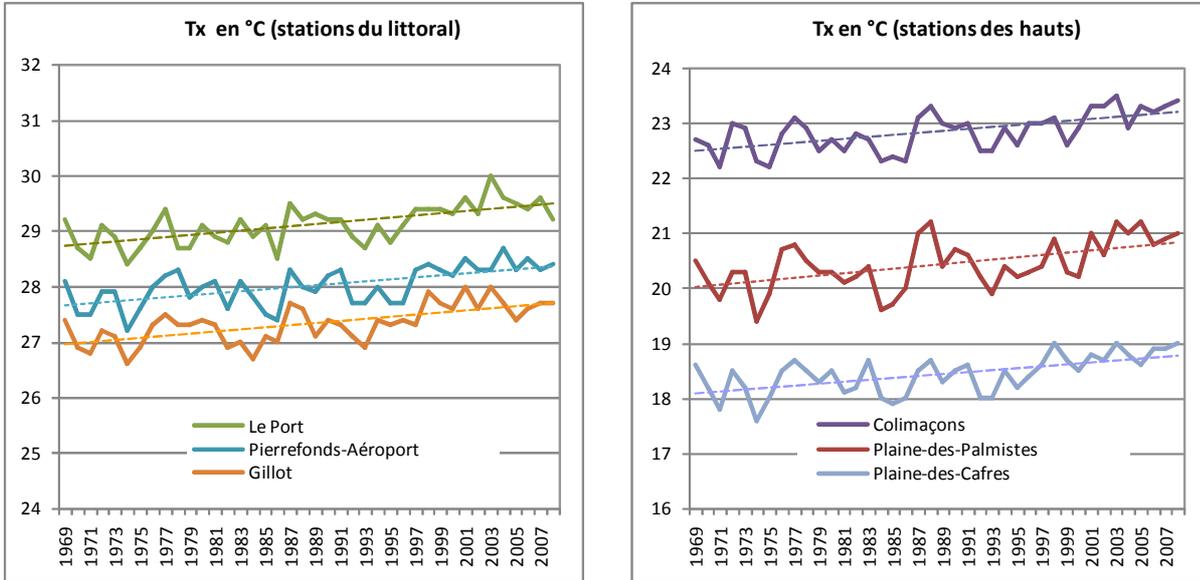
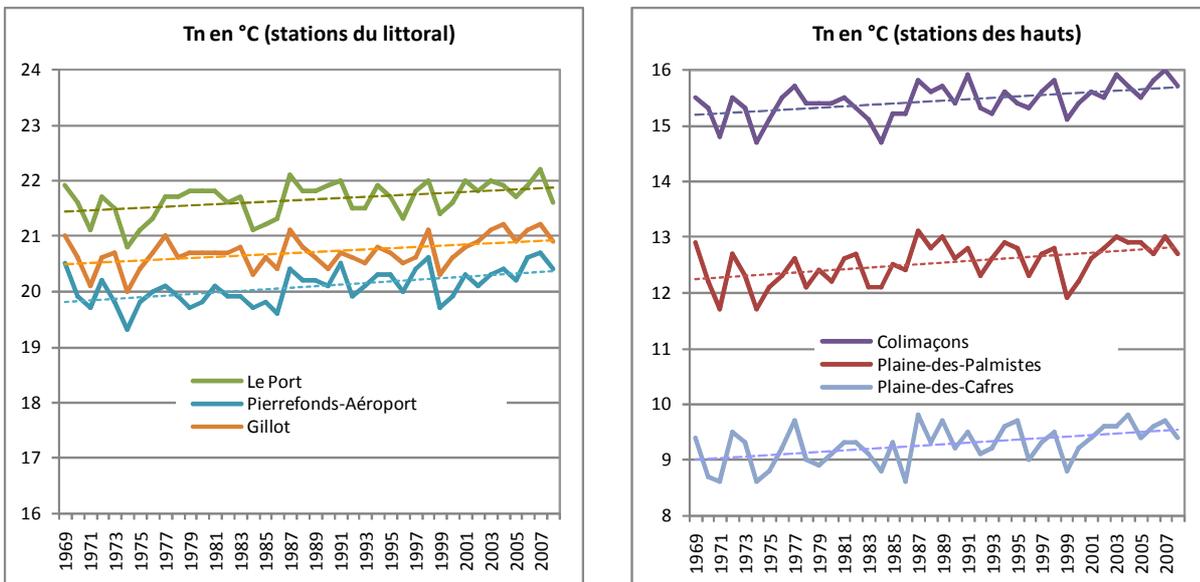


Figure 23 : Evolution des températures minimales quotidiennes en moyennes annuelles de l'île de La Réunion par station sur la période 1969-2008.

Le graphe de gauche regroupe les stations situées près du littoral. Le graphe de droite regroupe les stations situées dans les hauts.



En résumé : 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 celui 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 (c'est pendant les mois de mars-avril-mai que ces températures ont le plus augmenté –voir Annexe B).

4.2.3.3.2 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 24 plus bas.

RAPPEL SUR LES PRECIPITATIONS MOYENNES OBSERVEES A LA REUNION

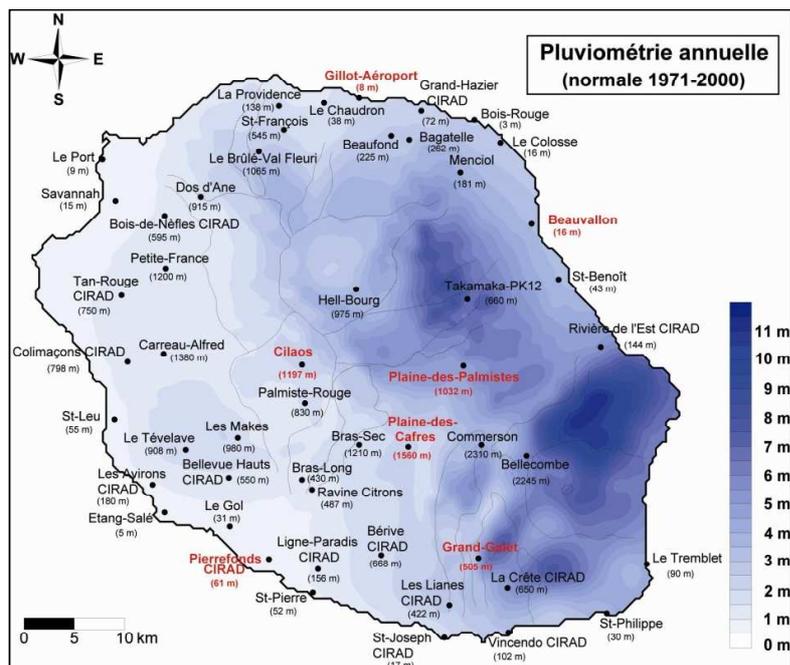
Les précipitations sont à La Réunion le phénomène météorologique le plus remarquable. L'île possède tous les records mondiaux de pluies pour les périodes comprises entre 12 heures et quinze jours.

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.

La carte des isohyètes annuelles de la Figure 24 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).

Figure 24 : Pluviométrie moyenne annuelle en mm sur l'île de La Réunion sur la période 1971-2000 et stations étudiées suivies de leur altitude.



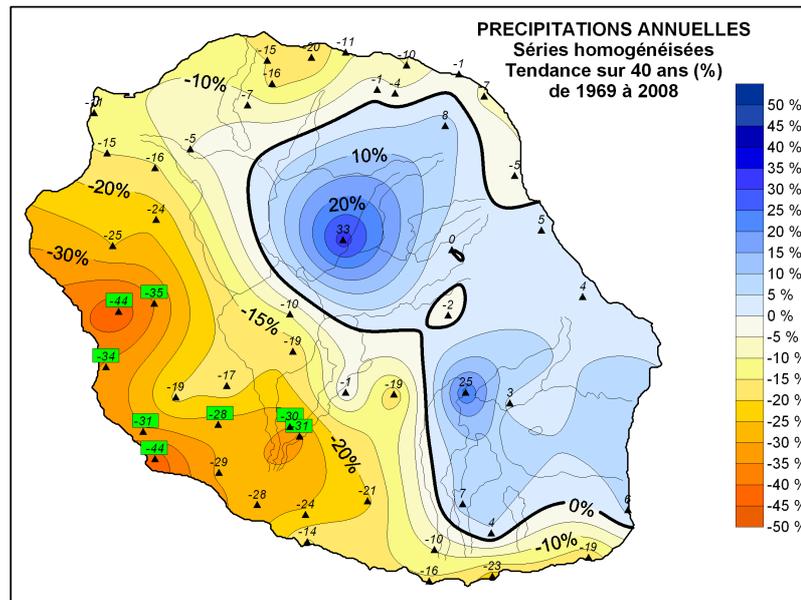
TENDANCE ANNUELLE SUR 40 ANS

La carte des tendances des précipitations annuelles de la Figure 25, 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'interpolation¹, 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.

¹ La méthode d'interpolation utilisée pour tracer les cartes de ce document est un krigeage 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

Figure 25 : Evolution des précipitations annuelles sur l'île de La Réunion 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 permet de rejeter l'hypothèse d'une tendance nulle avec un certain degré de confiance.

Nous l'avons appliqué aux séries de précipitations annuelles, avec un degré de confiance de 95%. Ce test indique que seuls 8 postes sur les 51 étudiés présentent une tendance significative (carrés verts sur la carte). Le Tableau 3 indique les postes et les 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.

Tableau 3 : Evolution et tendance significative des précipitations sur la période 1969-2008 sur l'île de La Réunion

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%

En résumé : 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 (voir Annexe B). 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.

4.3 LES DONNEES D'OBSERVATION METEOROLOGIQUES MISES A DISPOSITION DANS LE CADRE DU PROJET EXPLORE 2070

Des séries de données quotidiennes d'observation en températures minimales, maximales et précipitation ont été fournies au projet pour la **période 1980/2010**. Ces observations servent au calage du modèle hydrologique GR4J.

Parmi ces séries, certaines bénéficient d'une validation par des experts en climatologie de la Direction de Météo-France Antilles Guyane (DIRAG) pour la qualité de la mesure sur cette période. Cette information est synthétisée plus bas et précisée par poste en Annexe A.

Pour la Réunion, une homogénéisation des données de précipitations et de températures a été réalisée pour les stations fournies. Pour les autres départements, il s'agit de données non corrigées et non homogénéisées (présence de lacunes).

Sur les cartes ci-après figurent l'ensemble des postes météorologiques pour lesquelles des données ont été fournies.

Tableau 4 : Synthèse des données d'observations météorologiques fournies pour caractériser une période de référence sur les DOM

	Guyane	Martinique	Guadeloupe	Réunion
Stations météorologiques	9 postes (T,P) 1 poste P 7 validés par la DIRAG	12 postes (T,P) 10 postes P 11 validés par la DIRAG	2 postes (T,P) 15 postes P à Basse-Terre, dont 8 validés par la DIRAG	5 postes T 6 postes P
Couverture géographique	- Faible couverture géographique - 1 seul poste à l'intérieur des terres	- Assez bonne couverture géographique de la moitié Nord de l'île	- Faible couverture géographique : absence de poste en altitude et peu de poste au sud de Basse Terre (versant Est)	- Assez bonne couverture géographique - Postes principalement sur la côte - Peu de postes en altitude.
Période fournie	1980-2010	1980-2010	1980-2010	1979-2003
Type de données	Chroniques journalières non homogénéisées	Chroniques journalières non homogénéisées	Chroniques journalières non homogénéisées	Chroniques journalières corrigées et homogénéisées
Qualité des données : lacunes sur la période de calage ⁽¹⁾	1980-2010: P : 182 TN : 1341 TX : 2936 ⁽²⁾	1980-2000: P : 1093 TN : 818 TX: 2436	1980-2000: P : 3431 TN : 6089 TX : 6073	Pas de lacune (correction Météo France)

T = Température ; P = Pluviométrie

⁽¹⁾ : Nombre de jours présentant des lacunes sur la période de calage choisie (le choix est détaillé plus bas)

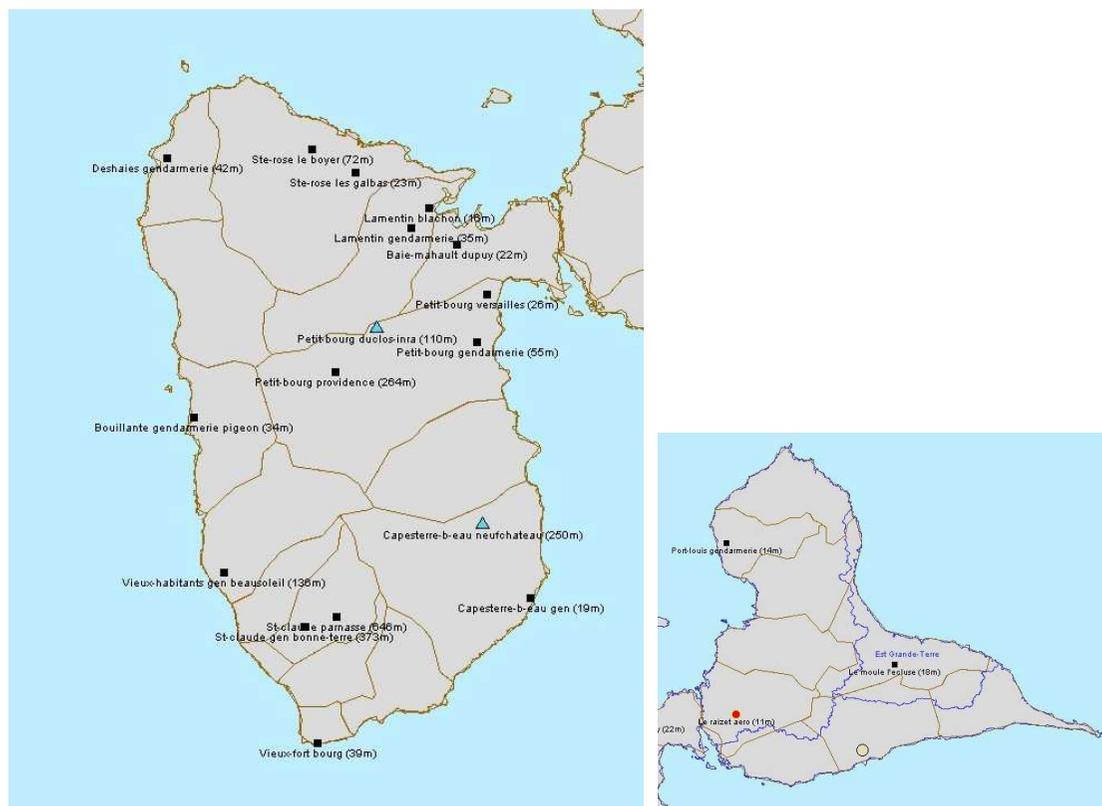
⁽²⁾ : station 97302001 non prise en compte dans le calcul, car elle est en activité pour la période 1998-2010 uniquement.

Figure 26: Position des stations météorologiques fournies pour le calage du modèle hydrologique sur la départements d'Outre-mer

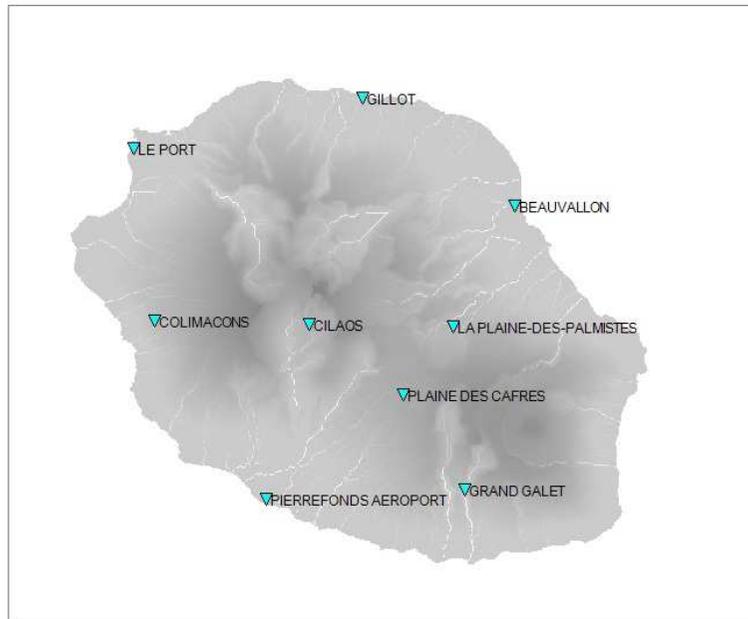
Martinique



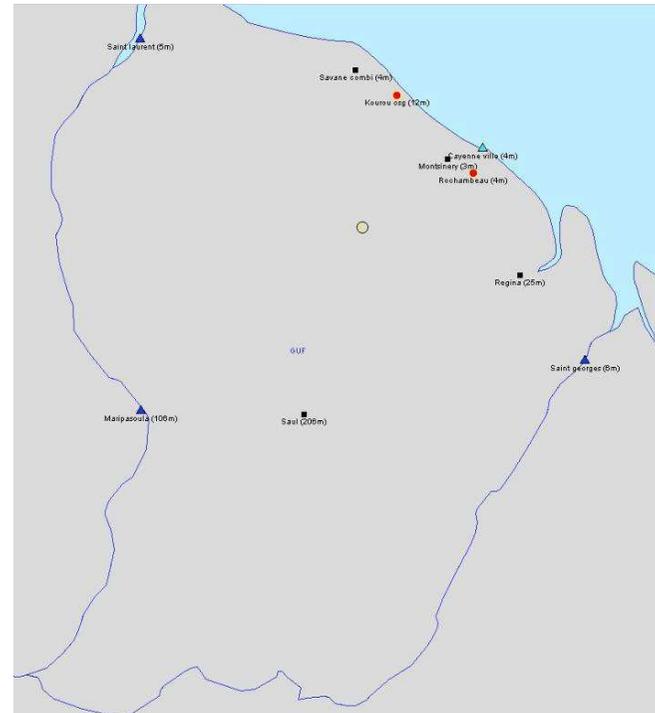
Guadeloupe



Réunion



Guyane



Stations météo

- Niveau 0 ●
- Niveau 1 ●
- Niveau 2 ▲
- Niveau 3 ▲
- Niveau 4 ■
- Niveau 5 ▲

Les niveaux 0 à 5 correspondent à différents types de mesures effectuées par Météo-France.

5. CARACTERISATION DES EVOLUTIONS CLIMATIQUES POSSIBLES A L'HORIZON 2050-2070 DANS LES DOM

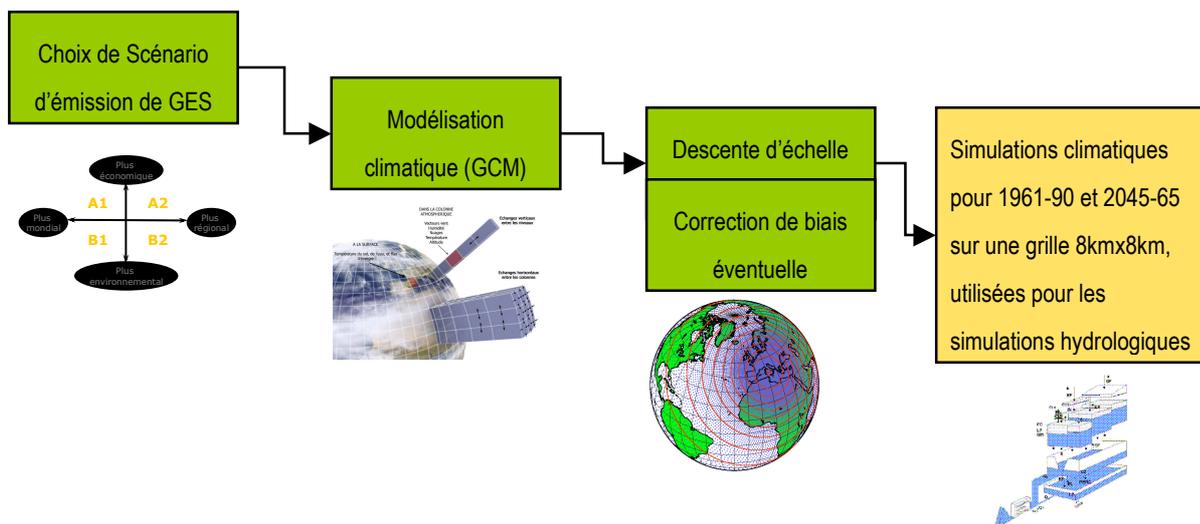
Dans ce chapitre sont présentées les chaînes de modélisation mises en œuvre pour la production des simulations climatiques dans les départements d'Outre-mer fournies au projet.

Ces simulations permettent d'appréhender les évolutions climatiques possibles à l'horizon 2050-2070 et, à l'issue des modélisations hydrologiques, d'appréhender les évolutions hydrologiques possibles. L'analyse des simulations et la caractérisation des évolutions climatiques possibles est présentée au paragraphe 5.3.

5.1 METHODOLOGIE

La démarche mise en œuvre pour la production de simulations climatiques exploitables pour l'étude d'impact sur l'hydrologie de surface mobilise une série d'étape schématisée ci-dessous.

Figure 27 : Vue globale de la chaîne de modélisation climatique



Pour chaque étape de modélisation, on présente ci-après une vue d'ensemble des outils disponibles d'une part et les choix retenus pour Explore2070 d'autre part.

L'annexe 1 du rapport B1 – Rapport détaillé Métropole-Climat apporte des précisions sur ces outils de modélisation.

5.1.1 Scénario d'émission de gaz à effet de serre

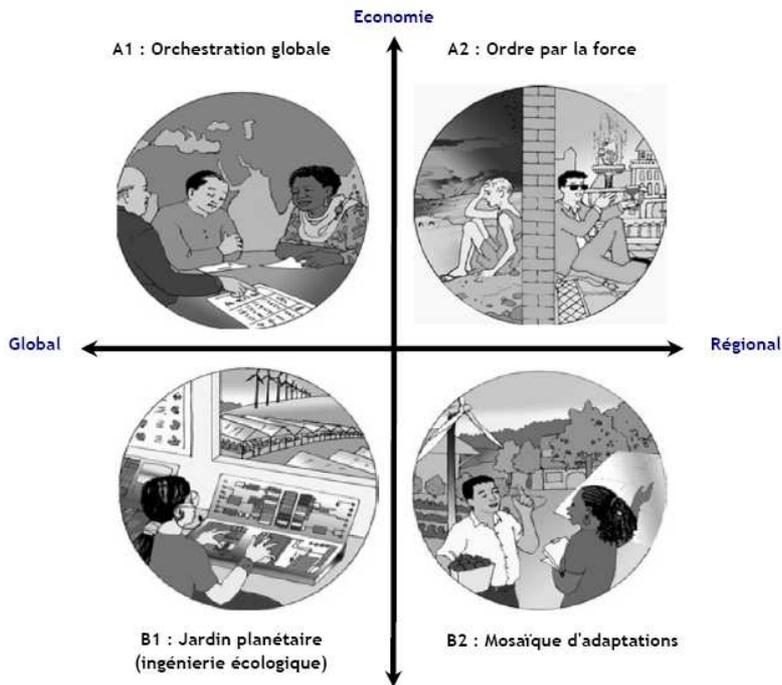
Pour répondre aux questions posées par le changement climatique et ses impacts, le GIEC utilise les modèles du système climatique et des études économiques et démographiques. Ils composent, non pas des prévisions, irréalisables à l'échelle de plusieurs décennies, mais des scénarios d'évolution du climat, supposés couvrir un large éventail d'évolutions possibles.

Dans le 4^{ème} rapport d'évaluation du GIEC (IPCC AR4), différentes familles de scénarios d'émissions de GES sont utilisés :

- ▶ La famille de **scénarios A1** décrit un monde futur dans lequel la croissance économique sera très rapide, la population mondiale atteindra un maximum au milieu du siècle pour décliner ensuite et de nouvelles technologies plus efficaces seront introduites rapidement. Les principaux thèmes sous-jacents sont la convergence entre régions, le renforcement des capacités et des interactions culturelles et sociales accrues, avec une réduction substantielle des différences régionales dans le revenu par habitant. La famille de **scénarios A1** se scinde en trois groupes qui décrivent des directions possibles de l'évolution technologique dans le système énergétique. Les trois groupes A1 se distinguent par leur accent technologique:
 - Forte intensité de combustibles fossiles (A1FI),
 - Sources d'énergie autres que fossiles (A1T),
 - Et équilibre entre les sources (A1B) (« équilibre » signifiant que l'on ne s'appuie pas excessivement sur une source d'énergie particulière, en supposant que des taux d'amélioration similaires s'appliquent à toutes les technologies d'approvisionnement énergétique et des utilisations finales).
- ▶ La famille de **scénarios A2** décrit un monde très hétérogène. Le thème sous-jacent est l'autosuffisance et la préservation des identités locales. Les schémas de fécondité entre régions convergent très lentement, avec pour résultat un accroissement continu de la population mondiale. Le développement économique a une orientation principalement régionale, et la croissance économique par habitant et l'évolution technologique sont plus fragmentées et plus lentes que dans les autres canevas.
- ▶ La famille de **scénarios B1** décrit un monde convergent avec la même population mondiale culminant au milieu du siècle et déclinant ensuite, comme dans le canevas A1, mais avec des changements rapides dans les structures économiques vers une économie de services et d'information, avec des réductions dans l'intensité des matériaux et l'introduction de technologies propres et utilisant les ressources de manière efficiente. L'accent est placé sur des solutions mondiales orientées vers une viabilité économique, sociale et environnementale, y compris une meilleure équité, mais sans initiative supplémentaires pour gérer le climat.
- ▶ La famille de **scénarios B2** décrit un monde où l'accent est placé sur des solutions locales dans le sens de la viabilité économique, sociale et environnementale. La population mondiale s'accroît de manière continue mais à un rythme plus faible que dans A2, il y a des niveaux intermédiaires de développement économique et l'évolution technologique est moins rapide et plus diverse que dans les canevas et les familles de scénarios B1 et A1. Les scénarios sont également orientés vers la protection de l'environnement et l'équité sociale, mais ils sont axés sur des niveaux locaux et régionaux.

Le schéma ci-après, qui combine les approches du GIEC et celle du projet Millennium (<http://www.millenniumassessment.org/en/index.aspx>), illustre les différents scénarios

Figure 28 : Scénarios d'émission de gaz à effet de serre de l'AR4



A1 : réduction des inégalités Nord-Sud avec un développement économique sur le schéma actuel

B1 : réduction des inégalités Nord-Sud avec un développement soucieux de l'environnement et du développement durable

A2 : développement hétérogène avec un développement économique sur le schéma actuel

B2 : développement hétérogène avec un développement soucieux de l'environnement et du développement durable

d'après

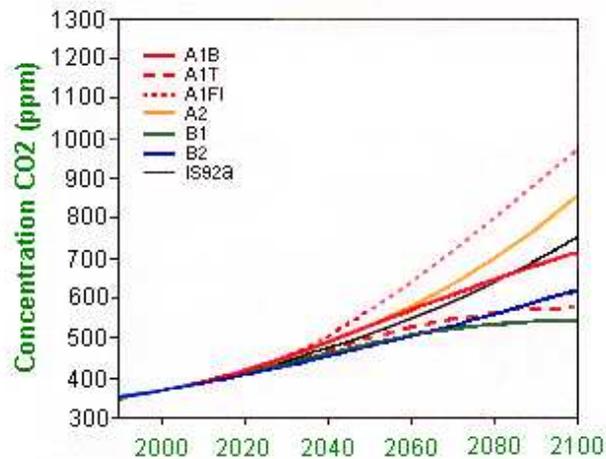
<http://www.millenniumassessment.org/en/index.html>

Pour Explore2070, le scénario d'émission de GES A1B a été sélectionné pour des raisons de disponibilité des données, pour les Antilles et la Guyane.

Pour l'île de la Réunion, le scénario d'émission de gaz à effet de serre utilisé est le scénario A2.

L'utilisation d'un unique scénario ne permet pas de rendre compte dans les résultats des incertitudes liées à l'estimation des concentrations de gaz à effet de serre. Ces incertitudes peuvent être très fortes. Les résultats hydrologiques finaux pourraient être fortement influencés par ce choix de scénario.

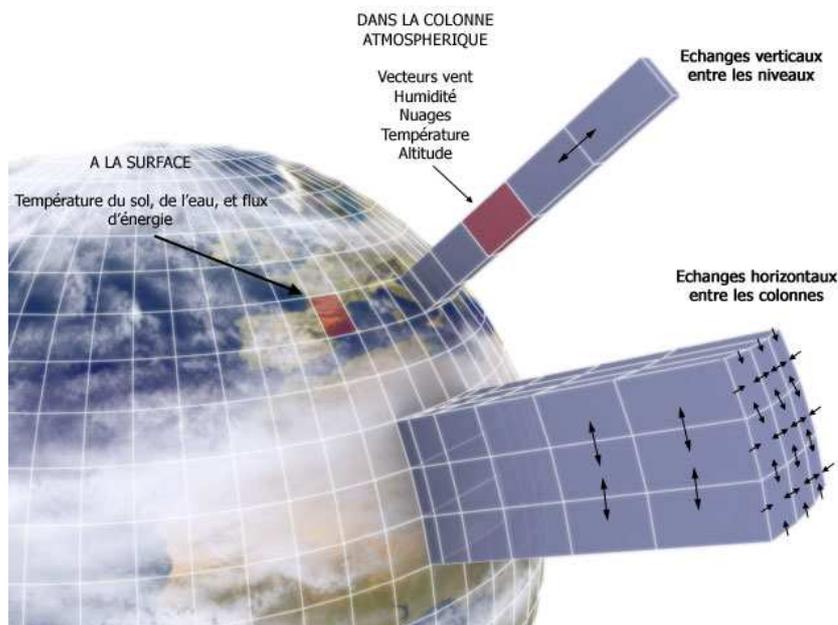
Figure 29 : Evolutions des concentrations de CO₂ pour les différents scénarii utilisés par le GIEC
(source : <http://www.ipcc-data.org>)



5.1.2 Modélisation climatique globale

Les simulations climatiques sont produites par des modèles de circulation générale (GCM). Il s'agit de modèles couplés océan-atmosphère qui modélisent la partie organisée des écoulements atmosphériques et océaniques, responsable du climat.

Figure 30 : Processus et maillage des modèles de climat



Source : Source : site menaceclimatique.free.fr

Pour des raisons de disponibilité des données, un seul modèle de circulation générale est utilisé pour les départements d'Outre-mer. Il s'agit du **modèle Arpège Climat V4.6**. Il a été utilisé avec **deux forçages de SST différents** (hypothèses sur les températures de surface de la mer)

5.1.2.1 **Modèle climatique global ayant généré les simulations climatiques utilisées dans Explore 2070 pour les DOM : le modèle climatique ARPEGE Climat de Météo France**

Développé par le Centre National de Recherches Météorologiques (CNRM), ARPEGE Climat est l'un des 23 modèles qui ont servi de support à la rédaction du 4^{ième} rapport du GIEC. Il s'agit d'une version du modèle de prévision météorologique 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.

Une particularité du modèle est sa configuration « grille étirée ». Près du pôle d'étirement, la résolution du modèle atteint 50x50 km² 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.

Une configuration ARPEGE climat grille étirée avec un pôle d'étirement sur la mer Tyrrhénienne a été élaborée à Météo-France dans les années 90 et bénéficie d'améliorations constantes.

D'autre part, en 2008, des simulations avec un pôle d'étirement sur les États-Unis ont été effectuées avec les forçages des émissions de gaz à effet de serre du scénario A1B.

En 2007 et 2009, des simulations à haute résolution d'ARPEGE-CLIMAT ont été mises à disposition sur l'ensemble du globe pour une maille de 50x50 km² avec les forçages des émissions de gaz à effet de serre du scénario A2 puis A1B.

5.1.2.2 **Les simulations produites**

L'utilisation des ces modèles climatiques permet de générer :

- ▶ **des simulations de référence** obtenues sur une période historique en faisant varier les concentrations des gaz à effet de serre et des aérosols selon les valeurs observées. Pour Explore2070, il s'agit de 1961-1990 (en Métropole) ; pour les DOM cette période a été adaptée en fonction des données disponibles.
- ▶ **les simulations climatiques** (parfois appelées scénarios climatiques) : simulations climatiques obtenues en faisant varier les concentrations des gaz à effet de serre (GES) et des aérosols fournies par les scénarios socio-économiques. Pour Explore2070, la période est 2045-2065 (en Métropole) ; pour les DOM cette période a été adaptée en fonction des données disponibles.

Il est important de comprendre que les **situations météorologiques simulées sont virtuelles et n'ont pas pour objectif, pour une date de validité donnée, de reproduire la situation correspondante réellement observée (ou qui sera observée).**

Pour des raisons de limitation de la puissance de calcul des ordinateurs disponibles et de stockage des résultats, **les modèles de circulation générale utilisés pour les simulations climatiques possèdent généralement une résolution de l'ordre de quelques centaines de kilomètres.** En ne décrivant pas -ou en décrivant trop grossièrement- certaines composantes du paysage (îles, montagne, vallées), ces simulations ignorent les effets de ces composantes sur le climat. Par ailleurs les processus d'échelle inférieure à la maille, tels que par exemple les orages, ne sont pas décrits explicitement.

De même, à cette résolution, ces modèles ne permettent pas de fournir des données assez précises (spatialement) pour toutes les études d'impact du changement climatique, comme par exemple l'impact du changement climatique sur les glaciers, sur un fleuve particulier, sur les maladies tropicales, sur l'océan côtier, ... Ces domaines ont besoin de simulations à plus haute résolution spatiale. Le dernier inconvénient des modèles à basse résolution est leur faible capacité à simuler les événements extrêmes qui sont souvent liés à des processus ou à des forçages de petites échelles. Pour ces raisons, la communauté scientifique du climat a développé la notion de régionalisation climatique à partir de **méthodes de désagrégation spatiale appelée également descente d'échelle**, ou encore *downscaling*.

5.1.3 Descente d'échelle

LES SIMULATIONS ISSUES DES MODELES GLOBAUX SONT TROP PEU PRECISES POUR DES ETUDES D'IMPACT DU CHANGEMENT CLIMATIQUE : LA NECESSAIRE DESCENTE D'ECHELLE

Pour des raisons de limitation de la puissance de calcul des ordinateurs disponibles et de stockage des résultats, **les modèles de circulation générale utilisés pour les simulations climatiques à l'échelle du globe possèdent généralement une résolution de l'ordre de quelques centaines de kilomètres**. En ne décrivant pas - ou en décrivant trop grossièrement - certaines composantes du paysage (îles, montagne, vallées), ces simulations ignorent les effets de ces composantes sur le climat. Par ailleurs, les processus d'échelle inférieure à la maille, tels que par exemple les orages, ne sont pas décrits explicitement.

De même, à cette résolution, ces modèles ne permettent pas de fournir des données assez précises (spatialement) pour toutes les études d'impact du changement climatique, comme par exemple l'impact du changement climatique sur les glaciers, sur un fleuve particulier, sur les maladies tropicales, sur l'océan côtier, ... Ces domaines ont besoin de simulations à plus haute résolution spatiale. **C'est fondamentalement le cas dans le cas présent d'Explore 2070 où les simulations climatiques sont utilisées comme données d'entrée de modèles hydrologiques** qui simulent la transformation de la pluie en débit à l'échelle de bassins versants. Ces bassins peuvent être de petites tailles et il est ainsi fondamental que la maille à laquelle on travaille soit assez réduite.

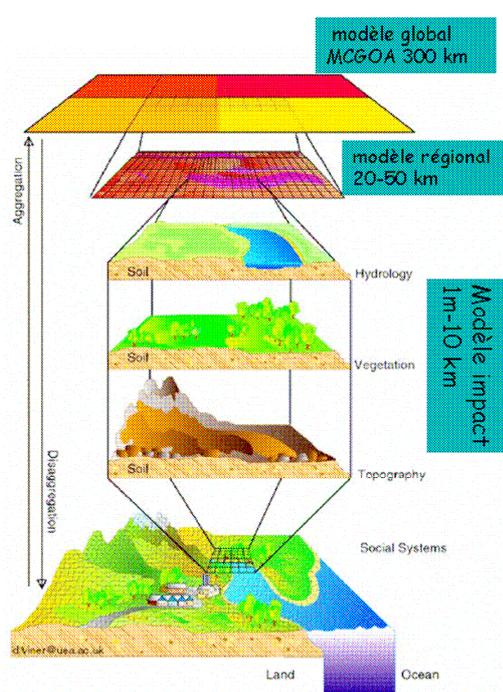
Le dernier inconvénient des modèles à basse résolution est leur faible capacité à simuler les événements extrêmes qui sont souvent liés à des processus ou à des forçages de petites échelles.

Pour ces raisons, la communauté scientifique du climat a développé la notion de **régionalisation climatique** à partir de **méthodes de désagrégation spatiale appelée également descente d'échelle**.

Les principaux objectifs de la régionalisation sont :

- ▶ améliorer la représentation de la variabilité spatiale et temporelle du climat et de son évolution, en particulier les statistiques des événements extrêmes climatiques (vagues de chaleurs, fortes pluies, sécheresses, tempêtes, cyclones, ...)
- ▶ faciliter les études d'impacts du changement climatique sur les différents secteurs socio-économiques (hydrologie, écosystèmes, santé, ...).

Figure 31 : La problématique de la désagrégation. Source Climate Research Unit, University of East Anglia



Il faut noter que la méthode de descente d'échelle peut induire des incertitudes importantes, qui ne pourront pas être quantifiées en raison du choix de méthode unique. En particulier, les incertitudes liées à la descente d'échelle peuvent être importantes sur les pluies (Déqué et al. 2007) et sur les débits (Quintana 2010). **Un état de l'art concernant les incertitudes induites par l'étape de descente d'échelle est proposé dans le document A1 - Rapport de synthèse.**

PRECISIONS SUR LES METHODES DE DESCENTE D'ECHELLE UTILISEES POUR LES DOM

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

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

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

Pour les départements d'Outre-mer, deux méthodes de descente d'échelle dynamiques ont été mobilisées :

- ▶ **une première approche fournit des données à une résolution spatiale de 50km : il s'agit des simulations "Arpège Climat _ Global _ 50km" ;**
- ▶ **une seconde approche, qui consiste à basculer et étirer la grille du modèle global pour renforcer la résolution spatiale dans la zone que l'on veut étudier. Il s'agit des simulations "Arpège Climat_pôle_Etats Unis.**

Ces deux approches sont détaillées ci-après.

Les simulations ARPEGE-climat 50 km global scenarios A1B et A2 pour les DOM

Deux expériences de **simulations globales haute résolution 50x50 km** ont été réalisées avec le modèle ARPEGE V4.6.

La première expérience a été réalisée avec le scénario d'émission **A1B** et les caractéristiques suivantes :

- ▶ La période de référence couvre 1950-2000 ;
- ▶ Les projections couvrent la période 2001-2100 ;
- ▶ La température de surface de la mer (TSM) provient des simulations issues d'une version globale couplée d'ARPEGE qui a été utilisée dans les simulations dites "stream2" du projet FP6-ENSEMBLES (postérieurement à l'AR4). Ces TSM ainsi obtenues servent ensuite au forçage du modèle ARPEGE-Climat étiré (**TSM dite « stream2 »**).

Ces simulations sont présentées sous le nom : **Glob50-SST-stream2**.

La deuxième expérience a été réalisée avec le scénario d'émission **A2** et les caractéristiques suivantes :

- ▶ La période de référence couvre 1979-2003 ;
- ▶ Les projections couvrent la période 2040-2070.

Les températures de surface de la mer SST sont issues de séries observées (European Centre for Medium-Range Weather Forecasts) . En climat futur, on ajoute à ces valeurs des écarts de TSM mensuels calculés via la projection climatique ARPEGE Climat scénario A2.

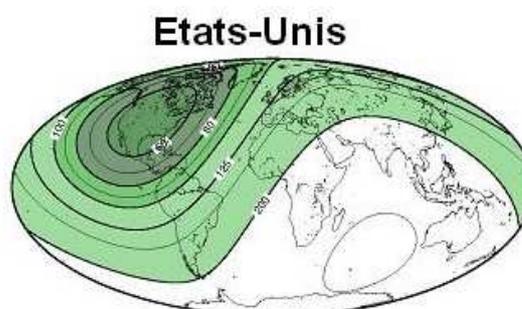
Ces simulations sont présentées sous le nom : **Glob50-SST-ERA40**.

Les simulations ARPEGE-climat pôle Etats-Unis scenario A1B pour les DOM

Deux simulations avec un pôle d'étirement (maximum de résolution) sur les États-Unis ont été effectuées en 2008 par le centre de recherche de Météo France, **pour le scénario A1B**, sur période continue 1950-2100.

Le pôle est positionné à 40°N, le facteur d'étirement est de 2.5.

Figure 32 : Simulation ARPEGE climat pôle Etats-Unis



La première simulation est réalisée avec une SST « stream 2 ».

Ces simulations apparaissent sous le nom : **Etiré EU-SST Stream2** dans le présent rapport.

La deuxième est réalisée avec un jeu de données de TSM de l'institut Hadley (centre de recherche britannique).

Ces simulations apparaissent sous le nom : **Etiré EU-SST Hadley Center** dans le présent rapport.

5.1.3.1 Correction de biais

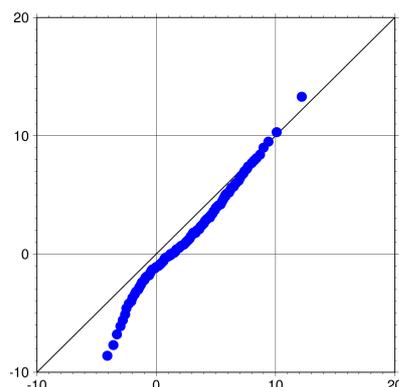
Les simulations de l'île de La Réunion et de la Guyane bénéficient d'un débiaisage des données réalisé via la méthode quantile - quantile.

DESCRIPTION DE LA METHODE DE CORRECTION QUANTILE-QUANTILE

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

Elle consiste à comparer les fonctions de densité probabiliste pour chaque saison et variable. Le diagramme quantile-quantile (Figure 32) est à la fois un outil d'analyse et une méthode de correction (Déqué, 2007).

Figure 33 : Diagramme quantile-quantile pour les températures minimales à Paris en hiver (°C). Les quantiles du modèle sont en abscisse et ceux de l'observation sont en ordonnée



Il s'agit d'une méthode non-linéaire qui consiste à corriger les valeurs des quantiles du modèle par ceux calculés à partir des observations. En chaque point du modèle, pour chaque variable météorologique on calcule les 99 centiles des séries quotidiennes. On calcule de même les 99 centiles des séries observées. Chaque variable est corrigée indépendamment et au pas de temps quotidien.

Cette correction repose sur le principe suivant : le modèle et la réalité ont chacun leur propre échelle de valeur.

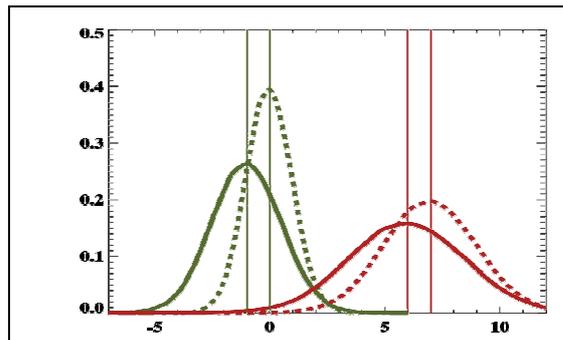
La fonction de correction consiste à associer chaque centile du modèle au centile observé. Pour toute valeur du modèle située entre deux centiles, on fait une interpolation linéaire. Au delà du 99ème et en deçà du 1er, on applique une correction constante estimée sur le centile extrême correspondant.

Dans un climat modifié, on suppose que l'échelle de valeurs du modèle, caractérisée par les 99 centiles d'une série de référence reste la même, ce qui implique que les extrapolations de valeurs extrêmes, qui ont lieu dans 1% des cas pour le climat de référence, peuvent avoir lieu plus fréquemment et concerner des incréments plus élevés. Cela correspond aux extrémités de la courbe quantile-quantile, qui sont aussi les moins bien connues.

Aucune méthode de correction ne peut se passer d'une hypothèse sur le comportement du modèle dans le climat futur. Il existe des variantes de la méthode quantile-quantile. Nous avons utilisé ici la plus simple et la plus robuste.

Le graphique de la Figure 34 présente un exemple d'évolution d'une distribution : la méthode quantile-quantile permet de tenir compte d'une modification de la fréquence des maxima ainsi que d'une modification des maxima eux-mêmes.

Figure 34 : Exemple d'évolution d'une distribution (en vert pour le climat présent, en rouge pour le climat futur, en pointillé pour les valeurs corrigées par la méthode quantile-quantile et en trait continu pour les sorties brutes du modèle)



Cette méthode offre la possibilité d'utiliser les observations de plusieurs stations à l'intérieur d'une zone ou d'une maille du modèle, ce qui permet d'augmenter la taille de l'échantillon et de prendre en compte la variabilité sous-maille. Elle est adaptée pour l'étude des extrêmes et présente l'avantage de présenter une bonne cohérence temporelle permettant, par exemple, l'étude de périodes de sécheresse ou de nombre de jours consécutifs de fortes précipitations ou de fortes/faibles températures.

Les 99 centiles des séries observées sont calculés. La fonction de correction consiste à associer chaque centile du modèle au centile de SAFRAN correspondant. Pour toute valeur du modèle située entre deux centiles, on fait une interpolation linéaire. Au delà du 99ème et en deçà du 1er, une correction constante estimée sur le centile extrême correspondant est appliquée.

Ce type de correction a pu être appliquée :

- ▶ **Sur 4 stations en température et précipitations de Guyane : Rochambeau, Maripasoula, St Georges et St Laurent ;**
- ▶ **Pour 6 postes de température de l'île de la Réunion : Gillot, le Port, Pierrefonds-Aéroport, Colimaçons, Plaine des Palmistes, Plaine des Cafres ;**
- ▶ **Pour 7 postes de précipitations de l'île de la Réunion : Gillot, Beauvallon, la Plaine des Palmistes, la Plaine des Cafres, Cilaos, Pierrefonds-Cirad et Grand-Galet.**

5.1.4 Prise en compte des incertitudes

Les **sources d'incertitude** sont multiples mais elles peuvent être classées en trois grandes catégories :

- ▶ **Il s'agit d'abord des incertitudes sur les paramètres d'entrée des modèles incluant l'état initial et ceux qui interviennent dans les paramétrisations (dont les scénarios socio-économiques, la chimie atmosphérique).**

- ▶ Il s'agit ensuite des **incertitudes liées à la conception même des modèles qui proviennent des équations utilisées ou du traitement numérique de ces équations**. Il convient aussi d'y inclure **l'absence de représentation de certains processus qu'ils soient négligés ou mal connus** (comme la fonte plus ou moins accélérée des calottes groënlandaise et ouest-Antarctique, rétroaction des surfaces continentales dont couverture végétale, cycles du carbone et de l'azote...).
- ▶ Enfin, **une troisième source d'incertitude est le caractère en partie chaotique du climat du fait de sa variabilité naturelle, qui se traduit par le fait qu'un même modèle partant de deux états climatiques très proches calcule deux évolutions climatiques qui peuvent être notablement différentes**.

A celles-ci s'ajoutent **d'autres sources d'incertitude non quantifiables** pour l'instant (crises, guerres, épidémie végétales et animales, éruptions volcaniques, tremblement de terre, etc...).

Toutefois, ce résultat a été obtenu sans considérer les incertitudes liées à la descente d'échelle, qui peuvent être importantes sur les pluies (Déqué et al., 2007) et in-fine sur les débits (Quintana, 2010). Ces incertitudes invitent donc à la prudence dans l'analyse des résultats.

5.2 SYNTHÈSE DES DONNÉES MISES À DISPOSITION POUR LE PROJET

NB : Certaines images de ce paragraphe proviennent de GoogleEarth ©Google

La Figure 35: Points de grille des simulations pour les départements d'Outre-mer localise les points de grille des simulations pour les départements d'Outre-mer.

A la date de démarrage du projet, les départements français des Antilles ne sont couverts par aucun point de grille des simulations ARPEGE Climat. C'est pourquoi nous proposons une alternative en mettant à disposition des points de simulations situés sur les terres les plus proches possibles des îles françaises de l'arc antillais :

- ▶ le point 76340 (61,5°W, 10,2°N), situé à **Trinidad**, pour les simulations globales 50x50km (à 440 km des Antilles) ;
- ▶ le point 14556 (66,5°W, 18,4°N), situé à **Porto Rico**, pour les simulations pôle étiré Etats-Unis (à 720 km des Antilles).

Pour la Guyane, on dispose de 14 points pour les simulations pôle Etats-Unis.

Ces simulations ont permis de mettre en œuvre la méthode de correction « quantile-quantile » pour le calcul des indices climatiques de températures et de précipitations (Déqué, 2007, voir plus haut au paragraphe 5.1.3.1 la description de la méthode). Ainsi les données simulées des stations de Rochambeau, Maripasoula, St Georges et St Laurent ont été corrigées pour Tmin, Tmax et les précipitations quotidiennes pour les simulations glob50A1B, USAetireA1B_SSTHadc et USAetireA1B_SSTstream2.

Ces données ont été livrées au lot 3 pour exploitation dans les modèles hydrologiques.

Pour l'île de la Réunion, Un seul point de grille issu des simulations globales 50x50km d'ARPEGE climat est situé sur l'île (point 121214 : latitude : 21.22 S longitude : 55.50 E altitude : 530.75 m).

Cette simulation a permis de mettre en œuvre la méthode de correction « quantile-quantile » pour le calcul des indices climatiques de températures et de précipitations (Déqué, 2007, voir plus haut au paragraphe 5.1.3.1 la description de la méthode), dans le cadre de l'étude effectuée par la direction interrégionale de Météo-France sur l'île de La Réunion en 2009.

Ainsi, pour les températures, la méthode quantile-quantile a pu être appliquée sur 6 postes de l'île dont les données ont été homogénéisées : Gillot, le Port, Pierrefonds-Aéroport, Colimaçons, Plaine des Palmistes, Plaine des Cafres.

Pour les précipitations, la méthode quantile-quantile a pu être appliquée sur 7 postes de l'île : Gillot, Beauvallon, la Plaine des Palmistes, la Plaine des Cafres, Cilaos, Pierrefonds-Cirad et Grand-Galet.

Pour l'île de la Réunion et la Guyane, on dispose donc, à l'issue du travail de correction quantile-quantile, de données de simulations au droit :

- ▶ **de 9 postes pour la Réunion;**
- ▶ **de 4 postes pour la Guyane.**

Des simulations complémentaires ont été produites, et sont utilisées dans l'analyse des évolutions climatiques possibles développée plus bas. Ces données, pour des raisons de contraintes techniques (travail de débiaisage non réalisés, scénario GES non retenu...) n'ont cependant pas été utilisées pour les études hydrologiques réalisées dans Explore 2070. Il s'agit en particulier :

- ▶ de simulation utilisant le scénario d'émission de gaz à effet de serre A2 ;
- ▶ de simulation global 50km sur la Guyane, non corrigées quantile-quantile.

Figure 35: Points de grille des simulations pour les départements d'Outre-mer

Martinique et Guadeloupe

Point de grille 76340 à Trinidad des simulations globales 50x50km d'ARPEGE climat et point 14556 à Porto Rico des simulations pôle étiré Etats-Unis d'ARPEGE climat



Ile de la Réunion

Point de grille 121214 sur l'île de La Réunion pour les simulations globales 50x50km d'ARPEGE climat



Guyane

14 points de grille sur la Guyane des simulations pôle étiré Etats-Unis d'ARPEGE climat



Des résultats de simulations ARPEGE-climat V4 pôle Etats-Unis et ARPEGE-climat V4 globe 50 km ont été livrés pour la période de référence 1961-1990 (1979-2003 pour la simulation globale 50 km A2) et les projections 2040-2070 pour les températures minimales, maximales et les précipitations, corrigées par la méthode quantile-quantile pour l'île de la Réunion.

5.3 ANALYSE DES EVOLUTIONS CLIMATIQUES POSSIBLES A L'HORIZON 2040-2070

Les simulations temps passé (dîtes « de référence ») couvrent la période 1961/1990 (climat « relativement » stable) hors cas particulier de la simulation globale 50km A2.

L'horizon étudié est 2040-2070.

5.3.1 Formalisme de présentation des résultats

TABLEAUX INDIQUANT L'INTERVALLE DE CONFIANCE ET ECARTS MINIMUM/MAXIMUM

Les résultats sont présentés sous forme de tableaux indiquant la valeur de l'indice pour la période de référence (sans correction), et les écarts à cette période de référence pour chacune des simulations pour l'horizon indiqué.

L'intervalle d'incertitude est donné pour l'écart moyen à la valeur de référence correspondant à un niveau de confiance de 95%.

Pour la référence et le scénario, un intervalle de confiance propre sur la valeur moyenne est déterminé à partir des 19, 30 ou 31 valeurs de l'échantillon en considérant une distribution normale et l'indépendance de ces valeurs. Selon la loi de Student, cet intervalle de confiance autour de la valeur moyenne de l'indice est estimé de la façon suivante :

$$\left[\bar{X} - t \frac{\sigma(X)}{\sqrt{N}} ; \bar{X} + t \frac{\sigma(X)}{\sqrt{N}} \right]$$

avec t issu de la table de Student pour P=95%

L'incertitude totale sur l'écart scénario-référence est finalement déduite en combinant les deux incertitudes. Cet intervalle permet d'estimer l'incertitude liée à la variabilité naturelle du climat, mais ne prend en compte ni l'incertitude liée au scénario d'émission utilisé, ni celle liée aux limites des modèles climatiques.

Afin de présenter l'éventail des possibles dû à ces incertitudes, les résultats sont montrés indépendamment pour chacun des modèles (et éventuellement des scénarios). Les valeurs entre parenthèses donnent une indication sur les extrêmes simulés par les modèles. Elles correspondent aux valeurs minimale et maximale obtenues sur la période considérée parmi l'échantillon de valeurs annuelles. A titre d'exemple, la Figure 39 explicite ce que l'on lit dans l'extrait de tableau suivant :

Figure 36 : Exemple de restitution de résultat de modèle

Simulations	Température minimale quotidienne	
	Moyenne pour la période de référence-en °C	Écart par rapport à la valeur de référence-en °C
Étiré EU-SST Hadley Center-Trinidad-A1B	20,5	1,7/2,2 (0,7/3,1)

Écart entre la valeur moyenne de l'indice sur 2040-2070 et la valeur de référence (intervalle de confiance correspondant à un niveau de confiance de +95%)

Écart min/max sur la période considérée

Valeur de référence (période 1961-1990 sauf indication contraire)

Nom de la simulation et scénario associé

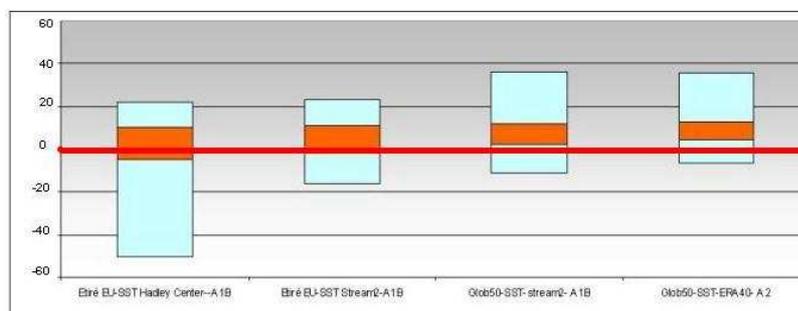
Dans le cas de la simulation ARPEGE-Climat étiré initialisé par la SST Hadley Center, pour le point de simulation de Trinidad, scénario A1B, l'indice (en l'occurrence la température minimale quotidienne) vaut 20,5°C en moyenne sur la période de référence. Sa valeur moyenne sur la période 2040-2070 est susceptible d'augmenter d'une quantité comprise entre 1,7°C et 2,2°C (avec un niveau de confiance de 95%). La fonction de répartition est donc calculée sur les moyennes annuelles ou saisonnières, prises comme autant de réalisations du même processus aléatoire. Cependant, sur la période 2040-2070, la valeur moyenne en T minimale de l'année la plus « fraîche » de la simulation est plus chaude de 0,7°C par rapport à la référence, l'année la plus chaude s'écartant quant à elle de 3,1°C de cette référence.

REPRESENTATION SOUS FORME D'HISTOGRAMMES

Dans l'exemple de la figure ci-dessous, indiquant les « Rapport de valeur moyenne annuelle du cumul de précipitations pour la Guyane entre simulations 2040-2070 et référence 1961-1990-A1B ou 1979-2003-A2. Intervalle de confiance et valeurs extrêmes. Pour ARPEGE climat V4 globe 50km, scénario A1B et A2. En % par rapport à la valeur de référence », la partie en orange correspond à l'intervalle de confiance : ex -4,8 à 9,9 % pour le modèle étiré Etats-Unis SST Hadley Center A1B.

La partie bleue correspond à l'écart minimum-maximum décrit en paragraphe 5.3.1 : -49,9 à 21,8 pour le modèle étiré Etats-Unis SST Hadley Center A1B. Attention les échelles varient pour chaque figure.

Figure 37 : Rapport de valeur moyenne annuelle du cumul de précipitations pour la Guyane entre simulations 2040-2070 et référence 1961-1990-A1B ou 1979-2003-A2. Intervalle de confiance et valeurs extrêmes. Pour ARPEGE climat V4 globe 50km, scénario A1B et A2. En % par rapport à la valeur de référence.



Dans les tableaux ci-dessous, sont présentées les valeurs moyennes de la température minimale et maximale pour 1 point de simulation ARPEGE (hormis dans le cas de la Guyane pour laquelle une moyenne des valeurs des points ARPEGE est calculée) par saison et en moyenne annuelle, pour la période de référence 1961-1990 et écarts entre simulations 2040-2070 et référence 1961-1990.

5.3.2 Les Antilles (par défaut : les points de Trinidad et Porto Rico)

Comme indiqué précédemment, au moment du démarrage du projet, les départements français des Antilles ne sont couverts par aucun point de grille des simulations ARPEGE Climat. Par défaut, ce sont les résultats des simulations pour les points 76340 (61,5°W, 10,2° N), situé à Trinidad, (simulations globales 50x50km) et le point 14556 (66,5°W, 18,4°N), situé à Porto Rico (simulations pôle étiré Etats-Unis) qui sont présentés ci-dessous.

Afin de disposer de quelques éléments de comparaison entre les climats de ces 2 points et les Antilles françaises, une analyse comparative des normales 1961-90 (normales OMM) est proposée ci-dessous.

Il s'agit ici de données issues de séries non homogénéisées (la série de précipitation du Lamentin a été corrigée depuis 1962, celles de températures minimales et maximales depuis 1965, ce qui ne nous a pas permis de calculer les normales 61-90 associées).

Il est cependant difficile de dire si les signaux mis en évidence sont liés à des effets locaux ou réellement représentatifs d'une région climatique. En effet, en Martinique par exemple, la pluviométrie annuelle peut varier d'un facteur 10 entre St Pierre et une station située sur la Montagne Pelée, à 10 km de là.

Des travaux menés à partir de séries homogénéisées apporteraient une réelle amélioration pour ce type d'analyse, sur des périodes différentes et sur des comparaisons plus fines.

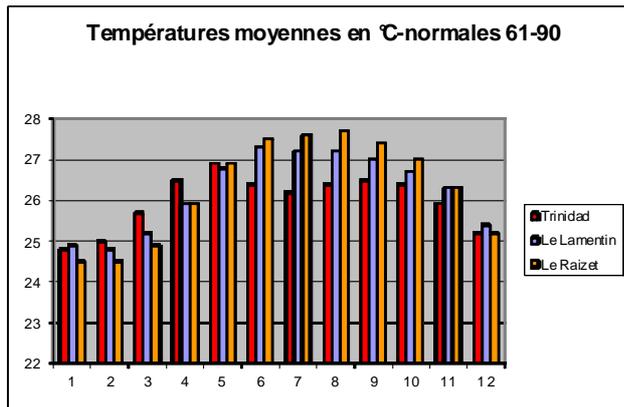
Par ailleurs, dans les tableaux ci-dessous, les résultats sont présentés sous forme de moyennes annuelles. Aucun découpage saisonnier n'est proposé du fait de l'éloignement des points de la zone d'intérêt.

LE POINT DE SIMULATION TRINIDAD

Le climat actuel (comparaison avec les Antilles)

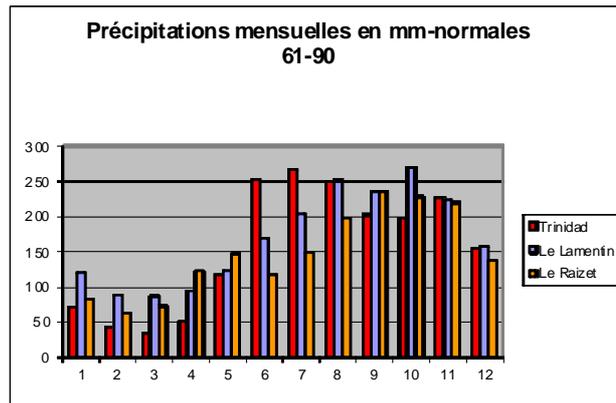
Températures

Normales de températures moyennes 1961-1990 pour Trinidad, le Lamentin et le Raizet.



Précipitations

Normales de précipitations 1961-1990 pour Trinidad, le Lamentin et le Raizet.



Sur la figure ci-dessus, il apparaît que les températures moyennes de Trinidad sont supérieures à celles des Antilles de janvier à avril puis deviennent inférieures de juin à novembre, en moyenne sur la période 1961-1990.

Trinidad bénéficie d'un climat tropical sous l'influence des alizés et de la ZCIT et n'est pas dans la trajectoire des cyclones. La saison des pluies de Trinidad a lieu de juin à décembre. Elle dure plus longtemps que celle des Antilles françaises (de juillet à octobre). Mais la saison sèche présente un déficit de précipitations, probablement dû à un effet local, par rapport au Raizet et au Lamentin. Les cumuls annuels pour la période 61-90 sont assez proches pour les 3 stations.

LES EVOLUTIONS CLIMATIQUES POSSIBLE A L'HORIZON 2040-2070

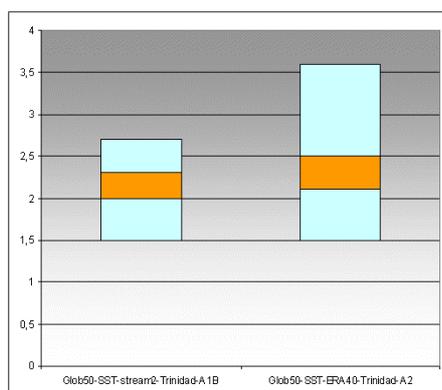
Températures et Précipitations

Moyenne annuelle des températures minimales et maximales quotidiennes, précipitations en cumul annuel pour la période de référence et écarts/rapports entre simulations 2040/2070 et référence. Intervalle de confiance pour la valeur moyenne, valeurs extrêmes entre parenthèses.

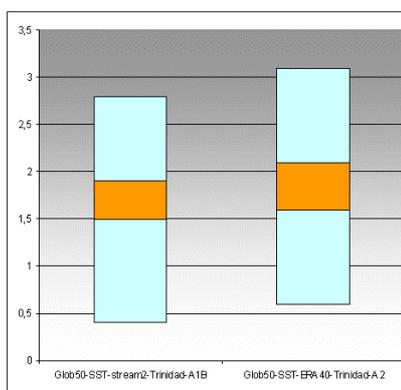
Pour les simulations ARPEGE Climat V4.6-scénario A1B et A2 pour le point Trinidad

Simulations	Température minimale quotidienne		Température maximale quotidienne		Cumul annuel de précipitations	
	Moyenne pour la période de référence-en °C	Ecart par rapport à la valeur de référence-en °C	Moyenne pour la période de référence-en °C	Ecart par rapport à la valeur de référence-en °C	Cumul moyen pour la période de référence en mm	Écarts en % par rapport à la valeur de référence
Glob50-SST-stream2—Trinidad-A1B	22,8	2,0/2,3 (1,5/2,7)	28,6	1,5/1,9 (0,4/2,8)	2000,4	-2,5/5,1 (-14,7/20,1)
Glob50-SST-ERA40-Trinidad-A2 Ref : 79/2003	23,0	2,1/2,5 (1,5/3,6)	29	1,6/2,1 (0,6/3,1)	1934,0	-1,3/4,8 (-16,8/15,2)

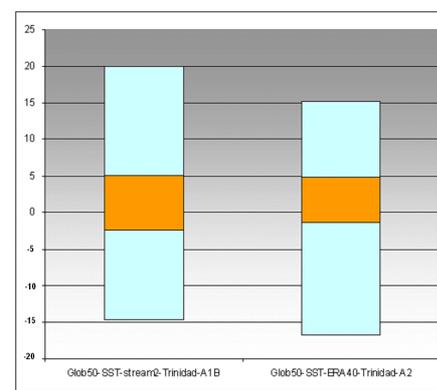
Écarts de valeur moyenne annuelle de la température minimale quotidienne pour le point de Trinidad entre simulations 2040-2070 et référence 1961-1990-A1B ou 1979-2003-A2. Intervalle de confiance et valeurs extrêmes. Pour ARPEGE climat V4 globe 50km, scénario A1B et A2. En °C



Écarts de valeur moyenne annuelle de la température maximale quotidienne pour le point de Trinidad entre simulations 2040-2070 et référence 1961-1990-A1B ou 1979-2003-A2. Intervalle de confiance et valeurs extrêmes. Pour ARPEGE climat V4 globe 50km, scénario A1B et A2. En °C



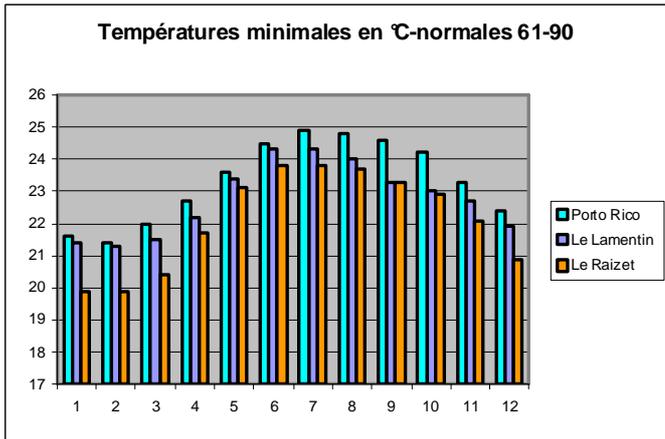
Rapport de valeur moyenne annuelle du cumul de précipitations pour le point de Trinidad entre simulations 2040-2070 et référence 1961-1990-A1B ou 1979-2003-A2. Intervalle de confiance et valeurs extrêmes. Pour ARPEGE climat V4 globe 50km, scénario A1B et A2. En % par rapport à la valeur de référence.



LE POINT DE SIMULATION PORTO-RICO

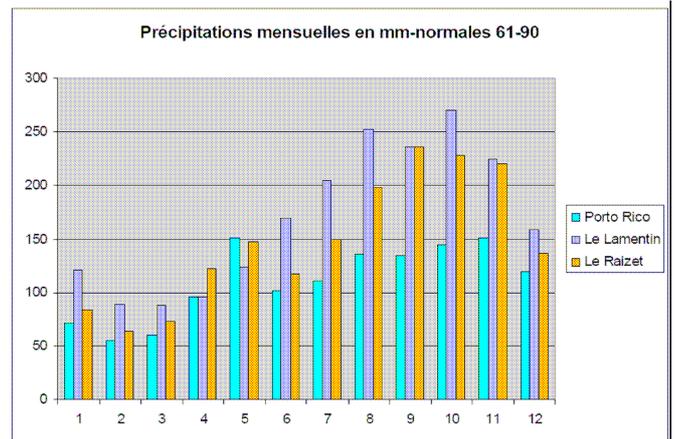
Le climat actuel (comparaison avec les antilles)

Températures

Normales de températures minimales 1961-1990 pour Porto-Rico, le Lamentin et le Raizet.

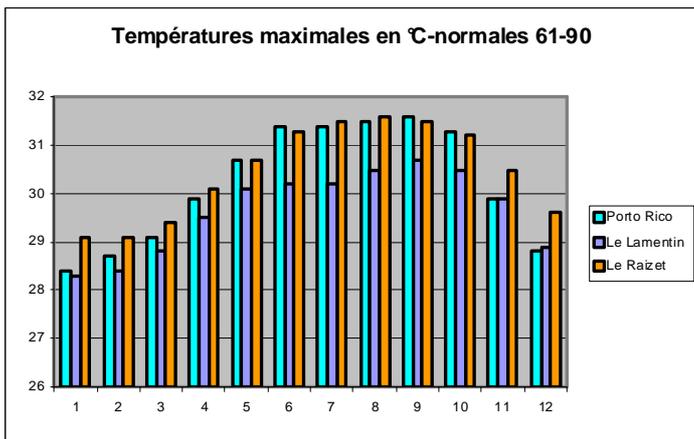
Les températures minimales de Porto Rico sont supérieures à celles du Raizet et du Lamentin, pour l'ensemble des normales mensuelles de la période 61-90.

Précipitations

Normales de précipitations 1961-1990 pour Porto Rico, le Lamentin et le Raizet

Le cumul mensuel de précipitations est plus régulier que sur les deux autres stations au cours de l'année à Porto Rico sur la période 1961-1990.

Pour information, la saison cyclonique de Porto Rico a lieu de mai à novembre

Normales de températures maximales 1961-1990 pour Porto-Rico, le Lamentin et le Raizet.

Les températures maximales de Porto Rico sont sensiblement proches de celles du Raizet d'avril à octobre, mais presque toujours supérieures à celles du Lamentin, notamment durant la saison humide des Antilles françaises sur la période 61-90.

LES EVOLUTIONS CLIMATIQUES POSSIBLE A L'HORIZON 2040-2070

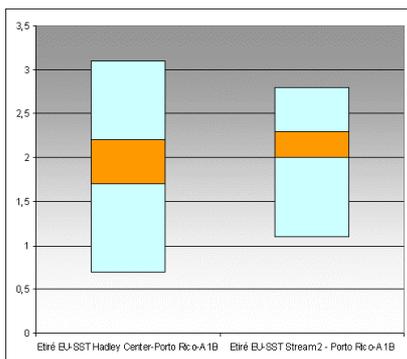
Températures et Précipitations

Moyenne annuelle des températures minimales et maximales quotidiennes, précipitations en cumul annuel pour la période de référence et écarts/rapports entre simulations 2040/2070 et référence. Intervalle de confiance pour la valeur moyenne, valeurs extrêmes entre parenthèses.

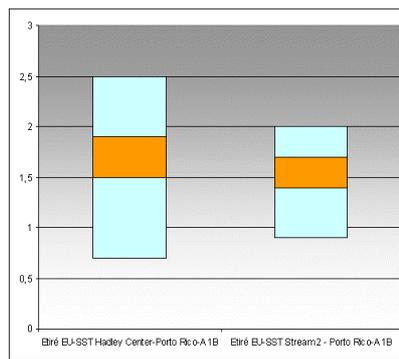
Pour les simulations ARPEGE Climat V4.6-scénario A1B et A2 pour le point Porto-Rico

Simulations	Température minimale quotidienne		Température maximale quotidienne		Cumul annuel de précipitations	
	Moyenne pour la période de référence-en °C	Ecart par rapport à la valeur de référence-en °C	Moyenne pour la période de référence-en °C	Ecart par rapport à la valeur de référence-en °C	Cumul moyen pour la période de référence en mm	Ecarts en % par rapport à la valeur de référence
Etiré EU-SST Hadley Center-Porto Rico-A1B	20,5	1,7/2,2 (0,7/3,1)	27,3	1,5/1,9 (0,7/2,5)	1737,8	-6,0/4,1 (-27,5/20,9)
Etiré EU-SST Stream2-Porto Rico -A1B	20,5	2,0/2,3 (1,1/2,8)	27,1	1,4/1,7 (0,9/2,0)	1774	-0,5/6,7 (-14,6/19,3)
Moyenne des simulations ¹ A1B pour le point Porto Rico	20,5	1,9/2,2 (0,7/3,1)	27,2	1,5/1,8 (0,8/2,6)	1755,9	-2,1/4,2 (-28,2/20,5)

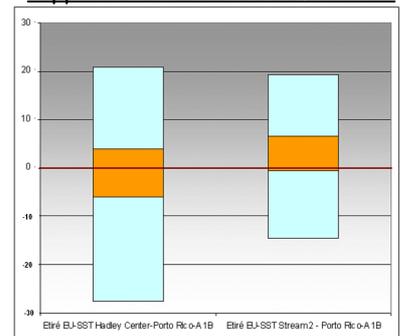
Ecarts de valeur moyenne annuelle de la température minimale quotidienne pour le point de Porto-Rico entre simulations 2040-2070 et référence 1961-1990-A1B ou 1979-2003-A2. Intervalle de confiance et valeurs extrêmes. Pour ARPEGE climat V4 globe 50km, scénario A1B.
En °C



Ecarts de valeur moyenne annuelle de la température maximale quotidienne pour le point de Porto-Rico entre simulations 2040-2070 et référence 1961-1990-A1B ou 1979-2003-A2. Intervalle de confiance et valeurs extrêmes. Pour ARPEGE climat V4 globe 50km, scénario A1B. En °C



Rapport de valeur moyenne annuelle du cumul de précipitations pour le point de Porto-Rico entre simulations 2040-2070 et référence 1961-1990-A1B ou 1979-2003-A2. Intervalle de confiance et valeurs extrêmes. Pour ARPEGE climat V4 globe 50km, scénario A1B. En % par rapport à la valeur de référence.



Pour les points de Trinidad et Porto Rico :

- ▶ **Le réchauffement est marqué pour les températures maximales et plus encore pour les minimales avec un écart moyen >1°C, voire 2°C pour les minimales (à noter qu'en métropole, ce sont les simulations de Tx qui présentent les écarts les plus élevés).**
- ▶ **Pas de signal significatif sur les précipitations**

¹ obtenue à partir des 2 simulations précédentes

5.3.3 La Guyane

Dans les tableaux ci-dessous la valeur de la période de référence est présentée dans la même cellule que les écarts à la référence et l'intervalle min/max.

Les saisons font référence au découpage indiqué en paragraphe 4.2.2.2.

Les valeurs sont obtenues par moyenne spatiale de l'ensemble des points de simulation.

5.3.3.1 Températures maximales

Tableau 5 : Moyenne des températures maximales quotidiennes par saison et en moyenne annuelle, pour la période de référence et écarts entre simulations 2040-2070 et référence. Intervalle de confiance pour la valeur moyenne, valeurs extrêmes entre parenthèses. Pour les simulations ARPEGE Climat V4.6-scénario A1B pour les points de Guyane. En °C.

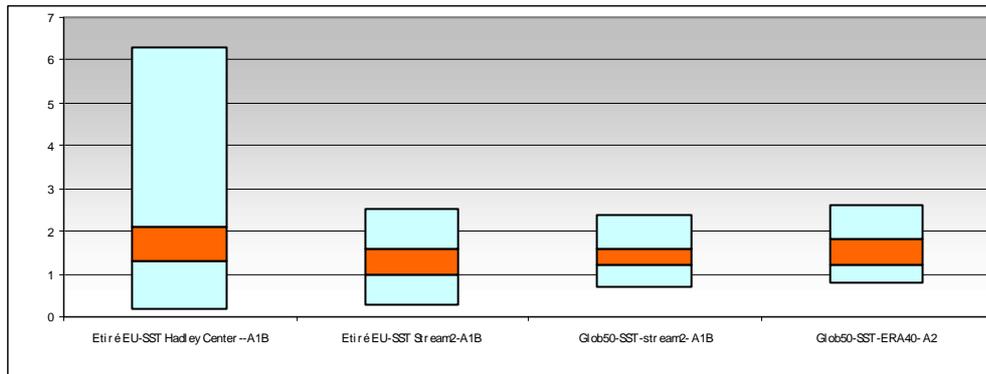
Simulations	juillet à octobre : saison sèche	novembre décembre petite saison des pluies	janvier à mars : été	avril à juin : saison des pluies	année
Etiré EU-SST Hadley Center-- A1B	30,3 1,4/2,5 (-0,2/7,5)	28,5 1,4/2,4 (0,2/6,0)	28,9 -0,2/0,7 (-1,4/3,5)	28,5 0,9/1,7 (0,4/6,0)	29,1 1,3/2,1 (0,2/6,3)
Etiré EU-SST Stream2-A1B	30,3 0,6/1,3 (0,0/2,1)	28,3 1,1/1,7 (0,6/2,6)	28,8 0,0/1,2 (-0,8/4,1)	28,3 1,1/1,6 (0,3/2,8)	29,0 1,0/1,6 (0,3/2,5)
Glob50-SST- stream2- A1B	29,9 1,5/1,9 (0,9/2,5)	27,9 1,2/1,6 (0,8/2,2)	28,2 0,3/1,1 (-0,1/3,0)	28,3 1,3/1,6 (0,6/2,2)	28,6 1,2/1,6 (0,7/2,4)
Moyenne des simulations A1B ¹	30,2 1,3/1,8 (-0,1/7,6)	28,2 1,3/1,8 (0,5/6,2)	28,6 0,2/0,8 (-1,1/4,3)	28,4 1,2/1,5 (0,3/6,1)	28,9 1,3/1,7 (0,4/6,5)

Tableau 6 : Moyenne des températures maximales quotidiennes par saison et en moyenne annuelle, pour la période de référence et écarts entre simulations 2040-2070 et référence. Intervalle de confiance pour la valeur moyenne, valeurs extrêmes entre parenthèses. Pour les simulations ARPEGE Climat V4.6-scénario A2 pour les points de Guyane. En °C.

Simulations	juillet à octobre : saison sèche	novembre décembre petite saison des pluies	janvier à mars : été	avril à juin : saison des pluies	année
Glob50-SST- ERA40- A2	30,3 1,3/2,0 (0,6/3,1)	28,2 1,3/1,9 (0,8/2,5)	28,6 0,4/1,4 (-0,2/2,7)	28,6 1,3/1,6 (0,6/2,2)	29,0 1,2/1,8 (0,8/2,6)

¹ obtenue à partir des 3 simulations précédentes

Figure 38 : Ecart de valeur moyenne annuelle de la température maximale quotidienne simulée pour la Guyane entre simulations 2040-2070 et référence 1961-1990-A1B ou 1979-2003-A2. Intervalle de confiance et valeurs extrêmes. Pour ARPEGE climat V4 globe 50km, scénario A1B et A2. En °C



Le réchauffement est marqué pour les températures maximales avec un écart moyen supérieur à 1°C pour la quasi-totalité des scénarios et des saisons (hormis l'été pour laquelle le réchauffement est moins fort).

A noter :

- ▶ des écarts maximaux très importants avec les simulations pôle étiré Etats-Unis, SST Hadley Center--A1B, dépassant 6, voire 7 °C (lié à une année simulée très sèche) ;
- ▶ des intervalles de confiance assez similaires entre les résultats des simulations A1B et A2.

5.3.3.2 Températures minimales

Le réchauffement est marqué pour les températures minimales avec un écart moyen >1, voire 2°C pour la quasi-totalité des saisons et des scénarios.

A noter :

- ▶ des écarts maximaux assez importants avec les simulations pôle étiré Etats-Unis, SST Hadley Center--A1B, dépassant 3 °C.
- ▶ résultats de la simulation A2 un peu plus pessimistes que A1B.

Tableau 7 : Moyenne des températures minimales quotidiennes par saison et en moyenne annuelle, pour la période de référence et écarts entre simulations 2040-2070 et référence. Intervalle de confiance pour la valeur moyenne, valeurs extrêmes entre parenthèses. Pour les simulations ARPEGE Climat V4.6-scénario A1B pour les points de Guyane. En °C..

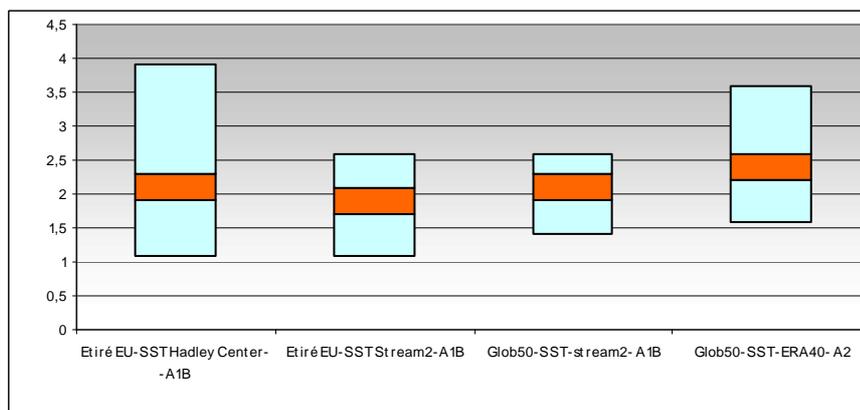
Simulations	juillet à octobre : saison sèche	novembre décembre petite saison des pluies	janvier à mars : été	avril à juin : saison des pluies	année
Etiré EU-SST Hadley Center - A1B	21,9 1,9/2,4 (1,2/4,7)	21,8 1,9/2,3 (1,2/3,1)	21,5 1,3/2,0 (-0,1/3,7)	22,1 2,0/2,5 (1,3/3,6)	21,9 1,9/2,3 (1,1/3,9)
Etiré EU-SST Stream2-A1B	21,7 2,0/2,5 (1,3/3,0)	21,9 1,6/2 (1,0/2,6)	21,6 1,1/1,6 (0,4/2,3)	22,2 1,8/2,2 (1,2/2,9)	21,9 1,7/2,1 (1,1/2,6)

Simulations	juillet à octobre : saison sèche	novembre décembre petite saison des pluies	janvier à mars : été	avril à juin : saison des pluies	année
Glob50-SST- stream2-A1B	21,3 2,2/2,6 (1,4/3,1)	21,3 1,9/2,2 (1,3/2,7)	21,3 1,1/1,6 (0,3/2,5)	21,8 1,9/2,3 (1,1/2,8)	21,5 1,9/2,3 (1,4/2,6)
Moyenne des simulations A1B ¹	21,6 2,1/2,4 (1,1/4,9)	21,6 1,9/2,1 (0,9/3,3)	21,5 1,3/1,6 (0,0/3,8)	22 2,0/2,3 (0,9/3,7)	21,7 1,9/2,1 (1,1/4,0)

Tableau 8 : Moyenne des températures minimales quotidiennes par saison et en moyenne annuelle, pour la période de référence et écarts entre simulations 2040-2070 et référence. Intervalle de confiance pour la valeur moyenne, valeurs extrêmes entre parenthèses. Pour les simulations ARPEGE Climat V4.6-scénario A2 pour les points de Guyane. En °C.

Simulations	juillet à octobre : saison sèche	novembre décembre petite saison des pluies	janvier à mars : été	avril à juin : saison des pluies	année
Glob50-SST- ERA40-A2	21,7 2,5/3,0 (1,8/4,4)	21,5 2,2/2,6 (1,6/3,5)	21,5 1,4/1,9 (0,6/2,9)	21,9 2,0/2,5 (1,4/3,7)	21,7 2,2/2,6 (1,6/3,6)
Ref : 79/2003					

Figure 39 : Ecart de valeur moyenne annuelle de la température minimale quotidienne simulée pour la Guyane entre simulations 2040-2070 et référence 1961-1990-A1B ou 1979-2003-A2. Intervalle de confiance et valeurs extrêmes.. Pour ARPEGE climat V4 globe 50km, scénario A1B et A2. En °C



5.3.3.3 Précipitations

Tableau 9 : Cumul de précipitations par saison et par année, en mm, pour la période de référence et rapport

¹ obtenue à partir des 3 simulations précédentes

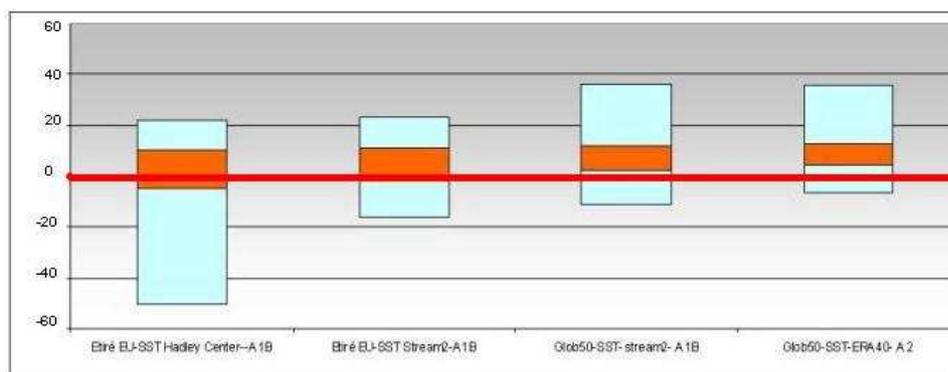
entre simulations 2040-2070 et référence, en pourcentage. Intervalle de confiance pour la valeur moyenne, valeurs extrêmes entre parenthèses. Pour les simulations ARPEGE Climat V4.6-scénario A1B pour les points de Guyane.

Simulations	juillet à octobre : saison sèche	novembre décembre petite saison des pluies	janvier à mars : été	avril à juin : saison des pluies	année
Etiré EU-SST Hadley Center-- A1B	548,3 -28,5/ -8,3 (-74,4/ 27,7)	531,7 -6,8/9,5 (-52,3/32,4)	210,9 12,5/39,6 (-35,0/78,9,1)	699,9 2,5/ 23,2 (-60,2/ 44,7)	1990,8 -4,8/9,9 (-49,9/21,8)
Etiré EU-SST Stream2-A1B	529,6 2,5/ 22,4 (-7,5/ 37,2)	551,7 -6,3/5,6 (-19,7/33,6)	225,3 -12,8/17,0 (-57,3/80,7)	748,9 -4,4/ 12,0 (-22,6/ 39,8)	2055,4 -1,7/11,1 (-15,5/23,3)
Glob50-SST- stream2- A1B	595,3 1,2/ 15,2 (-10,4/ 22,3)	574,3 1,6/9,5 (-6,0/44,3)	278,3 -6,9/13,1 (-53,5/42,2)	702 0,7/ 16,2 (-27,3/ 65,0)	2149,9 2,1/11,8 (-10,9/36,1)
Moyenne des simulations A1B ¹	557,8 -5,0/6,7 (-74,8/30,5)	552,6 -1,4/5,9 (-54,1/50,0)	238,1 1,8/17,3 (-59,7/70,9)	716,9 3,2/13,3 (-61,1/61 ,5)	2065,4 1,1/8,5 (-51,7/41,6)

Tableau 10 : Cumul de précipitations par saison et par année, en mm, pour la période de référence et rapport entre simulations 2040-2070 et référence, en pourcentage. Intervalle de confiance pour la valeur moyenne, valeurs extrêmes entre parenthèses. Pour les simulations ARPEGE Climat V4.6-scénario A2 pour les points de Guyane.

Simulations	juillet à octobre : saison sèche	novembre décembre petite saison des pluies	janvier à mars : été	avril à juin : saison des pluies	année
Glob50-SST- ERA40- A2	608,5 8,0/ 22,6 (-18,0/ 48,3)	564,3 6,3/14,1 (-5,3/34,7)	262,4 -8,0/11,0 (-50,9/35,6)	678,0 -4,5/ 12,7 (-28,5/ 63,8)	2113,3 4,3/12,9 (-6,4/35,7)

Figure 40 : Rapport de valeur moyenne annuelle du cumul de précipitations pour la Guyane entre simulations 2040-2070 et référence 1961-1990-A1B ou 1979-2003-A2. Intervalle de confiance et valeurs extrêmes. Pour ARPEGE climat V4.6 globe 50km, scénario A1B et A2. En % par rapport à la valeur de référence.



Les ratios de précipitation sont assez peu significatifs.

¹ obtenue à partir des 3 simulations précédentes

5.3.4 L'île de La Réunion

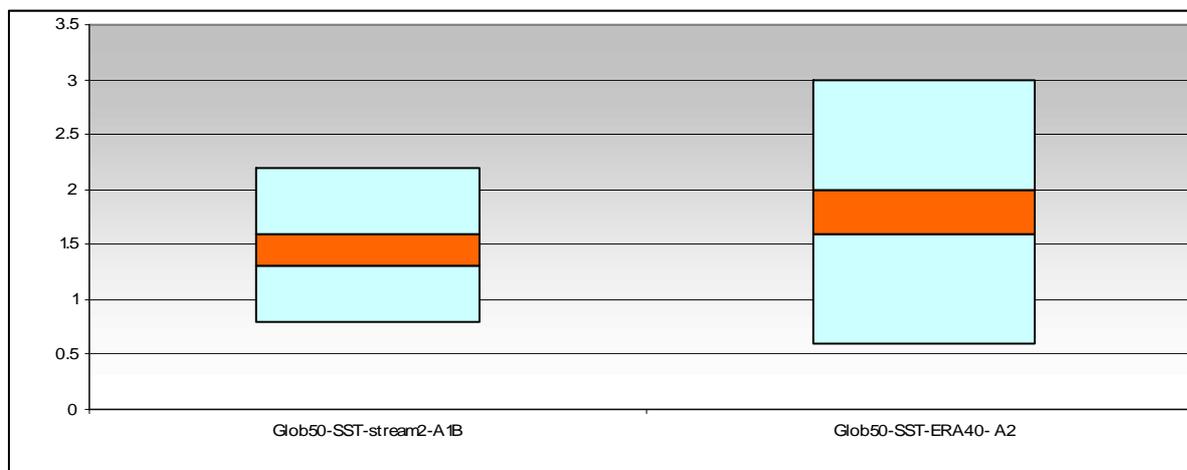
Dans les tableaux ci-dessous la valeur de la période de référence est présentée dans la même cellule que les écarts à la référence et l'intervalle min/max.

5.3.4.1 Températures maximales

Tableau 11 : Moyenne des températures maximales quotidiennes par saison et en moyenne annuelle, pour la période de référence et écarts entre simulations 2040-2070 et référence. Intervalle de confiance pour la valeur moyenne, valeurs extrêmes entre parenthèses. Pour les simulations ARPEGE Climat V4.6-scénario A1B et A2 pour le point de l'île de la Réunion. En °C.

Simulations	Janvier à mars Saison des pluies	Avril Saison intermédiaire	Mai à novembre Saison sèche	Décembre Saison intermédiaire	année
Glob50-SST-stream2- A1B	24,9 1,0/1,5 (0,4/2,1)	23,6 1,1/1,6 (0,1/2,7)	21,9 1,4/1,7 (0,7/2,4)	24,3 1,3/1,8 (0,3/2,8)	23 1,3/1,6 (0,8/2,2)
Glob50-SST-ERA40- A2	25,2 1,2/1,7 (0,1/2,8)	24 1,3/1,8 (0,1/2,9)	22,1 1,7/2,2 (0,7/3,4)	24,7 1,6/2,2 (0,5/3,9)	23,2 1,6/2 (0,6/3,0)

Figure 41 : Ecarts de valeur moyenne annuelle de la température maximale quotidienne simulée pour le point de l'île de la Réunion entre simulations 2040-2070 et référence 1961-1990-A1B ou 1979-2003-A2. Intervalle de confiance et valeurs extrêmes. Pour ARPEGE climat V4 globe 50km, scénario A1B et A2. En°C.



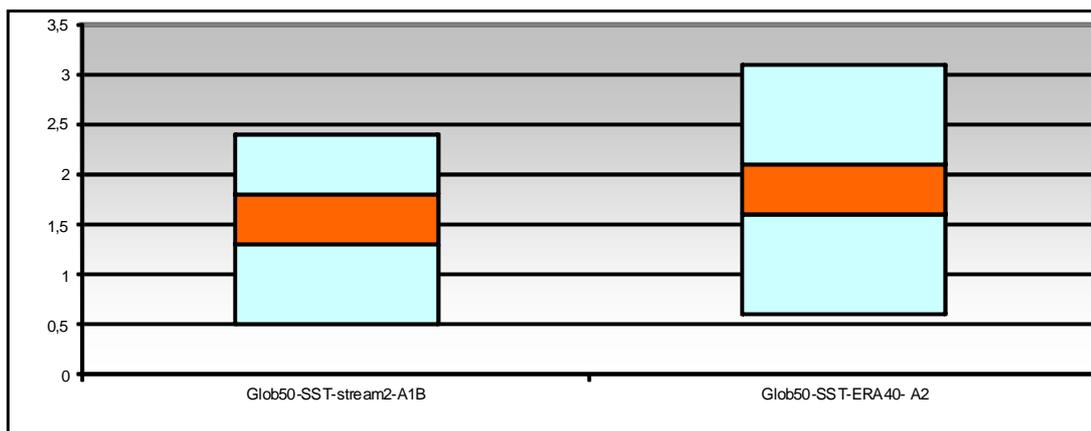
Le réchauffement est marqué pour les températures maximales avec un écart moyen supérieur à 1°C.

5.3.4.2 Températures minimales

Tableau 12 : Moyenne des températures minimales quotidiennes par saison et en moyenne annuelle, pour la période de référence et écarts entre simulations 2040-2070 et référence. Intervalle de confiance pour la valeur moyenne, valeurs extrêmes entre parenthèses. Pour les simulations ARPEGE Climat V4.6-scénario A1B et A2 pour le point de l'île de la Réunion. En °C.

Simulations	Janvier à mars Saison des pluies	Avril Saison intermédiaire	Mai à novembre Saison sèche	Décembre Saison intermédiaire	année
Glob50-SST-stream2-A1B	19,9 1,1/1,7 (-0,4/2,5)	18,8 1,3/2,0 (-0,5/3,2)	15,2 1,4/1,9 (0,4/2,5)	19,1 1,2/2,0 (-0,6/3,2)	17,0 1,3/1,8 (0,5/2,4)
Glob50-SST-ERA40- A2	20,2 1,6/2,1 (0,3/3,5)	19,3 1,3/2 (-0,2/3,2)	15,5 1,5/2,1 (0,4/3,1)	19,5 1,7/2,4 (0,5/3,3)	17,3 1,6/2,1 (0,6/3,1)

Figure 42 : Ecart de valeur moyenne annuelle de la température minimale quotidienne simulée pour le point de l'île de la Réunion entre simulations 2040-2070 et référence 1961-1990-A1B ou 1979-2003-A2. Intervalle de confiance et valeurs extrêmes. Pour ARPEGE climat V4 globe 50km, scénario A1B et A2. En °C.



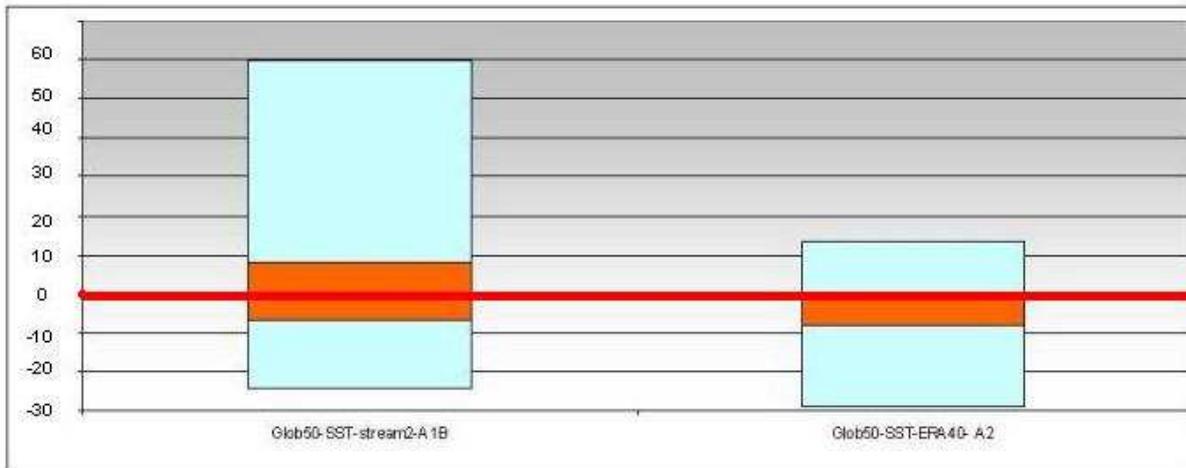
Le réchauffement est marqué pour les températures minimales avec un écart moyen >1°C.

5.3.4.3 Précipitations

Tableau 13 : Cumul de précipitations par saison et par année, en mm, pour la période de référence et rapport entre simulations 2040-2070 et référence, en pourcentage. Intervalle de confiance pour la valeur moyenne, valeurs extrêmes entre parenthèses. Pour les simulations ARPEGE Climat V4.6-scénario A1B et A2 pour le point de l'île de la Réunion.

Simulations	Janvier à mars Saison des pluies	Avril Saison intermédiaire	Mai à novembre Saison sèche	Décembre Saison intermédiaire	année
Glob50-SST-stream2- A1B	781,3 -5,1/13,3 (-33,4/99,3)	167,4 -17,6/42,1 (-52,2/394,0)	652,0 -18,5/2,7 (-52,6/51,3)	297,5 -10,4/16,9 (-51,9/98,4)	1898,2 -6,9/8,0 (-24,4/60,1)
Glob50-SST-ERA40- A2	873,4 -8,7/6,1 (-27,4/49,8)	177,7 -20,2/10,2 (-52,5/73,1)	663,5 -16,8/-2,6 (-38,3/46,2)	281,9 -9,8/13,5 (-38,7/68,7)	1996,4 -8,1/0,1 (-28,5/13,5)

Figure 43 : Rapport du cumul de précipitations moyen annuel pour le point de l'île de la Réunion entre simulations 2040-2070 et référence 1961-1990-A1B ou 1979-2003-A2. Intervalle de confiance et valeurs extrêmes. Pour ARPEGE climat V4 globe 50km, scénario A1B et A2. En % par rapport à la moyenne de référence



Les ratios de précipitation ne montrent pas d'évolution par rapport au climat de référence.

6. SIMULATIONS DE DEBITS DANS LES DOM

6.1 DEMARCHE GENERALE

Pour simuler les débits actuels et futurs de bassins versants de départements d'Outre-mer, le Lot Hydrologie de surface a utilisé le modèle hydrologique GR4J de l'Irstea (ex Cemagref). La démarche mise en œuvre pour les modélisations hydrologiques est la suivante.

- ▶ Choix des points de calcul et traitement des données hydrologiques et climatiques : Le choix des points de calcul dépend principalement de la disponibilité des données hydrologiques et climatiques.
- ▶ Phase de calage : Le modèle GR4J est un modèle hydrologique à réservoirs à quatre paramètres. Il nécessite une phase de calage qui permettra de déterminer les paramètres du modèle pour un bassin versant donné. Pour cette phase, il faut disposer de chroniques météorologiques et hydrologiques observées. On cherche, lors de ce calage, les valeurs de paramètres qui permettront de minimiser l'écart entre les débits observés et les débits simulés par le modèle. Ces valeurs permettront de paramétrer le modèle utilisé en temps futur. Cela implique une hypothèse forte, qui revient à supposer que la fonction de transformation opérée par le bassin ne varie pas avec le climat. Cette phase nécessite donc de constituer des bases de données hydrologiques et météorologiques observées. La constitution de ces bases de données est précisée au paragraphe 6.4.1. La procédure de calage est détaillée au paragraphe 6.5.1.2.
- ▶ Evaluation de la fiabilité du modèle hydrologique : Il est important d'analyser les performances des modélisations hydrologiques en temps présent, afin d'obtenir une première quantification des incertitudes associées aux simulations hydrologiques. Pour mener cette évaluation, une procédure de « calage/validation » du modèle GR4J est effectuée.
- ▶ Expérimentation d'une approche multi-paramétrages en zone cyclonique : Les Antilles et l'île de la Réunion sont soumises à des aléas cycloniques et donc à des événements hydrologiques extrêmes. Cela peut poser des difficultés pour la modélisation hydrologique. Une approche multi-paramétrage a donc été expérimentée sur ces territoires, et finalement retenue pour la Réunion uniquement. Cette approche est explicitée au paragraphe 6.5.2. L'idée principale de cette approche est de combiner de manière continue deux types de calages du modèle hydrologique GR. En conséquence, la phase de calage et la phase d'évaluation de la fiabilité du modèle seront distinctes pour l'île de la Réunion, puisqu'elles impliquent un double calage du modèle.
- ▶ Simulations des débits actuels et futurs. Calculs d'indicateurs. Le paramétrage du modèle établi à l'étape 2 et les données de simulations climatiques actuelles et futures permettent de simuler les débits actuels et futurs des bassins versants. Pour la suite des travaux, des indicateurs statistiques seront calculés à partir de ces simulations, afin d'analyser les changements hydrologiques.

6.2 SYNTHÈSE DES DONNÉES CLIMATIQUES DISPONIBLES

Les tableaux présentés ci-après synthétisent les données fournies par Météo France et utilisées pour les modélisations hydrologiques dans les départements d'Outre Mer.

6.2.1 Données d'observations météorologiques

Tableau 14 : Synthèse des données d'observations fournies pour le calage des modèles hydrologiques sur les départements d'Outre-mer.

DOM	Traitement Météo France	Postes	Période fournie	Couverture géographique
Guyane	Chroniques non homogénéisées	9 postes (T,P) 1 poste P	1980-2010 pour les 10 postes et 1961-1990 pour 4 postes	- Faible couverture géographique - 1 seul poste à l'intérieur des terres
Martinique	Chroniques non homogénéisées	12 postes (T,P) 10 postes P	1980-2010	- Assez bonne couverture géographique de la moitié Nord de l'île
Guadeloupe	Chroniques non homogénéisées	2 postes (T,P) 15 postes P à Basse-Terre	1980-2010	- Faible couverture géographique : absence de poste en altitude et peu de poste au sud de Basse Terre (versant Est)
Réunion	Chroniques corrigées et homogénéisées	5 postes T 6 postes P	1979-2003	- Assez bonne couverture géographique - Postes principalement sur la côte - Peu de postes en altitude.

T = Température ; P = Pluviométrie

Pour la Guadeloupe et la Guyane, la couverture géographique restreinte des postes pluviométriques pourrait poser des difficultés lors des modélisations hydrologiques.

6.2.2 Données de simulations climatiques utilisées dans les simulations hydrologiques

Tableau 15: Synthèse des données de simulations fournies pour les départements d'Outre-mer

DOM	Scénario	Modélisation Arpège	Traitement	Points de simulation	Périodes de simulations
Guyane	A1B	EtireEU_SST-Hadc	correction quantile-quantile	4 sur le territoire	TP : 1961-1990 TF : 2040-2070
	A1B	EtireEU_SSTstream2	correction quantile-quantile	4 sur le territoire	TP : 1961-1990 TF : 2040-2070
Antilles	A1B	Glob50_SSTstream2	aucun	1 : Trinidad	TP : 1961-2000 TF : 2040-2070
	A1B	EtireEU_SSTstream2	aucun	1 : Porto Rico	TP : 1961-2000 TF : 2040-2070
	A1B	EtireEU_SST-Hadc	aucun	1 : Porto Rico	TP : 1961-2000 TF : 2040-2070
Réunion	A2	Glob50_A2	correction quantile-quantile	9 sur le territoire	TP : 1979-2003 TF : 2040-2070

Pour les Antilles, on dispose uniquement de simulations non traitées et non corrigées. La méthode des anomalies, détaillée au paragraphe 6.4, est mise en œuvre pour utiliser ces données.

Pour la Guyane, seuls 4 points de simulations corrigées sont disponibles, ce qui implique une faible représentativité des données pluviométriques à l'échelle des bassins versants, et pourrait engendrer de faibles performances du modèle hydrologique.

6.3 DONNEES HYDROLOGIQUES UTILISEES ET SELECTION DES BASSINS VERSANTS

Compte tenu de la faible disponibilité des données d'observations hydrométriques et météorologiques dont nous disposons pour les DOM, la constitution de la base de données hydrologique ne peut pas suivre exactement la méthode présentée pour la Métropole. La période de référence a aussi été déplacée pour les DOM, compte tenu des données climatiques fournies.

La démarche suivie pour la sélection des stations hydrométriques est la suivante :

- ▶ Retenir les stations présentant au moins 6 années cumulées de données fiables sur la période de calage du modèle hydrologique¹. Pour les stations de la Banque Hydro, les données comptabilisées sont les données de débits ayant un code validité 8 ou 9 selon la nomenclature de la Banque Hydro ;
- ▶ Délimiter pour chaque station un bassin versant dont la station est l'exutoire. Seuls les bassins versants dont la superficie est supérieure à 4 km² sont retenus. Les bassins pour lesquels la superficie calculée est très différente de la superficie donnée dans la base de donnée hydrologique (Banque Hydro ou DEAL) ne seront pas pris en compte ;
- ▶ Vérifier la présence de chroniques météorologiques jugées suffisantes. Lorsque les postes météorologiques les plus proches du bassin sont trop peu représentatifs des conditions climatiques du bassin, celui-ci pourra être éliminé.

6.3.1 L'île de la Réunion

La période de référence sélectionnée pour la Réunion est l'intervalle 1979-2003, période pour laquelle on dispose des chroniques d'observations météorologiques et des simulations climatiques de référence (Global 50_Era40) corrigées quantile-quantile. **La période de calage du modèle hydrologique sera donc aussi l'intervalle 1979-2003.**

Les données hydrométriques utilisées proviennent de la Banque Hydro. 11 stations vérifient les critères cités ci-dessus et sont donc retenues pour la simulation des débits.

¹ La période de référence est la période pour laquelle sont calculées les simulations hydrologiques en temps passé. Elle est donc dépendante des données de simulations climatiques disponibles. La période de calage du modèle est la période qui permet de paramétrer le modèle pluie-débit à partir des données d'observations hydrologiques et météorologiques. Elle est donc sélectionnée en fonction des données d'observation météorologiques disponibles.

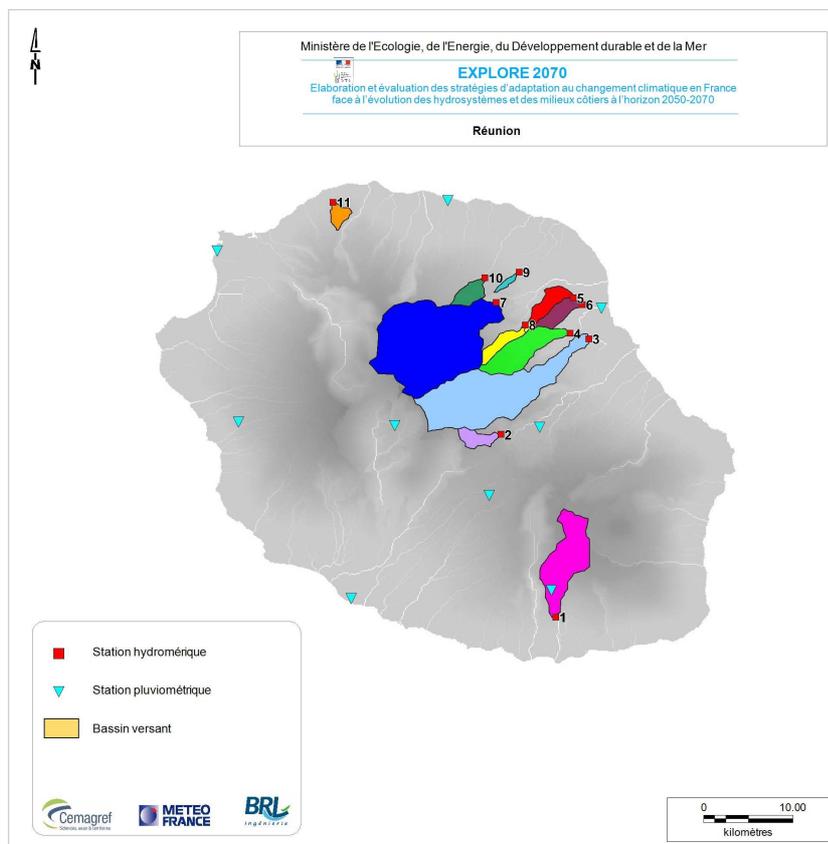
Dans la mesure du possible, on choisira des périodes de calage et de référence proches. Pour les Antilles et la Réunion, ces deux périodes sont identiques. Pour la Guyane, la période de référence (1961-1990) est incluse dans la période de calage (1961-2010).

Tableau 16: Points de calculs et bassins versants associés pour la Réunion

Stations hydrométriques retenues pour l'île de la Réunion					
Code	Nom	Longitude	Latitude	Superficie (km ²)	Années dispo ⁽¹⁾
Z40101130	Le bras Noir à la Plaine des Palmistes	55.586	-21.144	7.8	13
Z40120100	La rivière des Marsouins à S ^t Benoît	55.680	-21.041	95.8	14
Z40130130	La rivière des Roches à S ^t Benoît	55.660	-21.035	28	19
Z40131130	La rivière Bras Panon à Bras Panon	55.663	-20.997	11.3	11
Z40131170	Le bras Pétard à Bras Panon	55.673	-21.004	9.6	7
Z40200100	La rivière du Mât à Salazie	55.580	-20.999	129.2	20
Z40211090	Le bras des Lianes à Bras Panon	55.611	-21.026	8.1	20
Z40300100	Le Grand Bras à Saint André	55.606	-20.969	2	24
Z40301190	Le bras Laurent à Sainte Suzanne	55.569	-20.975	8.5	16
Z40010100	La rivière Langevin à Saint Joseph	55.644	-21.340	55.6	22
Z40321470	Le ruisseau Blanc à Saint Denis	55.412	-20.894	5.4	9

⁽¹⁾ Nombre d'années cumulées pour lesquelles des données hydrométriques sont disponibles, années comprises entre 1979 et 2008

Figure 44 : Points de calculs et bassins versants associés pour la Réunion



6.3.2 La Martinique

Les données d'observations météorologiques fournies par Météo-France pour la Martinique recouvrent la période 1980-2010. Des simulations climatiques sont fournies pour les points de Trinidad et Porto Rico, pour la période passée 1961-2000 et la période future 2040-2070.

Compte tenu de ces données de simulations climatiques, il a été choisi d'utiliser les données d'observations météorologiques pour simuler les débits en temps présent, et d'utiliser la méthode des anomalies climatiques (détaillée au paragraphe 6.4.2) pour simuler les débits en temps futur.

La période de référence doit donc être incluse dans la période des chroniques d'observation et rester assez proche de la période de référence choisie pour la Métropole. La période de calage et de référence retenue est donc **1980-2000**.

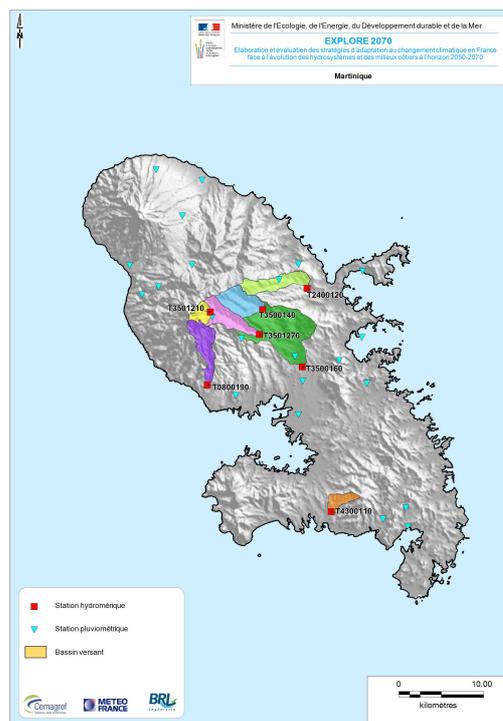
Les données hydrométriques utilisées proviennent de la Banque Hydro. 7 stations vérifient les critères cités ci-dessus.

Tableau 17 : Points de calculs choisis pour la Martinique

Stations hydrométriques retenues pour la Martinique			
Code	Nom	Superficie (km ²)	Nb années ⁽¹⁾
T0800190	Le Case Navire à Schoelcher	12.9	7
T2400120	Le Galion à Trinité	12.5	14
T3500140	La Lézarde au Gros-Morne	12.9	19
T3500160	La Lézarde au Lamentin	36.7	13
T3501210	La Blanche à Fort-de-France	4.7	15
T3501270	La Blanche à Saint-Joseph	12	11
T4300110	L'Oman à Sainte-Lucie	5	10

(1) : Nombre d'années cumulées pour lesquelles des données hydrométriques sont disponibles, années comprises entre 1980 et 2000

Figure 45: Points de calculs et bassins versants associés pour la Martinique



6.3.3 La Guadeloupe

Les données climatiques fournies pour la Guadeloupe couvrent les mêmes périodes que les données fournies pour la Martinique. **La période de référence et de calage retenue est donc la période 1980-2000.**

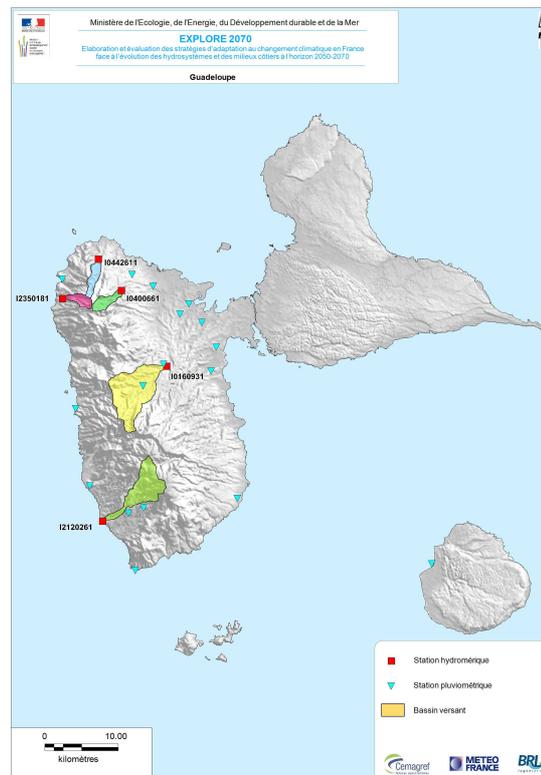
Les données hydrométriques utilisées proviennent de la Banque Hydro. 5 stations vérifient les critères cités ci-dessus.

Tableau 18: Points de calculs choisis pour la Guadeloupe

Stations hydrométriques retenues pour la Guadeloupe			
Code	Nom	Superficie (km ²)	Nb années ⁽¹⁾
I0442611	La rivière Nogent à Sainte-Rose	5.5	6
I2350181	La rivière Ferry à Deshaies	4.5	8
I0400661	La rivière Moustique Sainte Rose à S ^{te} -Rose	5.6	7
I0160931	La rivière Bras David à Petit-Bourg	37.6	7
I2120261	La rivière des Pères à Baillif	22.8	7

⁽¹⁾ Nombre d'années cumulées pour lesquelles des données hydro sont disponibles, années comprises entre 1980 et 2000

Figure 46 : Points de calculs et bassins versants associés pour la Guadeloupe



6.3.4 La Guyane

On dispose, pour quatre postes météo, des données météorologiques observées pour la période 1961-2010 et des corrections quantile-quantile des simulations climatiques passées pour 1961-1990. **La période 1961-1990 sera donc retenue comme période de référence pour la Guyane.**

On choisira cependant comme période de calage la plus longue période disponible, soit l'intervalle 1961-2010.

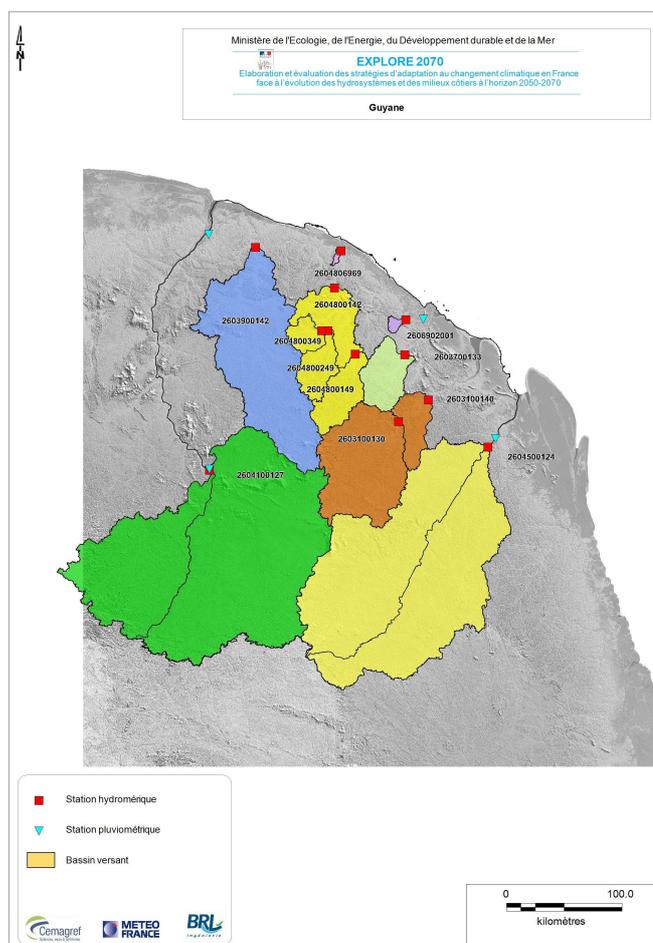
Les données hydrométriques utilisées ont été fournies par la DEAL de Guyane. Parmi les données fournies, 12 bassins vérifient les critères cités précédemment.

Tableau 19 : Points de calculs choisis pour la Guyane

Stations hydrométriques retenues pour la Guyane				
Identifiant IRD	Nom Station	Rivière	Superficie BV (DEAL) (km ²)	Nb années ⁽¹⁾
2603100130	Pierrette	Approuague	6105	38
2603100140	St_Athanase	Approuague	7525	15
2603700133	St_Bief	Comté	1760	40
2603900142	St_Sabbat	Mana	10255	31
2604100127	Maripasoula	Lawa	28285	46
2604500124	St_Maripa	Oyapock	25120	44
2604800142	Sinnamary_PetitSaut_Aval	Sinnamary	5900	35
2604800149	Saut_Dalle	Sinnamary	1855	12
2604800249	Saut_Lautel	Koursibo	1290	12
2604800349	Leblond	Crique Leblond	730	8
2604806969	Toussaint_Pont	Crique Toussaint	56	8
2606902001	Tonegrande_ONF	Tonegrande	129	12

: Nombre d'années cumulées pour lesquelles des données hydro sont disponibles, années comprises entre 1961 et 2010

Figure 47: Points de calculs et bassins versants associés pour la Guyane



6.4 CONSTITUTION DES BASES DE DONNEES

6.4.1 Pour les observations

La phase de calage du modèle nécessite la constitution d'une base de données météorologique et hydrologique observées à l'échelle des bassins versants.

La base de données pour les observations résulte du croisement d'une base de données météorologique (précipitations et températures) avec une base de données hydrométrique (débits de surface). Ces données observées permettront de caler et d'évaluer la qualité du modèle hydrologique sur la période de calage.

Compte tenu du faible nombre de postes pluviométriques et météorologiques pour lesquels on dispose de chroniques d'observation, le croisement entre les données climatiques et les bassins versants a été réalisé par la méthode des polygones de Thiessen. Les chroniques climatiques pour un bassin versant donné sont donc calculées comme la moyenne pondérée des chroniques climatiques des différents postes météo proches de ce bassin. Lorsqu'un poste météo présente une lacune, les variables météo sont la moyenne pondérée des postes restants. Pour chaque DOM, deux découpages de Thiessen sont réalisés, respectivement pour les précipitations et les températures. Lorsque l'ensemble des polygones de Thiessen ne couvre pas le territoire de bassins versants étudiés, des considérations basées sur les isohyètes permettent d'attribuer des pondérations aux postes météorologiques. Les cartes associées à cette étape sont présentées en Annexe C : Reconstitution des chroniques climatiques à l'échelle des bassins versant.

6.4.2 Pour les simulations

Pour la simulation des débits actuels et futurs, il faut constituer une base de données climatiques simulées à l'échelle des bassins versants. Il s'agit, à partir de quelques points de grilles de simulations climatiques, de constituer des chroniques climatiques « désagrégées » aux bassins versants.

POUR L'ILE DE LA REUNION

Météo-France a fourni les corrections quantile-quantile des simulations climatiques **Glob50**, du scénario climatique **A2**, pour les 9 postes météorologiques et pour les périodes 1979-2003 et 2040-2070 (cf. paragraphe 6.3.1). On dispose donc pour chaque poste météo de chroniques simulées en temps passé et temps futur. La méthode de Thiessen précédemment décrite est donc directement réutilisée pour constituer la base de données des simulations.

POUR LA GUYANE

Une correction quantile-quantile a été effectuée par Météo France pour 4 postes météo de Guyane, pour les simulations EtireEU-Stream2 et EtireEU-hadc (détaillée en 6.3.4). On dispose donc pour 4 points de Guyane, des chroniques de simulation climatiques pour les périodes 1961-1990 et 2040-2070. A partir de ces quatre points, la méthode de Thiessen précédemment décrite est directement réutilisée pour constituer la base de données des simulations.

POUR LA MARTINIQUE ET LA GUADELOUPE

Pour les Antilles, on dispose uniquement de simulations climatiques à Porto Rico et Trinidad. La méthode des anomalies climatiques a donc été choisie pour modéliser l'évolution climatique aux Antilles à partir de ces données.

Le principe de la méthode des anomalies est d'évaluer 'simplement' l'évolution climatique (futur/présent) à partir de données de simulation (à Porto Rico et Trinidad), et d'appliquer cette évolution aux postes d'observation météorologiques présents aux Antilles.

On a donc, au terme de cette démarche :

- ▶ des données d'observations climatiques en temps présent, aux postes météo des Antilles ; sur la période 1980-2000 ;
- ▶ des données climatiques en temps futur, issues de la méthode des anomalies, aux mêmes postes météo des Antilles ; sur la période 2040-2060.

On comparera donc, en terme hydrologique :

- ▶ les chroniques de débits simulés à partir des données d'observation ; sur la période 1980-2000 ;
- ▶ et les chroniques de débits simulés à partir des données temps futurs issues des anomalies, sur la période 2040-2060.

La démarche pour le calcul des séries climatiques futures est la suivante :

Les variations climatiques entre temps présent et temps futur sont calculées pour les différentes simulations et permettront de simuler un climat futur aux postes météo des Antilles.

Il est très important de souligner que les données disponibles pour ces simulations climatiques sont extrêmement faibles et très peu exploitables : Trinidad est situé à 440 km de la Martinique au Sud, et Porto Rico à 720 km au Nord-Ouest, ces deux points ont des contextes climatiques très différents. **La simulation climatique à partir de tels points pour les Antilles doit donc être reçue avec une très grande prudence.**

Pour chaque variable (températures minimales et maximales et précipitations), les moyennes mensuelles sont extraites des simulations en temps passé et temps futur. La période de référence retenue pour les Antilles est 1980-2000. Comme on dispose de 20 années de temps passé, la période de simulation future sera la période 2040-2060.

Pour chaque variable et chaque mois de l'année, une moyenne des années passées (1980-2000) et une moyenne des années futures (2040-2060) sont calculées.

Les anomalies entre temps futur et temps présent sont ensuite calculées à partir de ces valeurs (quotients pour les précipitations et différences pour les températures). Ces anomalies sont ensuite appliquées aux chroniques d'observation des postes météo des Antilles, selon les formules :

$$T_{\text{forçage_j_m_sc}} = T_{\text{obs_i_m}} + \Delta T_{\text{m_sc}}$$

$$P_{\text{forçage_j_m_sc}} = P_{\text{obs_i_m}} * (1 + \Delta P_{\text{m_sc}})$$

Avec **j** correspondant à l'année 2040, 2041, ...2060 ; **i** correspondant à l'année 1980, ...2000 ; **m** correspondant au mois. $T_{\text{obs_i_m}}$ et $P_{\text{obs_i_m}}$ sont les valeurs observées aux postes météo ; $\Delta T_{\text{m_sc}}$ et $\Delta P_{\text{m_sc}}$ sont les anomalies calculées pour la simulation climatique (**sc**).

Lorsque le calcul de $P_{\text{forçage_j_m_sc}}$ donne une valeur négative, on lui applique la valeur zéro.

Ces forçages ont été effectués pour trois simulations climatiques :

- ▶ La simulation Glob50 – modèle climatique SST Stream2 - scénario A1B (Trinidad) ;
- ▶ La simulation Etire EU – modèle climatique SST Stream2 - scénario A1B (Porto Rico) ;
- ▶ La simulation Etire EU – modèle climatique SST Hadley - scénario A1B (Porto Rico).

Cette méthode est particulièrement simple à mettre en œuvre, et considérée comme robuste.

Elle présente deux inconvénients majeurs : elle ne permet pas de modifier le nombre de jours de pluies dans le futur, et ne rend pas compte du changement de variabilité climatique. Entre autres, elle ne rend pas compte d'une éventuelle variation de l'activité cyclonique.

Les tableaux ci-après présentent les anomalies calculées, et appliquées aux chroniques climatiques.

Pour les températures maximales, on obtient une augmentation moyenne de +1,2 à +1,4 degrés selon les simulations entre les périodes 2040-2060 et 1980-2000.

Pour les températures minimales, on obtient une augmentation moyenne de +1,5 à +1,8 degrés selon les simulations.

Tableau 20 : Anomalies (°C) calculées pour les points de simulations climatiques de Porto Rico et Trinidad

Global 50 - Stream2 - Trinidad				Etire EU - Stream2 - Porto Rico				EtireEU - Hadc - Porto Rico			
mois	PRE	TMAX	TMIN	mois	PRE	TMAX	TMIN	mois	PRE	TMAX	TMIN
1	-0.05	1.39	1.68	1	0.20	1.00	1.74	1	0.07	1.35	1.40
2	0.06	1.20	1.82	2	0.21	1.01	2.14	2	0.15	1.32	1.64
3	0.01	1.33	1.63	3	-0.03	1.24	1.96	3	0.07	1.43	1.71
4	-0.04	1.37	1.70	4	0.14	1.01	2.00	4	0.03	1.40	1.61
5	-0.05	1.31	1.53	5	0.02	1.08	1.51	5	-0.01	1.26	1.63
6	-0.06	1.60	1.32	6	0.06	1.17	1.42	6	-0.05	1.25	1.54
7	0.13	1.29	1.71	7	-0.02	1.36	1.44	7	-0.14	1.48	1.45
8	0.04	1.50	1.90	8	0.04	1.46	1.56	8	-0.10	1.49	1.45
9	0.07	1.45	1.85	9	0.03	1.38	1.65	9	-0.13	1.46	1.38
10	-0.08	1.77	1.93	10	0.35	1.22	2.48	10	-0.05	1.25	1.29
11	0.00	1.32	1.81	11	0.13	1.30	2.13	11	0.01	1.46	1.54
12	0.13	1.31	1.85	12	-0.03	1.44	1.98	12	0.04	1.29	1.60

6.5 MODELISATION HYDROLOGIQUE

6.5.1 Le modèle hydrologique GR4J

Le modèle hydrologique utilisé pour la simulation des débits actuels et futurs dans les départements d'Outre-mer est le modèle journalier GR4J de l'Irstea. Il s'agit d'un modèle apparenté aux modèles conceptuels, et global (il n'explicite pas la variabilité spatiale du bassin).

6.5.1.1 Description du modèle

Le modèle GR4J (modèle du Génie Rural à 4 paramètres Journalier) est un **modèle hydrologique global à réservoirs** (voir Figure 48). Nous donnons dans ce qui suit une brève description mathématique du modèle, des informations plus détaillées étant fournies par Perrin et al. (2003).

On désigne par P (mm) la pluie moyenne de bassin et par E (mm) l'évapotranspiration potentielle (ETP). Les étapes successives suivantes permettent de calculer le débit.

► Neutralisation

La première opération est d'ôter à la pluie P l'évapotranspiration potentielle E pour déterminer une pluie nette Pn et une évapotranspiration nette En calculée par :

$$\begin{aligned} \text{Si } P \geq E, \text{ alors } Pn &= P - E & \text{et } En &= 0 \\ \text{Si } P < E, \text{ alors } Pn &= 0 & \text{et } En &= E - P \end{aligned}$$

► Fonction de rendement

Dans le cas où Pn est différente de zéro, une partie Ps de Pn alimente le réservoir de production et est calculée par :

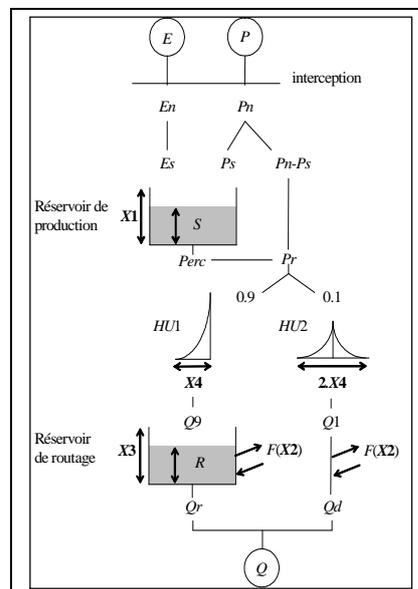
$$P_s = \frac{X_1 \left(1 - \left(\frac{S}{X_1} \right)^2 \right) \cdot \tanh \left(\frac{P_n}{X_1} \right)}{1 + \frac{S}{X_1} \cdot \tanh \left(\frac{P_n}{X_1} \right)}$$

où X_1 (mm) est la capacité maximum du réservoir de production et S le contenu du réservoir de production en début de pas de temps. Dans le cas contraire, lorsque En est différent de zéro, une quantité d'évaporation Es est retirée du réservoir de production. Elle est donnée par :

$$Es = \frac{S \cdot \left(2 - \frac{S}{X_1} \right) \cdot \tanh \left(\frac{En}{X_1} \right)}{1 + \left(1 - \frac{S}{X_1} \right) \cdot \tanh \left(\frac{En}{X_1} \right)}$$

Après actualisation du niveau du réservoir, une percolation $Perc$ issue du réservoir de production est alors calculée et alimentera ensuite l'écoulement.

Figure 48 : Structure schématique du modèle GR4J



► Hydrogramme unitaire

La pluie efficace totale est ensuite routée par un hydrogramme unitaire $HU2$ dépendant du temps de base X_4 , puis séparée en deux composantes, de proportions volumétriques fixes (90 % / 10 %)

► Fonction d'échange avec l'extérieur non atmosphérique

Un échange souterrain en eau est calculé par :

$$F = X_2 \cdot \left(\frac{R}{X_3} \right)^{3.5}$$

où R est le niveau dans le réservoir de routage en début de pas de temps, X_3 la capacité à un jour du réservoir, X_2 le coefficient d'échange en eau qui peut être positif dans le cas d'apports, négatif dans le cas de pertes vers des nappes profondes ou nul.

► Réservoir de routage

Le niveau dans le réservoir de routage est modifié en ajoutant la sortie $Q9$ de l'hydrogramme unitaire et F , puis sa vidange est calculée de la façon suivante :

$$Qr = R \cdot \left\{ 1 - \left[1 + \left(\frac{R}{X_3} \right)^4 \right]^{\frac{1}{4}} \right\}$$

Le débit total correspond à la somme des deux composantes d'écoulement.

Le modèle comporte quatre paramètres optimisables :

- ▶ X1 : capacité du réservoir de production (mm)
- ▶ X2 : coefficient d'échanges souterrains (mm)
- ▶ X3 : capacité à un jour du réservoir de routage (mm)
- ▶ X4 : temps de base de l'hydrogramme unitaire HU1 (j)

6.5.1.2 Calage

Les paramètres du modèle GR4J n'ayant pas de signification physique *a priori*, leurs valeurs sont déterminées par calage sur des séries observées. Par ce calage, on cherche à minimiser l'écart entre les séries de débit observées et simulées. On cherche donc les valeurs des paramètres qui conduisent à la différence la plus faible possible entre les sorties du modèle et les débits observés.

La procédure de calage utilisée est une procédure dite "locale", c'est-à-dire qu'elle part d'un point de l'espace des paramètres et en explore le voisinage pour converger vers une valeur optimale. On utilise ici la méthode "pas-à-pas" développée à l'Irstea et qui a montré son efficacité pour ce modèle hydrologique.

En pratique, on utilise un critère d'efficacité basé sur les erreurs du modèle. Pour les travaux réalisés en Métropole, on a utilisé l'erreur quadratique calculée sur les racines carrées des débits et mise sous la forme adimensionnelle du critère de Nash et Sutcliffe (1970). Ce critère de calage est donc défini par :

$$NSEr_q = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (\sqrt{Q_i} - \sqrt{\hat{Q}_i})^2}{\sum_{i=1}^n (\sqrt{Q_i} - \sqrt{\bar{Q}})^2}$$

où Q_i et \hat{Q}_i sont respectivement les débits observés et simulés durant la période de calage; et où \bar{Q} est la moyenne des débits observés. Si le critère de Nash est de 1, l'ajustement est parfait, par contre s'il est négatif, le débit calculé par le modèle est une plus mauvaise estimation que le simple débit constant égal au débit observé.

Ce calage sur les racines des débits permet de ne pas donner trop d'influence aux forts débits lors du calage. Nous verrons que dans le cas des DOM soumis à des épisodes cycloniques, d'autres fonctions objectif et des approches multi-modèles peuvent être intéressantes à considérer. Le choix de la forme adimensionnelle du critère de Nash-Sutcliffe permet d'avoir des critères relativement comparables entre bassins.

Ce critère de calage sur les racines des débits a aussi été retenu pour la Guyane.

Pour les zones cycloniques - Réunion et Antilles - une approche multi-paramétrage a été expérimentée. Cette approche, expliquée au paragraphe 6.5.2, fait intervenir deux calages distincts. Après étude des performances de cette méthode (6.5.3.1), il a été choisi de retenir cette approche pour la Réunion uniquement.

Le critère de calage sur la racine des débits est donc aussi retenu pour la Martinique et la Guadeloupe.

Pour la Réunion, deux critères de calage sont retenus :

- ▶ le critère de Nash sur le logarithme des débits ;
- ▶ le critère de Nash sur les débits.

Ce choix est explicité au paragraphe 6.5.2

6.5.1.3 Évaluation de la fiabilité du modèle

Il est important d'analyser les performances des modélisations hydrologiques en temps présent, afin d'obtenir une première quantification des incertitudes associées aux simulations hydrologiques. Pour cela, une procédure en calage-contrôle est utilisée.

En effet, les paramètres du modèle doivent être déterminés par calage. Deux sous-périodes sont identifiées dans la chronique des observations. Elles sont désignées ci-après par période 1 et période 2. Ces deux sous-périodes sont constituées d'un minimum de 3 années consécutives et sont sélectionnées sur des critères de disponibilité des données de débits observés. Le calage des paramètres du modèle est réalisé sur la période 1. La fonction objectif est un critère quadratique sur les racines des débits. Le jeu de paramètre optimal est ensuite utilisé pour contrôler le modèle sur la période 2. Enfin, le rôle des deux sous-périodes est inversé. On obtient ainsi une évaluation du modèle en contrôle (c'est-à-dire indépendamment du calage) sur toutes les données disponibles (on fait la moyenne des critères obtenus sur les deux périodes). Ce sont ces résultats en contrôle qui sont présentés par la suite.

CRITERES D'EVALUATION

Les critères de performance retenus sont :

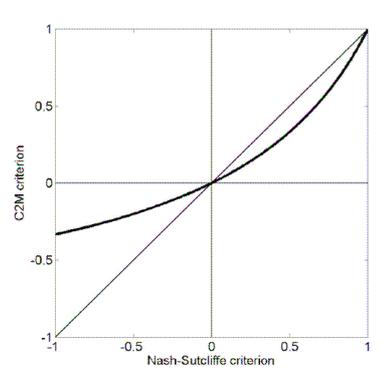
- ▶ Le critère de Nash-Sutcliffe calculé sur les débits, sous forme d'un critère borné noté C2M (Mathevet et al., 2006). Ce critère donne une importance relative plus importante à la restitution des forts débits.
- ▶ Le critère de Nash-Sutcliffe calculé sur les logarithmes des débits (sous forme C2M). Ce critère confère un poids relatif plus important aux reconstitutions de périodes de basses eaux (étiages).
- ▶ Le biais sur les volumes totaux écoulés.

Rappelons pour la lecture des résultats que le critère C2M évolue entre -1 et 1. Sa formulation est donnée par :

$$C2M = \frac{NSE}{2 - NSE}$$

Le score égal à 1 traduit une reproduction parfaite des débits observés, tandis que le score 0 signifie des performances équivalentes à un modèle naïf de simulation (donnant un débit constant égal au débit moyen observé). Enfin, les scores négatifs sanctionnent des performances de simulation moins bonnes que celles de ce même modèle naïf. La Figure 49 représente la relation entre le critère de Nash-Sutcliffe et le critère borné C2M (trait épais).

Figure 49: Relation entre le critère de Nash et le critère borne C2M



Cette méthode a menée pour l'ensemble des bassins versants étudiés. Pour les bassins versants de la Réunion, une étape intermédiaire est effectuée, afin de tenir compte du multi-paramétrage du modèle. Cette approche « multi-paramétrage » est explicitée ci-après.

6.5.2 Approche multi-paramétrages en zones cycloniques

6.5.2.1 Introduction

Parmi les départements d'outre-mer, les îles de la Réunion, la Martinique et la Guadeloupe présentent une variabilité climatique annuelle très marquée, avec notamment l'apparition de précipitations cycloniques extrêmes qui sont souvent à l'origine de très fortes crues. Cette forte variabilité rend la modélisation hydrologique complexe, si l'on veut être capable de simuler à la fois les périodes d'étiage, les événements de crue "ordinaires" et ceux liés aux aléas cycloniques.

Dans le cas des bassins en zone cyclonique, une difficulté majeure de la modélisation hydrologique continue est de représenter des événements de différente nature (étiages et crues cycloniques), avec des mécanismes hydrologiques très variables suivant les conditions. Une étude menée à l'Irstea pour la modélisation hydrologique en Nouvelle Calédonie avait déjà permis de faire apparaître cette difficulté dans une zone soumise elle-aussi aux aléas cycloniques (Gentien-Baudry, 1999).

L'objectif de l'étude décrite ci-après est de mettre en place une approche utilisant le modèle hydrologique GR4J sur les bassins des DOM en zone cyclonique, qui permettrait d'améliorer les performances de la modélisation hydrologique continue. Les bassins concernés sont ceux de la Réunion et des Antilles.

De nombreuses études (dont Gentien-Baudry, 1999 ; Oudin et al, 2006) montrent que le choix de la fonction objectif pour le calage du modèle est déterminant : notamment, le critère de Nash (Nash et Sutcliffe, 1970) sur les débits privilégie la simulation des crues, alors que le critère de Nash sur les logarithmes des débits privilégie la simulation des étiages.

Critère de Nash sur les débits :

$$NQ = 1 - \frac{\sum (Q_s - Q_o)^2}{\sum (Q_o - \bar{Q})^2} \quad (1)$$

Critère de Nash sur le logarithme des débits :

$$N \ln Q = 1 - \frac{\sum (\ln Q_s - \ln Q_o)^2}{\sum (\ln Q_o - \overline{\ln Q})^2} \quad (2)$$

Avec :

Q_s : débit simulé

Q_o : débit observé

\overline{Q} : débit moyen

Les graphes ci-après montrent les résultats en « contrôle » du modèle GR4J pour un même station hydrométrique, et pour les deux calages : le calage utilisant le critère de Nash sur les débits (noté NQ) et le calage utilisant le critère de Nash sur le logarithme des débits (noté NLnQ). Les résultats sont présentés pour deux périodes :

- ▶ Une période de hautes eaux, pour laquelle on observe que la modélisation paramétrée avec NQ est la meilleure ;
- ▶ Une période de basses eaux, pour laquelle on observe que la modélisation paramétrée avec NLnQ est la meilleure.

Figure 50 : Modélisation hydrologique à la station « Le Verdoube à Tautaval », en période de hautes eaux, pour différents paramétrage du modèle GR4J

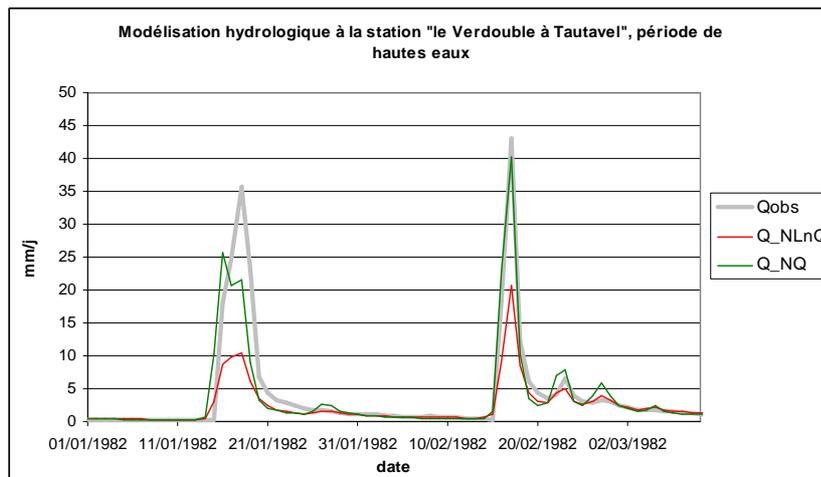
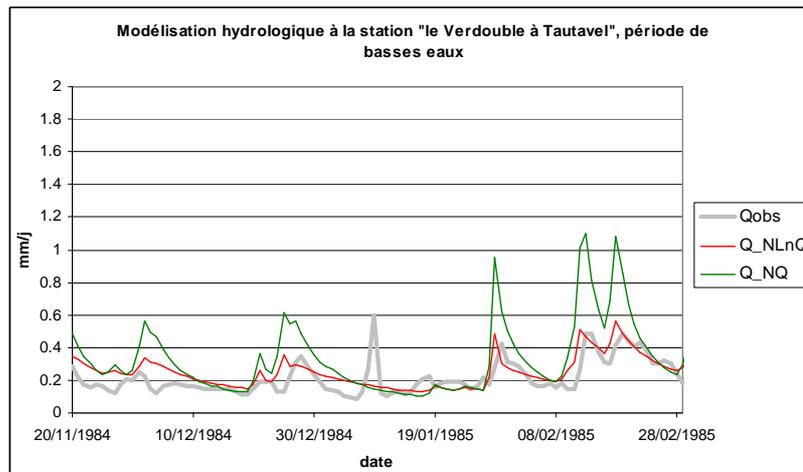


Figure 51 : Modélisation hydrologique à la station « Le Verdoube à Tautavel », en période de basses eaux, pour différents paramétrage du modèle GR4J



Une approche envisagée est donc de réaliser deux calages du modèle GR4J, l'un avec le critère de Nash sur les débits (NQ), et l'autre avec le critère de Nash sur les logarithmes des débits (NLnQ). Ces deux calages fournissent deux séries distinctes de débits simulés. On envisage alors de combiner ces deux séries, à l'aide d'un coefficient de pondération journalier, dépendant des conditions climatiques ou hydrologiques.

Le débit finalement calculé sera donc, au jour j :

$$Q_f = \alpha Q_{NQ} + (1 - \alpha) Q_{NLnQ}$$

où :

- ▶ Q_{NQ} est le débit calculé avec l'optimisation de NQ ;
- ▶ Q_{NLnQ} est le débit calculé avec l'optimisation de NLnQ ;
- ▶ α est le coefficient de pondération au jour j .

A l'issue de ce calcul, on comparera les performances des différentes modélisations à l'aide des critères utilisés dans le cadre d'Explore 2070 : les critères C2M pour les débits et les logarithmes des débits (notés C2MQ et C2MLQ).

6.5.3 Méthodologie

L'objet de l'étude est de trouver un coefficient de pondération α qui permette une combinaison adéquate des deux simulations. Deux types de pondérations ont été testés :

- ▶ Une pondération dépendante des conditions hydrologiques ;
- ▶ Une pondération dépendante des conditions climatiques.

Pour la pondération hydrologique, les coefficients suivants ont été testés:

▶ $\alpha = s$ (4)

▶ $\alpha = \frac{s^3}{s^3 + (1-s)^3}$ (5)

où s est le taux de remplissage du réservoir de production de GR4J au jour j , variant entre 0 et 1. Notons que cet indice présente des variations saisonnières, avec des valeurs faibles en période estivale et élevées en période hivernale.

Ces coefficients ont été mis au point lors d'une étude réalisée par l'Irstea et publiée par Oudin et al (2006).

On notera par la suite :

► Q_{MS} les débits calculés avec la pondération $\alpha = s$

► Q_{M_Oudin} les débits calculés avec la pondération $\alpha = \frac{s^3}{s^3 + (1-s)^3}$

Pour la pondération climatique, le coefficient suivant a été testé :

$$\alpha(j) = \frac{1+c}{1+\exp(-a * P(j) + b)} - c \quad \text{au jour } j \quad (6)$$

Où :

► $P(j)$ est la pluie au jour j (mm/j)

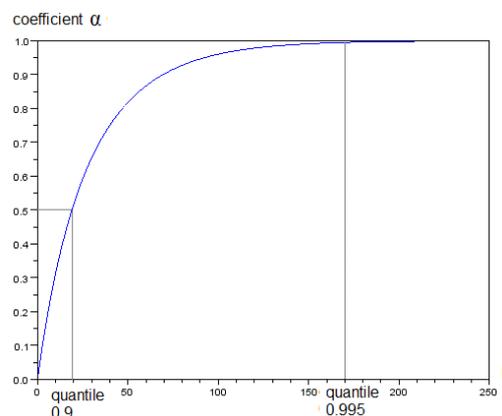
► Et a , b et c sont des constantes, définies pour chaque bassin versant par :

- $a = \frac{5}{q_{0.995} - q_{0.5}}$
- $b = \log(e^{a * q_{0.9}} - 2)$
- $c = \frac{1}{e^b}$

► où q_x est le quantile x des pluies

Le coefficient de pondération α est donc une fonction sigmoïde des pluies, avec l'allure suivante :

Figure 52 : allure de la fonction $\alpha(P)$, utilisée comme coefficient de pondération pour l'approche multi-paramétrage.



On notera par la suite Q_{Mpluie} les débits calculés avec ce coefficient de pondération. Notons que la complexité du modèle au stade de l'optimisation n'est pas plus importante, le nombre de paramètres calés simultanément restant égal à 4.

La démarche est la suivante :

- ▶ On effectue l'évaluation en « contrôle-calage » pour les bassins versants de la Réunion, la Guadeloupe et la Martinique, pour trois critères de calage :
 - NQ, qui privilégie les hautes eaux ;
 - NLnQ, qui privilégie les basses eaux ;
 - NRQ, critère de Nash sur la racine carré des débits, qui a été retenu pour le calage de l'ensemble des bassins versants de la Métropole dans le cadre d'Explore 2070.
- ▶ On calcule ensuite, pour chacun des trois coefficients de pondération définis plus haut, les moyennes pondérées qui fournissent de nouvelles séries de débits. Seuls les débits issus de la phase « contrôle » sont considérés, puisque ce sont ceux-là qui permettent d'évaluer les performances du modèle. A l'issue de cette étape on a donc trois nouvelles séries de débits pour chaque bassin versant : Q_{MS} ; Q_{MOudin} ; Q_{Mpluie} .
- ▶ On compare ensuite les performances obtenues par ces six modélisations sur la base des critères : C2MQ et C2MLQ. Cette analyse permettra de choisir, pour chaque département d'Outre-mer, le type de modélisation la plus adaptée.

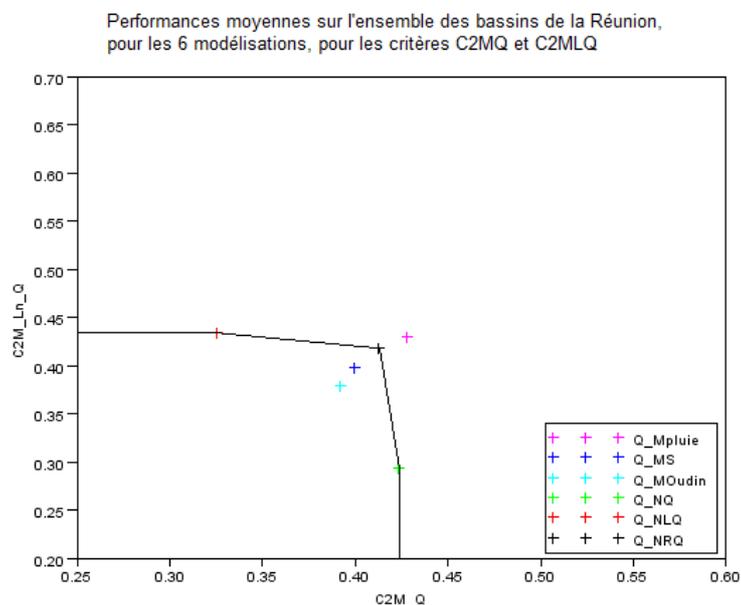
6.5.3.1 Résultats et Utilisation pour Explore 2070

Les deux critères de performances principaux sont :

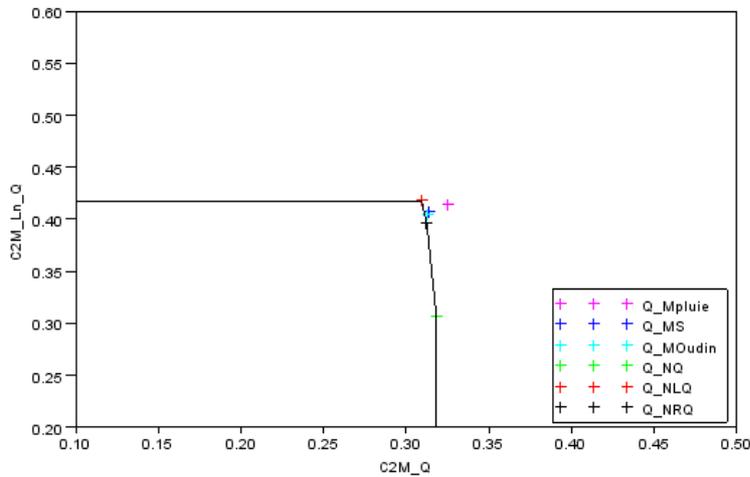
- ▶ C2MQ, qui donne une importance relative plus importante à la restitution des forts débits ;
- ▶ C2MLQ, qui donne un poids relatif plus important aux reconstitutions des périodes de basses eaux.

L'objectif de cette étude est d'obtenir une modélisation qui soit performante sur les deux critères simultanément. On a calculé, pour chaque département, et pour chaque type de modélisation (parmi les 6), la moyenne des performances sur l'ensemble des bassins versants. On représente sur les graphes ci-après, ces six moyennes pour C2MQ et C2MLQ, ce qui permet de comparer les six modélisations.

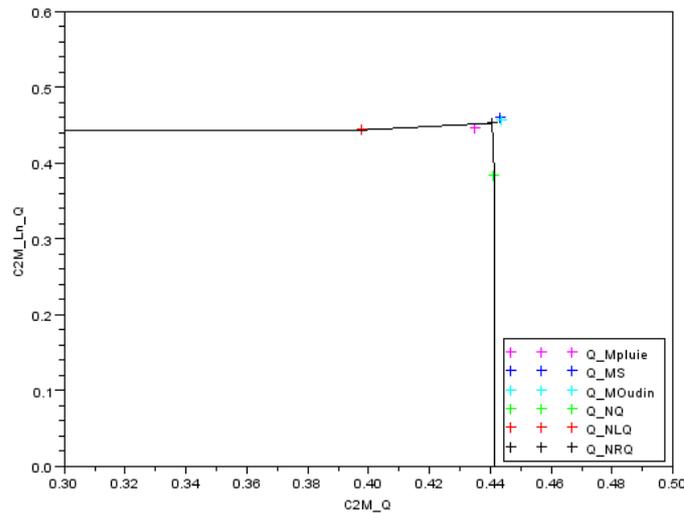
Figure 53 : Performances moyennes sur l'ensemble des bassins versants des DOM pour les six modélisations



Performances moyennes sur l'ensemble des bassins de la Guadeloupe, pour les 6 modélisations, pour les critères C2MQ et C2MLQ



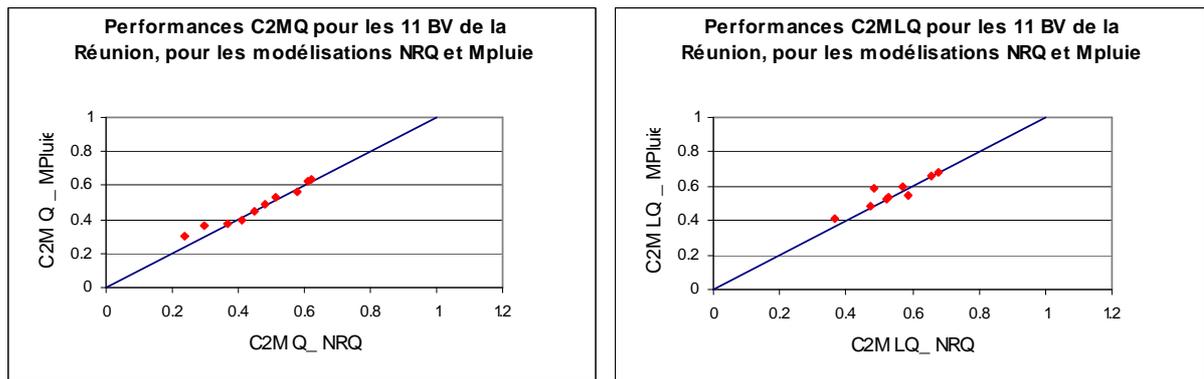
Performances moyennes sur l'ensemble des bassins de la Martinique, pour les 6 modélisations, pour les critères C2MQ et C2MLQ



Pour la Réunion et la Guadeloupe, la meilleure des trois approches multi-paramétrage paraît être l'approche basée sur le coefficient dépendant des pluies. Pour la Martinique, les calculs avec les pondérations hydrologiques liées au réservoir de production semblent donner de meilleurs résultats.

On compare ci-dessous, les performances en contrôle de la modélisation NRQ et de la « meilleure » modélisation multi-paramétrage, ceci pour chaque bassin versant.

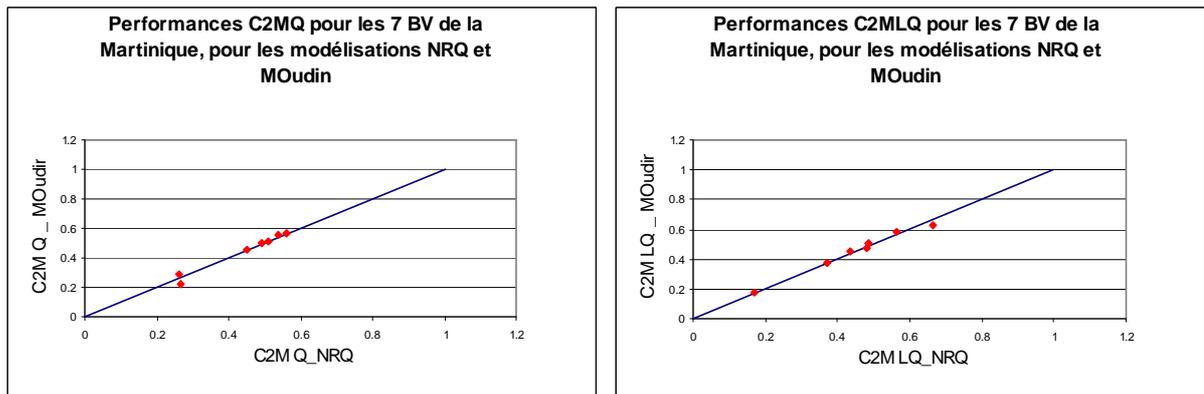
Figure 54 : Performances des modélisations « NRQ » et « MPluie » pour les bassins de la Réunion



Erreur ! Signet non défini.

Pour la Réunion, l'approche multi-paramétrage basée sur les pluies paraît plus performante que l'approche issue du calage NRQ. C'est donc cette approche qui sera retenue pour les bassins de la Réunion.

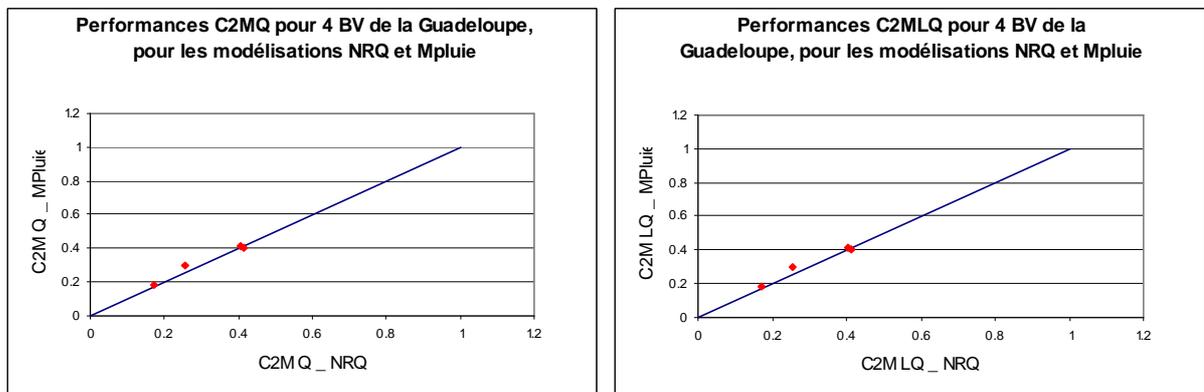
Figure 55 : Performances des modélisations « NRQ » et « MPluie » pour les bassins de la Martinique



Erreur ! Signet non défini.

Pour la Martinique, on compare donc les résultats issus du calage NRQ avec les résultats de la modélisation "MOudir". L'apport de cette approche multi-paramétrage n'est pas jugé ici suffisant pour être retenu. C'est donc la même approche que celle choisie pour la Métropole, basée sur le calage NRQ, qui sera retenue pour la Martinique.

Figure 56 : Performances des modélisations « NRQ » et « MPluie » pour les bassins de la Martinique



Erreur ! Signet non défini.

Pour la Guadeloupe, les résultats des modélisations « NRQ » et « Mpluie » sont comparées pour les bassins. L'apport de cette approche multi-paramétrage n'est pas jugé ici suffisant pour être retenu. C'est donc la même approche que celle choisie pour la Métropole, basée sur le calage NRQ, qui sera retenue pour la Guadeloupe.

6.5.4 Synthèse des méthodologies retenues pour chaque DOM

1 - Choix des points de calcul et traitement des données hydrologiques :

- ▶ 12 bassins étudiés en Guyane,
- ▶ 11 bassins étudiés à la Réunion,
- ▶ 7 bassins étudiés en Martinique,
- ▶ 5 bassins étudiés en Guadeloupe,

2 - Phase de calage :

- ▶ calage sur la période 1980-2000 pour les Antilles,
- ▶ calage sur la période 1961-2010 pour la Guyane,
- ▶ calage sur la période 1961-1990 pour la Réunion,
- ▶ critère de calage sur la racine carrée des débits pour les Antilles et la Réunion,
- ▶ double-calage pour la Réunion (approche multi-paramétrage),

3 - Evaluation de la fiabilité du modèle hydrologique : procédure de calage-contrôle effectuée.

4 - Simulations des débits actuels et futurs :

- ▶ un modèle climatique utilisé ;
- ▶ périodes de référence :
 - 1980-2000 pour les Antilles,
 - 1961-1990 pour la Guyane,
 - 1976-2003 pour la Réunion,
- ▶ périodes futures :
 - 2040-2070 pour la Guyane et la Réunion,
 - 2040-2060 pour les Antilles.

5 - Calcul d'indicateurs et traitement statistique

Erreur ! Signet non défini.

6.6 ÉVALUATION DE LA FIABILITE DU MODELE HYDROLOGIQUE GR4J DANS LES DOM

Nous présentons ici l'analyse des performances du modèle hydrologique GR4J utilisé pour la modélisation des bassins des départements d'Outre-mer. Rappelons que dans le déroulement des travaux de modélisation du Lot Hydrologie de surface, l'analyse des performances de simulations hydrologiques en temps présent a lieu en amont des simulations qui seront réalisées avec les sorties des modèles climatiques (en temps présent et futur).

L'objectif de cette évaluation est de qualifier la capacité des modèles hydrologiques à représenter la relation pluie-débit en conditions actuelles, et donc le niveau de confiance que l'on peut leur accorder à leur "compréhension" du fonctionnement hydrologique des bassins étudiés. Un fonctionnement satisfaisant en conditions actuelles est souhaitable, car il est peu probable qu'un modèle en échec en conditions actuelles donne des résultats fiables en conditions futures. Une évaluation des performances sur des données observées est donc une étape indispensable et préalable à l'utilisation des projections, et permet une première quantification des incertitudes associées aux simulations hydrologiques. Cependant, un fonctionnement satisfaisant en climat présent n'est clairement pas d'une condition suffisante pour s'assurer d'un bon fonctionnement en conditions futures : un très bon modèle en conditions actuelles peut se révéler incapable de donner des résultats fiables dans des conditions futures très différentes des conditions actuelles. Il faut donc en plus s'assurer que le modèle a une bonne sensibilité à des variations de conditions climatiques et qu'il est capable de s'adapter à des conditions très différentes (fonctionnement en extrapolation par rapport aux conditions actuelles). Cette capacité d'adaptation des modèles est plus délicate à évaluer et ne sera pas détaillée dans ce rapport.

Nous nous concentrons donc dans la suite sur l'évaluation de la capacité du modèle hydrologique à reproduire les débits observés en temps présent.

6.6.1 La Guyane

Les cartes suivantes présentent les performances du modèle GR4J pour les critères C2MQ et C2MLQ.

La modélisation des forts débits apparaît relativement moins satisfaisante que celle des plus faibles débits.

Figure 57 : Performances en validation du modèle GR4J - Critère C2MLQ pour la Guyane

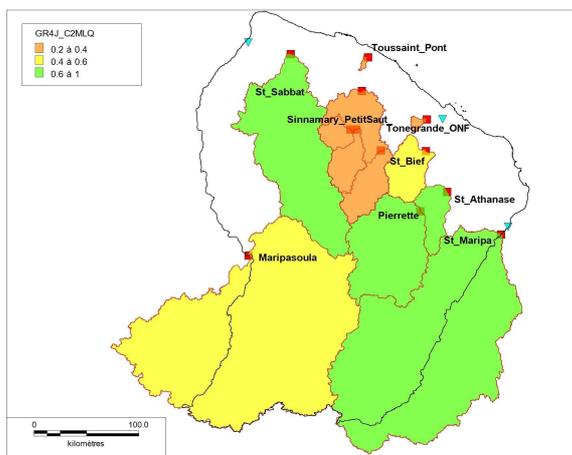
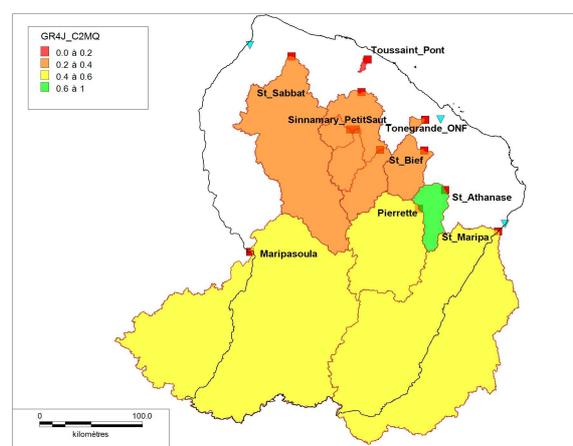


Figure 58 : Performances en validation du modèle GR4J - Critère C2MQ pour la Guyane



6.6.2 La Martinique

Les cartes suivantes présentent les performances du modèle GR4J pour les critères C2MQ et C2MLQ.

Figure 59 : Performances en validation du modèle GR4J - Critère C2MLQ pour la Martinique

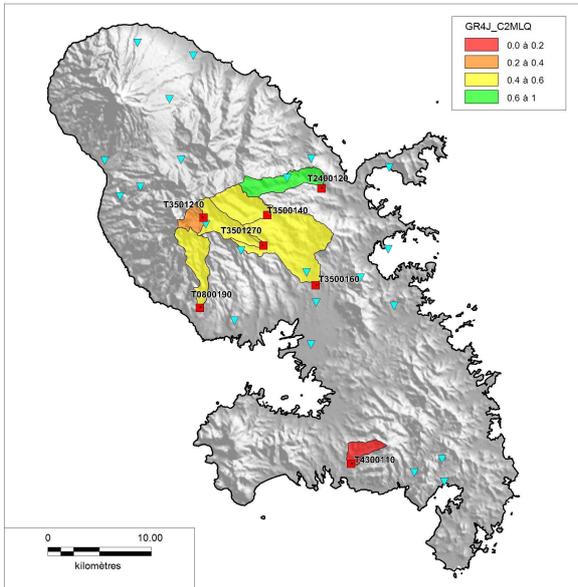
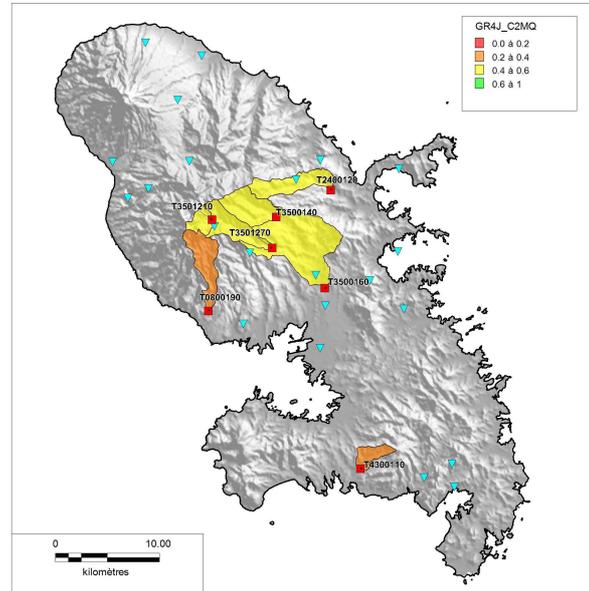


Figure 60 : Performances en validation du modèle GR4J - Critère C2MQ pour la Martinique



6.6.3 La Guadeloupe

Les cartes suivantes présentent les performances du modèle GR4J pour les critères C2MQ et C2MLQ.

La modélisation des forts débits apparaît relativement moins satisfaisante que celle des plus faibles débits. Les performances obtenues sont meilleures pour les deux grands bassins au Sud de l'île, mais restent assez faible pour l'ensemble des points de calcul de la Guadeloupe.

Figure 61 : Performances en validation du modèle GR4J - Critère C2MLQ pour la Guadeloupe

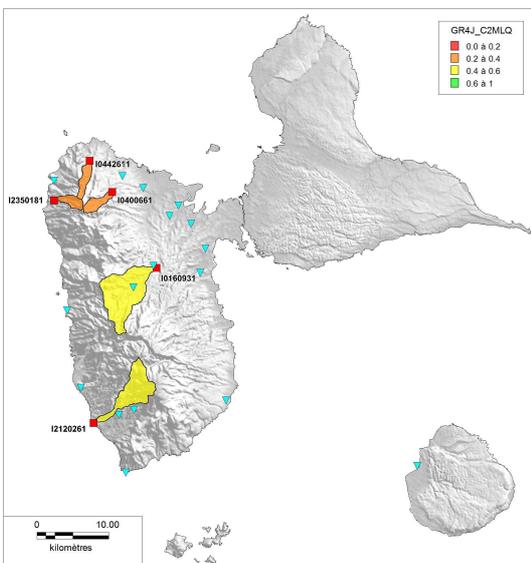
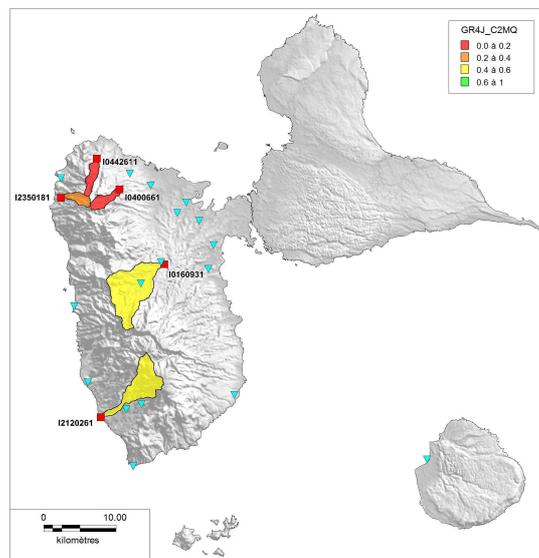


Figure 62 : Performances en validation du modèle GR4J - Critère C2MQ pour la Guadeloupe



6.6.4 La Réunion

Les cartes suivantes présentent les performances du modèle GR4J – avec utilisation de l’approche multi-paramétrage - pour les critères C2MQ et C2MLQ.

Figure 63 : Performances en validation du modèle GR4J - Critère C2MLQ pour la Réunion

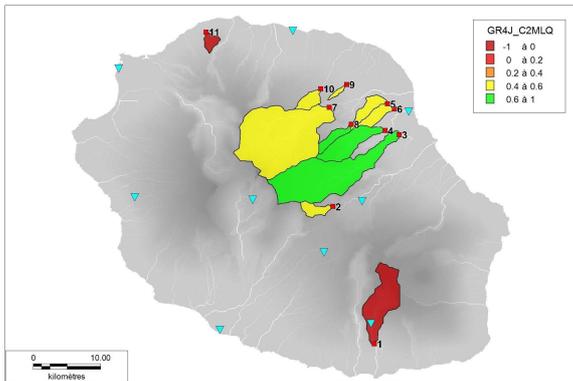


Figure 64 : Performances en validation du modèle GR4J - Critère C2MQ pour la Réunion

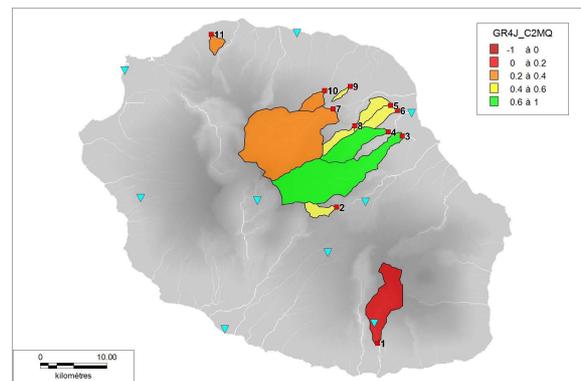


Tableau 21 : Bassins versants étudiés à la Réunion

N°	Code Hydro	Nom
1	Z40010100	La rivière Langevin à Saint Joseph
2	Z40101130	Le bras Noir à la Plaine des Palmistes [Bebourg]
3	Z40120100	La rivière des Marsouins à Saint Benoît [Béthléem]
4	Z40130130	La rivière des Roches à Saint Benoît [Abondance]
5	Z40131130	La rivière Bras Panon à Bras Panon
6	Z40131170	Le bras Pétard à Bras Panon
7	Z40200100	La rivière du Mât à Salazie
8	Z40211090	Le bras des Lianes à Bras Panon
9	Z40300100	Le Grand Bras à Saint André
10	Z40301190	Le bras Laurent à Sainte Suzanne
11	Z40321470	Le ruisseau Blanc [Ravine] à Saint Denis [La Montagne]

6.7 CALCUL D'INDICATEURS ET ANALYSE STATISTIQUE

Afin de caractériser les évolutions hydrologiques entre la période de référence et la période future, un ensemble de descripteurs ont été calculés à partir des simulations de débits journaliers. Ils s'agit d'une quinzaine d'indicateurs qui rendent compte :

- ▶ des régimes hydrologiques (Module, débits mensuels, débit annuel quinquennal sec,...) ;
- ▶ des étiages (QMNA5, VCN30, ...) ;
- ▶ des crues (QJXA10, ...).

De plus, des descripteurs climatiques et des indicateurs de la fiabilité des modèles hydrologiques sont aussi calculés.

Pour chaque modèles hydrologique et chaque modèle climatique, on calcule la valeur de l'indicateur sur la période passée et sur la période futur, puis on calcule l'écart entre ces deux valeurs :

$$\Delta = \frac{\text{FUT} - \text{PST}}{\text{PST}}$$

où FUT est la valeur calculée à partir des simulations sur la période 2046-2070 et PST est la valeur calculée à partir des simulations sur la période 1962-1990.

C'est ce Δ qui rend compte de l'évolution, et qu'il convient d'appliquer aux valeurs observées.

Pour chaque point de calcul, une **fiche de synthèse** renseigne ces indicateurs.

Pour les variables climatiques, la fiche présente :

- ▶ Les indicateurs climatiques calculés à partir des réanalyses Safran du climat présent (PST) ;
- ▶ Les évolutions entre simulations climatiques présentes et futures (FUT) pour chaque indicateur climatique, sous forme de Δ (FUT-PST pour les températures, (FUT-PST)/PST pour les précipitations et ETP), et ceci pour chacune des simulations identifiées en abrégé (exemple « USAha »).

Pour les variables hydrologiques, la fiche présente :

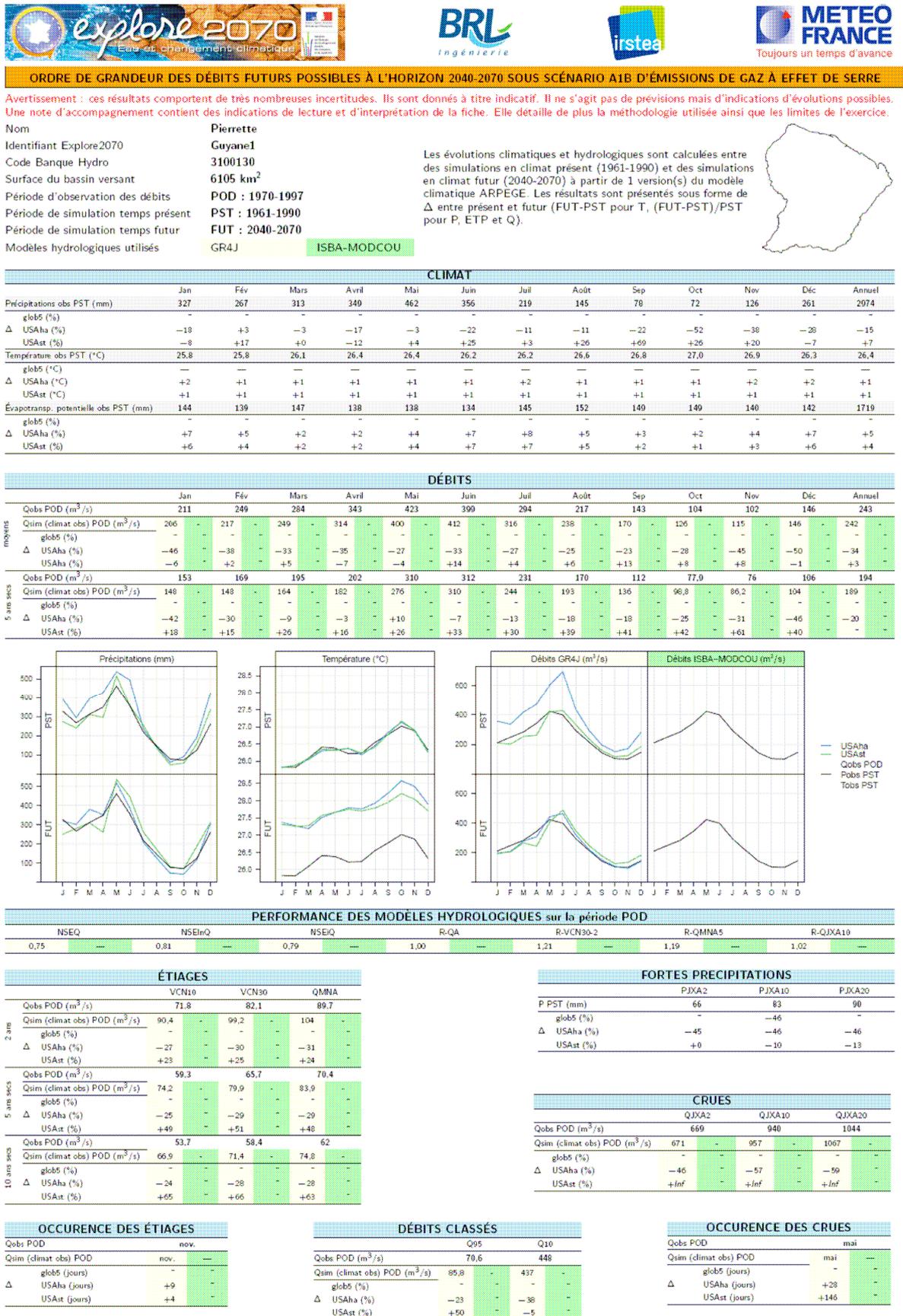
- ▶ Les indicateurs hydrologiques calculés sur les débits observés issus de la Banque Hydro : cette valeur rend compte du **fonctionnement actuel du bassin versant** ;
- ▶ Les indicateurs hydrologiques calculés sur les débits simulés par le modèle hydrologique GR4J avec en entrée le climat observé ;
- ▶ Les évolutions entre simulations présentes et futures pour chaque indicateur hydrologique sous forme de Δ ((FUT-PST)/PST), et pour des statistiques (minimum, médiane, maximum) sur les différents modèles climatiques : **ces valeurs rendent compte des évolutions hydrologiques possibles.**

La fiche présente aussi des indicateurs de performances des modèles hydrologiques en temps présent.

Elle présente enfin, sous forme de graphiques, les moyennes mensuelles des précipitations, températures et débits observés et simulés en temps présent et futur par les différents modèles climatiques et hydrologiques. La dispersion des courbes permet d'appréhender l'incertitude liée aux simulations.

La figure suivante présente un exemple de fiche-indicateurs.

Figure 65 : Exemple de fiche de synthèse



On présente ci-après les indicateurs choisis et les modes de calculs associés.

INDICATEURS CONSIDERES

Nous avons exclu de la liste des indicateurs des quantiles de période de retour supérieure à 20 ans, que ce soit en étiage ou en crue. Estimer des quantiles rares nécessiterait en effet des procédures spécifiques qui n'ont pas été retenues dans l'offre du Lot Hydrologie de surface. En outre les statistiques extrêmes sont fortement incertaines en temps présent sur des chroniques de quelques années, elles le sont encore plus en sortie de chaînes de modélisation en temps futur.

Dans le tableau ci-après sont présentés l'ensemble des indicateurs hydrologiques et climatiques qui sont restitués dans toutes les fiches des bassins versants.

La liste réduite des descripteurs sélectionnés qui est proposée ici répond à la préoccupation de ne pas produire trop d'indicateurs qui rendraient l'interprétation des résultats plus délicate.

Le calcul de tels indicateurs statistique ne peut être pertinent que si l'on dispose de série de débits suffisamment longue. En ce qui concerne les débits observés, **les indicateurs hydrologiques ont donc été calculé uniquement lorsque l'on dispose d'au moins dix années de données sur la période de référence.**

Certains de ces descripteurs se basent sur la courbe des débits classés, obtenue en classant tous les débits de la période par ordre croissant. On peut alors associer à chaque débit une fréquence de dépassement et construire la distribution des débits, les quantiles faibles (fréquence de dépassement élevée) caractérisant les étiages, les quantiles élevés (fréquence de dépassement faible) caractérisant les crues. Nous avons privilégié l'usage d'une distribution statistique à un échantillon pour l'obtention des quantiles plutôt qu'une approche empirique, réputée moins robuste pour les petits échantillons.

Dans l'ensemble du tableau, l'expression "fréquence de non dépassement d'une valeur x par une variable aléatoire X " s'entend au sens strict et désigne la probabilité que X soit inférieur ou égal à x , à la fois pour les indicateurs de crue et pour les indicateurs d'étiage.

Un certain nombre des descripteurs sélectionnés ici correspondent à ceux utilisés dans la banque HYDRO (). Ils sont tous exprimés en m^3/s .

La colonne de droite du tableau renvoie vers des détails sur les modalités de calcul présentées sous le tableau.

Tableau 22 : Description des indicateurs produits pour chaque bassin versant et figurant dans la fiche de synthèse.

CHAMPS	Définition	Renvoi pour détails sur les modalités de calcul
Descriptif du bassin-versant		
Nom indiquant le cours d'eau, surface du bassin versant et <i>coordonnées associées</i> au point de calcul et correspondance éventuelle avec la banque HYDRO	Liste établie dans la première phase de travail d'Explore2070	
Localisation du point de calcul sur un fond de carte		
Périodes sur lesquelles sont établies les statistiques		

CHAMPS	Définition	Renvoi pour détails sur les modalités de calcul
Période PST	Période entre le 1 ^{er} août 1961 et le 31 juillet 1991 pour le calcul des descripteurs du climat	
Période OBS	Période de disponibilité des débits dans la banque HYDRO entre le 1 ^{er} août 1962 et le 31 juillet 1991 (sans prise en compte des lacunes)	
Période	Période entre le 1 ^{er} août 2047 et le 31 juillet 2065 pour le calcul des descripteurs de l'hydrologie future	
Période FUT	Période entre le 1 ^{er} août 2046 et le 31 juillet 2065 pour le calcul des descripteurs du climat futur	
Indicateurs du climat		
Précipitations mensuelles et annuelles SAF	Moyennes interannuelles calculées à partir des réanalyses Safran sur la période entre le 1 ^{er} août 1961 et le 31 juillet 1991	
Températures mensuelles et annuelles SAF		
ETP mensuelles et annuelles SAF	Moyennes interannuelles calculées à partir des réanalyses Safran selon la formule de Penman sur la période entre le 1 ^{er} août 1961 et le 31 juillet 1991	
Indicateurs de régime hydrologique		
Débits mensuels et annuels moyens OBS	Moyennes interannuelles calculées à partir des données disponibles dans la banque HYDRO entre le 1 ^{er} août 1962 et le 31 juillet 1991	2 ; 3
Débits mensuels et annuels moyens sim SAF GR4J/SIM	Moyennes interannuelles calculées à partir des sorties des modèles hydrologiques GR4J/SIM avec en entrée le climat "observé" (réanalyses Safran) sur la période de disponibilité des débits dans la banque HYDRO entre le 1 ^{er} août 1962 et le 31 juillet 1991	2 ; 3
Débits mensuels et annuels quinquennaux sec OBS	Débits mensuels et annuels de fréquence de non dépassement 0,2 de la loi log-normale ajustée sur les échantillons de données disponibles dans la banque HYDRO entre le 1 ^{er} août 1962 et le 31 juillet 1991	4 ; 5
Débits mensuels et annuels quinquennaux sec sim SAF GR4J/SIM	Débits mensuels et annuels de fréquence de non dépassement 0,2 de la loi log-normale ajustée sur les échantillons de débits mensuels et annuels des modèles hydrologiques GR4J/SIM avec en entrée le climat "observé" (réanalyses Safran), sur la période de disponibilité des débits dans la banque HYDRO entre le 1 ^{er} août 1962 et le 31 juillet 1991	4 ; 5
Graphiques		
PST Précipitations	Sept courbes correspondant aux précipitations / températures mensuelles moyennes issues des simulations des sept MCG + une courbe avec les précipitations moyennes mensuelles calculées à partir des réanalyses Safran sur l'ensemble de la période entre le 1 ^{er} août 1961 et le 31 juillet 1991	
PST Température		
FUT Précipitations	Sept courbes correspondant aux précipitations / températures moyennes mensuelles issues des simulations des sept MCG sur la période entre le 1 ^{er} août 2046 et le 31 juillet 2065 + une courbe avec les précipitations moyennes mensuelles calculées à partir des réanalyses Safran sur la période entre le 1 ^{er} août 1961 et le 31 juillet 1991	
FUT Température		
PST Débit GR4J/SIM	Sept courbes correspondant aux sorties des modèles hydrologiques GR4J/SIM avec en entrée le climat issu de chacun des sept MCG + une courbe avec les débits mensuels moyens observés sur la période de disponibilité des débits dans la banque HYDRO entre le 1 ^{er} août 1962 et le 31 juillet 1991	
FUT Débit GR4J/SIM	Sept courbes correspondant aux sorties des modèles hydrologiques GR4J/SIM avec en entrée le climat issu de chacun des sept MCG sur la période entre le 1 ^{er} août 2047 et le 31 juillet 2065 + une courbe avec les débits mensuels moyens observés disponibles dans la banque HYDRO entre le 1 ^{er} août 1962 et le 31 juillet 1991	
Performance des modèles hydrologiques		
NSEQ	Critère de Nash-Sutcliffe calculé sur les débits journaliers sur la période de disponibilité des débits dans la banque HYDRO entre le 1 ^{er} août 1962 et le 31 juillet 1991	6

CHAMPS	Définition	Renvoi pour détails sur les modalités de calcul
NSEIQ	Critère de Nash-Sutcliffe calculé sur les inverses des débits journaliers sur la période de disponibilité des débits dans la banque HYDRO entre le 1 ^{er} août 1962 et le 31 juillet 1991	7
NSElnQ	Critère de Nash-Sutcliffe calculé sur les logarithmes népériens des débits journaliers sur la période de disponibilité des débits dans la banque HYDRO entre le 1 ^{er} août 1962 et le 31 juillet 1991	8
R-QA	Rapport entre le débit annuel moyen QA simulé par le modèle hydrologique avec en entrée le climat "observé" (réanalyses Safran) / observé sur la période de disponibilité des débits dans la banque HYDRO entre le 1 ^{er} août 1962 et le 31 juillet 1991	
R-VCN30(2)	Idem avec l'indicateur VCN30(2)	9
R-QMNA5	Idem avec l'indicateur QMNA5	10
R-QJXA10	Idem avec l'indicateur QJXA10	14
Indicateurs d'étiage		
VCN10 T=2, 5 et 10 ans, secs OBS	Quantiles de fréquence de non dépassement 0,5 0,2 et 0,1 de la loi log-normale ajustée sur les échantillons de débits moyens sur 10 jours miNimaux dans l'année, extraits des données disponibles dans la banque HYDRO entre le 1 ^{er} août 1962 et le 31 juillet 1991	9 ; 11
VCN10 T=2, 5 et 10 ans, secs sim SAF GR4J/SIM	Quantiles de fréquences de non dépassement 0,5 0,2 et 0,1 de la loi log-normale ajustée sur les échantillons de débits moyens sur 10 jours miNimaux dans l'année issus des modèles hydrologiques GR4J/SIM avec en entrée le climat "observé" (réanalyses Safran) sur la période de disponibilité des débits dans la banque HYDRO entre le 1 ^{er} août 1962 et le 31 juillet 1991	9 ; 11
VCN30 T=2, 5 et 10 ans, secs OBS	Quantiles de fréquences de non dépassement 0,5 0, 2 et 0,1 de la loi log-normale ajustée sur les échantillons de débits moyens sur 30 jours miNimaux dans l'année, extraits des données disponibles dans la banque HYDRO entre le 1 ^{er} août 1962 et le 31 juillet 1991	9 ; 11
VCN30 T=2, 5 et 10 ans, secs sim SAF GR4J/SIM	Quantiles de fréquences de non dépassement 0,5 0,2 et 0,1 de la loi log-normale ajustée sur les échantillons de débits moyens sur 30 jours miNimaux dans l'année issus des modèles hydrologiques GR4J/SIM avec en entrée le climat "observé" (réanalyses Safran) sur la période de disponibilité des débits dans la banque HYDRO entre le 1 ^{er} août 1962 et le 31 juillet 1991	9 ; 11
QMNA avec T=2, 5 et 10 ans, secs OBS	Quantiles de fréquence de non dépassement 0,5 0,2 et 0,1 de la loi log-normale ajustée sur les échantillons de débits moyens sur 10 jours miNimaux dans l'année, extraits des données disponibles dans la banque HYDRO entre le 1 ^{er} août 1962 et le 31 juillet 1991	10 ; 11
QMNA avec T=2, 5 et 10 ans, secs sim SAF GR4J/SIM	Quantiles de fréquences de non dépassement 0,5 0,2 et 0,1 de la loi log-normale ajustée sur les échantillons de débits Mensuels miNimaux dans l'Année issus des modèles hydrologiques GR4J/SIM avec en entrée le climat "observé" (réanalyses Safran) sur la période de disponibilité des débits dans la banque HYDRO entre le 1 ^{er} août 1962 et le 31 juillet 1991	10
Occurrence des étiages OBS	Mois d'occurrence privilégié du débit Mensuel miNimal Annuel obtenue à partir des observations disponibles entre le 1 ^{er} août 1962 et le 31 juillet 1991	12
Occurrence des étiages sim SAF GR4J/SIM	Mois d'occurrence privilégié du débit Mensuel miNimal Annuel obtenue à partir des sorties des modèles hydrologiques GR4J/SIM avec en entrée le climat "observé" (réanalyses Safran), sur la période de disponibilité dans la banque HYDRO entre le 1 ^{er} août 1962 et le 31 juillet 1991	12
Fortes précipitations		
PJXAT, avec T=2, 10 et 20 ans SAF	Pluies Journalières maXimales Annuelles de fréquence de non-dépassement 0,5, 0,9 et 0,95 calculées par ajustement de la loi de Gumbel sur les réanalyses Safran entre le 1 ^{er} août 1961 et le 31 juillet 1991	13
Indicateurs de crues		

CHAMPS	Définition	Renvoi pour détails sur les modalités de calcul
QJXAT, avec T=2, 10 et 20 ans OBS	Débits Journaliers maXimaux Annuels de fréquence de non-dépassement 0,5, 0,9 et 0,95 calculées par ajustement de la loi de Gumbel, sur les observations disponibles entre le 1 ^{er} août 1962 et le 31 juillet 1991	14
QJXAT, avec T=2, 10 et 20 ans sim SAF GR4J/SIM	Débits Journaliers maXimaux Annuels de fréquence de non-dépassement 0,5, 0,9 et 0,95 calculées par ajustement de la loi de Gumbel sur les sorties des modèles hydrologiques GR4J/SIM avec en entrée le climat "observé" (réanalyses Safran), sur la période de disponibilité dans la banque HYDRO entre le 1 ^{er} août 1962 et le 31 juillet 1991	14
Occurrence des crues OBS	Mois d'occurrence privilégié du Débit Journalier maXimal Annuel obtenue à partir des observations disponibles entre le 1 ^{er} août 1962 et le 31 juillet 1991	15
Occurrence des crues sim SAF GR4J/SIM	Mois d'occurrence privilégié du Débit Journalier maXimal Annuel obtenue à partir des sorties des modèles hydrologiques GR4J/SIM avec en entrée les réanalyses Safran sur la période de disponibilité dans la banque HYDRO entre le 1 ^{er} août 1962 et le 31 juillet 1991	15
Débits classés		
Q95 OBS	Valeur de débit journalier dépassé 95% du temps, extrait de la courbe des débits classés empirique obtenue à partir des observations disponibles dans la banque HYDRO entre le 1 ^{er} août 1962 et le 31 juillet 1991	16
Q95 sim SAF GR4J/SIM	Valeur de débit journalier dépassé 95% du temps, extrait de la courbe des débits classés empirique obtenue à partir des sorties des modèles hydrologiques GR4J/SIM avec en entrée le climat "observé" (réanalyses Safran), sur la période de disponibilité dans la banque HYDRO entre le 1 ^{er} août 1962 et le 31 juillet 1991	16
Q10 OBS	Valeur de débit journalier dépassé 10% du temps, extrait de la courbe des débits classés empirique obtenue à partir des observations disponibles entre le 1 ^{er} août 1962 et le 31 juillet 1991	16
Q10 sim SAF GR4J/SIM	Valeur de débit journalier dépassé 10% du temps, extrait de la courbe des débits classés empirique obtenue à partir des sorties des modèles hydrologiques GR4J/SIM avec en entrée le climat "observé" (réanalyses Safran), sur la période de disponibilité dans la banque HYDRO entre le 1 ^{er} août 1962 et le 31 juillet 1991	16

DETAILS SUR LES MODALITES DE CALCUL

Nous nous sommes rapprochés, quand cela était possible, des procédures de la banque HYDRO. Cependant, certaines nous étaient partiellement inconnues ou faisaient appel à l'expertise locale du gestionnaire.

Les modalités de calcul des indicateurs, ainsi que des explications plus détaillées sur leur nature, sont décrites ci-après. Nous précisons également les modalités de calcul des variables créées pour les besoins des fiches (notamment les dates des étiages).

Prise en compte des valeurs nulles dans les séries

1. Une loi tronquée est utilisée pour les échantillons comportant des valeurs nulles. Il faut ajuster la loi ϕ dans un premier temps à l'échantillon privé des valeurs nulles. Puis, la fréquence de non-dépassement de la valeur **Erreur ! Des objets ne peuvent pas être créés à partir des codes de champs de mise en forme.** est donnée par la relation :

$$F(x) = F(0) + (1 - F(0))\phi(x) \text{ si } x > 0$$

avec $F(0)$ la fréquence empirique de zéro, i.e. la proportion de valeurs nulles (en %). Si on souhaite obtenir par exemple le quantile quinquennal sec, la valeur recherchée X_5 sera celle qui respecte l'égalité :

$$F(X_5) = 0.2 \text{ soit : } \phi(X_5) = (0.2 - F(0)) / (1 - F(0))$$

Indicateurs de régime

2. **Le débit annuel moyen** est établi à partir de la moyenne de l'ensemble des débits journaliers disponibles. Une année est considérée en lacune s'il y a plus de 20% de données manquantes.
3. **Les débits mensuels** sont calculés s'il y a au moins 25 jours de données (soit au moins 80% de disponibilité sur le mois).
4. **Le débit mensuel interannuel quinquennal sec** pour un mois considéré - ex. janvier - est le débit mensuel qui a une fréquence de non dépassement de 1/5 (statistiquement, 1 année sur 5, le débit du mois considéré est inférieur à cette valeur, 4 années sur 5, il est supérieur). Il permet de caractériser un mois calendaire de faible hydraullicité.
5. **Le débit annuel interannuel quinquennal sec** est le débit moyen annuel qui a une fréquence de non dépassement de 1/5 (statistiquement, 1 année sur 5, le débit annuel est inférieur à cette valeur, 4 années sur 5, il est supérieur).

Performance des modèles

6. Le **critère de Nash-Sutcliffe** calculé sur les débits journaliers permet une évaluation de la fiabilité du modèle sur la période considérée. Ce critère donne une importance relative plus importante à la restitution des forts débits. Il est calculé selon :

$$NSEQ = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (Q_i - \hat{Q}_i)^2}{\sum_{i=1}^n (Q_i - \bar{Q})^2}$$

où Q_i et \hat{Q}_i sont respectivement les débits observés et simulés durant la période de calage et où \bar{Q} est la moyenne des débits observés. Si le critère de Nash est de 1, l'ajustement est parfait, par contre s'il est négatif, le débit calculé par le modèle est une plus mauvaise estimation que le simple débit constant égal au débit observé.

7. Le **critère de Nash-Sutcliffe calculé sur les inverses des débits journaliers**. Ce critère donne une importance relative plus importante à la restitution des étiages.
8. Le **critère de Nash-Sutcliffe calculé sur les logarithmes népériens des débits journaliers**. Ce critère donne également une importance relative plus importante à la restitution des bas débits.

Indicateurs d'étiage

9. Le **VCN_x** permet de caractériser les étiages. Plutôt que de s'intéresser aux débits journaliers (avec le risque de prendre en compte un creux exceptionnel non significatif), on s'intéresse à la moyenne sur x jours.

Considérons une période de x jours consécutifs et faisons la glisser tout au long d'une année par pas de 1 jour. A chaque date j du premier jour de la période on affecte le débit moyen noté **Qmoy(j)** sur l'ensemble des x jours. Pour une année donnée, on note VCN x le plus petit des Qmoy(j)

Exemple : Le VCN10 est la plus petite moyenne sur 10 jours des débits journaliers observée une année donnée en un point donné.

La fiche indicateur présente les valeurs de VCN10 et VCN30 pour des périodes de retour de 2, 5 et 10 ans.

10. Le **QMNA** désigne le débit mensuel minimal d'une année civile. La fiche indicateur présente les valeurs de QMNA pour des périodes de retour de 2, 5 et 10 ans.
11. S'il manque un des douze mois de l'**année hydrologique** pour les étiages, les minima annuels VCN10, VCN30 et QMNA ne sont pas calculés et l'année est considérée absente.
12. **Date d'occurrence des étiages** : voir ci-après

Indicateurs de fortes précipitations et de crue

13. La **PJXAT** est la pluie journalière maximale annuelle, de période de retour **T**. Pour chaque année, on enregistre la pluie journalière maximale. On classe ensuite ces valeurs de précipitations par ordre croissant. On peut alors associer à chaque pluie maximale une fréquence de dépassement et construire la distribution de débits. Cette distribution est ajustée par la loi de Gumbel. On calcule ensuite les quantiles pour les périodes de retour **T** (soit les fréquences de non dépassement $=1-1/T$).
14. le **QJXAT** est le débit journalier maximal annuel, de période de retour **T**. Pour chaque année, on enregistre le débit journalier maximal. On classe ensuite ces débits par ordre croissant. On peut alors associer à chaque débit maximal une fréquence de dépassement et construire la distribution de débits. Cette distribution est ajustée par la loi de Gumbel. On calcul ensuite les quantiles pour les périodes de retour **T** (soit les fréquences de non dépassement $=1-1/T$).
15. **Date d'occurrence des crues** : voir ci-après

Débits classés

16. Le **QX** est le débit journalier dépassé X% du temps. Il est calculé comme suit :

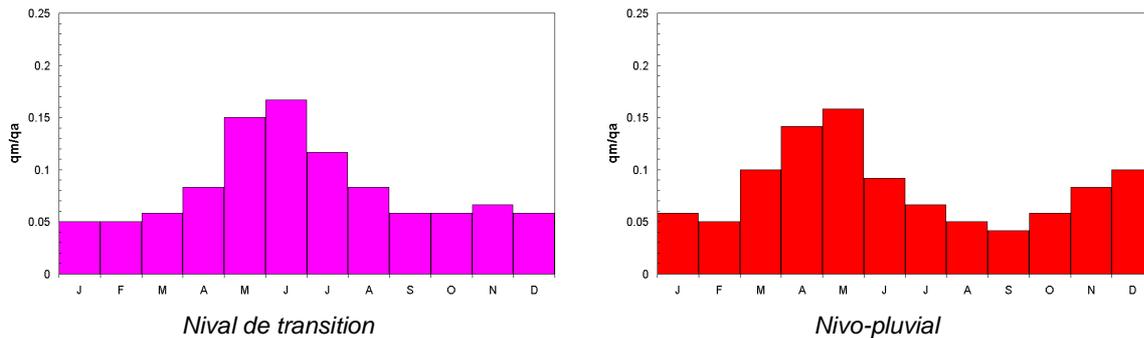
On classe tous les débits de la période par ordre croissant. On peut alors associer à chaque débit une fréquence de dépassement et construire la distribution des débits. Le **Q10** a une fréquence de dépassement de 0.1, il caractérise les hautes eaux. Le **Q95** a une fréquence de dépassement de 0.95, il caractérise les basses eaux.

Calcul des dates d'occurrence des crues et des étiages (détails sur les renvois 12 et 15)

L'**année hydrologique** pour l'extraction des maxima/minima annuels est calée sur le régime hydrologique de manière automatique et indépendante l'une de l'autre :

Par défaut, l'année hydrologique pour les étiages est l'année civile sauf pour les cours d'eau de montagne (repérés en premier lieu par la première lettre du code station HYDRO : O, Q, V, W, X ou Y) dont le régime est à dominante nivale ; le basculement entre bassins nivaux et bassins pluviaux est défini par la proximité à deux régimes de référence de la classification établie sur les cours d'eau français par Sauquet et al. (2008) à partir des coefficients mensuels de débit. L'année hydrologique pour les étiages des cours d'eau nivaux s'étend de juin de l'année considérée à mai de l'année suivante.

Figure 66 : Evolution des coefficients mensuels de débit - écoulement mensuel moyen qm divisé par l'écoulement annuel moyen qa (qa et qm en mm) - pour deux classes de régime définissant la transition entre régime nivale (à gauche) et régime pluvial (à droite), extrait de Sauquet et al., 2008



Par défaut, l'année hydrologique pour les crues débute le 1er septembre de l'année considérée et s'achève le 31 août de l'année civile suivante sauf pour les cours d'eau de montagne (repérés en premier lieu par la première lettre du code station HYDRO : O, Q, V, W, X ou Y) qui ont leur crue de manière privilégiée entre mai et août. L'année hydrologique pour les crues des cours d'eau nivaux est l'année civile.

Compte tenu des contraintes sur l'échantillonnage et la gestion des lacunes, il est possible que le nombre d'années effectif (et donc la taille de l'échantillon) évolue d'un descripteur à un autre (ex. si la station compte 10 jours de lacune pendant le mois de juin 1987 sur une période de 15 ans, les échantillons de débits mensuels auront un effectif de 15 pour tous les mois sauf pour juin). D'où les précautions d'usage de la notion de période OBS.

Pour qu'une **année hydrologique des crues** soient comptabilisée, il faut *a minima* six mois de données journalières.

Les dates se calculent à partir de statistiques circulaires. Considérons un ensemble d'événements et les dates correspondantes D_j . Dans le cas classique, ces dernières sont exprimées en jour julien (entre 1 et 366 pour les années bissextiles, entre 1 et 365 sinon), puis interprétées en angle en radian :

$$\theta_j = 2\pi \frac{D_j}{365}$$

Ces dates sont repérées en coordonnées polaires $(\cos(\theta_j); \sin(\theta_j))$ sur le cercle unitaire. La position moyenne des événements est donnée par :

$$x_\theta = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n \cos(\theta_j) \quad y_\theta = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n \sin(\theta_j)$$

Finalement on retient l'angle du moyen vecteur :

- si $x_\theta > 0$: $\theta = \arctan\left(\frac{y_\theta}{x_\theta}\right)$ si $y_\theta > 0$ ou $\theta = 2\pi + \arctan\left(\frac{y_\theta}{x_\theta}\right)$ si $y_\theta < 0$
- sinon : $\theta = \arctan\left(\frac{y_\theta}{x_\theta}\right) + \pi$

Dans le cas des crues, les dates sont le jour julien du débit journalier maximal. Les résultats sont donnés à résolution du mois. Dans le cas des étiages, les dates D_j sont les mois associés aux débits moyens minimaux des années hydrologiques et :

$$\theta_j = 2\pi \frac{D_j}{12}$$

6.8 PRESENTATION DES RESULTATS

A l'issue des travaux explicités dans ce rapport, deux productions viennent alimenter et supporter l'analyse des résultats finaux :

- ▶ L'ensemble des indicateurs calculés pour les observations et pour toutes les simulations sont rassemblés dans des tables .csv ;
- ▶ Les fiches de synthèse présentent ces résultats pour les 35 points de calcul.

6.9 ANALYSE DES EVOLUTIONS HYDROLOGIQUES FUTURES POSSIBLES

Le rapport A1 – *Synthèse* présente une analyse de l'ensemble des résultats produits en termes d'évolutions climatiques et hydrologiques possibles sur les DOM, et une analyse des incertitudes.

7. L'ACTIVITE CYCLONIQUE : PEUT-ON ANTICIPER DES EVOLUTIONS ?

7.1 RETROSPECTIVE

7.1.1 Les Antilles (source www.meteo.gp)

CYCLONES AYANT TOUCHE LA MARTINIQUE

Les cyclones sont baptisés depuis 1950. Voici la liste des cyclones ayant touché la Martinique depuis 1950 :

- ▶ 15 août 1951 : tempête tropicale CHARLIE,
- ▶ 2 septembre 1951 : ouragan DOG,
- ▶ 30 août 1958 : tempête tropicale ELLA,
- ▶ 25 septembre 1963 : ouragan de classe 3 à 4 EDITH (au moins 10 morts),
- ▶ 29 septembre 1967 : tempête tropicale BEULAH (pluies intenses),
- ▶ 20 août 1970 : tempête tropicale DOROTHY (pluies intenses avec records sur l'île, responsables de 44 morts),
- ▶ 29 août 1979 : ouragan de classe 4 DAVID (oeil passé juste au large de la Caravelle et dans le canal de la Dominique),
- ▶ 4 août 1980 : ouragan ALLEN (bien que son oeil soit passé au sud de Sainte-Lucie, resté mémorable en Martinique),
- ▶ 9 septembre 1988 : tempête tropicale GILBERT (avant de devenir l'ouragan du siècle sur la Jamaïque),
- ▶ 14 août 1993 : tempête tropicale CINDY (très fortes pluies, intensité de 147 mm en 1 heure au Prêcheur),
- ▶ 10 septembre 1994 : tempête tropicale DEBBY (fortes pluies),
- ▶ 26 août 1995 : tempête tropicale IRIS (nombreux records de pluie : 325 mm de pluies en 24 h à l'aéroport du Lamentin, 411 mm à Ducos pendant la même période et 449 mm en 2 jours),
- ▶ 14 septembre 1995 : ouragan de classe 1 MARILYN (sans effet notable sur l'île),
- ▶ 27 août 2007 : ouragan de classe 2 DEAN (oeil passé dans le canal de Ste-Lucie et côtes sud de la Martinique : dégâts considérables).

On peut noter que ne figurent pas sur cette liste un certain nombre de phénomènes qui ne sont passés sur l'île ou à proximité immédiate qu'au stade de dépression tropicale, c'est-à-dire sans vent supérieur à 63 km/h en valeur soutenue. Quant à LENNY de novembre 1999, s'il a laissé des marques, notamment par sa houle d'Ouest destructrice, son passage éloigné ne lui permet pas d'être comptabilisé comme un cyclone ayant touché directement l'île. De même que OMAR en octobre 2008, avec une houle un peu moins destructrice mais aux caractéristiques proches (houle d'Ouest déferlante sur la Côte Caraïbe).

Si on considère le dénombrement purement arithmétique, en 60 ans de statistiques cycloniques depuis 1950, on recense, pour la Martinique, 8 Tempêtes Tropicales et 6 Ouragans, ce qui représente en moyenne :

- ▶ 1 phénomène cyclonique (tempête ou ouragan) tous les 4,3 ans ;
- ▶ 1 ouragan tous les 10 ans.

CYCLONES AYANT TOUCHÉ LA GUADELOUPE

Ci dessous la liste des cyclones ayant touché la Guadeloupe depuis 1950 :

- ▶ 21 août 1950 : ouragan BAKER,
- ▶ 11 août 1956 : ouragan BETSY (6 morts),
- ▶ 18 août 1959 : tempête tropicale EDITH,
- ▶ 1er octobre 1961 : tempête tropicale FRANCES,
- ▶ 26 octobre 1963 : tempête tropicale HELENA (pluies intenses - 5 morts),
- ▶ 22 août 1964 : ouragan CLEO (14 morts - classe 3 sur Marie-Galante, les saintes et sud Basse-Terre),
- ▶ 27 septembre 1966 : ouragan INEZ (25 morts - classe 3 proche de la catégorie 4),
- ▶ 8 septembre 1981 : tempête tropicale GERT (peu d'impact sur l'île),
- ▶ 16 septembre 1989 : ouragan de classe 4 HUGO (oeil passé sur la Grande-Terre - dégâts considérables - 11 morts au total),
- ▶ 27 août 1995 : tempête tropicale IRIS (impact faible sur est Grande-Terre et Désirade essentiellement),
- ▶ 4 septembre 1995 : ouragan de classe 4 LUIS (impact modéré, il fut plus violent sur St-Barth' et St-Martin),
- ▶ 14 septembre 1995 : ouragan MARILYN (classe 1 mais avec des pluies intenses sur Basse-Terre),
- ▶ 7 septembre 1996 : tempête tropicale HORTENSE (sans effet particulier),
- ▶ 20 septembre 1998 : ouragan GEORGES (sans effet notable sur l'île, juste une grosse frayeur),
- ▶ 19 novembre 1999 : tempête tropicale LENNY (moins violent que sur les îles plus au nord qu'il a traversé à l'intensité d'ouragan, mais notable par ses cumuls de pluies et inondations, et aussi par sa houle d'Ouest destructrice en Côte-sous-le-Vent),
- ▶ 13-14 septembre 2004 : tempête tropicale JEANNE (quasiment formée sur le nord de l'île avec cumuls de pluies considérables sur la nord Basse-Terre),
- ▶ 3 septembre 2009 : tempête tropicale ERIKA (zone dépressionnaire faible traversant l'île avec fortes pluies et surtout à la Désirade avec un nouveau record de 305 mm en 36h),

On peut noter que ne figurent pas sur cette liste un certain nombre de phénomènes qui ne sont passés sur l'île, ou à proximité immédiate, qu'au stade de dépression tropicale, c'est-à-dire sans vent supérieur à 63 km/h en valeur soutenue, ou des phénomènes restés parfois en mémoire mais dont le centre est passé à plus de 100 km de l'île tels :

- ▶ 29-30 août 1979 ouragan DAVID encore présent dans les mémoires basse-terriennes, avec une houle énorme,
- ▶ 16-17 août 2007 ouragan DEAN passé juste au sud de la Martinique et dont certains effets furent remarqués en Guadeloupe (vents forts, grosse houle déferlante),
- ▶ 15-16 octobre 2008 ouragan OMAR passé tout près de Saint-Martin dans une trajectoire s'apparentant à celle de Lenny en 1999, et dont les effets de la houle d'Ouest ont été très importants sur les rivages de la Côte-sous-le-Vent,

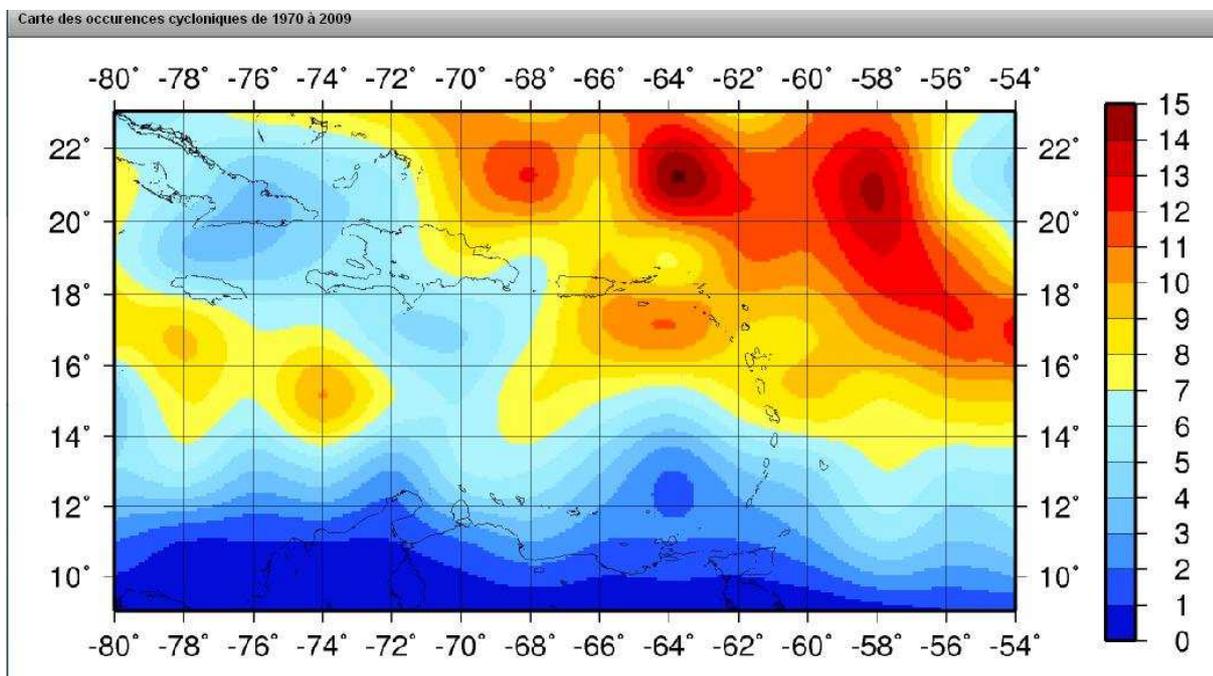
Si on considère le dénombrement purement arithmétique, en 60 ans de statistiques cycloniques depuis 1950, on recense, pour la Guadeloupe, 9 Tempêtes Tropicales et 8 Ouragans, ce qui représente en moyenne :

- ▶ 1 phénomène cyclonique (tempête ou ouragan) tous les 3,5 ans ;
- ▶ 1 ouragan tous les 7,5 ans.

Le risque de voir un phénomène cyclonique, sous forme de tempête ou ouragan, est très comparable sur l'ensemble des îles françaises des Antilles : environ 1 tous les 4 ans. La différence se situe surtout au niveau de l'intensité : plus on monte vers le nord, plus ces cyclones ont des chances d'être des ouragans. Le risque de passage d'ouragan augmente en effet de 1 tous les 10 ans en Martinique à 1 tous les 6 ans à peine à Saint-Barthélemy et 1 tous les 7 ou 8 ans en Guadeloupe. Mais ce ne sont que des valeurs issues de statistiques sur de faibles échantillons. Restons donc prudent sur ces résultats chiffrés.

CONSTATS GENERAUX SUR LE BASSIN ATLANTIQUE

Figure 67 : carte des occurrences cycloniques sur les Caraïbes de 1970 à 2009

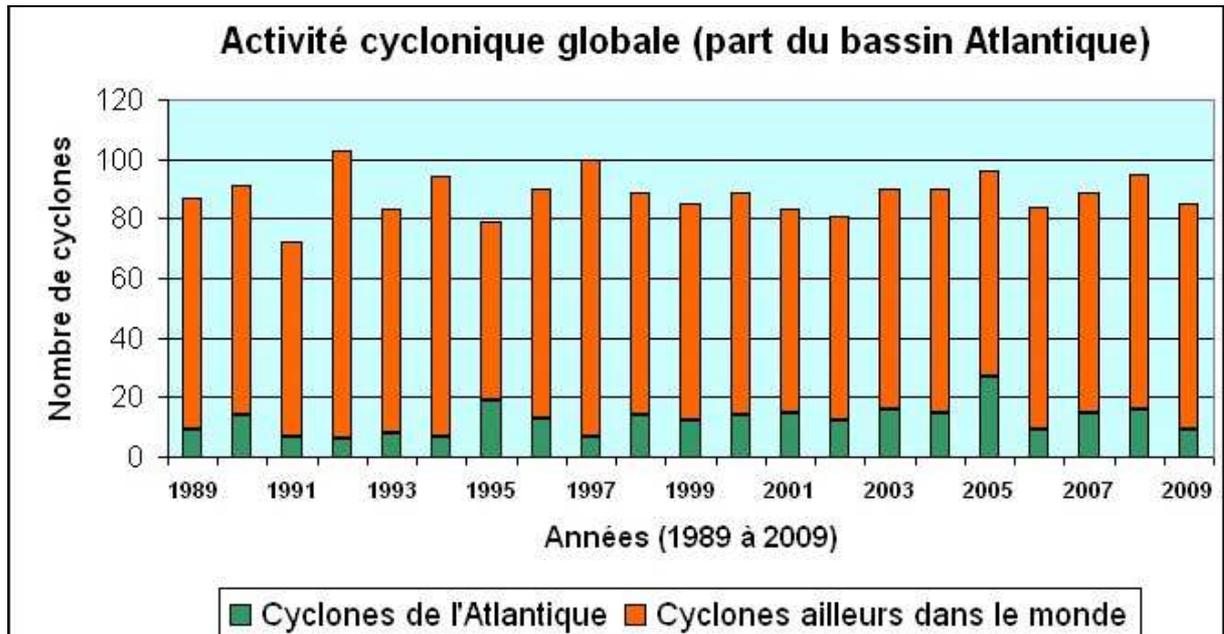


Aucune augmentation sensible du nombre de cyclones sur le globe dû au réchauffement de la Terre durant ces dernières 50 années n'a été montrée.

On peut cependant évoquer la recrudescence observée et constatée de l'activité cyclonique sur la zone de l'Atlantique depuis 1995. On l'attribue généralement à une variation naturelle multi-décennale.

Le graphe de la Figure 68 donne une idée de l'évolution du nombre de cyclones tropicaux depuis 21 ans.

Figure 68 : Nombre de cyclones observés en Atlantique et dans le monde de 1989 à 2009 (crédit : Météo-France)



7.1.2 L'île de la Réunion

HISTORIQUE DES EVENEMENTS CYCLONIQUES SUR L'ILE DE LA REUNION

(Source : Atlas climatologique de La Réunion- en cours de réédition)

Tableau 23 : Cyclones à moins de 300 km de La Réunion (1967-2010)

Année	Nom	Date	Passage au plus près des côtes réunionnaises
1969	DANY	02-févr	160 km au nord-ouest
1969	HELENE	24-mars	300 km au nord-est
1970	HERMINE	25-janv	60 km au sud-ouest
1970	JANE	21-févr	260 km au nord-ouest
1970	LOUISE	29-mars	260 km au nord-est
1971	HELGA	8/9-févr	150 km au sud-est
1972	EUGENIE	13-févr	280 km au nord-ouest
1972	BEATRICE	22/23-déc	280 km au sud-est
1973	LYDIE	10-mars	300 km à l'ouest
1975	DEBORAH	23/24-janv	240 km au sud
1975	GERVAISE	6/7-févr	140 km au sud-est
1977	FIFI	06-févr	140 km à l'ouest
1978	FLEUR	21-janv	260 km à l'est
1980	JACINTHE	04-févr	280 km au sud-est
1980	LAURE	13-mars	280 km à l'est
1981	FLORINE	07-janv	20 km au sud-est
1987	CLOTILDA	13/14-févr	sur l'île
1989	FIRINGA	29-janv	sur le Nord-Ouest
1993	COLINA	19-janv	sur l'Ouest
1994	HOLLANDA	11-févr	20 km au sud-est
1994	LITANNE	13/14-mars	300 km au nord
1996	BONITA	09-janv	260 km au nord
1996	DANIELLA	8/9-déc	120 km à l'est
1997	GRETELLE	22/23-janv	300 km au nord-ouest
2000	CONNIE	29-janv	140 km au nord-ouest
2001	ANDO	6/7-janv	210 km au nord-ouest
2002	DINA	22/23-janv	65 km au nord-ouest
2003	GERRY	13-févr	290 km au nord-est
2007	GAMEDE	24/27-févr	240 km au nord-ouest
2009	GAEL	15-févr	300 km au sud-ouest

Sur la période 1967-2010, 30 systèmes sont passés à moins de 300 km des côtes réunionnaises, au stade de cyclone tropical :

- ▶ 7 à moins de 100 km ;
- ▶ 6 entre 100 et 200 km ;
- ▶ 17 entre 200 et 300 km.

Répartition saisonnière (date de passage) :

- ▶ décembre : 2 cyclones ;
- ▶ janvier : 11 cyclones ;
- ▶ février : 12 cyclones ;
- ▶ mars : 5 cyclones.

TEMPÊTES ET CYCLONES A MOINS DE 100 KM DE LA REUNION**Tableau 24 : Tempêtes et cyclones à moins de 100 km de La Réunion (1967-2010)**

Année	Nom	Date	Passage au plus près des côtes réunionnaises	Stade	Quadrant d'origine à 300 km des côtes
1970	HERMINE	25-janv	60 km au sud-ouest	cyclone	NO
1972	DOLLY	08-févr	50 km au sud-ouest	tempête	NO
1973	CHARLOTTE	09-janv	70 km au sud-ouest	tempête	NO
1979	BENJAMINE	7/8-janv	50 km à l'est	tempête	NE
1980	HYACINTHE	27-janv	60 km au sud	tempête	SO
1981	FLORINE	07-janv	20 km au sud-est	cyclone	NE
1981	HELYETTE	01-févr	50 km au sud-est	tempête	NE
1981	JOHANNE	5/6-mars	50 km au nord-est	tempête	NO
1982	GABRIELLE	06-févr	50 km au nord-ouest	tempête	NE
1985	CELESTINA	17/18-janv	à proximité du Sud-Est	tempête	NO
1987	CLOTILDA	13/14-févr	sur l'île	cyclone	NO
1989	FIRINGA	29-janv	sur le nord-ouest	cyclone	NE
1989	KRISY	06-avr	50 km au sud-est	tempête	NE
1993	COLINA	19-janv	sur l'ouest	cyclone	NE
1994	HOLLANDA	11-févr	20 km au sud-est	cyclone	NE
1995	KYLIE	13-mars	à proximité du Nord-Ouest	tempête	NE
1999	DAVINA	10-mars	35 km au sud-est	tempête	NE
2002	DINA	22-janv	65 km au nord-ouest	cyclone	NE

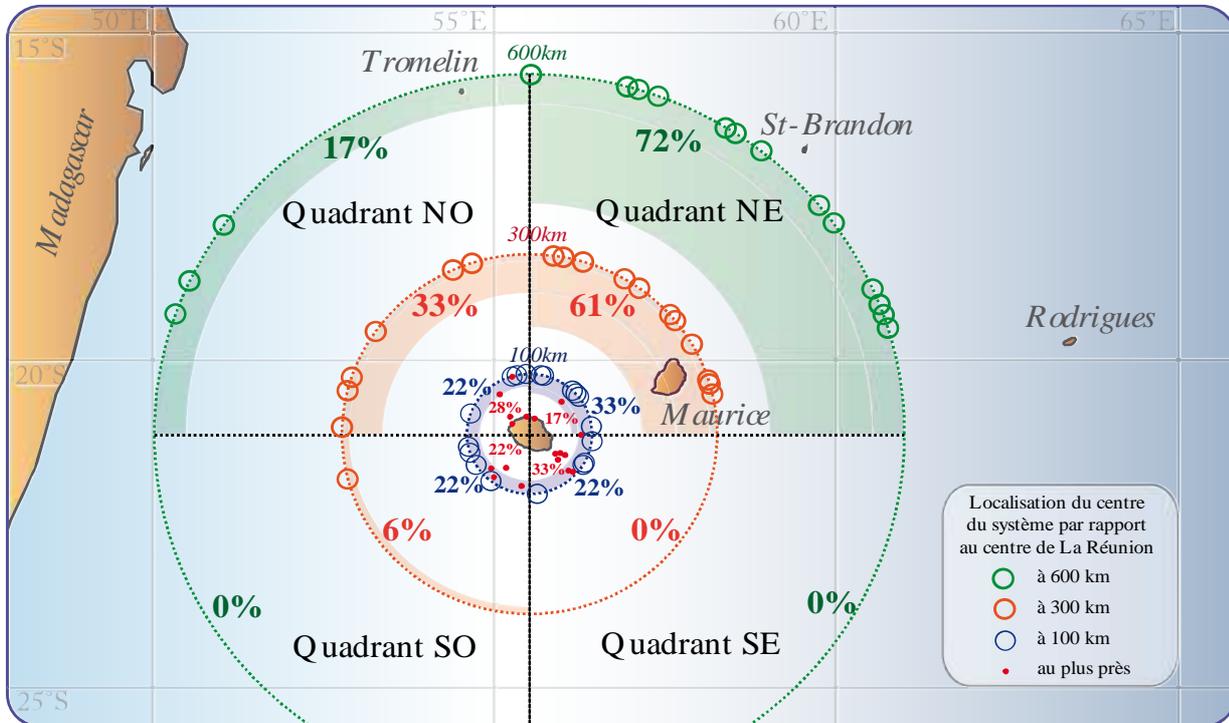
Sur la période 1967-2010, 18 systèmes sont passés à moins de 100 km des côtes réunionnaises : 7 au stade de cyclone tropical et 11 au stade de tempête tropicale (modérée ou forte).

Répartition saisonnière (date de passage) :

- ▶ janvier : 9 systèmes ;
- ▶ février : 5 systèmes ;
- ▶ mars : 3 systèmes ;
- ▶ avril : 1 système.

Si l'on remonte 100 ans en arrière, il n'y a pas eu de cyclone marquant à moins de 100 km des côtes réunionnaises au mois de décembre, mais 2 cyclones importants en avril (en 1944 et 1945). En moyenne, 1 système est observé tous les 2 ans, mais la répartition reste très irrégulière dans le temps : aucun cas de 2003 à 2010, mais 3 systèmes début 1981.

Figure 69 : Quadrant d'origine à 100, 300 et 600 km des tempêtes et cyclones passés à moins de 100 km de La Réunion (1967-2010)



La Figure ci-dessus montre les quadrants d'origine des 18 systèmes passés à proximité de La Réunion. La plupart de ces systèmes sont arrivés par le nord-est (72% des cas à 600 km, 61% à 300 km), alors que les passages à 100 km et au plus près de l'île montrent une répartition assez homogène. On peut noter par ailleurs que 2 systèmes (11% des cas) se sont formés à moins de 600 km.

Sur le bassin du Sud-Ouest de l'océan Indien, 9,3 systèmes tropicaux se sont formés en moyenne par an de 1967 à 2009 et 4,8 ont atteint le stade de cyclone tropical avec une forte variabilité interannuelle.

Mais la base de données disponible actuellement n'est pas suffisamment homogène pour dégager des tendances indiscutables sur l'échantillon étudié.

A noter qu'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.

Plus généralement les connaissances actuelles en matière d'évolution des caractéristiques des cyclones font état d'une baisse du nombre de cyclones. Cependant, dans l'avenir, l'intensité des systèmes les plus forts (de catégorie $>3^1$ sur l'échelle de Safir Simpson) pourrait être accrue avec une augmentation significative des précipitations associées (de manière plus nette que l'augmentation des vents).

Par ailleurs, les trajectoires moyennes des cyclones devraient être affectées par le changement climatique, même si l'on ne peut pas donner une idée précise des régions les plus affectées par ces changements.

7.2 ÉTAT DES LIEUX DES CONNAISSANCES SUR L'ACTIVITE CYCLONIQUE GLOBALE ET SES CONSEQUENCES SUR LES DEPARTEMENTS D'OUTREMER (F. CHAUVIN, CNRM-GAME, GMGEC/VDR)

7.2.1 L'activité cyclonique et la difficulté à simuler sa possible évolution liée au changement climatique

Les cyclones tropicaux sont classés parmi les phénomènes extrêmes du fait de leur potentialité à générer des dégâts considérables. Mais, en fait, si l'on y regarde de plus près, ce ne sont pas des phénomènes rares. En effet, **chaque année, environ 80 tempêtes tropicales (vents supérieurs à 17 m/s ou 34 nœuds) parcourent le globe et ce nombre varie peu d'une année à l'autre.** Parmi ces tempêtes, environ une quarantaine atteignent le stade de cyclone tropical (vents supérieurs à 33 m/s ou 64 nœuds), parmi lesquels une vingtaine peuvent atteindre le stade de cyclone majeur (c'est-à-dire de catégorie 3 et plus sur l'échelle de Saffir-Simpson, soit des vents dépassant les 50 m/s ou 95 nœuds). Ces derniers phénomènes sont à surveiller particulièrement car ce sont eux qui engendrent les dégâts les plus forts, ceux-ci étant une fonction non linéaire de l'intensité du vent. Néanmoins, parmi les dégâts engendrés par les cyclones tropicaux, on peut également compter ceux qui résultent des pluies associées aux cyclones et ceux qui sont le résultat de la marée de tempête associée. Cette dernière fut à l'origine des nombreuses victimes de l'ouragan Katrina qui a frappé la Nouvelle-Orléans fin août 2005.

La localisation géographique des phénomènes cycloniques se situe principalement aux tropiques, la probabilité de formation s'amenuisant fortement si l'on se rapproche de l'Equateur. L'absence de force de Coriolis autour de l'Equateur, ne permet pas, en effet, le développement de tourbillons susceptibles de générer des cyclones. Ainsi, la zone qui s'étend de part et d'autre de l'Equateur dans une bande large de 10° , ne voit-elle que très rarement des phénomènes cycloniques. De plus, et ce surtout dans l'hémisphère Nord, la trajectoire des cyclones tropicaux, qui est principalement orientée vers l'Ouest aux tropiques, peut s'incurver pour prendre une direction Est avant que le phénomène n'effectue sa transition extra-tropicale et ne se fonde dans la circulation générale des moyennes latitudes. On observe ce phénomène dans l'Ouest des bassins Atlantique et Pacifique Nord.

Les bassins océaniques qui voient la formation de cyclones sont : l'Atlantique Nord, le Pacifique Nord, découpé suivant 3 zones, Ouest, central et Est, l'océan indien Nord et Sud et le Pacifique Sud-Ouest. L'Atlantique Sud n'est pas considéré comme une zone de formation de cyclones, les conditions de grande échelle ne favorisant pas celle-ci. Néanmoins, en mars 2004, le Brésil a connu son premier cyclone tropical répertorié comme tel, bien que des observations antérieures avaient déjà mentionné de tels phénomènes.

¹ vent le plus fort en valeur soutenue durant 1 minute : 178 à 210 km/h

Les cyclones tropicaux se distinguent d'autres phénomènes météorologiques par certaines caractéristiques qui rendent leur dénombrement assez aisé depuis l'avènement des satellites. En effet, ce sont des phénomènes tourbillonnaires dont le cœur est plus chaud en altitude que l'atmosphère qui l'entoure. Ceci est dû principalement à la convection qui s'y développe, à l'origine de la condensation en altitude de l'eau qui s'est évaporée en surface, accompagnée d'un dégagement de chaleur. **Ce « cœur chaud » est vraiment spécifique des cyclones** et c'est un des éléments qui permettent de suivre la transition extra-tropicale du phénomène. Les vents dans un cyclone sont, bien entendu, cycloniques en surface et jusqu'à des altitudes élevées pour s'inverser au sommet de la troposphère, permettant ainsi d'évacuer les masses d'air par divergence. On considère que le vent tangentiel au cyclone est maximum vers 850 hPa, mais les effets de la surface peuvent rendre ces vents dévastateurs en très basse couche.

Pour rendre compte des conditions de grande échelle favorables au développement des cyclones tropicaux, on considère plusieurs facteurs qui influent sur ces phénomènes :

- ▶ La température de surface de la mer ; plus elle est élevée, et plus la probabilité de déclenchement est forte. On considère couramment qu'une température de surface de 26°C est nécessaire pour le déclenchement, mais ce seuil est arbitraire et n'est probablement adapté à un climat réchauffé ; Le tourbillon absolu est un facteur favorable au renforcement des phénomènes cycloniques ;
- ▶ Le cisaillement vertical du vent horizontal, représenté habituellement par la différence entre le vent de basse couche et celui du sommet de la troposphère, est un facteur défavorable à la cyclogénèse, empêchant l'isolement du système en formation par son mélange avec son environnement ; L'humidité des basses couches est un facteur important car elle est un moteur de la convection, qui tend à rendre le profil vertical de température instable et fournit l'eau nécessaire à la convection ;
- ▶ Enfin, le facteur de Coriolis, qui permet aux tourbillons de s'amplifier.

Le mécanisme de formation des cyclones tropicaux a fait l'objet, dans la littérature, d'un nombre incalculable de publications. **Malgré l'intérêt porté à ces phénomènes depuis longtemps, il est toujours difficile de comprendre comment un tourbillon se transforme ou pas en tempête, puis cyclone tropical.** Beaucoup d'effets thermodynamiques entrent en jeu et peuvent se renforcer ou s'annihiler entre eux.

Ainsi, les études dédiées à l'impact du réchauffement climatique sur l'activité des cyclones tropicaux, leur intensité et leur fréquence, n'ont pas abouti, à l'heure actuelle, sur un scénario solide d'évolution de ces systèmes au cours du 21e siècle.

Les simulations climatiques effectuées dans le cadre du GIEC représentent de manière très médiocre ces phénomènes dont l'échelle de grandeur n'est que de quelques dizaines à quelques centaines de kilomètres. Ainsi, les modèles de circulation générale (MCG) utilisés pour effectuer les scénarios climatiques ont une résolution spatiale trop grossière pour bien représenter les cyclones. Des simulations à échelle très fine ont tout de même été réalisées par plusieurs laboratoires, la plus fine grille utilisée atteignant 20 km pour le modèle japonais.

Deux alternatives existent actuellement pour étudier l'évolution de l'activité cyclonique dans une atmosphère plus chaude.

- ▶ Certaines études s'attachent à étudier l'évolution des variables de grande échelle favorables à la formation de cyclones. Elles ne permettent pas de dénombrer directement les cyclones dans une simulation mais abordent le sujet en termes de probabilité de déclenchement.

- ▶ Les modèles régionaux sont un outil primordial pour aborder directement les cyclones et tracer leurs trajectoires. En forçant ceux-ci avec les conditions issues d'un modèle couplé océan-atmosphère de grande échelle, on peut ainsi produire des cyclones plus réalistes. Cette méthodologie souffre, néanmoins, des effets de bords du domaine choisi. Météo-France a opté pour une approche à l'aide de la grille basculée/étirée du modèle ARPEGE-Climat. C'est une autre manière de régionaliser le climat, qui permet d'atteindre des résolutions de l'ordre de 50 km autour du pôle d'intérêt de la grille au détriment de l'antipode. Le principal intérêt de cette configuration est d'éviter les effets de bord du domaine, la résolution évoluant de manière continue entre le pôle d'intérêt et l'antipode.

7.2.2 Rétrospective : incertitude de la détection des tendances en termes d'activités cycloniques

Après le traumatisme de Katrina, en 2005, de nombreuses études se sont attachées à replacer cet événement dans le cadre du changement climatique. Ainsi, plusieurs études se sont polarisées sur les tendances observées, au cours du 20^e siècle, du nombre de cyclones tropicaux, à l'échelle globale ou régionale. **S'en est ensuivie une polémique sur le bien-fondé de cette approche, sachant que les bases de données des cyclones observés ne sont pas homogènes et ne peuvent donc pas faire l'objet d'une étude de tendance.** L'Organisation météorologique mondiale (OMM-WMO), plus précisément son programme de recherche en météorologie tropicale, a été amenée en février 2006 à publier une mise au point importante sur les cyclones tropicaux à l'ère des changements climatiques (OMM-WMO, Statement on Tropical Cyclones and Climate Change, 2006).

En, effet, plusieurs périodes peuvent être distinguées dans la collecte des observations de cyclones :

- ▶ la période précédant la seconde guerre mondiale ; ne pouvaient être détectés que les cyclones ayant touché des installations humaines ou des navires,
- ▶ la période entre la seconde guerre mondiale et les années 1970, qui a vu se généraliser les vols avions dans les cyclones pour recueillir des observations,
- ▶ la période satellitale, depuis les années 1970, pour laquelle on peut affirmer qu'aucun cyclone n'a pu être manqué.

C'est donc d'une période de 40 ans dont les chercheurs disposent pour étudier les tendances, sachant qu'une variabilité à l'échelle décennale, pilotée par les grands modes océaniques, ne fait que rendre plus ardue cette tâche.

Ainsi, au terme de la polémique, **un consensus est apparu, parmi les chercheurs, sur la difficulté de conclure sur d'éventuelles tendances observées.** Les dix prochaines années devraient apporter une information primordiale quant à la tendance actuelle sur l'Atlantique, puisque le mode décennal de cet océan devrait retourner à des conditions défavorables à la cyclogénèse. Mais c'est un peu anticiper sur l'avenir.

7.2.3 Cyclones tropicaux et réchauffement climatique

Le dernier rapport du GIEC (AR4, 2007) fait état des travaux réalisés antérieurement. **Ce qui ressort de l'ensemble des études effectuées est qu'il n'existe pas, à l'heure actuelle, de consensus sur une réponse de l'activité cyclonique mondiale.** L'idée reçue que le seuil de 26°C devrait être largement dépassé et qu'on devrait voir l'activité des cyclones croître est obsolète et non avenue. En effet, ce seuil de 26°C a été calculé dans les années 1950 par Palmén, en tenant compte du profil vertical de température nécessaire au déclenchement, à température de tropopause constante. Ce seuil s'est avéré bien concorder avec les zones de cyclogénèse au cours des 50 dernières années mais ne saurait, en aucun cas, caractériser ces mêmes zones dans un climat réchauffé. Il n'en reste pas moins que les températures de surface de la mer (TSM) sont un paramètre important pour le déclenchement des cyclones. Il n'est qu'à constater l'impact des événements ENSO sur cette activité pour s'en convaincre. On constate qu'un événement Nino favorise la cyclogénèse sur le Pacifique central (avec notamment, un risque accru sur Tahiti au détriment de Nouméa) et affaiblit fortement l'activité sur l'Atlantique.

Sur le Pacifique Ouest, malgré des SST plus froides au large du Japon, en Niño, la zone de cyclogénèse se trouve plutôt dans la partie où l'anomalie de SST est positive. Donc, en année Nino, la tendance est à des cyclones plus intenses et durant plus longtemps. Dans le Pacifique Nord-Est, l'activité est favorisée par les événements Niño. Concernant l'océan indien, la bibliographie est plus limitée et les signaux semblent faibles. Néanmoins, on ne sait pas encore exactement quel aspect de ces TSM entre en jeu. S'agit-il de la valeur absolue ou des gradients spatiaux ? Plusieurs études ont mis en avant l'importance de ces gradients, sur le cisaillement de vent, notamment. Concernant le profil vertical de température et d'humidité, une atmosphère réchauffée n'est pas forcément plus instable et peut contenir plus d'humidité sous forme de vapeur d'eau. D'ailleurs, les simulations numériques ayant la plus forte résolution semblent plutôt faire état d'une diminution du nombre global de cyclones tropicaux dans le futur.

Concernant l'intensité de ces phénomènes, il semblerait que l'intensité des cyclones les plus forts pourrait augmenter dans une atmosphère réchauffée, car l'énergie fournie aux systèmes s'accroît. De même, parmi les études qui ont abordé le sujet, les pluies associées aux cyclones auraient tendance à augmenter, cette augmentation pouvant atteindre 20%. Cela peut s'expliquer par le fait que même si le déclenchement des cyclones n'est pas plus fréquent, une fois que le système est formé, il dispose d'une énergie accrue par l'augmentation des TSM et de la vapeur d'eau contenue dans l'atmosphère.

Un autre aspect du changement de l'activité cyclonique dans un futur proche concerne les changements de trajectoires des cyclones. Même si des études ont montré que celles-ci pouvaient présenter de la variabilité interannuelle, **aucune synthèse n'a encore statué sur le changement possible des trajectoires.** La tâche est d'autant plus ardue que, au moins pour ce qui concerne l'Atlantique, il existe un mode de variabilité décennal de l'activité cyclonique, lié au mode Atlantique Multi-Décennal (AMD).

Enfin, les marées de tempête associées aux systèmes cycloniques n'ont pas encore fait l'objet d'une littérature abondante et aucune synthèse n'a encore émergé. On peut néanmoins imaginer qu'avec l'augmentation du niveau de la mer et l'accroissement des forts cyclones, les risques de fortes marées associées aux cyclones devraient augmenter dans le futur.

EN CONCLUSION

L'évolution de l'activité future des cyclones tropicaux fait partie des questions encore ouvertes dans le cadre du GIEC, du fait de la complexité des mécanismes mis en jeu. Cependant, parmi les incertitudes sur le sujet, trois tendances semblent aujourd'hui se dessiner : la diminution du nombre global de cyclones, l'augmentation de l'intensité des plus forts et l'augmentation des pluies cycloniques.

A charge pour le prochain rapport du GIEC de synthétiser d'autres avancées sur ce thème.

8. ACTIONS ET ETUDES EN COURS A METEO FRANCE DANS LES DOM SUR LE CHANGEMENT CLIMATIQUE

Différentes réponses à appel d'offres sont montées avec la Direction de la climatologie, le Département Services de la direction de la Production, le Centre National de Recherche en Météorologie dans la logique de coordination sur les services climatiques sous responsabilité des directions thématiques de Météo-France. Dans les actions engagées, plusieurs lots impliquent directement les équipes de Toulouse, qui apportent par ailleurs un soutien sur tout au long de ces projets sur les différents lots. Ainsi, les Direction Interrégionales de Météo-France engagées dans de telles actions bénéficient d'un transfert de compétence et gagnent en autonomie sur les dossiers liés au climat.

8.1 ANTILLES ET GUYANE

Fin 2008, dans le cadre de l'appel à projet MEEDDAT/ GICC-2 2008, Météo-France a soumis avec un ensemble de partenaires (IRD Martinique-Caraïbes, BRGM Antilles et Guyane, DIREN Guadeloupe, DIREN Martinique, DIREN Guyane) un projet de recherche « *Changement Climatique aux Antilles Guyane : évolution de la température et des précipitations au XXIème siècle, étude de l'impact sur les risques liés à l'eau, les ressources en eau et la biodiversité des écosystèmes* », acronyme AG2C. Ce projet incluait des travaux d'allongement des séries observées, de production de scénarios climatiques régionalisés aux Antilles Guyane et d'étude d'impact du changement climatique sur la ressource en eau et les risques liés à l'eau.

Le projet « AG2C » qui permettait de mobiliser de la ressource dédiée n'ayant pas été sélectionné, les efforts de Météo-France DIRAG ont cependant été poursuivis :

- ▶ Pour la sauvegarde des données anciennes (appui du Projet Caribsat : www.caribsat.com),
- ▶ Pour l'allongement de certaines séries et l'homogénéisation des données (Guadeloupe en 2011, allongement des séries Martinique et Guyane planifié).

Un contrat post-doctoral est mobilisé 13 mois sur ces travaux depuis octobre 2011.

Puis dans le cadre d'une convention de recherche et d'études partagées entre Météo-France DIRAG et la DIREN Martinique (actuellement DEAL) signée le 29 octobre 2010, des travaux de recherche sont planifiés pour la production de scénarii climatiques régionalisés sur la Martinique. D'une manière générale ces travaux enrichiront les projections à l'échelle des Petites Antilles et ouvrent le champ de collaboration régionale (comparaison multi-modèles).

Les travaux consisteront en (mobilisation sur 13 mois d'un post doc recherche) :

- ▶ Une analyse en profondeur de l'évolution des paramètres observés sur les Antilles et la Martinique en particulier ;
- ▶ La production des projections régionales par une descente d'échelle dynamique de CMIP-5 ARPEGE Climat vers Aladin Climat (12 kms) puis d'une descente d'échelle statistique s'appuyant notamment sur des travaux en cours pour la recherche de relation entre les variables de grande échelle (appelées « prédicteurs ») aux variables locales (appelées « prédictants »). Les questions de spatialisation des données seront également abordées ;
- ▶ Une collaboration avec les hydrologues (DEAL notamment) pour l'étude d'impact du changement climatique sur la ressource en eau ;
- ▶ Toute collaboration concernant les études d'impact sur l'environnement.

En Guyane, des opportunités de collaboration avec la DEAL et autres organismes sont en cours de discussion afin d'affiner les projections. Par ailleurs la Guyane dispose déjà d'un ensemble de points modèle climatique sur terre ce qui facilite certains premiers travaux de descente d'échelle statistique.

8.2 ÎLE DE LA REUNION

Le bureau d'études de Météo-France sur l'île de la Réunion **participe au comité technique du SRCAE** piloté conjointement entre la DEAL et la région. L'objectif étant d'identifier les orientations stratégiques dans les domaines du développement des énergies renouvelables, de la réduction des gaz à effet de serre, de la maîtrise de la demande en énergie, de la lutte contre la pollution atmosphérique et de l'adaptation au changement climatique.

Ces 5 domaines sont déclinés en 3 volets : air, atténuation, adaptation.

Le SRCAE devrait déboucher au final sur la mise en place du Plan Climat Energie Réunion (PCER). Le tout doit se dérouler en 3 phases :

- ▶ Etats des lieux des connaissances dans les domaines du Climat, de l'air et de l'Energie. Cette phase a été réalisée par le bureau d'études SOGREAH ;
- ▶ A partir de cet état des lieux, la 2nde phase consiste à définir un diagnostic qui permettra d'arrêter des orientations et de rédiger le SRCAE (2011) ;
- ▶ La 3ième phase consiste à la mise en œuvre des orientations du SRCAE par un plan d'action : le PCER (2012).

Dans ce processus, l'étude menée en 2009 par le bureau d'études de Météo-France de la DIRRE sur le changement climatique à La Réunion sert de données d'entrées à la réflexion.

Météo France intervient dans la concertation, essentiellement pour apporter des éclairages sur ces données.

Le bureau d'études de Météo-France sur l'île de la Réunion participe également au **projet ACCLIMATE** de la commission de l'océan indien (COI) qui traite de l'adaptation au changement climatique pour la région du sud-ouest de l'Océan Indien comprenant l'île Maurice, Madagascar, Les Seychelles, Les Comores et La Réunion.

Début 2011, la COI a lancé un appel d'offre pour une étude de faisabilité d'une base de données régionale et d'une simulation climatique régionale couvrant les pays de la COI. Météo-France/DIRRE a répondu à cet appel d'offre en constituant un groupement avec les services météorologiques de Madagascar et des Seychelles ainsi qu'avec le bureau d'étude BRLi. L'offre de Météo-France a été acceptée en mai 2011. L'étude a débuté en juillet 2011 et devrait être finalisée fin octobre 2011.

9. CONCLUSION GENERALE

Les résultats présentés dans ce rapport représentent des avancées significatives dans le déroulement des travaux du Lot Hydrologie de surface, pour les Départements d'Outre-mer.

Ils ont permis de :

- ▶ Mettre en évidence des évolutions significatives de températures dans les DOM. Cependant, aucune tendance pour les précipitations et l'activité cyclonique n'est observée ;
- ▶ Choisir les points de calcul et paramétrer le modèle hydrologique pour ces points ;
- ▶ Evaluer la fiabilité du modèle hydrologique en temps présent sur les bassins étudiés, faisant ressortir des variations significatives des performances selon les points de calculs.

Dans la suite, les travaux s'attacheront à analyser les résultats des modèles hydrologiques auxquels on aura fourni en entrée les simulations issues des modélisations climatiques. Un ensemble de critères sera sélectionné pour rendre compte des évolutions sur les régimes d'écoulements, sur les crues et les étiages.

10. REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES ET SOURCES

10.1 CLIMATOLOGIE

HOMOGENEISATION DES SERIES CLIMATIQUES

Mestre O., 2000 : Méthodes statistiques pour l'homogénéisation de longues séries climatiques –thèse de l'Université Paul Sabatier.

GIEC

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. (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.

METHODE DE CORRECTION QUANTILE-QUANTILE

ARPEGE-climat

Déqué, M., 2007: Frequency of precipitation and temperature extremes over France in an anthropogenic scenario: model results and statistical correction according to observed values. *Global and Planetary Change*, 57, 16-26

Déqué 2009 : Méthode de désagrégation quantile/quantile conditionnelle, rapport final RexHySS, http://www.sisyphe.upmc.fr/~agnes/rexhyss/DOCS/annexes/aV1a.quantile_quantile.pdf

ÉTUDES SUR LE CLIMAT

Atlas climatologique de l'île de la Réunion –Météo-France DIRRE

Etude pour l'identification des évolutions des changements climatiques à La Réunion (Météo-France Direction Interrégionale de l'île de La Réunion, 2009)

CYCLONES

OMM-WMO, Statement on Tropical Cyclones and Climate Change, 2006

MISSION MINISTERE

Peings Y., Jamous M ; Planton S., Le Treut H., 2010 : scénarios climatique : indices sur la France métropolitaine pour les modèles français ARPEGE-Climat et LMDz et quelques projections pour les DOM-COM- Mission confiée à Jean Jouzel- publié sur **SOURCES**

INTERNET

Météo-France : <http://météofrance.com/>

Météo-France Antilles-Guyane : <http://www.meteo.gp>

Météo-France île de la Réunion <http://www.meteo.re>

Observatoire National sur les Effets du Réchauffement Climatique

10.2 HYDROLOGIE DE SURFACE

Merz, R., Parajka, J. and Blöschl, G., 2009. Scale effects in conceptual hydrological modeling. *Water Resources Research*, 45: W09405.

Mathevet, T., Michel, C., Andréassian, V. and Perrin, C., 2006. A bounded version of the Nash-Sutcliffe criterion for better model assessment on large sets of basins. *IAHS Red Books Series n°307*, pp. 211-219.

Valéry, A. (2010): Modélisation précipitations – débit sous influence nivale. Élaboration d'un module neige et évaluation sur 380 bassins versants. Thèse de Doctorat, Irstea (Antony), AgroParisTech (Paris), 405 pp.

Gentien-Baudry, 1999. La modélisation pluie-débit sur les bassins versants de la Nouvelle Calédonie. Thèse de Doctorat Thesis, Irstea (Antony), UPMC, Université Paris-Sud, Ecole des Mines de Paris, ENGREF. 76 pp.

Oudin, L., Andréassian, V., Mathevet, T., Perrin, C., Michel, C. (2006): Dynamic averaging of rainfall-runoff model simulations from complementary model parameterizations. *Water Resources Research*, 42(7): W07410, doi: 10.1029/2005WR004636.

ANNEXES

Annexe A : Détail des données d'observations météorologiques fournies

POUR LA MARTINIQUE

Figure 70: position des stations météorologiques retenues pour le calage des modèles hydrologiques sur la Martinique.



Tableau 25 : liste des stations météorologiques de Martinique (Météo-France et Conseil Général de Martinique) utilisées pour le calage de modèles hydrologiques et disponibilités en températures et précipitations sur la période 1980-2010.

Martinique	Températures	Précipitations	Validation DIRAG experts en climatologie
FOND-DENIS-CADETS	Disponibles sur toute la période	Disponibles sur toute la période	oui
FORT-DE-FRANCE DESAIX	Jusqu'au 30/06/1994 Tx - depuis le 01/12/1994 Tn : depuis le 01/01/1995	Disponibles sur toute la période	oui
LAMENTIN-AEROPORT	Disponibles sur toute la période	Disponibles sur toute la période	oui
MACOUBA-BELLEVUE	Disponibles sur toute la période	Disponibles sur toute la période	oui
ST-JOSEPH LEZARDE	Disponibles sur toute la période	Depuis le 01/02/1980	oui
MORNE-ROUGE- CHAMPFLORE	Tn : Jusqu'au 31/12/2008 Tx : Jusqu'au 30/04/1991; Du 01/03/1995 au 31/08/1999; Du 01/05/2000 au 31/12/2008	Disponibles sur toute la période	Oui pour les précipitations
RIVIERE-PILOTE GENDARMERIE	Pas de données	Disponibles sur toute la période	oui
ST-JOSEPH RABUCHON	Pas de données	Disponibles sur toute la période	oui
ST-PIERRE PERINEL	Jusqu'au 31/08/1993; Du 01/05/1994 au 28/02/1995; Du 12/10/1995 au 31/12/2008	Jusqu'au 28/02/1995 puis du 01/10/1995 au 31/12/2010	Oui pour les précipitations
STE-MARIE MORNE des ESSES	Pas de données	Disponibles sur toute la période	oui
TRINITE-SPOUTOURNE	Pas de données	Disponibles sur toute la période	oui
AJOUPA-BOUILLON EDEN	Jusqu'au 31/12/2008	Disponibles sur toute la période	non
BASSEPOINTE-CHAL	jusqu'au 31/12/2008	Disponibles sur toute la période	non
FRANCOIS-CHOPOT	Jusqu'au 30/09/1994 - depuis le 23/10/1997	Jusqu'au au 31/12/1994, puis depuis le 01/10/1997	non
ROBERT-P. FORT	Jusqu'au 31/05/1991-depuis le 04/11/2003	Jusqu'au 31/05/1991-depuis le 01/10/1991	non
CARBET BOUTBOIS	Pas de données	Disponibles sur toute la période	non
FDF-MEDAILLE	Pas de données	Jusqu'au 30/04/1993- depuis le 01/10/1993	non

Martinique	Températures	Précipitations	Validation DIRAG experts en climatologie
LAMENTIN-QUARRE	Pas de données	Jusqu'au au 28/02/2001, puis depuis le 01/07/2001	non
MARIN	Pas de données	Depuis le 01/09/1994	non
STE-MARIE CONCO	Jusqu'au 31/05/1982 du 01/11/1982 au 30/11/1982 du 01/04/1985 au 31/12/2008	Jusqu'au 31/05/1982 puis du 01/11/1982 au 31/01/1983- depuis le 01/04/1985	non
RIVIERE-PILOTE CAPRON	Pas de données	Jusqu'au 31/05/1972 puis depuis le 01/01/1973	non
ROBERT-DUCHESNE	Pas de données	Disponibles sur toute la période	non

POUR LA GUADELOUPE

Grande-Terre :

Tableau 26 : liste des stations météorologiques de Guadeloupe (Grande-Terre) (Météo-France et association APCG) utilisées pour le calage de modèles hydrologiques et disponibilités en températures et précipitations sur la période 1980-2010.

Guadeloupe Grande-Terre	Températures	Précipitations	Validation DIRAG experts en climatologie
LES ABYMES (LE RAIZET AERO)	Disponibles sur toute la période	Disponibles sur toute la période	oui
PORT-LOUIS GENDARMERIE	Pas de données	Disponibles sur toute la période	oui
LE MOULE L'ECLUSE	Pas de données	Disponibles sur toute la période	oui

Figure 71: position des stations météorologiques retenues pour le calage des modèles hydrologiques sur la Guadeloupe (Grande-Terre)



Basse-Terre

Figure 72 : liste des stations météorologiques de Guadeloupe Basse-Terre (Météo-France et association APCG) utilisées pour le calage de modèles hydrologiques et disponibilités en températures et précipitations sur la période 1980-2010.

Guadeloupe Basse Terre	Températures	Précipitations	Validation DIRAG experts en climatologie
PETIT-BOURG DUCLOS- INRA	Depuis le 01/01/1987	Disponibles sur toute la période	oui
BAIE-MAHAULT DUPUY	Pas de données	Disponibles sur toute la période	oui
BOUILLANTE GENDARMERIE PIGEON	Pas de données	depuis le 01/07/1980	oui
CAPESTERRE-BELLE-EAU NEUFCHATEAU	Du 01/01/1987 au 31/08/2007	Disponibles sur toute la période	Oui pour les précipitations
CAPESTERRE-BELLE-EAU GENDARMERIE	Pas de données	Disponibles sur toute la période	oui
DESHAIES GENDARMERIE	Pas de données	Disponibles sur toute la période	oui

Guadeloupe Basse Terre	Températures	Précipitations	Validation DIRAG experts en climatologie
STE-ROSE LES GALBAS	Pas de données	Disponibles sur toute la période	oui
VIEUX-HABITANTS GENDARMERIE BEAUSOLEIL	Pas de données	Jusqu'au 31/12/1981 puis depuis le 01/03/1983	oui
ST-CLAUDE GEN BONNE- TERRE	1- Du 01/01/1987 au 30/06/1992; 2- Du 01/11/1992 (Tx Du 12/11/1992) au 28/02/2003; 3- Du 01/12/2003 au 31/01/2004; 4- Du 03/08/2004 au 30/06/2005	Disponibles sur toute la période	non
LAMENTIN BLACHON	Pas de données	du 01/01/1981 au 31/12/1987 du 01/01/1989 au 31/12/1989 depuis le 01/01/1991	non
LAMENTIN GENDARMERIE	Pas de données	Disponibles sur toute la période	non
PETIT-BOURG VERSAILLES	Pas de données	du 01/01/1980 au 31/07/1982 depuis le 01/02/1983	non
PETIT-BOURG GENDARMERIE	Pas de données	Jusqu'au 31/12/1986 depuis le 01/01/1988	non
PETIT-BOURG PROVIDENCE	Pas de données	Du 01/01/1980 au 30/09/1995 Du 01/02/1996 au 31/12/1996 Du 01/06/1997 au 28/02/2011	non
ST-CLAUDE PARNASSE	Pas de données	Depuis le 01/01/1981	non
ST-LOUIS PRESBYTERE	Pas de données	Depuis le 01/01/1981	non
STE-ROSE LE BOYER	Pas de données	Disponibles sur toute la période	non
VIEUX-FORT BOURG	Pas de données	Disponibles jusqu'au 01/09/2010	non

Figure 73: Position des stations météorologiques retenues pour le calage des modèles hydrologiques sur la Guadeloupe (Basse-Terre)



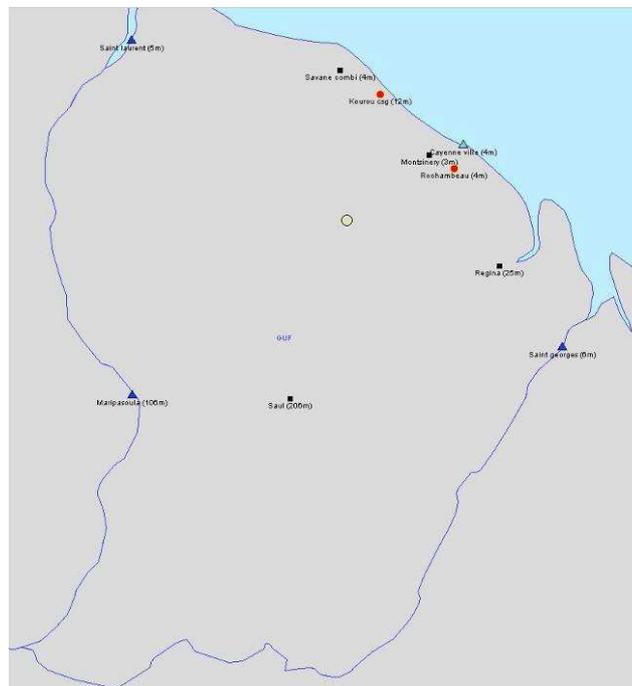
POUR LA GUYANE

Données validées par des experts :

Tableau 27 : position des stations météorologiques retenues pour le calage des modèles pluie-débit sur la Guyane

Guyane	températures	précipitations	Validation DIRAG experts en climatologie
KOUROU CSG	Disponibles sur toute la période	Disponibles sur toute la période	oui
MATOURY (ROCHAMBEAU)	Disponibles sur toute la période	Disponibles sur toute la période	oui
SAINT GEORGES DE L'OYAPOCK	Disponibles sur toute la période	Disponibles sur toute la période	oui
SAINT LAURENT DU MARONI	Disponibles sur toute la période	Disponibles sur toute la période	oui
MARIPASOULA	Disponibles sur toute la période	Disponibles sur toute la période	oui
REGINA	Tx : Jusqu'au 25/10/2004 Du 01/03/2005 au 05/08/2005 Depuis le 01/01/2006 Tn : au 02/07/1985; 4- Du 01/02/1986 au 23/06/1986; 5- Depuis le 01/11/1986	Disponibles sur toute la période	Oui pour les précipitations
CAYENNE VILLE	Depuis le 01/01/1998	Disponibles sur toute la période	Oui pour les précipitations
SINNAMARY (SAVANE COMBI)	Depuis le 01/05/1980	Disponibles sur toute la période	Oui pour les précipitations
MONTSINERY	Pas de données	Disponibles sur toute la période	oui
SAUL	Tx :Jusqu'au 31/12/1987; 3- Du 01/10/1988 au 31/12/1993; 4- Du 01/09/1994 au 30/06/1995; 5- Depuis le 01/09/1996 Tn :Jusqu'au 31/01/1988; Depuis le 01/10/1988	Jusqu'au 31/01/1988 - Depuis le 01/10/1988	Oui pour les précipitations

Figure 74: Position des stations météorologiques retenues pour le calage des modèles hydrologiques sur la Guyane



POUR L'ILE DE LA REUNION

Pour les températures, une homogénéisation des données pour 6 postes de l'île a été réalisée. Il s'agit de Gillot, le Port, Pierrefonds-Aéroport, Colimaçons, Plaine des Palmistes, Plaine des Cafres.

Pour les précipitations, une homogénéisation des données pour 7 postes de l'île a été réalisée : Gillot, Beauvallon, la Plaine des Palmistes, la Plaine des Cafres, Cilaos, Pierrefonds-Cirad et Grand-Galet.

Annexe B : Présentation des résultats du rapport « Etude pour l'identification des évolutions des changements climatiques à La Réunion » rédigé par météo- France pour le conseil régional de l'île de la Réunion

En complément du paragraphe 4.2.3.3.

1. CARACTERISATION DU CLIMAT ACTUEL : EVOLUTION SAISONNIERE

Evolution saisonnière des températures sur 40 ans

Le Tableau ci-après indique les évolutions des températures en fonction des saisons pour la période 1969-2008. Pour chaque tendance calculée, un test statistique (test de Spearman¹) 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.

Les saisons sont découpées de la façon suivante :

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

Tableau 28 : Evolution par saison des températures minimales (Tn) et maximales (Tx) sur la période 1969-2008

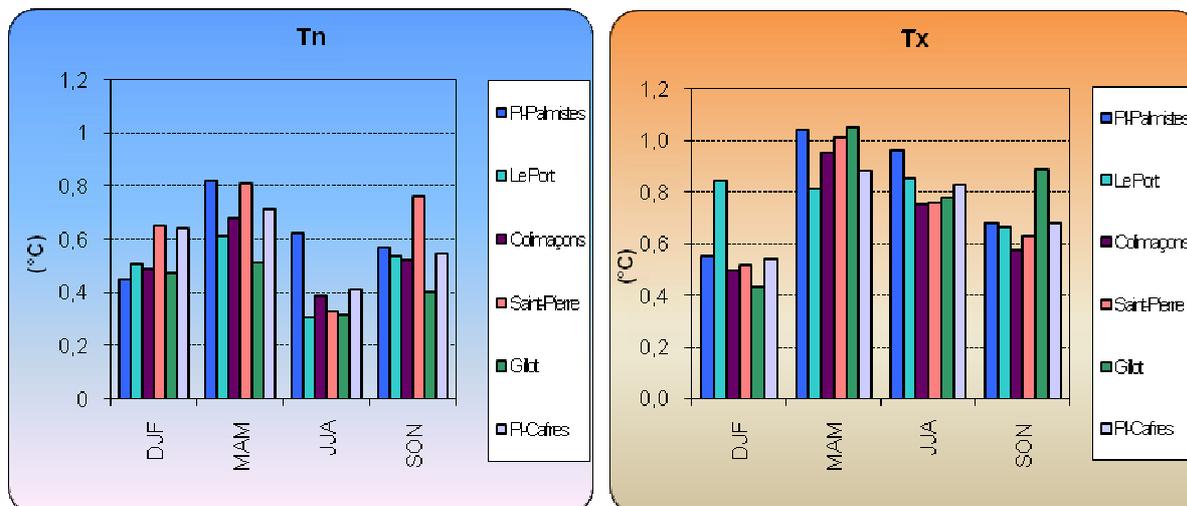
	Evolution des Tn sur 40 ans				Evolution des Tx sur 40 ans			
	DJF	MAM	JJA	SON	DJF	MAM	JJA	SON
Gillot-Aéroport (8m)	+0,48°C	+0,51°C	+0,32°C	+0,40°C	+0,44°C	+1,05°C	+0,78°C	+0,89°C
Le Port (9m)	+0,51°C	+0,61°C	+0,31°C	+0,53°C	+0,84°C	+0,81°C	+0,85°C	+0,67°C
Pierrefonds-Aéroport (21m)	+0,65°C	+0,81°C	+0,33°C	+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

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 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.

¹ 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.

Figure 75 : Evolution, par saison et par station de l'île de la Réunion 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.

Etude des indices climatiques de température

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

- ▶ $T_n \leq 0^\circ\text{C}$: nombre de jours où la température minimale est inférieure ou égale à 0°C .
- ▶ $T_n \geq 20^\circ\text{C}$: nombre de jours où la température minimale est supérieure ou égale à 20°C .
- ▶ $T_x \geq 25^\circ\text{C}$: nombre de jours où la température maximale est supérieure ou égale à 25°C .
- ▶ T_n10p : pourcentage de nuits relativement froides : T_n inférieure au 1^{er} décile calculé quotidiennement sur une fenêtre glissante de 5 jours, sur la période 1971-2000
- ▶ T_n90p : pourcentage de nuits relativement chaudes : T_n supérieur au dernier décile calculé quotidiennement sur une fenêtre glissante de 5 jours, sur la période 1971-2000.
- ▶ T_x10p : pourcentage de journées relativement froides : T_x inférieure au 1^{er} décile calculé quotidiennement sur une fenêtre glissante de 5 jours, sur la période 1971-2000.
- ▶ T_x90p : pourcentage de journées relativement chaudes : T_x 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 :

- ▶ $T_n \leq 10^\circ\text{C}$: nombre de jours où la température minimale est inférieure ou égale à 10°C .
- ▶ $T_x \geq 32^\circ\text{C}$: nombre de jours où la température maximale est supérieure ou égale à 32°C .
- ▶ $T_x \geq 35^\circ\text{C}$: 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 inexistantes sur une très grande partie de l'île. Ainsi, le seuil de 10°C est mieux adapté au climat réunionnais.

Les tableaux ci-dessous présentent 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.

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.

Tableau 29 : Indices climatiques, par station de l'île de la Réunion, sur la période de référence 1971-2000 et leur évolution sur la période 1969-2008

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%

(les indices sont calculés pour les températures minimales en nombre de jours ou en pourcentage annuel)

Tableau 30 : Indices climatiques, par station de l'île de la Réunion, sur la période de référence 1971-2000 et leur évolution sur la période 1969-2008

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%

(les indices sont calculés pour les températures maximales en nombre de jours ou en pourcentage annuel)

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 celui 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.

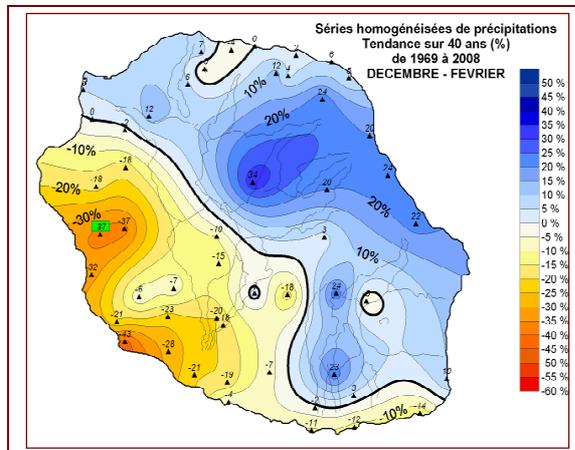
Tendances saisonnières des précipitations sur 40 ans

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.

La période de décembre-janvier-février se situe au cœur de la saison cyclonique, saison qui contribue le plus aux cumuls annuels de précipitations. La carte ci-dessous 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.

Décembre-Janvier-Février

Figure 76 : Evolution et tendance significative des précipitations sur l'île de la Réunion sur la période 1969-2008 pour les mois de décembre, janvier et février.

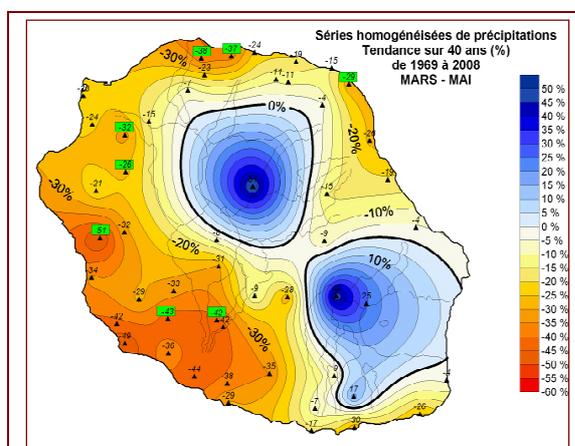


Poste	Altitude	Commune	Evolution significative sur 40 ans	Tendance significative (en % par décennie)
Colimaçons	798 m	Saint-Leu	-37%	-9,3%

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. 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.

Mars-Avril-Mai

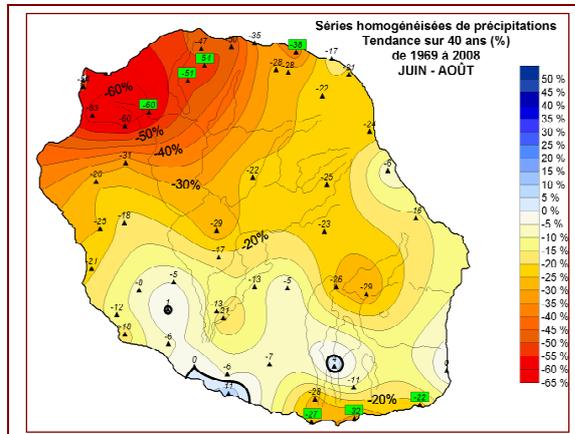
Figure 77 : Evolution et tendance significative des précipitations sur l'île de la Réunion sur la période 1969-2008 pour les mois de mars, avril et mai.



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%

Juin-Juillet-Août

Figure 78 : Evolution et tendance significative des précipitations sur l'île de la Réunion sur la période 1969-2008 pour les mois de juin, juillet et août.

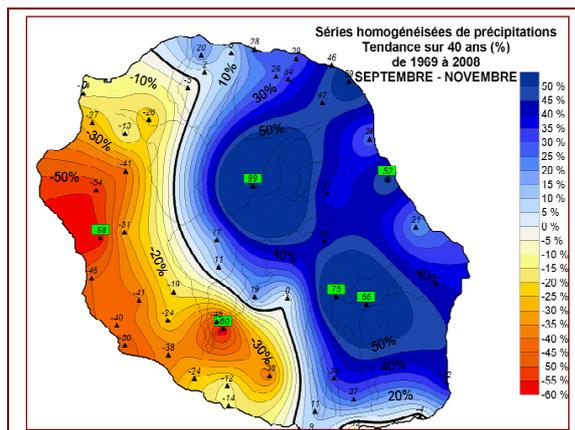


Poste	Altitude	Commune	Evolution significative sur 40 ans	Tendance significative (en % par décennie)
Saint-Joseph	17 m	Saint-Joseph	-27%	-6,8%
Saint-Philippe	30 m	Saint-Philippe	-22%	-5,5%
Grand-Hazier	72 m	Sainte-Suzanne	-38%	-9,5%
Vincendo	102 m	Saint-Joseph	-32%	-8,0%
Saint-François	545 m	Saint-Denis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

Pour ces trois mois de plein hiver austral, la quasi-totalité de La Réunion présente des tendances de précipitations négatives (Figure 92). 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

Figure 79 : Evolution et tendance significative des précipitations sur l'île de la Réunion sur la période 1969-2008 pour 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%
Commerson	2310 m	Saint-Joseph	+75%	+18,8%

Une fois encore, la figure 92 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.

Etude des indices climatiques de précipitation

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 24 présentée plus haut dans le corps principal du rapport).

Les tableaux ci-après 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 ($rr^1 < 1\text{mm}$)
- ▶ 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.

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).

¹ rr : cumul quotidien de précipitations.

Tableau 31 : Indices climatiques par poste de l'île de la Réunion 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 →	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

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.

Tableau 32 : Indices climatiques par poste de l'île de la Réunion sur la période de référence 1971-2000 et leur évolution sur la période 1969-2008 (les indices sont calculés en mm ou en pourcentage)

Poste	Commune	Indice →	r1d	r3d	r5d	r10d	cumul	sdi	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%

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. PROJECTIONS REGIONALES POUR LA REUNION ISSUES DES SIMULATIONS GLOBALES A 50 KM POUR LE SCENARIO A2 AVEC CORRECTION QUANTILE QUANTILE

Températures

La version du modèle à la résolution de 50x50 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 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 ci-après 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).

Si l'on étudie les anomalies de températures par saison (graphiques de la Figure 94), 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.

Tableau 33 : 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)

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

Figure 80 : Anomalies des températures minimales (à gauche) et maximales (à droite) de l'île de la Réunion par saison et par poste, pour la période 2041-2070 par rapport à la période de référence 1971-2000

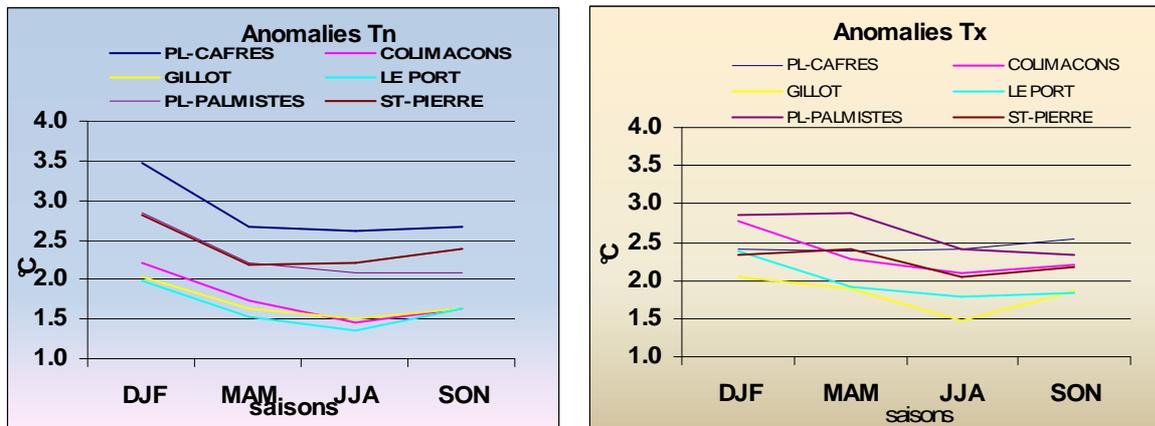


Tableau 34 : Indices climatiques de Tn de l'île de la Réunion pour la période 2041-2070 (le nom du poste est suivi de son altitude) (les indices sont calculés pour les températures minimales en nombre de jours ou en pourcentage annuel)

Poste	Commune	Indice -->	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		

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. Le Tableau 36 et le Tableau 37 reprennent plus bas 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.

Tableau 35 : Indices climatiques des Tx l'île de la Réunion 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)

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		

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 paraîtra 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 scénario 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 paraîtraient chaudes selon les mêmes critères.

Précipitations

Comme pour les températures, la version du modèle ARPEGE à la résolution de 50x50 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. Le tableaux 36 et 37 montrent l'évolution des valeurs des indices climatiques 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).

Tableau 36 : Indices climatiques de l'île de la Réunion pour la période 2041-2070 (le nom du poste est suivi de son altitude) (les indices sont calculés en nombre de jours annuel)

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

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%).

Tableau 37 : Indices climatiques de l'île de la Réunion pour la période 2041-2070 (le nom du poste est suivi de son altitude) (les indices sont calculés en mm ou en pourcentage)

Poste	Commune	Indice →	r1d	r3d	r5d	r10d	cumul	sdi	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%

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 50 km × 50 km, 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.

Annexe C : Reconstitution des chroniques climatiques à l'échelle des bassins versant

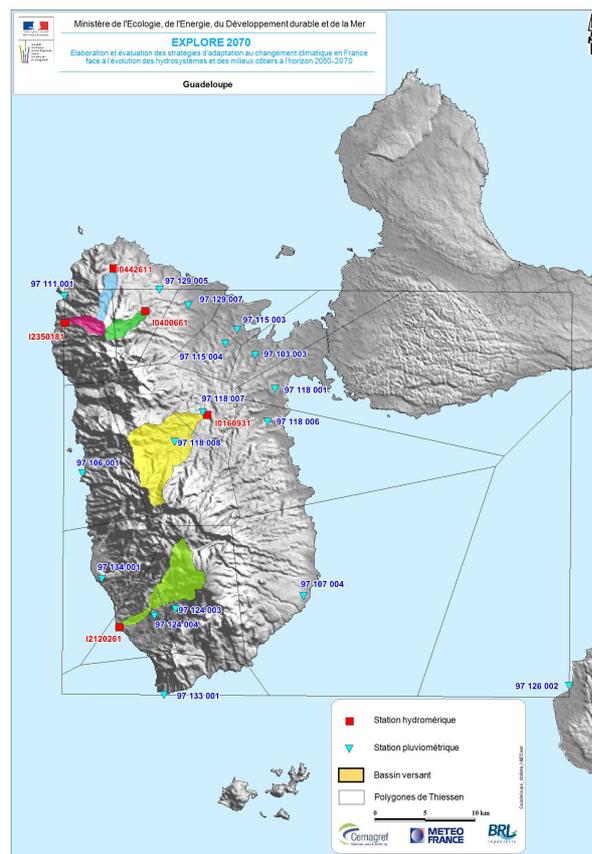
1. LA GUADELOUPE

Chroniques d'observation

Pour les précipitations, la méthode des polygones de Thiessen est utilisée, et le résultat est présenté ci-dessous.

Pour les températures, on dispose uniquement de 2 stations sur Basse Terre. Le poste le plus proche du bassin a été pris en compte.

Figure 81 : Polygones de Thiessen pour la désagrégation des observations pluviométriques à l'échelle des bassins versants de la Guadeloupe



Chroniques de simulations

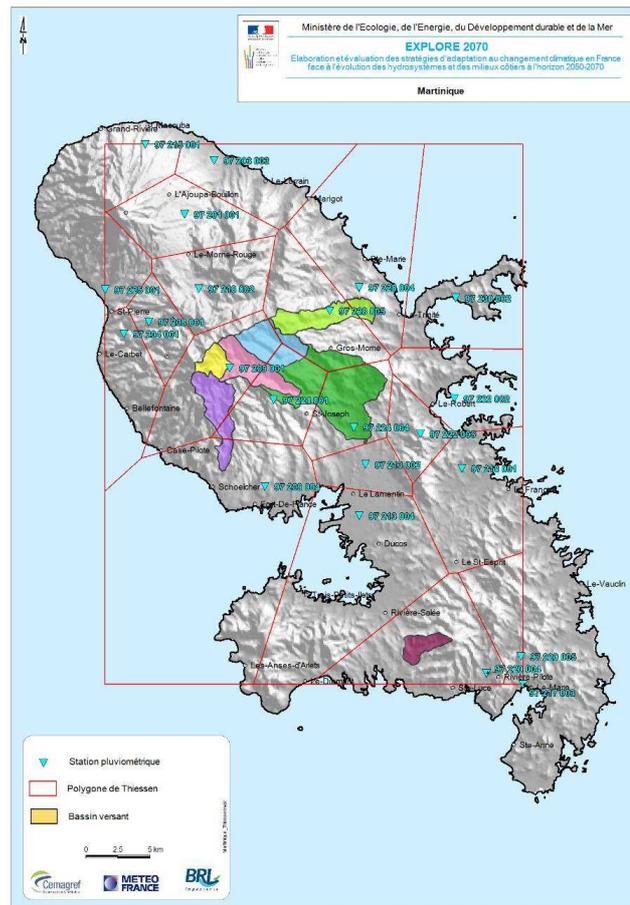
Pour les simulations, la méthode des anomalies est appliquée (cf. 6.4.2). La méthode de « désagrégation » utilisée est donc identique à celle utilisée pour les observations.

2. LA MARTINIQUE

Chroniques d'observation

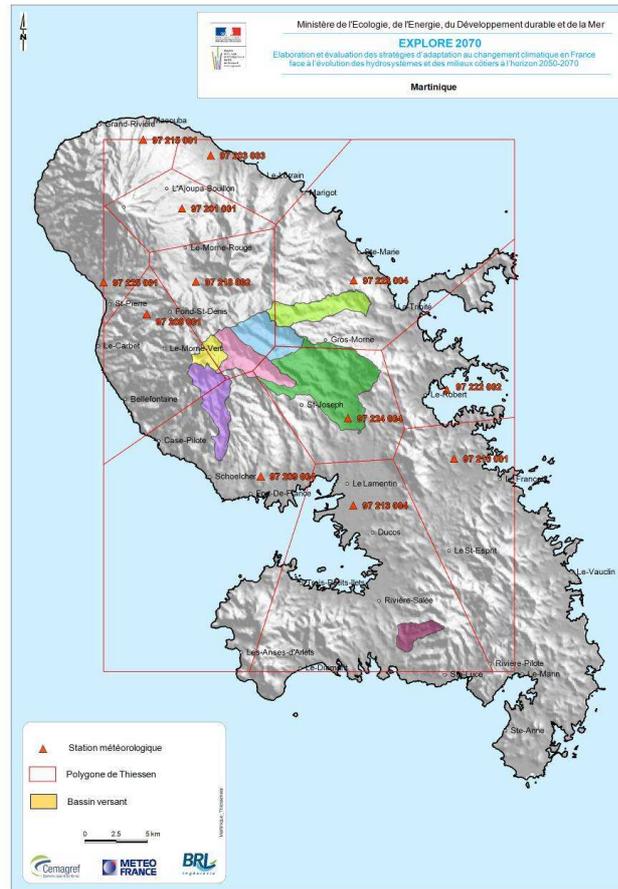
Pour les précipitations, la méthode des polygones de Thiessen est utilisée, et le résultat est présenté ci-dessous.

Figure 82: Polygones de Thiessen pour la désagrégation d'observations pluviométriques à l'échelle des bassins versants de la Martinique



Pour les températures, la méthode des polygones de Thiessen est utilisée, et le résultat est présenté ci-dessous.

Figure 83 : Polygones de Thiessen pour la désagrégation des observations de températures à l'échelle des bassins versants de la Martinique



Chroniques de simulations

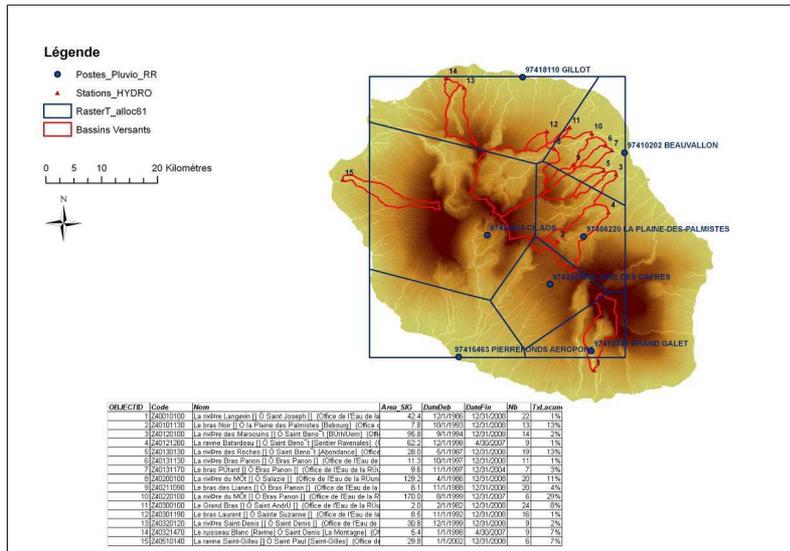
Pour les simulations, la méthode des anomalies est appliquée (cf. 6.4.2). La méthode de « désagrégation » utilisée est donc identique à celle utilisée pour les observations.

3. L'ILE DE LA REUNION

Chroniques d'observation

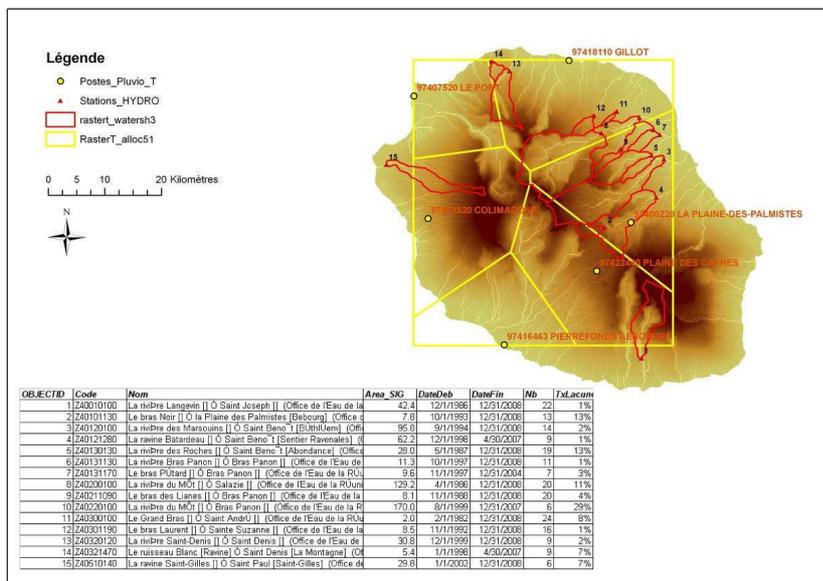
Pour les précipitations, la méthode des polygones de Thiessen est utilisée, et le résultat est présenté ci-dessous.

Figure 84 : Polygones de Thiessen pour la désagrégation des observations pluviométriques à l'échelle des bassins versants de la Réunion¹



Pour les températures, la méthode des polygones de Thiessen est utilisée, et le résultat est présenté ci-dessous.

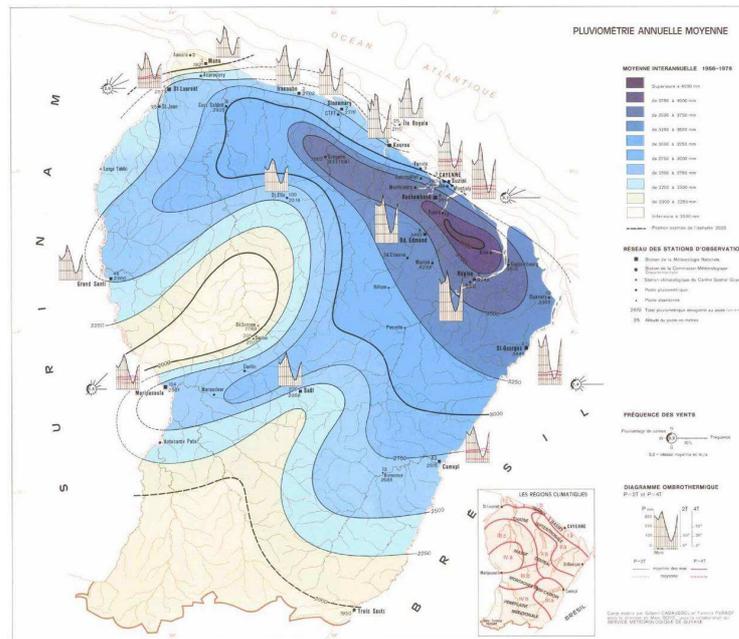
Figure 85 : Polygones de Thiessen pour la désagrégation des observations de températures à l'échelle des bassins versants de la Réunion²



¹ Remarque : Parmi les 15 bassins versants qui figurent sur les cartes ci-dessous, seuls les 11 définis en 6.3.1 disposent d'un nombre suffisant de données hydrologiques et on pu être modélisés.

² Remarque : Parmi les 15 bassins versants qui figurent sur les cartes ci-dessous, seuls les 11 définis en 6.3.1 disposent d'un nombre suffisant de données hydrologiques et on pu être modélisés.

Figure 87 : Pluviométrie annuelle moyenne en Guyane. Source : IRD, ex-ORSTOM, Atlas des départements d'Outre mer, 1978.



Chroniques de simulations

Pour les simulations, on dispose de la correction quantile-quantile au niveau des 4 postes météo d'observation. La méthode de « désagrégation » utilisée est donc identique à celle utilisée pour les observations.