

# Impacts du changement climatique sur différents paramètres physiques en Guyane : caractérisation et projection - GuyaClimat


Rapport final

**BRGM/RP-72111-FR**

Étude réalisée dans le cadre des opérations de Service public du BRGM -  
AP20CAY051

Longueville F., Thieblemont R., Bel Madani A., Idier D., Palany P., D'Anna  
M., Dutrieux P-C, Védie L., Lanson M., Suez-Panama-Bouton B.

## Vérificateur :

Nom : Gonéri Le Cozannet  
Fonction : Expert 3  
Date : 14/12/2022  
Signature : 

## Approbateur :

Nom : Frédéric Tronel  
Fonction : Directeur BRGM Guyane  
Date : 15/12/2022  
Signature : 

## Avertissement

Ce rapport est adressé en communication exclusive au demandeur, au nombre d'exemplaires prévu.

Le demandeur assure lui-même la diffusion des exemplaires de ce tirage initial.

La communicabilité et la réutilisation de ce rapport sont régies selon la réglementation en vigueur et/ou les termes de la convention.

Le BRGM ne saurait être tenu comme responsable de la divulgation du contenu de ce rapport à un tiers qui ne soit pas de son fait et des éventuelles conséquences pouvant en résulter.

## Votre avis nous intéresse

Dans le cadre de notre démarche qualité et de l'amélioration continue de nos pratiques, nous souhaitons mesurer l'efficacité de réalisation de nos travaux.

Aussi, nous vous remercions de bien vouloir nous donner votre avis sur le présent rapport en complétant le formulaire accessible par cette adresse <https://forms.office.com/r/yMgFcU6Ctq> ou par ce code :



**Mots clés :** Changement climatique, Submersion chronique, Projection, Température, Guyane, Cayenne, Kourou, Mana

En bibliographie, ce rapport sera cité de la façon suivante :

**Longueville F., Thieblemont R., Bel Madani A., Idier D., Palany P., D'Anna M., Dutrieux P-C, Védie L., Lanson M., Suez-Panama-Bouton B. (2022) – Impacts du changement climatique sur différents paramètres physiques en Guyane : caractérisation et projection - GuyaClimat. Rapport final. BRGM/RP-72111-FR, 349 p., 122 Fig.**

© BRGM, 2022, ce document ne peut être reproduit en totalité ou en partie sans l'autorisation expresse du BRGM.  
IM003-MT008-P2-20/01/2022



## Synthèse

Le changement climatique a des conséquences sur l'ensemble des facteurs physiques climatiques dans le monde. La Guyane n'échappe pas à ce phénomène et plusieurs interrogations demeurent sur la quantification de ces changements à l'échelle du territoire. Dans ce contexte, le projet GuyaClimat vise à caractériser l'impact du changement climatique à l'échelle de la Guyane sur différents paramètres physiques. Ce programme financé par la Direction Générale des Territoires et de la Mer (DGTM), l'Agence Française de Développement (AFD), l'Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Énergie (ADEME), l'Office de l'Eau de Guyane (OEG), Météo France et enfin le BRGM est destiné à l'ensemble des acteurs publics locaux et les financeurs.

Cette étude repose sur (i) des relevés et témoignages recueillis sur le terrain, (ii) une large gamme de méthodes dynamiques et statistiques, (iii) des jeux de données d'observations et (iv) des ensembles de simulations climatique futures et des scénarios climatiques pour mieux comprendre et quantifier les impacts du changement climatique à l'échelle du territoire guyanais au XXI<sup>ème</sup> siècle. Plus spécifiquement, les changements sont quantifiés sur des paramètres physiques (*i.e.* niveau de la mer, température, précipitations, vent, vagues) et les impacts qui en découlent, *i.e.* les zones basses exposées aux submersions chroniques en milieu urbain et des indices sectoriels (*p.ex.* jours secs, fortes pluies, degrés-jours de climatisation, etc).

Les projections réalisées pour l'étude GuyaClimat s'appuient sur deux types de scénarios, utilisés notamment par le Groupe d'experts Intergouvernemental sur l'Évolution du Climat (GIEC), qui décrivent l'évolution climatique future :

- les « Representative Concentration Pathways » (RCPs ou trajectoires représentatives de concentration) qui convertissent des concentrations atmosphériques de gaz à effet de serre en forçage radiatif ;
- les « Shared Socio-Economic Pathways » (SSPs ou trajectoires socio-économiques partagées) qui traduisent des ensembles d'hypothèses socio-économiques (Population, Éducation, Urbanisation, PIB) qui sont eux-même associés à des forçages radiatifs dans le 6<sup>e</sup> rapport du GIEC.

Les scénarios RCPs (resp. SSPs) ont été utilisés pour les projections des simulations climatiques des exercices CMIP5 (resp. CMIP6) et ont servi de base aux rapports du GIEC de l'AR5 en 2013 (resp. l'AR6 en 2021). Pour l'étude GuyaClimat, les scénarios RCP2.6 (faibles émissions de gaz à effets de serre), RCP4.5 (émissions contenues, sans atteinte des objectifs climat) et RCP8.5 (accélération des émissions de gaz à effets de serre) ont été retenus ainsi que les scénarios SSP2-4.5 (similaire au RCP4.5) et SSP5-8.5 (similaire au RCP8.5).

Au préalable de la réalisation de projections futures, les résultats des simulations historiques des modèles climatiques (depuis 1850 jusqu'à la période actuelle) sont analysés et comparés à différents jeux de données d'observations. Pour le volet dédié à l'élévation du niveau marin moyen, cette analyse retrospective permet de valider les performances des modèles climatiques CMIP5 mais également de valider la méthode de régionalisation du niveau marin. La méthode consiste à combiner l'ensemble des composantes qui contribuent à l'élévation du niveau de la mer à l'échelle régionale : *i.e.* l'expansion thermique, les changements de circulation océanique, les fontes des glaciers et des calottes glaciaires, etc. Notre étude tient également compte des mouvements verticaux du sol locaux (mesurés par les stations GPS) qui contribuent à l'évolution niveau marin relatif localement.

Pour le volet dédié aux paramètres météorologiques, l'analyse historique permet d'identifier et sélectionner les modèles climatiques CMIP6 les plus aptes à reproduire le climat guyanais et ses fluctuations qui sont principalement influencés par la position de la ZCIT (Zone de Convergence Intertropicale) et ses caractéristiques, et l'Oscillation australe (ou ENSO). Les résultats de modèles climatiques retenus sont ensuite débiaisés et une descente d'échelle statistique est réalisée pour adapter les résultats des modèles climatiques au territoire guyanais.

Ci-dessous sont résumées les principales conclusions des résultats de projections des paramètres physiques au XXI<sup>ème</sup> siècle en Guyane.

Concernant les projections du niveau marin relatif pour la Guyane (par rapport à la période 1986-2005) :

- à l'horizon temporel 2050, la médiane de la remontée du niveau marin est de 0.24 m (likely range [0.18 ; 0.31] m) pour le scénario climatique RCP2.6 (scénario faible) et de 0.28 m (likely range [0.21 ; 0.36] m) pour le scénario RCP8.5 (scénario fort) ;
- à l'horizon temporel 2100, la remontée du niveau marin est de 0.46 m (likely range [0.29 ; 0.64] m) pour le scénario RCP2.6 et de 0.84 m (likely range [0.59 ; 1.17] m) pour le scénario RCP8.5 ;
- les projections de cette étude n'excluent pas la possibilité d'une élévation de plus de 2 m à la fin du XXI<sup>ème</sup> siècle (scénario impliquant notamment un effondrement de la calotte de glace en Antarctique) ;
- les mouvements verticaux du sol peuvent localement engendrer des écarts supplémentaires de ~0.2 m sur ces projections à l'horizon 2100.

Concernant les autres paramètres météorologiques, les résultats en moyenne annuelle mettent en évidence sur la zone littorale :

- une forte augmentation des températures minimales à l'horizon 2100 de 2.5-3 °C et des maximales de 1.5-2 °C pour SSP2-4.5/scénario intermédiaire par rapport à la période historique récente 1980-2014, et de 4-4.5 °C pour les minimales et de 3.5-4 °C pour les maximales pour SSP5-8.5/scénario fort ;
- une tendance à la baisse significative des précipitations de -0.03-0.24 mm/jour par décennie pour le scénario SSP2-4.5 et de -0.09-0.32 mm/jour par décennie pour le scénario SSP5-8.5 ;
- une tendance à l'augmentation de la force du vent statistiquement significative de moins de 0.1 m/s par décennies ;
- des diminutions modestes (3 à 5 %) mais statistiquement significatives de la hauteur significative (< 10 cm), de la période (< 0.5 s) et de l'énergie des vagues, principalement durant la saison hivernale. On relève également une rotation horaire faible (de l'ordre de 1°) de leur direction d'incidence par rapport à la période historique récente.

Des variations saisonnières et spatiales à l'échelle du territoire sont aussi identifiées et quantifiées. Ainsi, pour les températures, les normales mensuelles augmentent pour les minimales et les maximales respectivement de 1.5-3.5 °C et 0.5-3 °C à horizon 2041-2070 et de 2-4.5 °C et 1-4 °C à horizon 2071-2100 par rapport à la période historique 1980-2014. Ces variations ne sont pas homogènes à l'échelle du territoire. Sous l'effet de régulateur thermique de l'océan, les températures minimales journalières sont plus fraîches à l'intérieur des terres que sur le littoral et à l'inverse les températures maximales sont plus chaudes à l'intérieur des terres que sur le littoral.

Ces changements quantifiés sur les paramètres physiques entraînent des changements sur les impacts. Deux types d'impacts sont examinés : les zones basses potentiellement exposées aux submersions chroniques en milieu urbain proche de la côte et les indices climatiques sectoriels.

L'impact de la remontée du niveau marin et de son incertitude sur les submersions chroniques (se produisant à marée haute par temps calme) est caractérisé en ramenant les projections de remontée de niveau moyen dans le référentiel NGG77 et en y superposant les niveaux d'eau maxima journaliers liés à la marée. Le croisement de ces valeurs de niveau avec un modèle numérique de terrain (MNT) permet de cartographier les zones basses potentiellement exposées aux submersions chroniques. En d'autres termes, ces secteurs correspondent aux zones situées sous le niveau maximum journalier au moins un jour par an.

À l'instar de l'analyse du niveau marin, une première étape consiste en la validation de la méthode sur des événements passés récents, comme par exemple à Cayenne avec des submersions chroniques dans le quartier du village chinois en 2020. Nos résultats confirment qu'il est statistiquement possible que le niveau d'eau dépasse la cote d'élévation critique conduisant à la submersion chronique de ce quartier situé en zone basse en 2020.

À partir de notre méthode validée, les cartes de zones basses potentiellement exposées aux submersions chroniques sont alors réalisées sur 3 secteurs urbains : Cayenne, Kourou et Mana. Au cours du XXI<sup>ème</sup> siècle, nos projections révèlent cependant que, relativement à la situation actuelle, la superficie de zone basse potentiellement exposées aux submersions chroniques augmente plus à Cayenne et Kourou qu'à Mana. En particulier, si le changement climatique emprunte une trajectoire de réchauffement intermédiaire (RCP4.5) et que les mouvements verticaux du sol restent stables, la superficie de zones basses potentiellement exposées aux submersions chroniques pourrait augmenter de 50 % à Cayenne et Kourou entre 2020 et 2100. Par ailleurs, si le réchauffement est très important (RCP8.5) et qu'une subsidence (affaissement) locale est observée, les superficies des zones basses potentiellement exposées aux submersions chroniques passeraient de 500 ha en 2020 à 1 000 ha en 2100 pour Cayenne et de 400 ha à 1 000 ha pour Kourou sur les mêmes périodes, soit une augmentation de près de 100 %.

Malgré la difficulté à caractériser précisément les conséquences directes de l'élévation du niveau marin sur le littoral guyanais, compte tenu de la dynamique active des bancs de vase, les cartes produites par l'étude GuyaClimat constituent un outil d'aide à la décision pour les acteurs locaux.

Concernant les impacts climatiques pour la santé, l'agriculture, la ville et la gestion des ressources en eau, l'étude conclut à :

- une tendance significative à l'augmentation des jours secs, avec +0.1-0.4 jours/mois par décennie pour SSP2-4.5 et +0.2-0.6 jours/mois par décennie pour SSP5-8.5 ;
- une raréfaction significative des jours de fortes pluies avec des tendances de -0.03-0.09 jours/mois par décennie pour SSP2-4.5) et de -0.03-0.12 jours/mois par décennie pour SSP5-8.5, mais paradoxalement les projections suggèrent une intensification des fortes pluies ;
- une augmentation significative de la fréquence des journées et nuits chaudes : pour SSP2-4.5 +2.5-2.9 jours/mois par décennie en moyenne annuelle pour les nuits chaudes, et +1.1-1.6 jours/mois par décennie pour les journées chaudes et respectivement pour SSP5-8.5 +3.2-3.4 et +2.1-2.6 ;
- enfin, des besoins en climatisation qui continuent à augmenter fortement dans les simulations futures : +89-108 degrés-jours annuels par décennie pour SSP2-4.5 et +149-194 degrés-jours annuels par décennie pour SSP5-8.5.

Les projections réalisées dans le cadre de cette étude constituent une première étape nécessaire à la compréhension des conséquences du changement climatique à l'échelle de la Guyane. En effet, ces paramètres physiques influencent une multitude d'écosystèmes naturels (mangrove, morphologie côtière, aquifère etc.) dont dépendent des secteurs économiques comme l'agriculture, la pêche, la gestion des ressources en eau ou encore la gestion des risques et la santé humaine.

Afin de répondre au mieux aux conséquences du changement climatique sur le territoire guyanais, il est nécessaire que les acteurs locaux s'approprient les résultats de cette étude. Pour assurer une bonne compréhension et assimilation des résultats, un plan de communication devra être mis en place pour les élus locaux mais également pour le grand public. Ce travail nécessitera des échanges entre les différents partenaires pour décider du format le plus approprié de cette communication.

Les résultats de l'étude permettront également aux acteurs publics d'initier ou réévaluer des plans de gestion, d'aménagement ou de risques dans lesquelles les effets du changement climatique doivent être pris en compte à l'échelle de la Guyane.

## Sommaire

<b>1. Introduction.....</b>	<b>21</b>
1.1 CADRE DE L'ÉTUDE.....	21
1.2 OBJECTIFS ET MÉTHODE DE TRAVAIL.....	22
<b>2. Contexte général.....</b>	<b>23</b>
2.1 CHANGEMENT CLIMATIQUE GLOBAL ET SUBMERSION CHRONIQUE .....	23
2.1.1 Changement climatique global.....	23
2.1.2 Submersions chroniques .....	24
2.2 CONNAISSANCES SUR LE CHANGEMENT CLIMATIQUE À L'ÉCHELLE DE LA GUYANE .....	25
2.3 ÉVOLUTION MORPHODYNAMIQUE DU LITTORAL GUYANAIS.....	26
2.3.1 Contexte géologique.....	26
2.3.2 Dynamique des bancs de vase.....	28
<b>3. Évolution du niveau moyen de la mer .....</b>	<b>31</b>
3.1 MÉTHODES.....	31
3.1.1 Le niveau marin relatif .....	31
3.1.2 Projections et reconstruction du niveau marin relatif à partir de modèles climatiques.....	32
3.1.3 Données utilisées .....	35
3.2 RÉSULTATS.....	43
3.2.1 Caractérisation des mouvements verticaux du sol .....	43
3.2.2 Reconstruction historique du niveau de la mer en Guyane .....	46
3.2.3 Projections du niveau de la mer en Guyane .....	47
3.3 SYNTHÈSE SUR L'ÉLÉVATION DU NIVEAU MARIN .....	50
<b>4. Caractérisation de la submersion chronique .....</b>	<b>51</b>
4.1 MÉTHODES.....	51
4.1.1 Préambule .....	51
4.1.2 Données topographiques.....	53
4.1.3 Projections probabilistes de niveaux d'eau locaux .....	56
4.1.4 Cartographie des zones basses potentiellement exposés aux submersions chroniques ( $ZB_{MJ}$ et $ZBC_{MJ}$ ) .....	62
4.2 RÉSULTATS.....	66
4.2.1 Observations et analyses d'événements de submersions chroniques passées .....	66
4.2.2 Projections de niveau d'eau.....	69
4.2.3 Cartes.....	71
4.3 DISCUSSIONS .....	83
4.3.1 Variabilité spatiale de la marée.....	83
4.3.2 Limites de la cartographie.....	84



<b>5. Évolution des paramètres physiques : températures, précipitations, vents et vagues.....</b>	<b>87</b>
5.1 MÉTHODES .....	87
5.1.1 Préambule : Le climat guyanais sous l'influence de la ZCIT .....	87
5.1.2 Approche générale : Modélisation climatique globale et descente d'échelle sur la Guyane.....	88
5.1.3 Évaluation des simulations historiques.....	90
5.1.4 Évaluation des projections futures à grandes échelle.....	94
5.1.5 Correction des biais et descentes d'échelle statistique.....	95
5.1.6 Indices climatiques sectoriels.....	97
5.1.7 Modélisation du climat de vagues.....	99
5.2 RÉSULTATS .....	106
5.2.1 Évaluation des simulations historiques.....	106
5.2.2 Évaluation des projections futures à grande échelle.....	119
5.2.3 Correction des biais et descente d'échelle statistique.....	141
5.2.4 Indices climatiques sectoriels.....	152
5.2.5 Évolution du climat de vagues.....	160
5.3 DISCUSSIONS.....	179
5.3.1 Évaluation et sélection des modèles CMIP6.....	179
5.3.2 Méthodes et descentes d'échelle .....	181
5.3.3 Indices climatiques, impacts sectoriels et risque d'hyperthermie .....	183
5.3.4 Projections futures du climat de vagues .....	186
<b>6. Conclusion .....</b>	<b>189</b>
<b>7. Références.....</b>	<b>193</b>

## Liste des figures

Figure 1 : Présentation générale de la Guyane. ....	21
Figure 2 : Les symptômes du changement climatique induits par un déséquilibre énergétique (d'après Von Schuckmann et al., 2016).....	24
Figure 3 : Évolution du niveau moyen régional au large de la Guyane entre 1993 et 2012 par altimétrie satellite (Moisan et al., 2013). ....	25
Figure 4 : Courbe de variation du niveau marin depuis les 150 000 BP à aujourd'hui (d'après Menier et Ballèvre, 2005).....	26
Figure 5 : Coupe caractéristique de la plaine côtière (adaptée de Prost, 1989 et Brunier et al., 2019). .	27
Figure 6 : Modèle tectonique de flexure élastique du plateau continental (Palvadeau, 1999). ....	28
Figure 7 : Schéma explicatif de la structure d'un banc de vase. Adapté de Plaziat (2004). ....	29
Figure 8 : Méthodes de mesure du niveau de la mer relatif et du niveau de la mer absolu dans le référentiel géocentrique. D'après Wöppelmann & Marcos (2016).....	31
Figure 9 : Schéma résumant les étapes successives permettant d'effectuer des projections locales du niveau de la mer.....	33
Figure 10 : Exemple de la moyenne de la composante stérodynamique (en m) simulée par l'ensemble de modèles CMIP5 en 2100 (par rapport à la période de référence 1986-2005) selon le scénario climatique RCP4.5. Cette carte a été produite à partir de l'outil <a href="https://sealevelrise.brgm.fr">https://sealevelrise.brgm.fr</a> . La résolution spatiale de la carte est de 1° de longitude x 1° de latitude.....	33
Figure 11 : Empreintes spatiales du niveau de la mer relatif associées aux bilans de masses de (a) la calotte Groenlandaise et (b) les glaciers continentaux. Les valeurs correspondent au rapport entre l'élévation locale et l'élévation globale. D'après Kopp et al. (2015). ....	34
Figure 12 : Localisation des données de niveaux moyens SONEL en Guyane. Coordonnées en WGS84. Trait de côte issu du traitement d'images satellite Sentinel (sept. 2021).....	37
Figure 13 : Changement de la température globale de la Terre aux 21 <sup>ème</sup> siècle (par rapport à la période de référence 1986-2005) simulée par les simulations climatiques CMIP5. D'après Church et al. (2013). ....	38
Figure 14 : Stations GPS en Guyane. (a) Carte de positionnement des stations GPS en Guyane. (b) Exemple de série temporelle (hebdomadaire) des changements d'élévations mesurés par le GPS Kourou selon la solution ULR7A. Source : SONEL.....	43
Figure 15 : Évolution temporelle annuelle des mouvements verticaux du sol associés au GIA (rouge) et au GRD (noir) à l'endroit de la station GPS de Kourou (Figure 14a). L'intervalle de confiance de 68% (ou 1 $\sigma$ ) est représenté en trait pointillé. Le GIA est donné sous forme de tendance linéaire ayant pour référence l'année 2004. ....	44
Figure 16 : (a) Vitesses verticales (en mm/an) à Kourou, Cayenne et Ile Royale mesurées par les GPS pour les solutions ULR7A, NGL14, JPL14 et GT2 et modélisées pour les contributions du GRD et GIA. (b) Estimation des vitesses verticales locaux pour chaque solution après retranchement des contributions du GRD et du GIA. Les barres verticales indiquent l'intervalle de confiance de 68%. ....	45
Figure 17 : Reconstruction historique et observation du niveau de la mer relatif à Ilet la Mère entre 1900 et 2020. La période de référence définie et commune aux jeux de données est 1990-2000. Les enveloppes grises et jaunes délimitent respectivement l'intervalle vraisemblable (CMIP5) et l'intervalle de confiance 90% (Frederikse et al., 2020). Les reconstructions considèrent que le sol est stable (absence de mouvements verticaux), comme le suggèrent les résultats de la section §3.2.1.....	46

Figure 18 : Projections du niveau marin moyen en Guyane selon les scénarios climatiques RCP2.6 (haut-gauche), RCP4.5 (haut-droite), RCP8.5 et « High-end » (bas-gauche). La sensibilité de ces projections aux mouvements verticaux locaux (bas-droite) est montrée pour les scénarios climatiques RCP2.6 (vert) et RCP8.5 (rouge). Les projections sont calculées en terme d'anomalie par rapport à la période de référence 1986-2005.....	49
Figure 19 : Schéma décrivant les zones basses potentiellement exposées aux submersions chroniques utilisant la méthode non connectée (1) et connectée (2).....	52
Figure 20 : Méthode générale permettant de caractériser la submersion chronique.....	53
Figure 21 : Emprises des Modèles Numériques de Terrain (MNT) disponibles à l'échelle du littoral de la Guyane et positionnement des événements historiques de submersion chronique recensés.....	54
Figure 22 : a) Modèle Numérique de Terrain de 2015 (CACL) et cartographie des points de contrôle mesurés au DGPS. b) Comparaison entre les points mesurés in situ et ceux issus du MNT 2014 (orange) et du MNT 2015 (bleu). Référentiel vertical NGG77.....	55
Figure 23 : Localisation des données utilisées pour estimer les distributions de marée et niveau d'eau (en gras, souligné). Les autres données disponibles sont aussi indiquées. NB : les localisations « Ile Royale » et « Ile Royale Anse Legoff » sont aussi appelées Iles du Salut dans ce rapport.....	57
Figure 24 : Exploitation des données de marée prédite. (a) Données de marée prédite à Iles du Salut (donnée source fournie par le SHOM), (b) Nombre de jours de dépassement (par les maximaux journaliers de marée prédite) en fonction du niveau d'eau repéré par rapport au niveau moyen NM pour les 3 sites.....	58
Figure 25 : Exploitation des données marégraphiques aux îles du Salut. (a) Données marégraphiques brutes, « corrigées » et maximaux journaliers utilisés pour le calcul de distribution. (b). Figures pour une tendance de remontée du niveau moyen relative passée de 2.87 mm/an.....	60
Figure 26 : Méthode de combinaison des projections de remontée du niveau marin et des distributions de niveau d'eau, illustrée sur le site des Iles du Salut, sur la période 2003-2050, en considérant les projections de niveau marin moyen relatif du scénario RCP8.5 (a) étapes permettant de référencer les projections du niveau marin moyen relatif par rapport au 0-NGG77. (b) évolution des niveaux d'eau pour les fréquences de dépassements allant de 1 jour/an à 365.25 jours/an.....	61
Figure 27 : Exemple d'évaluation du nombre de jours par an où l'élévation d'un point ( $Z_{MNT}$ ) est inférieure au niveau d'eau maximum journalier ( $Z_{WL}$ ). Notons que cet exemple est fictif et a pour seul objectif d'illustrer la méthode.....	62
Figure 28 : Exemple de carte de $ZB_{MJ}$ sur une partie de Cayenne pour le scénario RCP4.5 et l'année 2050.....	63
Figure 29 : Exemple d'application de l'algorithme de connexions de zones basses pour le MNT de Cayenne et un niveau d'eau maximum de 3 mètres.....	64
Figure 30 : Submersion chronique à l'intersection de la rue Serge Brown et de la rue Docteur Arthur Henry sur la commune de Cayenne prise le 16 octobre 2020 à 16h00 (©CACL, fond photographie : C.SEJOURNE).....	67
Figure 31 : (1) Localisation des points de contrôle mesurés au DGPS et leur valeur en z associée (points oranges). L'étoile bleue correspond à l'évènement historique recensé auprès de la CACL ; (2) profil topographique entre les points A et B caractérisant le point le plus haut de 1.77 m entre le canal et la zone basse dépassé lors de l'évènement historique d'intérêt.....	68
Figure 32 : Analyse probabiliste de dépassement de l'élévation 1,77m (NGG77) à Cayenne à partir des données de la marée prédite (a) et du marégraphe d'Ile Royale (b). Le niveau moyen (NM) suit la projection RCP8.5.....	69
Figure 33 : Exemple de carte des $ZB_{MJ}$ produite, ici pour Cayenne et le scénario RCP4.5 à échéance 2100 (cf. Annexe I-A4).....	72

Figure 34 : Exemple de carte des ZBC <sub>/MJ</sub> produite, ici pour Cayenne et le scénario RCP4.5 à échéance 2100 (cf. Annexe I-A5). .....	73
Figure 35 : Enveloppes probables de superficie des zones basses associées à chaque scénario (RCP2.6 : vert, RCP4.5 : bleu, RCP8.5 : rouge) et échéance. (a) : Cayenne. (b) : Kourou. (c) : Mana. Chaque enveloppe est délimitée par le scénario bas, la médiane (trait plein noir) et le scénario haut). La superficie indiquée en 2020 correspond au scénario RCP4.5 médian (pour plus d'explications, voir §4.1.4.1). .....	74
Figure 36 : Analyse des MNT's : superficie des zones dont l'altitude est inférieure au niveau d'eau considéré (cf. axe horizontal de la figure) pour Cayenne (bleu), Kourou (rouge) et Mana (vert). Les pointillés indiquent les gammes de valeurs de niveaux pour la fréquence 1 j/an entre 2020 et 2100. Le long de chaque courbe, les symboles se réfèrent au scénario RCP4.5 médian aux 3 horizons (2020, 2050, 2100) comme valeurs repères pour comparaison avec la Figure 35. ....	75
Figure 37 : Cartes de projection des ZBC <sub>/MJ</sub> au niveau du canal Laussat en fonction des différents scénarios « médians » RCP2.6, RCP4.5 et RCP8.5 pour l'horizon 2050 et 2100. Le cercle bleu correspond à la zone située entre le rue Ernest Prévost et la Rue du 14 et 22 juin 1962. La flèche en rouge indique l'endroit où se réalise la connexion avec le canal. ....	77
Figure 38 : Carte de projection pour les scénarios médians des ZBC <sub>/MJ</sub> pour les horizons 2050 et 2100, au niveau de la crique Fouillée. Le cercle noir correspond à la zone Collery. ....	78
Figure 39 : Présentation du secteur de Kourou et des submersions chroniques passées associées (étoiles rouges). ....	79
Figure 40 : Carte des projections ZB <sub>/MJ</sub> pour des scénarios médians au niveau du Village Saramaca, à horizon 2050 et 2100 pour les scénarios RCP2.6, 4.5 et 8.5. Cercle bleu : Zone basse du village Saramaca non reliée aux canaux mis à part pour le scénario RCP8.5 à horizon 2100 (fond : ScanLitto2010 IGN). ....	80
Figure 41: Projection des ZBC <sub>/MJ</sub> pour le scénario médian à RCP8.5 à 2050 (gauche) et 2100 (droite). Encadré bleu : emprise large du projet d'OIN. ....	81
Figure 42 : Présentation du secteur de Mana et de la localisation des informations historiques de submersion collectées (étoiles rouges). ....	82
Figure 43 : Carte de projection des ZB <sub>/MJ</sub> des scénarios médians pour les horizons 2050 et 2100, au niveau de la commune de Mana. Le cercle noir correspond à la zone comprise entre le pont et le sud du bourg. ....	83
Figure 44 : Cartes (a) des plus hautes mers astronomiques (PHMA) et (b) médiane des maximaux journaliers par rapport au niveau moyen. Calculé à partir de FES2014 (génération séries temporelles de 18 ans et 11 jours). Les valeurs de PHMA et Médiane indiquées au niveau des 3 marégraphes sont obtenus par analyse des séries temporelles de prédictions de marée fournies par le SHOM. NM' est le niveau moyen calculé à partir de chacun des jeux de données (différent du niveau moyen NM donnée dans le RAM). Le trait de côte a été digitalisé à partir des images satellites Sentinel-2 acquises en septembre 2021 (©ESA). ....	84
Figure 45 : Exemple de sur-estimation potentielle de l'emprise des ZBC <sub>/MJ</sub> liées à l'écoulement par un pixel, au niveau de la zone industrielle de Pariacoabo à Kourou pour le scénario haut RCP8.5 à horizon 2100. La flèche noire (c) indique par où se fait la connection entre la zone basse ouest et la zone basse est. ....	86
Figure 46 : Normales trimestrielles (MAM) des taux journaliers de précipitations RR pour le modèle FIO-ESM-2-0 sur le domaine d'étude. La ligne brisée jaune relie les points où RR est maximal pour une longitude donnée dans la zone en pointillés. Les métriques de la ZCIT (droite de régression représentée par le segment rouge) sont également calculées dans cette zone : pente s, latitude moyenne, RR moyennes et extension zonale (i.e. longitudinale). ....	90
Figure 47 : Moyennes composites sur 1980-2014 de l'indice ONI (Oceanic Niño Index, °C, cf. méthode de calcul ci-dessous) pendant El Niño (rouge) et La Niña (bleu) en fonction du trimestre glissant. Le calcul est basé sur les données HadISST1 (Rayner et al. 2003). ....	92

Figure 48 : Régions utilisées pour le calcul des indices ENSO, dont Nino3.4 (170°W–120°W, 5°S–5°N). Source : <a href="https://climatedataguide.ucar.edu/climate-data/nino-sst-indices-nino-12-3-34-4-oni-and-tni">https://climatedataguide.ucar.edu/climate-data/nino-sst-indices-nino-12-3-34-4-oni-and-tni</a> .....	92
Figure 49 : Stations pluviométriques utilisées (sauf Charvein dans la zone littorale) et zonage climatique de la Guyane (Papazzoni 2021). .....	96
Figure 50 : Emplacement des bouées au large de la Guyane, face à Cayenne (97301, 97302, 97304) et Kourou (97303) Source : <a href="https://candhis.cerema.fr/_public_/cartes.php">https://candhis.cerema.fr/_public_/cartes.php</a> .....	103
Figure 51: a) Nombre d'enregistrements semi-horaires par année et b) pourcentage de données disponibles par mois calendaire, pour chacune des bouées en saison hivernale. ....	103
Figure 52 : Écarts des échelles temporelles de décorrélation (jours) pour (à g.) la force du vent de surface U10 d'ARPEGE-Climat, (au m.) la hauteur significative Hs et (à d.) la période moyenne des vagues Tm de MFWAM05 entre l'historique (1984-2012) et le scénario RCP8.5 (2051-2079). Les contours représentent les moyennes historiques. Les données ARPEGE-Climat sont masquées en gris sur la terre. ....	104
Figure 53 : Schéma du processus de calcul de la significativité des évolutions des états de mer. ....	105
Figure 54 : Cartographie de la zone utilisée pour les graphes de saisonnalité. ....	105
Figure 55 : Distributions des normales trimestrielles des taux journaliers de précipitations (RR) sur la période 1980-2014 et les douze trimestres glissants de l'année pour les données GPCP, avec les métriques ZCIT associées (s représente la pente de la droite de régression linéaire). ....	107
Figure 56 : Normales trimestrielles glissantes de la latitude moyenne de la ZCIT sur 1980-2014 pour 50 modèles CMIP6 et 3 jeux de données de référence. Les courbes en traits gras représentent CMAP (jaune), GPCP (rouge), ERA5 (vert) et la moyenne d'ensemble multi-modèle (bleu). ....	109
Figure 57 : Normales trimestrielles glissantes de la pente de la ZCIT sur 1980-2014 pour 50 modèles CMIP6 et 3 jeux de données de référence. Les courbes en traits gras représentent CMAP (jaune), GPCP (rouge), ERA5 (vert) et la moyenne d'ensemble multi-modèle (bleu). ....	110
Figure 58 : Normales trimestrielles glissantes pour le taux journalier moyen des précipitations dans la ZCIT sur 1980-2014 pour 50 modèles CMIP6 et 3 jeux de données de référence. Les courbes en traits gras représentent CMAP (jaune), GPCP (rouge), ERA5 (vert) et la moyenne d'ensemble multi-modèle (bleu). ....	111
Figure 59 : Normales trimestrielles glissantes pour l'extension zonale de la ZCIT sur 1980-2014 pour 50 modèles CMIP6 et 3 jeux de données de référence. Les courbes en traits gras représentent CMAP (jaune), GPCP (rouge), ERA5 (vert) et la moyenne d'ensemble multi-modèle (bleu). ....	112
Figure 60 : Anomalies composites des taux journaliers de précipitations RR durant les événements El Niño (période 1980-2014) pour les données GPCP, par trimestre glissant en fonction de la phase de l'événement. Les contours représentent les normales trimestrielles des champs de pluie. ....	113
Figure 61 : Anomalies composites des taux journaliers de précipitations RR durant les événements La Niña (période 1980-2014) pour les données GPCP, par trimestre glissant en fonction de la phase de l'événement. Les contours représentent les normales trimestrielles des champs de pluie. ....	114
Figure 62 : Anomalies composites des taux journaliers de précipitations RR durant les événements El Niño (période 1980-2014) pour les 43 modèles CMIP6 capables de représenter ENSO dans le Pacifique et pour le trimestre JFM. A noter la différence d'échelle de couleurs avec la Figure 60. Les contours représentent les normales trimestrielles des champs de pluie. ....	116



Figure 63 : Anomalies composites des taux journaliers de précipitations RR durant les événements La Niña (période 1980-2014) pour les 43 modèles CMIP6 capables de représenter ENSO dans le Pacifique et pour le trimestre JFM. À noter la différence d'échelle de couleurs Figure 61. Les contours représentent les normales trimestrielles des champs de pluie. ....	117
Figure 64 : Écarts des moyennes annuelles à long terme des taux journaliers des précipitations RR entre l'historique (1929-2014) et le scenario SSP5-8.5 (2015-2100) pour les 10 modèles CMIP6 retenus. Les contours représentent les moyennes historiques (mm/jour). Les points indiquent les zones où les écarts sont significatifs au niveau de confiance de 95 %.....	121
Figure 65 : Écarts des moyennes saisonnières en JFMA à long terme des taux journaliers des précipitations RR entre l'historique (1929-2014) et le scenario SSP5-8.5 (2015-2100) pour les 10 modèles CMIP6 retenus. Les contours représentent les moyennes historiques (mm/jour). Les points indiquent les zones où les écarts sont significatifs au niveau de confiance de 95 %.....	122
Figure 66 : Écarts des moyennes saisonnières en JASO à long terme des taux journaliers des précipitations RR entre l'historique (1929-2014) et le scenario SSP5-8.5 (2015-2100) pour les 10 modèles CMIP6 retenus. Les contours représentent les moyennes historiques (mm/jour). Les points indiquent les zones où les écarts sont significatifs au niveau de confiance de 95 %.....	123
Figure 67 : Écarts des moyennes annuelles à long terme des températures moyennes journalières entre l'historique (1929-2014) et le scenario SSP5-8.5 (2015-2100) pour les 10 modèles CMIP6 retenus. Les contours représentent les moyennes historiques. Les points indiquent les zones où les écarts sont significatifs au niveau de confiance de 95 %.....	124
Figure 68 : Écarts des moyennes annuelles à long terme des températures moyennes journalières de surface entre l'historique (1929-2014) et le scenario SSP5-8.5 (2015-2100) pour les 10 modèles CMIP6 retenus. Les contours représentent les moyennes historiques. Les points indiquent les zones où les écarts sont significatifs au niveau de confiance de 95 %. Les zones pour lesquelles la température augmente de plus de 3°C sont représentées en blanc.....	125
Figure 69 : Écarts des moyennes saisonnières en JFMA à long terme des températures moyennes journalières de surface entre l'historique (1929-2014) et le scenario SSP5-8.5 (2015-2100) pour les 10 modèles CMIP6 retenus. Les contours représentent les moyennes historiques. Les points indiquent les zones où les écarts sont significatifs au niveau de confiance de 95 %. Les zones pour lesquelles la température augmente de plus de 5 °C sont représentées en blanc. ....	126
Figure 70 : Écarts des moyennes saisonnières en JASO à long terme des températures moyennes journalières de surface entre l'historique (1929-2014) et le scenario SSP5-8.5 (2015-2100) pour les 10 modèles CMIP6 retenus. Les contours représentent les moyennes historiques. Les points indiquent les zones où les écarts sont significatifs au niveau de confiance de 95 %. Les zones pour lesquelles la température augmente de plus de 5 °C sont représentées en blanc. ....	127
Figure 71 : Écarts des moyennes annuelles à long terme des moyennes journalières du vent à 10 m normalisé (flèches rouges) et de la force du vent (couleurs) entre l'historique (1929-2014) et le scenario SSP5-8.5 (2015-2100) pour 7 modèles CMIP6. Les flèches noires et les contours représentent les moyennes historiques du vent à 10 m normalisé <sup>30</sup> et de la force du vent (m/s), respectivement. Les points indiquent les zones où les écarts de la force du vent sont significatifs au niveau de confiance de 95 %.....	128
Figure 72 : Écarts des moyennes saisonnières en JFMA à long terme des moyennes journalières du vent à 10 m normalisé (flèches rouges) et de la force du vent (couleurs) entre l'historique (1929-2014) et le scenario SSP5-8.5 (2015-2100) pour 7 modèles CMIP6. Les flèches noires et les contours représentent les moyennes historiques du vent à 10 m normalisé et de la force du vent (m/s), respectivement. Les points indiquent les zones où les écarts de la force du vent sont significatifs au niveau de confiance de 95 %.....	130

- Figure 73 : Écarts des moyennes saisonnières en JASO à long terme des moyennes journalières du vent à 10 m normalisé (flèches rouges) et de la force du vent (couleurs) entre l'historique (1929-2014) et le scénario SSP5-8.5 (2015-2100) pour 7 modèles CMIP6. Les flèches noires et les contours représentent les moyennes historiques du vent à 10 m normalisé et de la force du vent (m/s), respectivement. Les points indiquent les zones où les écarts de la force du vent sont significatifs au niveau de confiance de 95 %. ..... 131
- Figure 74 : Écarts des moyennes annuelles à long terme des moyennes journalières du vent à 1000 hPa normalisé (flèches rouges) et de la force du vent (couleurs) entre l'historique (1929-2014) et le scénario SSP5-8.5 (2015-2100) pour les 3 modèles CMIP6 restants parmi les 10 retenus. Les flèches noires représentent les moyennes historiques du vent à 1000hPa normalisé et les contours celles de la force du vent (m/s). Les points indiquent les zones où les écarts de la force du vent sont significatifs au niveau de confiance de 95 %. La terre est grisée sur les cartes du haut et du milieu car les données à 1000 hPa y sont manquantes pour ces 2 modèles..... 132
- Figure 75 : Écarts des moyennes saisonnières en JFMA à long terme des moyennes journalières du vent à 1000 hPa normalisé (flèches rouges) et de la force du vent (couleurs) entre l'historique (1929-2014) et le scénario SSP5-8.5 (2015-2100) pour les 3 modèles CMIP6 restants parmi les 10 retenus. Les flèches noires et les contours représentent les moyennes historiques du vent à 1000hPa normalisé et de la force du vent (m/s), respectivement. Les points indiquent les zones où les écarts de la force du vent sont significatifs au niveau de confiance de 95 %. La terre est grisée sur les cartes du haut et du milieu car les données à 1000 hPa y sont manquantes pour ces 2 modèles. .... 133
- Figure 76 : Écarts des moyennes saisonnières en JASO à long terme des moyennes journalières du vent à 1000 hPa normalisé (flèches rouges) et de la force du vent (couleurs) entre l'historique (1929-2014) et le scénario SSP5-8.5 (2015-2100) pour les 3 modèles CMIP6 restants parmi les 10 retenus. Les flèches noires et les contours représentent les moyennes historiques du vent à normalisé et de la force du vent (m/s), respectivement. Les points indiquent les zones où les écarts de la force du vent sont significatifs au niveau de confiance de 95 %. La terre est grisée sur les cartes du haut et du milieu car les données à 1 000 hPa y sont manquantes pour ces 2 modèles. .... 134
- Figure 77 : Écarts des moyennes annuelles à long terme des moyennes journalières de la force du vent de surface entre l'historique (1929-2014) et le scénario SSP5-8.5 (2015-2100) pour les 2 modèles CMIP6 fournissant cette donnée mais pas les composantes cartésiennes parmi les 10 retenus. Les contours représentent les moyennes historiques (m/s). Les points indiquent les zones où les écarts de la force du vent sont significatifs au niveau de confiance de 95 %..... 135
- Figure 78 : Écarts des moyennes saisonnières en JFMA à long terme des moyennes journalières de la force du vent de surface entre l'historique (1929-2014) et le scénario SSP5-8.5 (2015-2100) pour les 2 modèles CMIP6 fournissant cette donnée mais pas les composantes cartésiennes parmi les 10 retenus. Les contours représentent les moyennes historiques (m/s). Les points indiquent les zones où les écarts de la force du vent sont significatifs au niveau de confiance de 95 %..... 136
- Figure 79 : Écarts des moyennes saisonnières en JASO à long terme des moyennes journalières de la force du vent de surface entre l'historique (1929-2014) et le scénario SSP5-8.5 (2015-2100) pour les 2 modèles CMIP6 fournissant cette donnée mais pas les composantes cartésiennes parmi les 10 retenus. Les contours représentent les moyennes historiques (m/s). Les points indiquent les zones où les écarts de la force du vent sont significatifs au niveau de confiance de 95 %..... 137

Figure 80 : Emplacement des points de grille modèle (symboles pleins) et des stations météorologiques (symboles vides) utilisés pour la correction QQ des précipitations issues de CNRM-CM6-1, GFDL-CM4, MIROC-ES2L et NorESM2-MM. Les stations utilisées pour corriger les simulations d'un point modèle donné sont représentées avec le même symbole que ce dernier. Le fond de carte représente la fraction terre-mer des modèles (0 % pour l'océan, 100 % pour la terre) lorsqu'elle est disponible. Les informations présentées pour CNRM-CM6-1 s'appliquent aussi à CNRM-ESM2-1 (mêmes grille et fraction terre-mer).....	142
Figure 81 : Normales mensuelles des RR futures corrigées (2071-2100) pour 5 modèles climatiques et 2 scénarios d'émissions, et des RR historiques (1980-2014) pour la zone littorale.....	143
Figure 82 : Normales mensuelles des températures minimales (à g.) et maximales (à d.) futures corrigées (2071-2100) pour 5 modèles climatiques et 2 scénarios d'émissions, et historiques (1980-2014) pour la zone littorale. ....	144
Figure 83 : Normales mensuelles de la force du vent de surface futures corrigées (2071-2100) pour 4 modèles climatiques et 2 scénarios d'émissions, et historiques (1980-2014) pour la zone littorale.....	145
Figure 84 : Moyennes annuelles des RR historiques et futures corrigées dans la zone littorale pour 5 modèles climatiques et 2 scénarios d'émissions. Afin d'éliminer le bruit de haute fréquence, les séries ont été lissées avec une moyenne mobile de largeur 11 ans après concaténation des périodes historique (1980-2014) et futures (2015-2100), entraînant la perte des données des 5 premières et 5 dernières années. ....	146
Figure 85 : Moyennes annuelles des températures minimales (à g.) et maximales (à d.) historiques et futures corrigées dans la zone littorale pour 5 modèles climatiques et 2 scénarios d'émissions. Afin d'éliminer le bruit de haute fréquence, les séries ont été lissées avec une moyenne mobile de largeur 11 ans après concaténation des périodes historique (1980-2014) et futures (2015-2100), entraînant la perte des données des 5 premières et 5 dernières années. ....	147
Figure 86 : Moyennes annuelles de la force du vent de surface historiques et futures corrigées dans la zone littorale pour 4 modèles climatiques et 2 scénarios d'émissions. Afin d'éliminer le bruit de haute fréquence, les séries ont été lissées avec une moyenne mobile de largeur 11 ans après concaténation des périodes historique (1980-2014) et futures (2015-2100), entraînant la perte des données des 5 premières et 5 dernières années. ....	148
Figure 87 : Écarts relatifs (%) des moyennes annuelles à long terme des taux journaliers des précipitations RR corrigés entre l'historique (1980-2014) et les scénarios SSP2-4.5 et SSP5-8.5 (2071-2100) pour les 5 modèles CMIP6 retenus. Les moyennes historiques (mm/jour) sont également représentées. Les symboles carrés indiquent les stations où les écarts sont significatifs au niveau de confiance de 95 % (test de Student). ....	149
Figure 88 : Écarts des moyennes annuelles à long terme des températures minimales (°C) corrigées entre l'historique (1980-2014) et les scénarios SSP2-4.5 et SSP5-8.5 (2071-2100) pour les 5 modèles CMIP6 retenus. Les moyennes historiques sont également représentées. Les symboles carrés indiquent les stations où les écarts sont significatifs au niveau de confiance de 95 % (test de Student). ....	150
Figure 89 : Écarts des moyennes annuelles à long terme des températures maximales (°C) corrigées entre l'historique (1980-2014) et les scénarios SSP2-4.5 et SSP5-8.5 (2071-2100) pour les 5 modèles CMIP6 retenus. Les moyennes historiques sont également représentées. Les symboles carrés indiquent les stations où les écarts sont significatifs au niveau de confiance de 95 % (test de Student). ....	151
Figure 90 : Moyennes annuelles du nombre mensuel de jours secs (à g.) et de fortes pluies (à d.) historiques et futures corrigées dans la zone littorale pour 5 modèles climatiques et 2 scénarios d'émissions. Afin d'éliminer le bruit de haute fréquence, les séries ont été lissées avec une moyenne mobile de largeur 11 ans après concaténation des périodes historique (1980-2014) et futures (2015-2100), entraînant la perte des données des 5 premières et 5 dernières années. ....	152

Figure 91 : Écarts des moyennes annuelles à long terme du nombre mensuel de jours secs entre l'historique (1980-2014) et les scénarios SSP2-4.5 et SSP5-8.5 (2071-2100) pour les 5 modèles CMIP6 retenus. Les moyennes historiques sont également représentées. Les symboles carrés indiquent les stations où les écarts sont significatifs au niveau de confiance de 95 % (test de Student).....	153
Figure 92 : Moyennes annuelles du cumul moyen des jours de fortes pluies historiques et futures corrigées dans la zone littorale pour 5 modèles climatiques et 2 scénarios d'émissions. Afin d'éliminer le bruit de haute fréquence, les séries ont été lissées avec une moyenne mobile de largeur 11 ans après concaténation des périodes historique (1980-2014) et futures (2015-2100), entraînant la perte des données des 5 premières et 5 dernières années.....	154
Figure 93 : Moyennes annuelles du nombre mensuel de nuits chaudes (à g.) et de journées chaudes (à d.) historiques et futures corrigées dans la zone littorale pour 5 modèles climatiques et 2 scénarios d'émissions. Afin d'éliminer le bruit de haute fréquence, les séries ont été lissées avec une moyenne mobile de largeur 11 ans après concaténation des périodes historique (1980-2014) et futures (2015-2100), entraînant la perte des données des 5 premières et 5 dernières années.....	155
Figure 94 : Moyennes annuelles de la température moyenne lors des nuits chaudes (à g.) et des journées chaudes (à d.) historiques et futures corrigées dans la zone littorale pour 5 modèles climatiques et 2 scénarios d'émissions. Afin d'éliminer le bruit de haute fréquence, les séries ont été lissées avec une moyenne mobile de largeur 11 ans après concaténation des périodes historique (1980-2014) et futures (2015-2100), entraînant la perte des données des 5 premières et 5 dernières années. ....	156
Figure 95 : Écarts des moyennes annuelles à long terme du nombre mensuel de nuits chaudes entre l'historique (1980-2014) et les scénarios SSP2-4.5 et SSP5-8.5 (2071-2100) pour les 5 modèles CMIP6 retenus. Les moyennes historiques sont également représentées. Les symboles carrés indiquent les stations où les écarts sont significatifs au niveau de confiance de 95 % (test de Student).....	157
Figure 96 : Écarts des moyennes annuelles à long terme du nombre mensuel de journées chaudes entre l'historique (1980-2014) et les scénarios SSP2-4.5 et SSP5-8.5 (2071-2100) pour les 5 modèles CMIP6 retenus. Les moyennes historiques sont également représentées. Les symboles carrés indiquent les stations où les écarts sont significatifs au niveau de confiance de 95 % (test de Student). ....	158
Figure 97 : Moyennes annuelles des degrés-jour annuels de climatisation historiques et futures corrigées dans la zone littorale pour 5 modèles climatiques et 2 scénarios d'émissions. Afin d'éliminer le bruit de haute fréquence, les séries ont été lissées avec une moyenne mobile de largeur 11 ans après concaténation des périodes historique (1980-2014) et futures (2015-2100), entraînant la perte des données des 5 premières et 5 dernières années. ....	159
Figure 98 : Projections multi-modèle annuelles et intervalle de confiance à 95% pour les scénarios RCP 4.5 et RCP 8.5 du changement (a) de la hauteur significative ( $H_s$ ); (b) période moyenne ( $T_m$ ); et (c) direction d'incidence moyenne ( $D_m$ ) des vagues. Chaque point correspond à un couple modèle de vague/modèle de climat.....	160
Figure 99 : Projections multi-modèle mensuelles et intervalle de confiance à 95% pour les scénarios RCP 4.5 et RCP 8.5 du changement (a) de la hauteur significative ( $H_s$ ); période moyenne ( $T_m$ ) (b); et (c) direction d'incidence moyenne ( $D_m$ ) des vagues.....	161
Figure 100 : Différence entre Hist-Obs et ERA5 pour la vitesse de U10 au-dessus de l'océan en saison hivernale avec pour contour le champ de référence de ERA5 (m/s) : a) moyenne et b) quantile 95. ....	162
Figure 101 : Différence moyenne de U10 entre Hist-Obs et ERA5 (flèches rouges, fond de carte pour la différence des vitesses) avec le champ de référence ERA5 (flèches noires, contours pour les vitesses). ....	163
Figure 102 : Différence entre Hist-Obs et ERA5 pour $T_m$ en saison hivernale avec pour contour le champ de référence de ERA5 : a) moyenne et b) quantile 95.....	163

Figure 103 : Différence entre Hist-Obs et ERA5 pour Hs en saison hivernale avec pour contour le champ de référence de ERA5 : a) moyenne et b) quantile 95. ....	163
Figure 104 : Différence moyenne entre Hist-Obs et ESA-CCI pour Hs en saison hivernale avec pour contour le champ de référence de ESA-CCI. ....	164
Figure 105 : Probabilité que Hs dépasse 1 m en saison hivernale pour : a) Hist-Obs et b) ESA-CCI. ...	165
Figure 106 : Quotient (en puissances de deux) des probabilités que Hs dépasse 1 m en saison hivernale, avec pour contour le champ de référence de ESA-CCI.....	165
Figure 107 : Quotient (en puissances de deux) des probabilités que Hs dépasse (a) 1,5 m, (b) 2 m, et (c) 3 m en saison hivernale, avec pour contour le champ de référence de ESA-CCI. ....	166
Figure 108 : Représentation en “boîtes à moustache” des données de (a,c,e,g) Hs et (b,d,f,h) Tm en saison hivernale pour (a,b) la bouée 97301, (c,d) la bouée 97302, (e,f) la bouée 97304 et pour (g,h) Hist-Obs (52°W ; 5°N). ....	166
Figure 109 : Représentation en “boîtes à moustache” des données de (a,c) Hs (m) et (b,d) Tm (s) en saison hivernale pour (a,b) la bouée 97303, et (c,d) Hist-Obs (52,5°W ; 5,5°N).....	167
Figure 110 : Roses des vagues en saison hivernale pour les bouées a) 97302, b) 97304 et pour c) Hist-Obs (5°N ; 52°W).....	168
Figure 111 : Roses des vagues en saison hivernale pour a) la bouée 97303 et b) Hist-Obs (5.5°N ; 52.5°W) .....	168
Figure 112 : Évolution moyenne RCP 8.5 (2051-2079) - Hist-Model (1984-2012) en saison hivernale avec pour contour le champ historique Hist-Model : a) Hs (m) et b) Tm (s). Les hachures signalent les zones où les évolutions sont statistiquement significatives au niveau de confiance de 95 %. ....	169
Figure 113 : Évolution RCP 8.5 (2051-2079) – Hist-Model (1984-2012) en saison hivernale de la médiane de Dir avec pour référence le champ de Hist-Model (flèches noires).....	170
Figure 114 : Roses des vagues pour (a,b,c,d,e) Hist-Model et (f,g,h,i,j) RCP8.5 extraites des points modèles (a,f) 5.5°N/51.5°W, (b,g) 6°N/52°W, (c,h) 6.5°N/52.5°W, (d,i) 6.5°N/53°W et (e,j) 6.5°N/53.5°W. ....	171
Figure 115 : Évolution moyenne RCP8.5 (2051-2079) – Hist-Model (1984-2012) en saison hivernale de U10 (flèches rouges, fond de carte pour l'évolution des vitesses) avec le champ historique Hist-Model (flèches noires, contours pour les vitesses).....	171
Figure 116 : Évolution moyenne RCP 8.5 (2051-2079) - Hist-Model (1984-2012) en saison hivernale avec pour contour le champ historique Hist-Model à l'échelle de l'Atlantique Nord : (à gauche) Hs (m) et (au milieu) Tm (s). A droite : Évolution moyenne RCP 8.5 (2051-2079) – Hist-Model (1984-2012) en saison hivernale de U10 (flèches noires, fond de carte pour l'évolution des vitesses) avec pour contour le champ historique des vitesses Hist-Model à l'échelle de l'Atlantique Nord. Les hachures signalent les zones où les évolutions de Hs, Tm, vitesse de U10 sont statistiquement significatives au niveau de confiance de 95%...	172
Figure 117 : Comparaison de la saisonnalité (en saison hivernale) pour Hist-Model (courbes vertes) et RCP8.5 (courbes rouges, les traits gras représentant une différence avec Hist-Model significative à 95%) de : a) Hs, b) Tm, c) U10 et d) E. ....	173
Figure 118 : Évolution moyenne RCP 8.5 (2051-2079) – Hist-Model (1984-2012) pour a) NDJ et b) FMA de U10 (flèches rouges, fond de carte pour l'évolution des vitesses) avec le champ historique Hist-Model (flèches noires, contours pour les vitesses).....	174
Figure 119 : Évolution RCP8.5 (2051-2079) - Hist-Model (1984-2012) des niveaux de retour décennaux en saison hivernale avec pour contour de référence Hist-Model (les hachures représentent les zones où les évolutions sont statistiquement significatives à 95 %), pour : a) Hs [m], b) Tm [s], c) E [m²s], et U10 (m/s) en d) NDJFMA, e) NDJ et f) FMA.....	175



- Figure 120 : Comparaison de la saisonnalité (en saison hivernale) pour Hist-Model (courbes vertes) et RCP 8.5 (courbes rouges, les traits gras représentant une différence avec Hist-Model significative à 95%) de la probabilité journalière que a) Hs maximale soit supérieure à 3.5 m, b) Tm maximale soit supérieure à 13 s, c) U10 maximale soit supérieure à 13 m/s et d) E maximale soit supérieure à 110 m<sup>2</sup> s. .... 176
- Figure 121 : Durées de retour (années) de RCP8.5 (2051-2079) correspondant aux niveaux de retour décennaux de Hist-Model (1984-2012) en saison hivernale pour : a) Hs, b) Tm, c) E, d) U10 en NDJFMA, e) U10 en NDJ et f) U10 en FMA. .... 178
- Figure 122 : Diagrammes de dispersion température-humidité à Saint-Georges, obtenus à partir d'observations a) horaires et b) quotidiennes (température maximale et humidité minimale) sur la période 1988-2021. Les données quotidiennes d'humidité minimale sont remplacées c) par leurs normales journalières et d) par des données reconstruites à partir d'un modèle de régression linéaire des températures maximales déduit du diagramme b. Les couleurs correspondent à l'indice de chaleur ressentie HI de la NOAA (Rothfus 1990), avec le décompte du nombre de jours concernés par des conditions sans préoccupation particulière (vert,  $HI < 26.7^{\circ}\text{C}$ ), de vigilance (jaune,  $26.7^{\circ}\text{C} \leq HI < 32.8^{\circ}\text{C}$ ), de vigilance extrême (orange,  $32.8^{\circ}\text{C} \leq HI < 40^{\circ}\text{C}$ ), de danger (rouge,  $40^{\circ}\text{C} \leq HI < 51.7^{\circ}\text{C}$ ) et de danger extrême (violet,  $HI \geq 51.7^{\circ}\text{C}$ ). .... 185

## Liste des annexes

<b>Annexes I : relatives aux chapitres 2, 3 et 4</b> .....	<b>202</b>
Annexe 1 (A1) : Comparaison des données FES2014 et SHOM .....	203
Annexe 2 (A2) : CAYENNE : Cartes des projections à 2050 des zones basses potentiellement exposées aux submersions chroniques pour les trois scénarios RCP2.6, RCP4.5 et RCP8.5 .....	205
Annexe 3 (A3) : CAYENNE : Cartes des projections à 2050 des zones basses connectées potentiellement exposées aux submersions chroniques pour les trois scénarios RCP2.6, RCP4.5 et RCP8.5 .....	211
Annexe 4 (A4) : CAYENNE : Cartes des projections à 2100 des zones basses potentiellement exposées aux submersions chroniques pour les trois scénarios RCP2.6, RCP4.5 et RCP8.5 .....	217
Annexe 5 (A5) : CAYENNE : Cartes des projections à 2100 des zones basses connectées potentiellement exposées aux submersions chroniques pour les trois scénarios RCP2.6, RCP4.5 et RCP8.5 .....	223
Annexe 6 (A6) : KOUROU : Cartes des projections à 2050 des zones basses potentiellement exposées aux submersions chroniques pour les trois scénarios RCP2.6, RCP4.5 et RCP8.5 .....	229
Annexe 7 (A7) : KOUROU : Cartes des projections à 2050 des zones basses connectées potentiellement exposées aux submersions chroniques pour les trois scénarios RCP2.6, RCP4.5 et RCP8.5 .....	235
Annexe 8 (A8) : KOUROU : Cartes des projections à 2100 des zones basses potentiellement exposées aux submersions chroniques pour les trois scénarios RCP2.6, RCP4.5 et RCP8.5 .....	241
Annexe 9 (A9) : KOUROU : Cartes des projections à 2100 des zones basses connectées potentiellement exposées aux submersions chroniques pour les trois scénarios RCP2.6, RCP4.5 et RCP8.5 .....	247
Annexe 10 (A10) : MANA : Cartes des projections à 2050 des zones basses potentiellement exposées aux submersions chroniques pour les trois scénarios RCP2.6, RCP4.5 et RCP8.5 .....	253
Annexe 11 (A11) : MANA : Cartes des projections à 2100 des zones basses potentiellement exposées aux submersions chroniques pour les trois scénarios RCP2.6, RCP4.5 et RCP8.5 .....	259
<b>Annexes II : relatives au chapitre 5</b> .....	<b>265</b>



# 1. Introduction

En 2021, le 6<sup>ème</sup> rapport d'évaluation du GIEC (Groupe Intergouvernemental d'experts sur l'Évolution du Climat) réaffirme que sous l'action humaine le climat se réchauffe à une vitesse sans précédent depuis au moins 2 000 ans (IPCC, 2021). Les conséquences de ce dérèglement sont multiples et ne sont pas homogènes à l'échelle de la planète.

Les travaux du GIEC permettent de regrouper et synthétiser les conséquences et projections à l'échelle de grandes régions continentales sur différents paramètres physiques comme entre autres : le niveau marin, les précipitations, la température, le vent ou encore les houles.

La Guyane, située sur le continent sud-américain entre le Brésil et le Suriname (Figure 1) est comme le reste du monde concernée par ces changements déjà observés et futurs. Néanmoins, il existe peu d'information à l'échelle locale sur les projections et les impacts du changement climatique. Ces données sont pourtant nécessaires à l'ensemble des gestionnaires et acteurs du territoire pour anticiper et adapter les aménagements du futur.

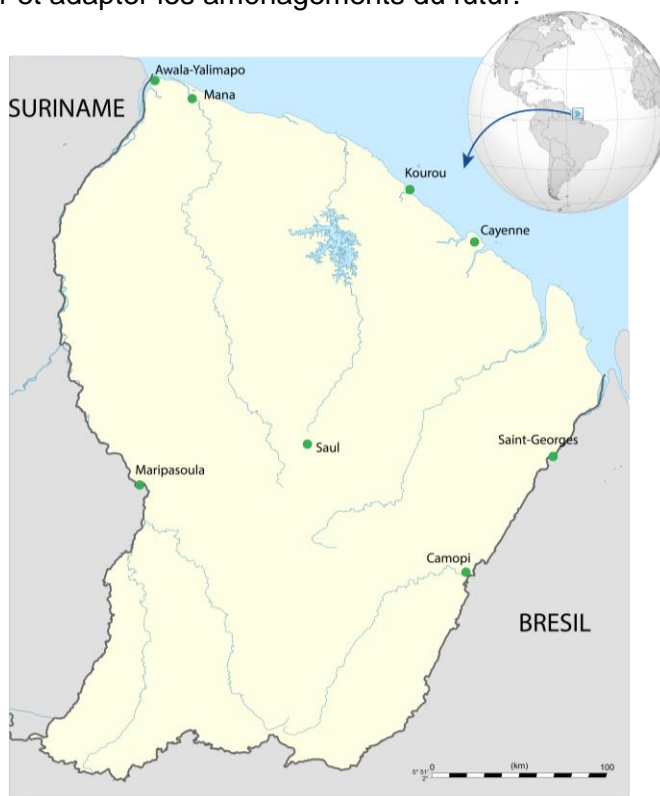


Figure 1 : Présentation générale de la Guyane.

## 1.1 CADRE DE L'ÉTUDE

Suite à des besoins exprimés entre autre par la mairie de Mana, à travers un courrier datant de mars 2019, le BRGM en partenariat avec Météo France a proposé la réalisation de cette étude intitulée : GuyaClimat. Ce programme est financé par la Direction Générale des Territoires et de la Mer (DGTm), l'Agence Française de Développement (AFD), l'Agence de l'Environnement et de la Maitrise de l'Énergie (ADEME), l'Office de l'Eau de Guyane (OEG), Météo France et enfin le BRGM.

Au cours de l'étude, un comité scientifique a été constitué et a suivi la réalisation scientifique du projet. Les membres de ce comité sont : Gael DURAND, Directeur de recherche au sein de l'université de Grenoble, Benoît MEYSSIGNAC, chercheur au Laboratoire d'études en géophysique et océanographie spatiales (LEGOS) de Toulouse (CNES) et Julien BOE directeur de recherche au Centre Européen de Recherche et de Formation Avancée en Calcul Scientifique (CERFACS) du CNRS.

## 1.2 OBJECTIFS ET MÉTHODE DE TRAVAIL

L'objectif général de cette étude est d'apporter aux gestionnaires et décideurs un outil caractérisant la vulnérabilité du territoire guyanais face au changement climatique et plus précisément face à différents paramètres physiques comme l'élévation du niveau marin et les submersions chroniques associées, les vagues, le vent, les précipitations et la température. Le périmètre de l'étude retenu est l'échelle régionale.

Réalisée en partenariat avec Météo France, la méthode générale consiste à :

- établir des hypothèses globales sur les contributions de chaque facteur aux différents paramètres physiques étudiés (élévation du niveau de la mer, température, précipitation, vent et houle) ;
- utiliser des méthodes statistiques et physiques pour modéliser les implications régionales de ces scénarios globaux pour la Guyane ;
- valider un modèle rétrospectif au regard des observations passés ;
- réaliser des projections en prenant en compte chacune de ces contributions et de leurs incertitudes à différents horizons temporels en fonction des paramètres physiques (2050, 2070, 2080 et 2100).

Après une brève présentation de l'état des connaissances des impacts du changement climatique à l'échelle globale et locale sur les différents paramètres physiques de l'étude, le rapport décrit les méthodes et les résultats obtenus pour caractériser :

- l'impact du changement climatique sur l'élévation du niveau marin ;
- les zones basses potentiellement exposées aux submersions chroniques ;
- l'influence du changement climatique sur des paramètres météorologiques (vent, vagues, précipitations, températures) et sur des indices sectoriels qui en découlent (p.ex. jours secs)

## 2. Contexte général

### 2.1 CHANGEMENT CLIMATIQUE GLOBAL ET SUBMERSION CHRONIQUE

#### 2.1.1 Changement climatique global

Le soleil est la principale source d'énergie du système climatique terrestre. Environ un tiers du rayonnement solaire incident est directement réfléchi par les nuages et à la surface, et ainsi renvoyé vers l'espace. Les deux tiers restants sont absorbés par l'atmosphère et majoritairement en surface par les océans, sur les continents et les régions englacées puis réémis vers l'atmosphère sous forme de rayonnement infrarouge, d'évaporation et de convection de l'air à la surface terrestre. Une petite fraction du rayonnement infrarouge émis depuis la surface est directement transmise à l'espace tandis que la majeure partie est absorbée par les gaz à effet de serre présents dans l'atmosphère ; essentiellement la vapeur d'eau, le dioxyde de carbone, le méthane, l'ozone et le protoxyde d'azote. L'énergie absorbée par l'atmosphère est alors réémise par rayonnement infrarouge dans deux directions opposées : vers la surface et vers l'espace. Ce mécanisme d'absorption et réémission vers la surface du rayonnement infrarouge par les gaz à effet de serre est un phénomène naturel, appelé communément « effet de serre », qui provoque une élévation de la température à la surface de la Terre.

Dans un système climatique en équilibre énergétique, le rayonnement infrarouge émis vers l'espace est égal au rayonnement solaire incident et détermine le bilan radiatif terrestre global. Toute perturbation de ce bilan radiatif par des facteurs internes ou externes au système climatique va alors entraîner un déséquilibre énergétique. Les facteurs internes correspondent typiquement à des modes de variabilité naturels du climat tel que le phénomène d'oscillation décennale du Pacifique qui modifie temporairement l'équilibre énergétique terrestre en piégeant de la chaleur dans l'océan à différentes profondeurs. Les facteurs externes sont principalement les fluctuations de l'énergie solaire incidente, les perturbations induites par les éruptions volcaniques, mais surtout les activités humaines qui contribuent à augmenter les concentrations de gaz à effet de serre dans l'atmosphère.

Ainsi, le changement climatique d'origine anthropique n'est autre que la conséquence de l'ajustement du système climatique terrestre au déséquilibre énergétique induit par l'augmentation des concentrations de gaz à effet de serre dans l'atmosphère.

Les « symptômes » de l'ajustement du système climatique à un déséquilibre énergétique positif sont représentés sur la Figure 2 (Von Schuckmann *et al.*, 2016). Ils comprennent notamment la hausse de la température globale en surface, l'augmentation du contenu thermique des océans, la fonte des glaciers terrestres et des calottes polaires, ou encore une accélération du cycle hydrologique et une augmentation des événements extrêmes. Les conséquences directes de ces symptômes sont une élévation du niveau de la mer globale qui entraîne alors une accentuation des risques côtiers (érosion et submersion) (Cooley *et al.*, 2022).

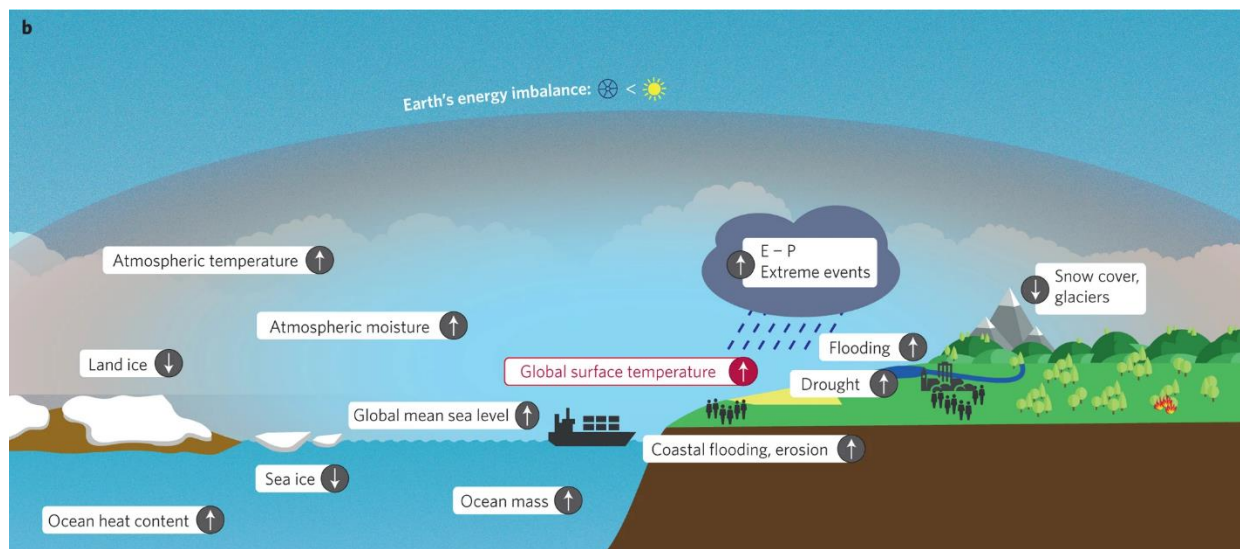


Figure 2 : Les symptômes du changement climatique induits par un déséquilibre énergétique (d'après Von Schuckmann et al., 2016)

### 2.1.2 Submersions chroniques

Le GIEC détaille les impacts de l'accélération de l'élévation du niveau marin sur les côtes dans un chapitre sur l'Océan de son dernier rapport d'évaluation (Cooley et al., 2022). Ces impacts comprennent les submersions chroniques à marée haute, la salinisation des zones humides, la transformation d'habitats et l'augmentation des aléas côtiers (érosion et submersions marines).

Les submersions chroniques correspondent à une inondation des zones basses sur le littoral, ou le long des cours d'eau, lors d'une période de marée haute et en conditions météorologiques calmes. Les submersions marines sont quant à elles une inondation temporaire lors de conditions météorologiques et marégraphiques défavorables.

Si les submersions marines peuvent être destructrices (rupture d'ouvrages, destructions d'habitations etc.), les submersions chroniques engendrent des inondations « mineures », *i.e.* des désagréments pour le public ainsi que des interruptions d'activités et des pertes économiques (Moftakhari et al., 2015). Les zones basses sont des zones vulnérables, qui potentiellement connaissent une augmentation de la fréquence des submersions chroniques dans le temps. Cette accélération, se traduisant par une augmentation du nombre de jours par an pour lesquels une zone basse est inondée, peut engendrer sur le long terme des dégâts sur les infrastructures et sur l'économie en raison de la fermeture de routes, de commerces, d'aéroports etc. (Sweet et Park, 2014 ; Le Cozannet et al., 2020).

La Guyane possède un réseau hydrique très dense, et la plaine côtière est caractérisée par des zones basses. Même si le littoral guyanais a une évolution très rapide du fait de l'influence de la dynamique amazonienne, les fronts salins, dus à la marée, remontent les cours d'eau et les canaux exposant au risque de submersion chronique les zones basses adjacentes.

## 2.2 CONNAISSANCES SUR LE CHANGEMENT CLIMATIQUE À L'ÉCHELLE DE LA GUYANE

Les pays qui composent le bouclier des Guyanes dont la Guyane Française sont tous soumis au changement climatique global. Un état des lieux a été dressé à l'échelle de cette région sur les effets du changement climatique et les conséquences potentielles sur différents systèmes naturels et socio-économiques (Héritier, 2011 ; Moisan *et al.*, 2013). Sur les paramètres physiques de notre étude les principales conclusions sont les suivantes :

- augmentation de la température moyenne de 1.36 °C entre 1955 et 2009 ;
- augmentation du niveau moyen de la mer au large de la Guyane de 3.5 mm/an entre 1993 et 2012, déterminé à partir de l'altimétrie satellite (Figure 3) ;
- pas d'évolution significative et continue sur les précipitations.

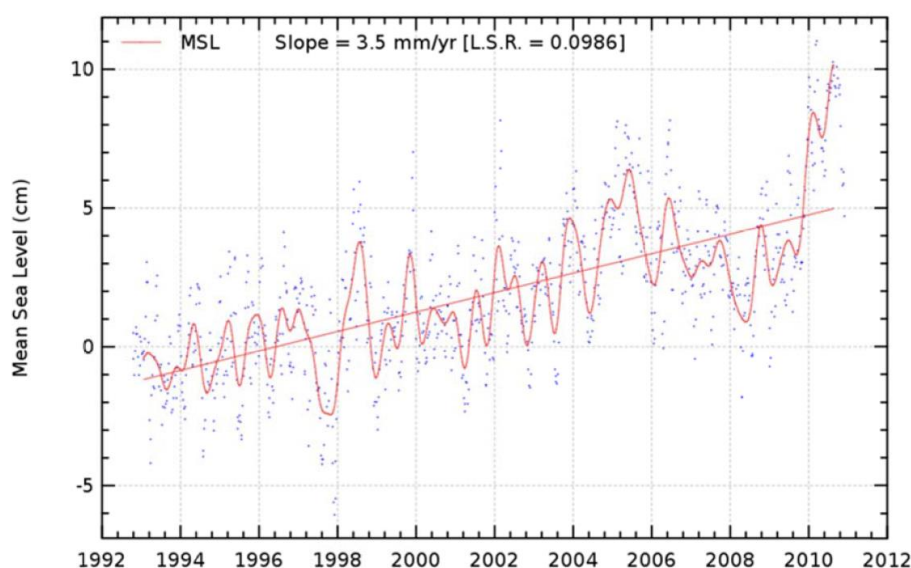


Figure 3 : Évolution du niveau moyen régional au large de la Guyane entre 1993 et 2012 par altimétrie satellite (Moisan *et al.*, 2013).

À notre connaissance, aucune étude de l'effet du changement climatique sur les régimes de vent et de vagues n'a jusqu'à présent été menée à l'échelle guyanaise.

Dans le cadre de l'étude de 2013, Météo France a réalisé des projections à partir du modèle ARPEGE-CLIMAT à l'échelle du globe, sans possibilité de réaliser une descente d'échelle. Ces premiers résultats ont montré une grande hétérogénéité dans la projection des précipitations, ne permettant pas de dégager de tendance d'évolution à l'échelle de la Guyane. Au sujet de la température et du niveau marin, les résultats issus du GIEC et du modèle de Météo France montraient respectivement une hausse d'environ 1 à 2 °C à l'horizon 2040-2070 et une élévation comprise entre 0.26 et 0.82 m en 2081-2100 par rapport à la période 1986-2005 (Moisan *et al.*, 2013).



## 2.3 ÉVOLUTION MORPHODYNAMIQUE DU LITTORAL GUYANAIS

### 2.3.1 Contexte géologique

Le littoral guyanais est caractérisé par une forte hétérogénéité d'un point de vue géologique. Par rapport aux autres pays du plateau des Guyanes (Suriname, Guyana), il a la particularité, de présenter des promontoires rocheux qui façonnent le paysage. Ces promontoires rocheux recourent la plaine côtière récente datant du quaternaire qui s'étend du fleuve Oyapock jusqu'au fleuve Maroni.

La plaine côtière de la Guyane est constituée de formations sédimentaires marines et fluviomarines, décomposées en trois grandes unités morphologiques : le socle ancien datant du précambrien, la plaine côtière ancienne et la plaine côtière récente. La première n'étant pas concernée par les objectifs de l'étude, elle ne sera pas détaillée dans ce rapport. Les deux dernières unités se sont déposées lors des différentes transgressions et régressions marines, liées à la variation du niveau marin au cours du temps (Figure 4).

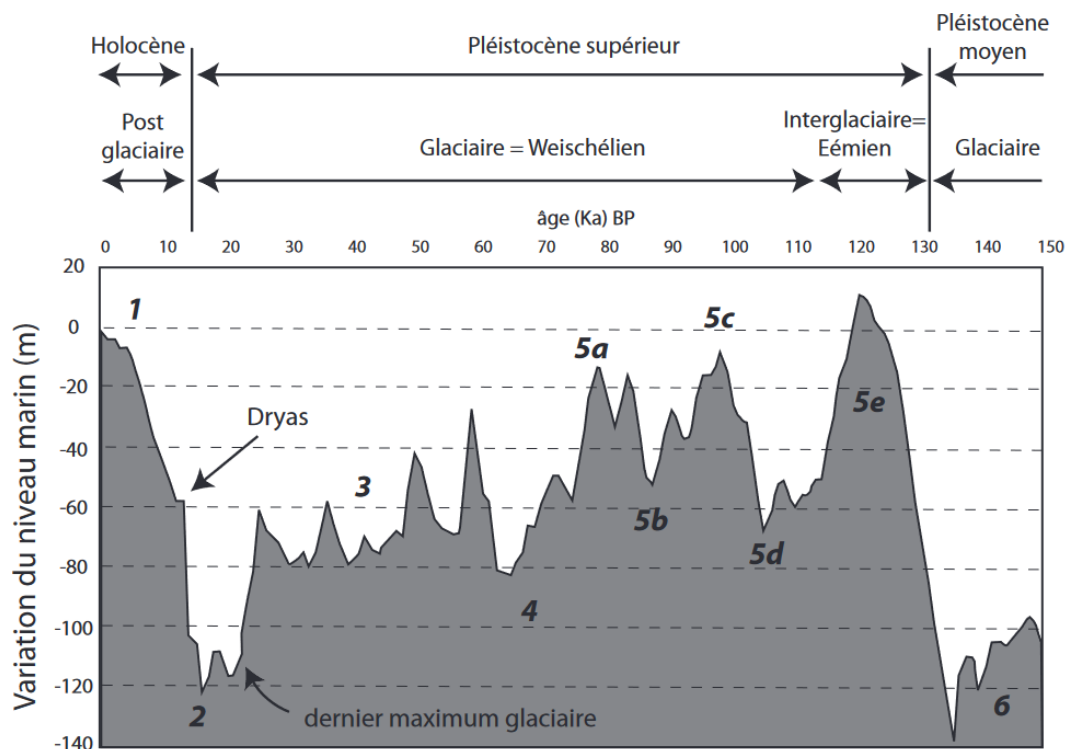


Figure 4 : Courbe de variation du niveau marin depuis les 150 000 BP à aujourd'hui (d'après Menier et Ballèvre, 2005)

La plaine côtière se prolonge au niveau du plateau continental jusqu'à une centaine de kilomètres des côtes actuelles.

#### La plaine côtière ancienne

La plaine côtière ancienne est caractérisée par des cordons sableux, pluri-kilométriques et larges d'environ 100 à 500 m qui reposent sur un substrat vaseux (Figure 5). Ces cordons sableux, se succèdent parallèlement à la côte guyanaise et se sont formés en domaine marin sur la zone intertidale (zone émerge à marée basse). La plaine côtière oscille entre 5 et 10-12 m d'altitude au-dessus du niveau marin actuel. Entre les successions des cordons sableux, plusieurs dépressions argileuses forment des marécages appelés « pri-pri » (Turenne, 1977).

La série sédimentaire qui regroupe la plaine côtière ancienne est la formation de Coswine (Pléistocène). Elle se subdivise en 2 membres (Choubert, 1961) dont le membre inférieur possède des caractères fluviaux et estuariens tandis que le membre supérieur, sableux, présente des caractères franchement marins. L'épaisseur de cette série est estimée à 20 m et cette dernière se serait déposée au cours d'une transgression marine dont le niveau marin relatif serait de 10 à 12 m au-dessus du niveau actuel (Choubert, 1961).

### La plaine côtière récente

La plaine côtière récente est composée de dépôts marins qui forment une plaine très plane comprise entre 0 et 2 m d'altitude (Figure 5). La caractéristique de cette plaine est la présence de cordons sableux de faible largeur (100 à 200 m) et de longueur plurikilométrique qui reposent sur un substrat vaseux. Ces cordons appelés « chenier » (Hoyt 1969 et Prost 1989), sont parallèles à la côte et se forment sous l'action des vagues, ils constituent les lignes d'anciens rivages (Figure 5). En parallèle de l'influence des bancs de vase venant de l'Amazonie, les cheniers dits actifs, se forment actuellement en zone intertidale par accumulation de sable apporté par la dérive littorale, par les fleuves ou par l'action des houles. Point-hauts topographiques, les cheniers constituent une première protection naturelle face aux phénomènes d'érosion et de submersion marine.

La série sédimentaire qui regroupe la plaine côtière récente est la Formation de Démérara (Holocène), qui repose sur la Formation de Coswine. Cette formation est d'origine marine et est constituée par des alternances d'argile bleue et de sable. La dernière phase de transgression marine, entraînant le dépôt des argiles de Démérara est datée de 10 ka BP.

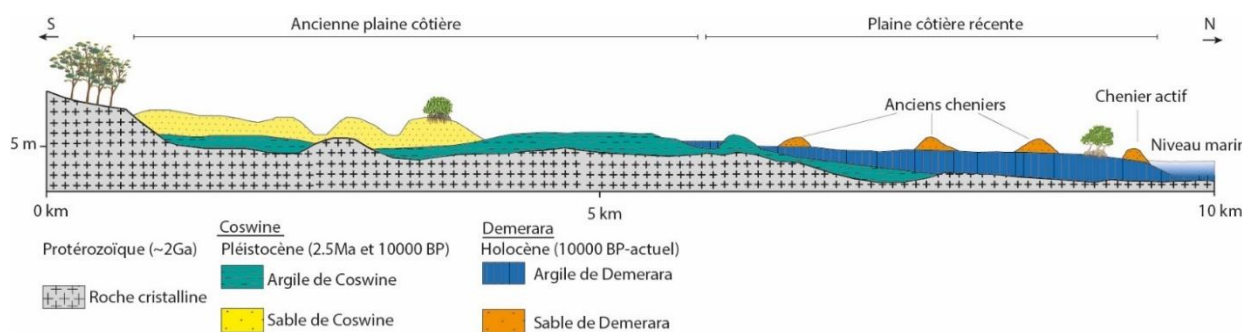


Figure 5 : Coupe caractéristique de la plaine côtière (adaptée de Prost, 1989 et Brunier et al., 2019).

### Mouvement verticaux du sol

À travers des observations géologiques sur l'approfondissement du socle à l'ouest, l'augmentation des épaisseurs de sédiments, ou encore les systèmes de failles, Choubert (1957), puis Turenne (1978) suggèrent que les mouvements tectoniques datant du Quaternaire, seraient dus localement à un compartimentage tectonique, dont chacun des côtés serait délimité par des failles.

En comparant la morphologie et la sédimentologie de grand fleuve guyanais et celle du plateau continental, avec les variations mondiales du niveau de la mer, il a été possible de quantifier les mouvements verticaux suivant, à partir de 120 ka BP (Palvadeau, 1999) (Figure 6) :

- une subsidence (ou affaissement) de la bordure de la plate-forme continentale comprise entre -7 et -15 m en 20 ka BP (-0.3 à -0.75 mm/an) ;
- une surrection (ou élévation) de la plate-forme interne comprise entre +12 m en 13.9 ka BP et +24 m en 11.5 ka BP (taux compris entre +0.8 mm/an et +2 mm/an) ;
- une surrection de l'ensemble de la plaine côtière de +3.5 m entre 120 et 1.3 ka BP (+0.02 mm/an) puis de +2.5 m entre 1.3 ka BP et l'actuel (+1.9 mm/an).

Ces variations sont hétérogènes à l'échelle de la plaine côtière guyanaise. Une surrection est plus importante au sud-ouest qu'au Nord-est.

La subsidence en mer combinée à une réponse élastique de la partie terrestre est expliquée par la flexure du plateau continental sous le poids des sédiments et du cône de l'Amazonie. Ce poids d'un côté entraîne un bombement de l'autre (Figure 6).

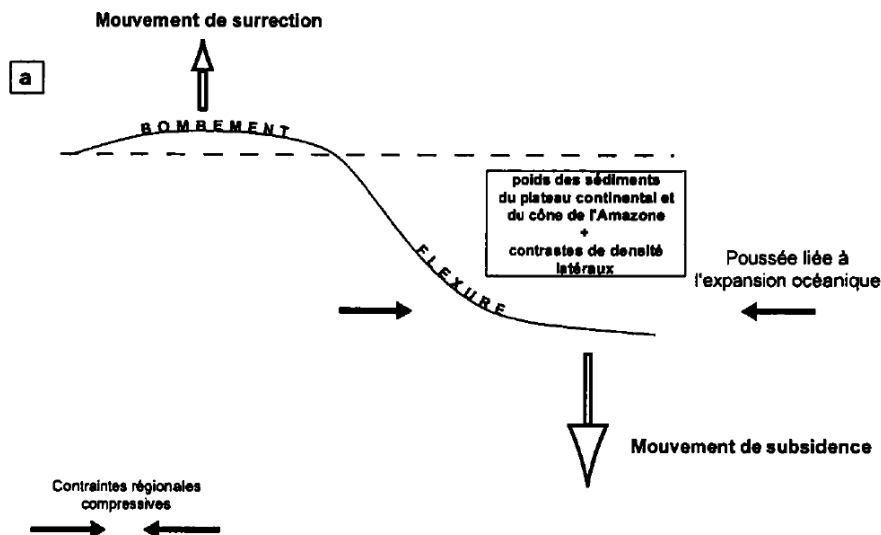


Figure 6 : Modèle tectonique de flexure élastique du plateau continental (Palvadeau, 1999).

### 2.3.2 Dynamique des bancs de vase

Plus de 20 millions de tonnes de sédiments sont drainées chaque mois par le fleuve Amazone (Martinez *et al.*, 2009). La majorité des sédiments présents le long des plateaux des Guyanes provient du système amazonien. Ils sont issus en partie de l'altération des roches volcaniques et métamorphiques du plateau lui-même (Lointier et Prost, 1988). L'intensité des apports en sédiments dépend de la saisonnalité : faible en saison sèche (juin-novembre), forte en saison des pluies (décembre-début juin) (Allersma, 1971).

Ces sédiments prennent la forme de bancs à la frontière entre le Brésil et la Guyane. Les bancs de vases du littoral guyanais mesurent 10 à 60 km de long, sur une largeur comprise entre 20 et 30 km pour une épaisseur comprise entre 2 et 5 m (Allison *et al.*, 2000) (Figure 7). Ils sont espacés entre eux de 15 à 25 km (Froidefond *et al.*, 1988 ; Prost et Charron, 1990 ; Allison *et al.*, 2000). Ces zones de bancs présentent des profils convexes d'accrétion vaseuse et de progradation (Gratiot *et al.*, 2007). Les bancs de vase sont décomposés en deux grandes parties : une partie subtidale et une partie intertidale (Figure 7). La première correspond à la zone constamment immergée et la seconde se situe entre les limites des plus hautes et des plus basses marées.

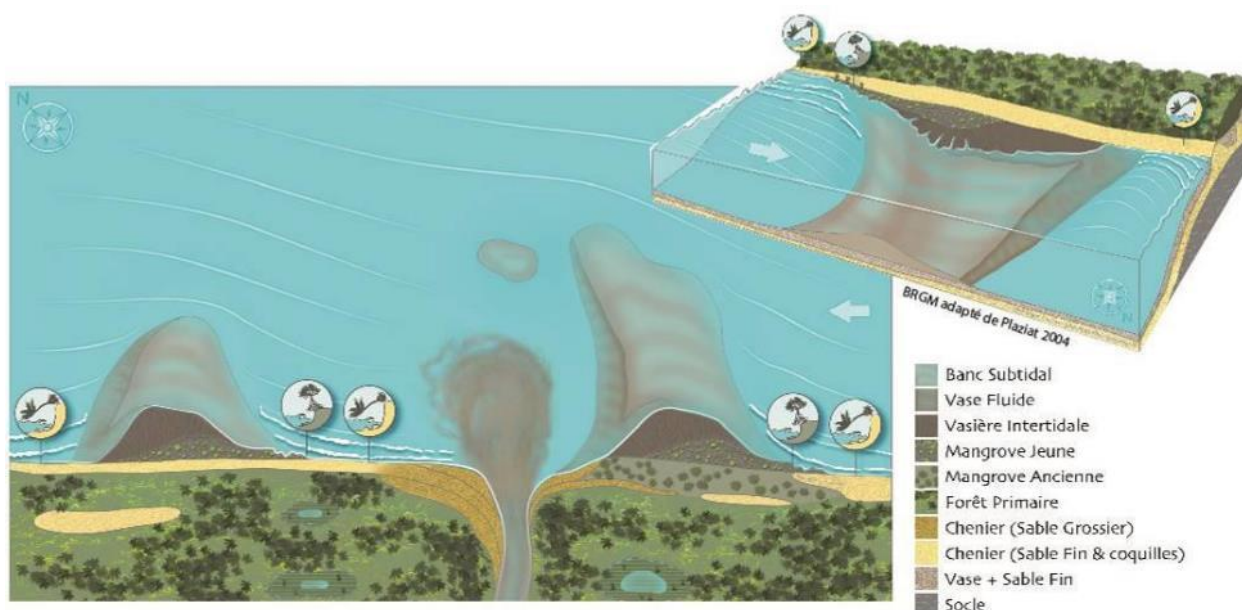


Figure 7 : Schéma explicatif de la structure d'un banc de vase. Adapté de Plaziat (2004).

En Guyane, les bancs de vase sont l'un des facteurs de contrôle de l'érosion côtière. En l'absence d'un banc de vase, la côte est dite en configuration « interbanc ». Dans cette configuration, lors de fortes houles, le déferlement des vagues favorise l'érosion directement sur la plage ou la mangrove résiduelle. À l'inverse, lorsqu'un banc de vase est présent devant la côte les houles incidentes sont atténuées, le déferlement sur la plage est alors moins énergétique et l'érosion est alors beaucoup plus faible.

Les moteurs de la migration des bancs de vase sont multiples et comprennent des forçages globaux comme le courant des Guyanes, les Alizées ou encore le niveau de la mer (Prost *et al.*, 2017) :

- le courant des Guyanes est un courant de surface qui se déplace d'est en ouest au large du plateau des Guyanes avec une rythmicité annuelle (saison des pluies/ saison sèche), qui se traduit par une réflexion vers l'océan atlantique tropical à l'ouest de la Guyane au cours de la saison sèche ;
- les Alizés sont des vents d'est qui prennent naissance dans le front intertropical de convergence (FIT). Ces vents génèrent des houles de secteur nord-est et sont à l'origine d'une agitation sur le littoral guyanais (Melo *et al.*, 2009) ;
- le niveau de la mer le long des côtes de Guyane varie au cours du temps, en fonction de plusieurs facteurs dont le principal est le cycle des marées.

La migration des bancs de vase commence à être bien caractérisée notamment par une approche expérimentale *in situ*, par télédétection spatiale et par des travaux de simulations (Gardel et Gratiot, 2005 ; Vantrepotte *et al.*, 2013). L'ensemble de ces travaux a permis de quantifier la vitesse de déplacement des bancs de vase au cours des dernières décennies. Une augmentation significative de la vitesse de déplacement des bancs de vase a été mise en évidence entre le début des années 1980 où la vitesse de migration était comprise entre 0.2 km/an et 1.8 km/an, (Froidefond *et al.*, 1988) et les années 1990 durant lesquelles elle s'établit entre 2 km/an et 2.6 km/an (Gardel, et Gratiot 2005). Cette augmentation de la vitesse a été confirmée par les travaux menés par Abascal (2019) qui estime la migration en moyenne à 2.3 km/an.

Les estuaires de Guyane interagissent avec le phénomène de migration des bancs vaseux littoraux. Les courants tidaux et fluviaux, orientés perpendiculairement au littoral engendrent un blocage partiel du banc de vase en migration ainsi que l'éjection des sédiments fins hors de l'estuaire (Todd, 1968 ; Giosan *et al.*, 2005). Ce phénomène dit « d'épi hydraulique » ou encore « de chasse hydraulique » est principalement déterminé par la puissance du débit fluvial (Gensac, 2012).

### 3. Évolution du niveau moyen de la mer

#### 3.1 MÉTHODES

Ce chapitre s'intéresse à l'élévation du niveau moyen de la mer en Guyane, préalable indispensable à la caractérisation des zones basses potentiellement exposées aux submersions chroniques. Non seulement le niveau marin évolue spatialement et temporellement, mais l'altitude des côtes également (ex : phénomènes de subsidence). Dans cette section « Méthodes », nous rappelons tout d'abord les différentes composantes du niveau marin, puis comment réaliser des estimations rétrospectives ou des projections du niveau de la mer moyen relatif à l'échelle locale, et enfin les données utilisées dans cette étude.

##### 3.1.1 Le niveau marin relatif

Le niveau de la mer relatif  $NM_{relatif}$ , mesuré par les marégraphes, est égal à la différence entre le niveau de la mer absolu  $NM_{géocentrique}$  mesuré dans le référentiel géocentrique (p.ex. par altimétrie spatiale) et les mouvements verticaux du sol  $MVS$  mesurés p.ex. par des stations GPS (Eq. 1, Figure 8). Le niveau de la mer absolu  $NM_{géocentrique}$  peut être décomposé en trois termes qui quantifient le changement du niveau de la mer dû à la redistribution de masse récente et en cours ( $NM_{géocentrique}^{RMC}$ ), aux effets stérodynamiques ( $NM^{Stérodynamique}$ ) et enfin à l'ajustement isostatique global ( $NM_{géocentrique}^{AI}$ ) (Eq. 2).

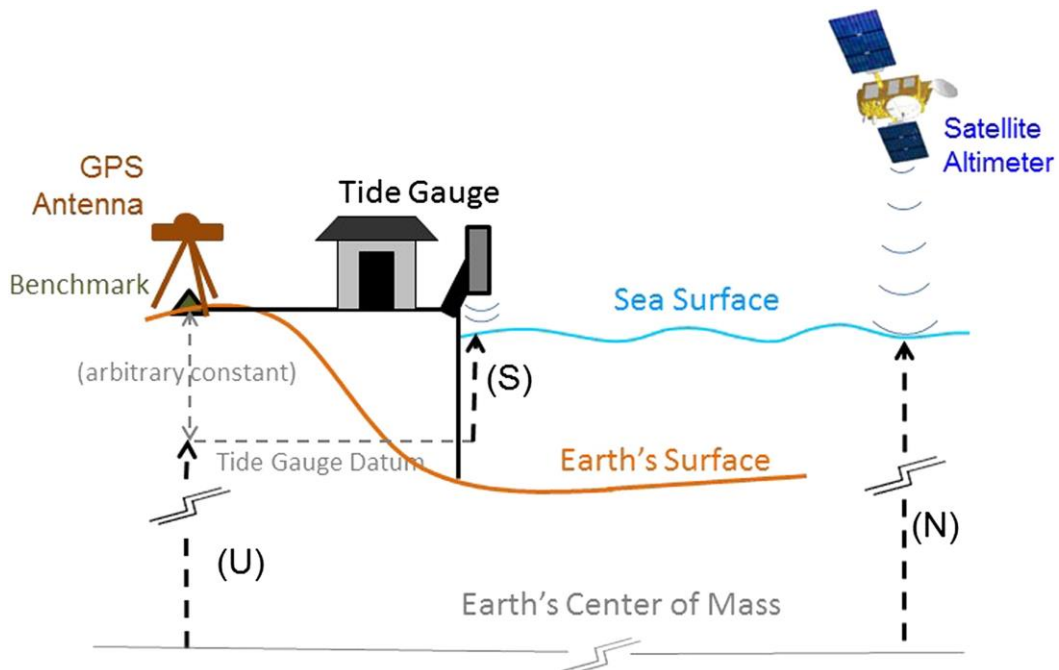


Figure 8 : Méthodes de mesure du niveau de la mer relatif et du niveau de la mer absolu dans le référentiel géocentrique. D'après Wöppelmann & Marcos (2016).

$$NM_{relatif} = NM_{géocentrique} - MVS \text{ (Eq. 1)}$$

$$NM_{relatif} = (NM_{géocentrique}^{RMC} + NM^{Stérodynamique} + NM_{géocentrique}^{AI}) - MVS \text{ (Eq. 2)}$$

La première de ces trois composantes ( $NM_{g\acute{e}ocentrique}^{RMC}$ ) décrit les changements du niveau marin associés aux pertes de masse des glaciers de montagne, des calottes glaciaires Antarctique et Groenlandaise et aux fluctuations de la masse d'eau liquide retenue sur les continents. Les transferts de masse (depuis les continents vers les océans) des sources précédemment énumérées augmentent le volume d'eau de l'océan et donc contribuent à l'élévation du niveau de la mer global. Cependant, l'élévation engendrée n'est pas uniforme spatialement du fait des modifications du champ de gravité, de la rotation terrestre et de la déformation de la Terre solide induites par ces pertes de masses localisées (aussi appelés effets GRD pour Gravitationnel-Rotation-Déformation). Il convient donc de tenir compte de ces changements spatiaux lorsque l'on cherche à reconstruire ou projeter le niveau de la mer à l'échelle régionale. Les empreintes spatiales (« fingerprint » en anglais) décrivant les changements spatiaux de chaque source *RMC* sont obtenues en résolvant l'équation du niveau de la mer (*i.e.* Spada *et al.*, 2019).

Le second terme ( $NM^{St\acute{e}rodynamique}$ ) décrit et quantifie les changements du niveau marin dus aux fluctuations de densité et aux changements de circulation de l'océan, incluant également l'effet du baromètre inverse. Ce terme considère en outre les effets de l'expansion thermique ainsi que les effets de la variabilité dynamique du climat et ses changements à long terme sur le niveau marin.

Enfin, le troisième et dernier terme ( $NM_{g\acute{e}ocentrique}^{AI}$ ) permet de tenir compte de la réponse visco-élastique de la Terre solide à la dernière déglaciation (~14 000/13 000 av JC). Cette composante est aussi appelée ajustement isostatique (GIA pour Glacial Isostatic Adjustment).

Les termes  $NM_{g\acute{e}ocentrique}^{RMC}$  et  $NM_{g\acute{e}ocentrique}^{AI}$  peuvent être décomposés en la somme du niveau marin relatif (càd niveau marin par rapport au plancher océanique) et des mouvements verticaux associés (Eq. 3). Ainsi, en retranchant les mouvements verticaux des contributions *RMC* et *AI* au mouvements verticaux *MVS* mesurés par une station GPS, on détermine les mouvements locaux d'origine non climatiques tels que les phénomènes tectoniques ou la compaction de sédiments.

$$NM_{relatif} = (NM_{relatif}^{RMC} + NM^{St\acute{e}rodynamique} + NM_{relatif}^{AI}) - (MVS - MVS^{RMC} - MVS^{AI}) \text{ (Eq. 3)}$$

### 3.1.2 Projections et reconstruction du niveau marin relatif à partir de modèles climatiques

La Figure 9 illustre les étapes successives qui permettent d'effectuer des estimations rétrospectives ou des projections du niveau de la mer moyen relatif à l'échelle locale à partir de simulations de modèles climatiques.



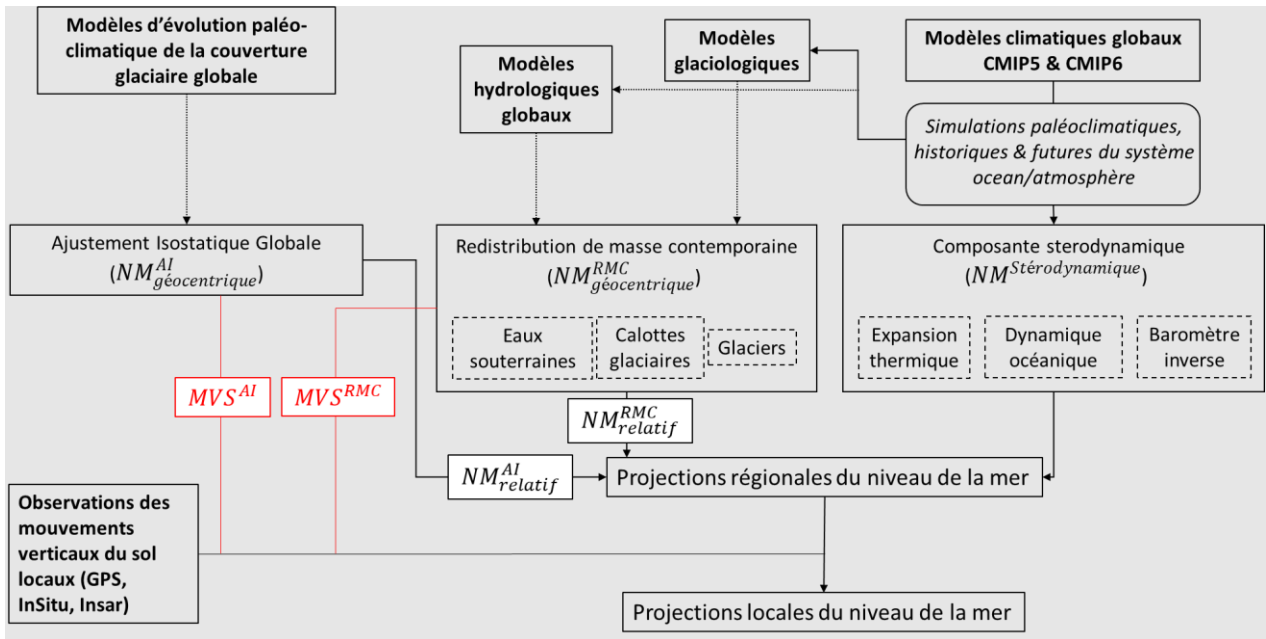


Figure 9 : Schéma résumant les étapes successives permettant d'effectuer des projections locales du niveau de la mer.

### 3.1.2.1 Composante stérodynamique ( $NM^{Stérodynamique}$ )

Les simulations des modèles climatiques couplés océan-atmosphère qui ont participé aux exercices internationaux CMIP5 (Taylor *et al.*, 2012) et CMIP6 (Eyring *et al.*, 2016) permettent directement d'estimer les trois composantes de l'élévation du niveau de la mer qui composent l'effet stérodynamique, à savoir : l'expansion thermique, les changements de circulation océanique et la correction des tendances dues au baromètre inverse (cette dernière a un effet modeste). Un exemple de résultat de projections de la contribution stérodynamique est illustré sur la Figure 10.

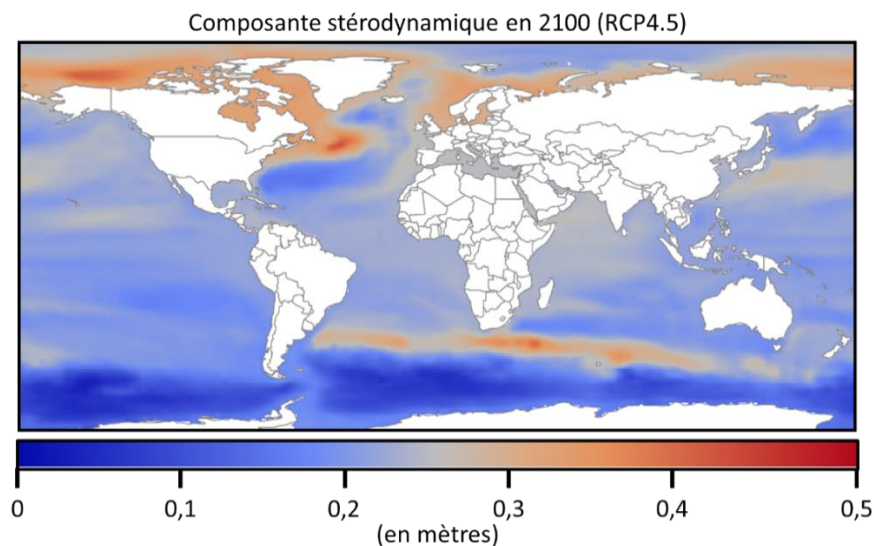


Figure 10 : Exemple de la moyenne de la composante stérodynamique (en m) simulée par l'ensemble de modèles CMIP5 en 2100 (par rapport à la période de référence 1986-2005) selon le scénario climatique RCP4.5. Cette carte a été produite à partir de l'outil <https://sealevelrise.brgm.fr>. La résolution spatiale de la carte est de 1° de longitude x 1° de latitude.



### 3.1.2.2 Composante de masse ( $NM_{relatif}^{RMC}$ )

Dans leur formulation actuelle, les modèles climatiques ne comprennent pas de module glaciologique permettant d'estimer les fontes des glaciers terrestres ou encore des calottes glaciaires en réponse au changement climatique. Pour contourner ce problème, les groupes de modélisation glaciologique effectuent des projections en utilisant les sorties des modèles climatiques (typiquement la température et les précipitations) comme conditions limites pour leurs modèles glaciologiques. Notons que la résolution spatiale des modèles climatiques globaux n'étant pas suffisamment fine (de l'ordre de 1 à 2° en lat/lon) pour représenter les processus locaux qui influencent les fontes des calottes, les projections de températures et précipitations sont généralement affinées localement en effectuant des descentes d'échelles à partir de modèles climatiques régionaux haute résolution et/ou d'outils statistiques.

Les résultats obtenus par les modèles glaciologiques prennent la forme de changements du bilan de masse en surface, localisés par régions et traduits en équivalent niveau marin global. Pour obtenir la régionalisation du changement de niveau marin associé à ces fontes localisées, il faut prendre en compte les effets GRD (cf 3.1.1) qui sont déduits de la résolution de l'équation du niveau de la mer (cf par exemple Spada *et al.*, 2019). Les résultats prennent alors la forme d'empreintes spatiales comme le montre la Figure 11 pour la calotte Arctique et les grands glaciers continentaux. On constate bien que l'élévation du niveau de la mer résultante de ces fontes de glace localisées n'est pas uniformément répartie autour du globe. Une baisse du niveau de la mer (valeurs négatives) est constatée dans un rayon d'environ 2 000 km autour des régions sources, puis une élévation graduelle à mesure que l'on s'éloigne de ces dernières. La Guyane étant située loin des régions sources, l'élévation sera d'autant plus importante.

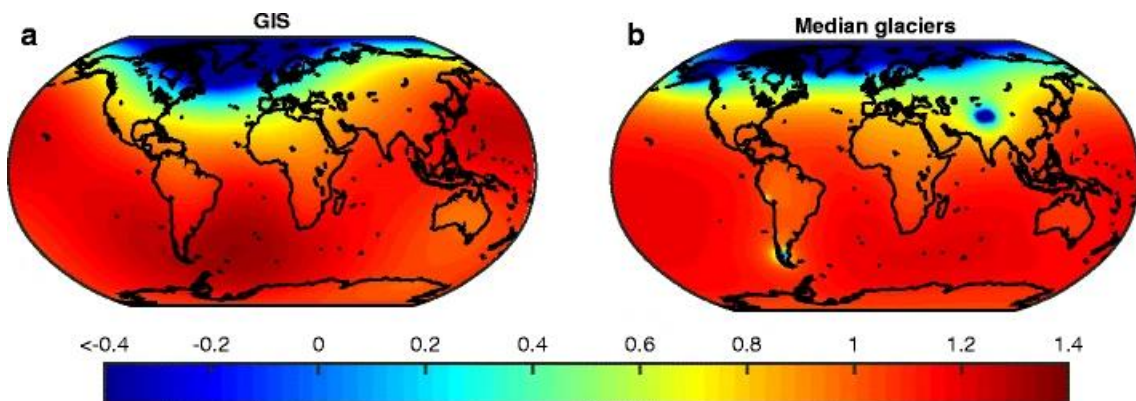


Figure 11 : Empreintes spatiales du niveau de la mer relatif associées aux bilans de masses de (a) la calotte Groenlandaise et (b) les glaciers continentaux. Les valeurs correspondent au rapport entre l'élévation locale et l'élévation globale. D'après Kopp *et al.* (2015).

### 3.1.2.3 L'ajustement isostatique ( $NM_{relatif}^{AI}$ )

L'effet régionalisé du GIA est obtenu par la résolution de l'équation du niveau de la mer utilisée également pour caractériser l'effet régionalisé des transferts de masse contemporains (§3.1.2.2). La différence principale réside dans la prise en compte pour le GIA de l'ajustement visqueux du manteau terrestre aux déglaciations passées. Ce processus opère à relativement long terme (milliers d'années) comparé à la déformation élastique de la Terre solide instantanée (échelle interannuelle) qui est considérée pour le calcul des empreintes spatiales des transferts de masses contemporains (GRD, Figure 11). Il existe plusieurs modèles de GIA qui dépendent du modèle d'évolution de l'épaisseur de glace passée, du modèle radial de la Terre et des données issues d'observations qui sont utilisées pour contraindre le modèle de GIA (Spada *et al.* 2019).

#### 3.1.2.4 Mouvements verticaux du sol locaux

Le dernier terme de l'équation 3 ( $MVS - MVS^{RMC} - MVS^{AI}$ ) correspond à la détermination des mouvements verticaux locaux. Ils sont estimés en retranchant aux observations locales ( $MVS$ ), l'estimation de la déformation de la Terre solide due aux transferts de masses contemporains ( $MVS^{RMC}$ ) et à l'ajustement isostatique ( $MVS^{AI}$ ). Ces deux termes sont estimés à partir d'empreintes spatiales également issues de la résolution de l'équation du niveau de la mer (Frederikse *et al.*, 2019).

#### 3.1.2.5 Validation récente de la méthode

Très récemment, Frederikse *et al.* (2020) ont conduit une étude d'attribution de grande ampleur en développant puis comparant deux reconstructions du niveau marin indépendantes sur l'ensemble de XX<sup>ème</sup> siècle :

- la première est basée sur les observations de marégraphes répartis sur l'ensemble du globe ;
- la seconde combine chaque composante individuelle et son incertitude en suivant, dans un cadre probabiliste, une approche similaire à la méthode décrite ici. Chaque composante est estimée à partir de données *in situ* et, sur la période récente, contrainte par des mesures du satellite GRACE.

Leur étude, effectuée à l'échelle globale mais également à l'échelle de chaque bassin océanique, a permis, pour la première fois sur l'ensemble du XX<sup>ème</sup> siècle, de « fermer le budget » du niveau marin ; *i.e.* qu'en appliquant les 2 méthodes séparément, ils ont obtenu les mêmes estimations de niveau marin et tendances.

### 3.1.3 Données utilisées

Cette section détaille les données (issues d'observations ou de simulations) permettant d'effectuer des reconstructions et des projections du niveau de la mer en Guyane selon la méthode présentée précédemment.

#### 3.1.3.1 Analyse rétrospective du niveau marin relatif en Guyane et validation

Au préalable de la réalisation de projections futures, un exercice de validation des résultats de modèles climatiques est effectué via une analyse rétrospective du niveau marin moyen à l'échelle du territoire. Cette analyse consiste à reconstruire le niveau de la mer historique en Guyane à partir des différentes composantes simulées directement ou indirectement par les modèles climatiques puis de comparer les résultats avec les observations du niveau de la mer.

Le Tableau 1 résume les sources par composante des données modélisées pour l'analyse rétrospective. Les composantes qui dépendent de l'évolution climatique sont directement (contribution stérodynamique) ou indirectement (bilan de masses des glaciers et calotte glaciaires) issues des simulations historiques de l'exercice CMIP5 (couvrant la période 1860-2005). La composante stérodynamique est qualifiée de directe car les quantités, permettant de la calculer, sont extraites des fichiers de sortie des modèles climatiques : la variable *zostoga* quantifie l'expansion thermique globale et la variable *zos* représente le niveau de la mer dynamique. La composante stérodynamique est obtenue en sommant ces deux quantités corrigées de l'effet du baromètre inverse (calculé à partir de la pression atmosphérique au niveau de la mer *psl* également fournie dans les modèles CMIP5) et de la dérive des modèles climatiques, propre à chaque modèle et calculée en utilisant la simulation de contrôle pré-industrielle (Gupta *et al.*, 2013). Les évolutions des bilans de masse des glaciers continentaux et des calottes glaciaires sont obtenues indirectement car ces bilans sont estimés à partir de modèles glaciologiques qui utilisent les résultats des modèles CMIP5 comme conditions limites :

typiquement, les précipitations, l'évaporation et la température de surface. Suivant les recommandations de Slangen *et al.* (2017), des corrections aux bilans de masses des glaciers et de la calotte glaciaire arctique avant 1960 doivent cependant être appliquées.

En plus des composantes listées dans le paragraphe précédent, il convient d'ajouter les composantes non simulées (même indirectement) par les modèles CMIP5 mais qui influencent le niveau marin relatif (Slangen *et al.*, 2014 ; Meyssignac *et al.*, 2017b) : les écoulements dynamiques des calottes, le GIA et les eaux continentales. Les écoulements dynamiques des calottes englobent de nombreux processus tels que :

- le vêlage (ou désagrégation) et la fonte au front glaciaire ou la percolation de l'eau de fonte avec le socle glaciaire au Groënland ;
- l'amincissement puis la rupture de plateformes glaciaires par action soit des bassins d'eau de fonte en surface, soit par entrée d'eau marine plus chaude sur le plateau continental sous-jacent en Antarctique.

Les changements de masse d'eau continentale incluent l'évolution des retenues d'eau au XX<sup>ème</sup> siècle (Chao *et al.* 2008) et le prélèvement des eaux souterraines (Wada *et al.*, 2012 ; 2016 & Döll *et al.*, 2014). Le GIA est enfin basé sur le récent ensemble de simulations de Caron *et al.* (2018).

Composante	Source	Références	Commentaire
Stérodynamique (Stero)	Meyssignac <i>et al.</i> (2017b) ; Slangen <i>et al.</i> (2017)	Slangen <i>et al.</i> (2015)	Somme des variables « zostoga », « zos » corrigées par l'effet du baromètre inverse (variable « psl ») et de l'effet de dérive climatique de chaque modèle. Toutes les simulations historiques CMIP5 sont disponibles à <a href="https://esgf-node.llnl.gov/projects/cmip5/">https://esgf-node.llnl.gov/projects/cmip5/</a> .
Glaciers (Glac)		Marzeion <i>et al.</i> (2012 & 2015)	Modèle de glaciers global forcé par les simulations historiques CMIP5 puis corrigé.
Bilan de masse calotte arctique (SMB-G)		Meyssignac <i>et al.</i> (2017a)	Modèle atmosphérique régional (MARv3.5) forcé par les simulations historiques CMIP5 puis corrigé.
Bilan de masse calotte antarctique (SMB-A)		Slangen <i>et al.</i> (2017)	Estimation du bilan de masse directement à partir des résultats des simulations historiques CMIP5.
Ecoulement dynamiques des calottes (Dyn-G & Dyn-A)		Slangen <i>et al.</i> (2017)	Contribution multi-processus estimée indépendamment des simulations historiques CMIP5.
Eaux continentales (EC)		Chao <i>et al.</i> , (2008) ; Wada <i>et al.</i> , (2012, 2016) ; Döll <i>et al.</i> (2014)	Contribution des retenues d'eau (barrages) et d'extraction des eaux souterraines.
GIA	Frederikse <i>et al.</i> (2020)	Caron <i>et al.</i> (2018)	Ensemble de 128 000 simulations de GIA faisant varier les paramètres de Terre solide (épaisseur lithosphérique et viscosité du manteau) et des modèles de déglaciations passés.

Tableau 1 : Données modélisées utilisées pour la reconstruction du niveau marin historique à partir des résultats de modèles climatiques. Les références bibliographiques dans la colonne « Source » pointent vers les jeux de données tandis que les références bibliographiques dans la colonne « Références » pointent vers les études qui ont conduit au développement des jeux de données.

Chaque composante directe et indirecte a une source commune et cohérente d'un ensemble de simulations historiques réalisées par 14 modèles climatiques : ACCESS 1.3 (Australie), CanESM2 (Canada), CNRM-CM5 (France), CSIRO-mk3.6 (Australie), GFDL-CM3 (Etats-Unis), GFDL-ESM2M (Etats-Unis), GISS-E2-R (Etats-Unis), HadGEM2-ES (Royaume-Uni), IPSL-CM5A-LR (France), IPSL-CM5A-MR (France), MIROC-ESM (Japon), MIROC-ESM-CHEM (Japon), MRI-CGCM3 (Japon) et NorESM1-M (Norvège). L'estimation moyenne de chaque composante est calculée en considérant la moyenne des 14 réalisations et l'incertitude sur cette estimation est représentée par l'écart type de ces 14 réalisations.

Type de donnée	Source	Références	Commentaire
Niveau marin relatif observé	Chroniques marégraphique mensuelles et annuelles d'Ilet la Mère mise à disposition sur la plateforme SONEL ( <a href="https://www.sonel.org/spip.php?page=maregraphe&amp;idStation=3174">https://www.sonel.org/spip.php?page=maregraphe&amp;idStation=3174</a> )	<a href="http://dx.doi.org/10.17183/REFMAR#535">http://dx.doi.org/10.17183/REFMAR#535</a>	Utilisation des données mensuelles & annuelles.
Reconstruction historiques du niveau marin moyen.	Agrégation d'observations historiques pour chaque composante du niveau de la mer. <a href="https://zenodo.org/record/3862995#.YyM8zrTP2Uk">https://zenodo.org/record/3862995#.YyM8zrTP2Uk</a>	Frederikse <i>et al.</i> (2020)	Données annuelles sur l'ensemble du 20 <sup>ème</sup> siècle.

Tableau 2. Jeux de données de reconstructions historiques ou observations.

Les reconstructions historiques modélisées du niveau de la mer moyen relatif en Guyane sont comparées à plusieurs jeux de données de niveau marin listés dans le Tableau 2. Ces derniers sont tous issus de données d'observations, soit directement mesurés, soit reconstruits selon différentes méthodes qui incluent des observations (Frederikse *et al.*, 2020).

Sur la plateforme SONEL, nous utilisons les chroniques de niveau marin annuelles disponibles à quatre stations marégraphiques (Figure 12) : Ile Royale, Ile Royale – Anse Legoff, Dégrad des Canes et enfin Ilet la Mère. Parmi ces chroniques marégraphiques, Ilet la Mère, bien qu'incomplète, est retenue car elle remonte le plus loin dans le passé avec des observations validées depuis 1978 contre 1989 pour Ile Royale – Anse Legoff et Dégrad des Canes. Les résultats de cette comparaison sont présentés dans la section 3.2.2.

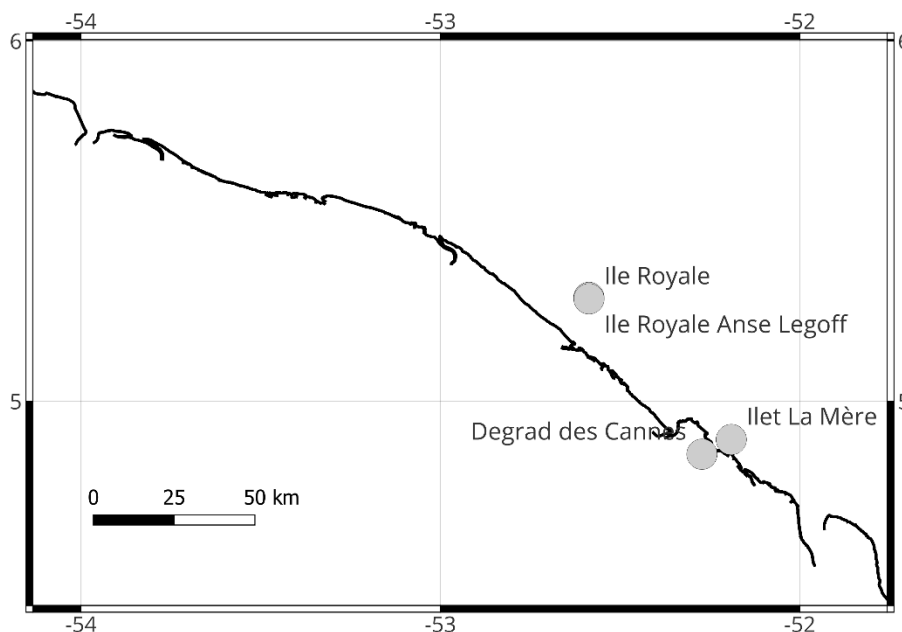


Figure 12 : Localisation des données de niveaux moyens SONEL en Guyane. Coordonnées en WGS84. Trait de côte issu du traitement d'images satellite Sentinel (sept. 2021).

### 3.1.3.2 Projections futures : scénarios du changement climatique

Nous rappelons ici tout d'abord les différents scénarios existants, puis précisons les données utilisées pour estimer les projections futures du niveau marin relatif en Guyane.

L'évolution future du climat terrestre dépend des concentrations de gaz à effet de serre dans l'atmosphère. Ces concentrations futures sont projetées en accord avec des scénarios du changement climatique et servent au forçage des modèles de climat. La Figure 13 montre un exemple de projections de la température globale selon différents scénarios et les incertitudes associées.

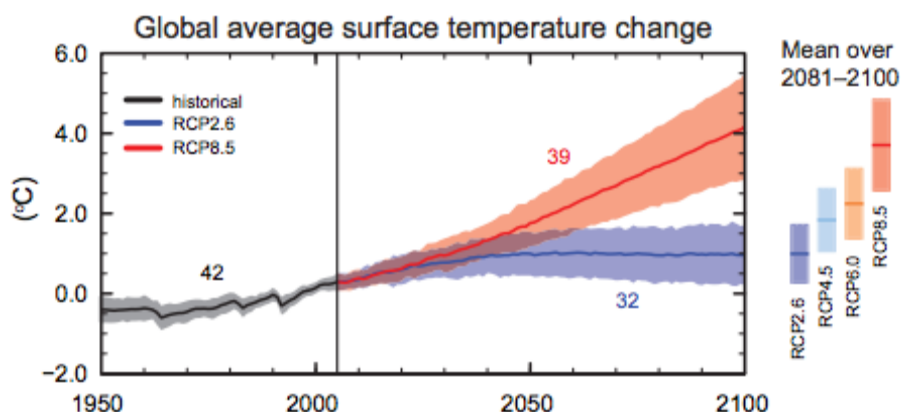


Figure 13 : Changement de la température globale de la Terre aux 21<sup>ème</sup> siècle (par rapport à la période de référence 1986-2005) simulée par les simulations climatiques CMIP5. D'après Church et al. (2013).

#### Scénarios RCPs (Representative Concentration Pathways) :

Le 5<sup>ème</sup> rapport du GIEC (AR5, 2013) et le rapport spécial SROCC (Oppenheimer *et al.*, 2019) sont basés sur les Representative Concentration Pathways<sup>1</sup> (RCPs ; Meinshausen *et al.*, 2011). Le RCP 2.6 est un scénario où la température globale ne devrait vraisemblablement pas excéder 2°C en 2100 par rapport à l'ère préindustrielle, tandis que le RCP 8.5 correspond à une poursuite des émissions de gaz à effets de serre (GES) qui pourrait conduire à une hausse des températures proche de 3 °C à 5 °C en 2100. Le scénario RCP2.6 est très strict quant aux réductions d'émissions de GES et aux mesures d'atténuation du changement climatique ; il est souvent associé aux objectifs de l'accord de Paris. À l'inverse, le scénario RCP8.5 présente un futur dystopique sans aucune régulation des émissions des gaz à effet de serre. Considéré improbable du fait notamment d'hypothèses de croissance de la consommation de charbon qu'il suppose (Ritchie et Dowlatabadi, 2017), ce scénario a pour intérêt d'explorer un futur à haut risque et constitue ainsi une limite supérieure. Les évaluations récentes des politiques d'atténuation du changement climatique conduisent à une hausse de température globale la plus probable de 3 °C à l'horizon 2100 (Hausfather et Peters, 2020). Ces estimations sont cohérentes avec la limite supérieure du scénario intermédiaire RCP4.5.

<sup>1</sup> En Français : trajectoire du forçage radiatif

### Scénarios SSPs (Shared Socioeconomic Pathways) :

Les scénarios SSPs (Shared Socio-economic Pathways<sup>2</sup> ; Riahi *et al.*, 2017) traduisent des ensembles d'hypothèses socio-économiques (Population, Éducation, Urbanisation, PIB). En résumé, les SSP1 et SSP5 envisagent des investissements substantiels dans l'éducation et la santé, une croissance économique rapide et des institutions qui fonctionnent bien. Cependant, le SSP5 suppose une économie basée sur les combustibles fossiles tandis que le SSP1 se base sur une évolution croissante vers des pratiques durables. Les SSP3 et SSP4 envisagent des tendances de développement dans lesquelles les sociétés sont hautement vulnérables au changement climatique. Dans le SSP3, les pays donnent la priorité à la sécurité régionale, tandis que dans le SSP4, les grandes inégalités au sein des pays et entre pays dominant. Le scénario SSP2 envisage une trajectoire intermédiaire dans laquelle les institutions progressent dans l'atteinte des objectifs de développement durable, mais lentement.

Depuis l'AR6 (2021), le GIEC utilise des couples de scénarios SSPs-RCPs qui permettent de mettre en cohérence développements socio-économiques et futurs possibles des facteurs anthropiques du changement climatique. Les principaux scénarios analysés par le GIEC dans l'AR6 sont :

- deux scénarios avec des émissions de GES élevées (SSP3-7.0) et très élevées (SSP5-8.5) ;
- un scénario avec des émissions de GES intermédiaires (SSP2-4.5) ;
- deux scénarios avec des émissions de GES très faibles (SSP1-1.9) et faibles (SSP1-2.6).

### Scénarios « High-end » :

Les projections « high-end » sont des projections à fort impact mais peu probables. Ils impliquent un effondrement de calottes marines en Antarctique. Ce type de scénario a été conceptualisé dans les contextes décisionnels où la tolérance à l'incertitude est faible (par exemple pour la conception d'une centrale nucléaire côtière ; Hinkel *et al.*, 2019), et le rapport du GIEC de 2021 rappelle que ce type de scénario ne peut pas être exclu aujourd'hui dans l'état des connaissances actuelles (IPCC, 2021). Pour GuyaClimat, un scénario high-end a été construit pour le niveau de la mer en Guyane suivant les hypothèses décrites dans Thiéblemont *et al.* (2019) : pour chaque contribution de l'élévation au niveau de la mer, nous considérons l'estimation la plus élevée simulée parmi toutes celles simulées par les modèles physiques.

### **Les projections basées sur le SROCC (scénarios RCP & high-end)**

Les jeux de données utilisés pour la réalisation des projections du niveau de la mer en Guyane et donc pour la caractérisation des zones basses potentiellement exposées aux submersions chroniques sont présentés dans le Tableau 3. Ces projections sont construites sur la base des résultats de modèles et données publiés par le GIEC dans le rapport SROCC (2019). Le choix de nous baser sur le SROCC plutôt que sur le dernier rapport du GIEC AR6 (2021) se justifie car les projections du SROCC utilisent les modèles climatiques de l'exercice CMIP5. Les modèles CMIP5 étant également ceux que nous utilisons pour la validation des reconstructions du niveau de la mer historique en Guyane (§3.1.3.1), cette approche permet de conserver la cohérence entre les analyses rétrospectives et les projections futures. D'autre part, les données de niveau de la mer de l'AR6 sont hybrides (elles mélangent CMIP5 et CMIP6) et des questions restent ouvertes quant à la comprendre et estimer la plausibilité de la plus forte sensibilité climatique des modèles CMIP6 par rapport aux modèles des exercices CMIP précédents (Zelinka *et al.*, 2020). Nous avons ainsi moins de recul sur le jeu de données AR6.

---

<sup>2</sup> En Français : trajectoires socioéconomiques partagées



Notre approche opère toutefois à quelques modifications du jeu de données initial du SROCC. Les éléments les plus significatifs sont détaillés dans cette section.

### Contributions des glaciers, de la calotte glaciaire Arctique et des eaux souterraines :

Les projections du niveau de la mer dans le rapport spécial SROCC du GIEC (Oppenheimer *et al.*, 2019) ont été élaborées à partir des résultats des simulations climatiques futures de l'exercice CMIP5 et d'avis d'experts basés sur la littérature scientifique récente la plus exhaustive possible. Du fait de l'absence de nouvel exercice d'intercomparaison de modèles climatiques (CMIP) entre l'AR5 (2013) et le SROCC (2019), les études additionnelles de projections des différentes composantes du niveau de la mer se sont avérées cohérentes avec les projections initiales de l'AR5 (2013). Le travail de synthèse des auteurs du SROCC a ainsi conduit à conserver les mêmes estimations futures (incertitudes comprises) des contributions glaciers, calotte glaciaire Arctique et eaux souterraines entre l'AR5 et le SROCC. Ces projections régionalisées grâce aux empreintes spatiales calculées par Slangen *et al.* (2014) sont disponibles pour les trois scénarios RCP et l'ensemble du XXI<sup>ème</sup> siècle via le serveur ICDC d'Hambourg (<https://www.cen.uni-hamburg.de/icdc/data/ocean/ar5-slr.html>).

### Contribution stérodynamique :

Dans l'AR5 et le SROCC, les projections de la composante stérodynamique (voir aussi §3.1.2.1) et l'estimation des incertitudes afférentes résultent de la moyenne d'ensemble de 21 modèles<sup>3</sup> CMIP5 pour les scénarios climatiques RCP4.5 et RCP8.5 et 16 modèles pour le scénario climatique RCP2.6. Le scénario RCP2.6 a été moins simulé que les scénarios RCP4.5 et RCP8.5 dans l'exercice CMIP5. Pour l'étude GuyaClimat, nous avons sélectionné 19 modèles parmi 21 (resp. 14 modèles parmi 16) pour les projections RCP4.5/8.5 (resp. RCP2.6). En effet, les travaux de Le Cozannet *et al.* (2019) ont montré que parmi les modèles CMIP5 considérés dans l'AR5 et le SROCC, 2 modèles (MIROC-ESM et MIROC-ESM-CHEM) prédisent une expansion thermique anormalement élevée par rapport aux autres modèles. MIROC-ESM et MIROC-ESM-CHEM sont en conséquence exclus de notre sélection de modèles. Cette modification de l'échantillon de modèles originel du GIEC permet d'aboutir à une distribution normale<sup>4</sup> des projections de la composante stérodynamique et une estimation d'élévation du niveau de la mer moyenne en 2100 de ~2 cm inférieures à la valeur donnée dans le SROCC.

### Contribution de la calotte glaciaires Antarctique :

Depuis la publication de l'AR5 en 2013, la contribution Antarctique au niveau de la mer a été très débattue. Des études (DeConto et Pollard, 2016 ; Bamber *et al.*, 2019) ont alerté sur la possibilité d'un effondrement de la calotte Antarctique qui pourrait considérablement aggraver la contribution de cette dernière à l'élévation du niveau de mer à partir du milieu du XXI<sup>ème</sup> siècle et au-delà. Cette hypothèse repose sur l'éventualité d'instabilités mécaniques MISI (Marine Ice Sheet Instability ou « instabilité des calottes marines ») et MICI (Marine Ice Cliff Instability ou « instabilité des falaises marines ») qui pourraient expliquer des effondrements de l'Antarctique de l'ouest au cours de la dernière période interglaciaire (Vaughan, 2008). Le MISI est un recul autoentretenu de la ligne d'échouage (lieu où la glace continentale commence à flotter sur l'océan) dans les

<sup>3</sup> Liste des modèles : BCC-CSM1-1, MIROC5, MRI-CGCM3, ACCESS1-0, IPSL-CM5A-MR, HadGEM2-CC, MPI-ESM-MR, GFDL-ESM2G, MIROC-ESM-CHEM, CNRM-CM5, CSIRO-Mk3-6-0, IPSL-CM5A-LR, NorESM1-ME, INMCM4, HadGEM2-ES, MIROC-ESM, GFDL-ESM2M, MPI-ESM-LR, NorESM1-M, canESM2, GISS-E2-R.

<sup>4</sup> La fonction de densité de probabilités de la loi normale a la forme d'une courbe en cloche symétrique et est centrée sur la moyenne : elle décrit généralement les phénomènes naturels issus d'événements aléatoires.

régions où le socle rocheux s'abaisse vers l'intérieur des terres. Des études basées sur des observations satellitaires et des résultats de modélisation (Joughin *et al.*, 2014 ; Rignot *et al.*, 2014) suggèrent que l'instabilité MISI pourrait être en cours sous l'impulsion des eaux relativement plus chaudes de la circulation circumpolaire profonde. La théorie du MICI propose un recul autoentretenu du front de glace dans les zones où il se trouve à 100 m ou plus au-dessus de la surface de l'océan, une situation qui nécessite au préalable la disparition totale de la plateforme de glace flottante. Le MICI est cependant encore débattu car il n'a pas été observé à l'ère moderne sur une calotte de glace marine et il n'est pas encore clair si ce mécanisme est vraiment nécessaire pour reproduire les variations du niveau de la mer dans le passé géologique (Edwards *et al.*, 2019).

Les projections du SROCC ont révisé la composante Antarctique à la hausse pour le scénario RCP8.5 par rapport à l'AR5. Cette nouvelle estimation, qui combine les études Levermann *et al.* (2014), Golledge *et al.* (2015 & 2019), Ritz *et al.* (2015) et Bulthuis *et al.* (2019), inclut le MISI mais pas le MICI jugé trop incertain. Ainsi, pour le scénario RCP8.5, la contribution antarctique à l'élévation du niveau de la mer en 2100 a augmenté de près de 10 cm par rapport à l'AR5. Nos projections de la contribution de l'Antarctique se sont basées sur ces nouvelles estimations du SROCC et ont été régionalisées à partir des « empreintes spatiales » calculées par Slangen *et al.* (2014).

Type de donnée	Sources	Références	Commentaire
Projections IPCC-SROCC (2019)	- ICDC Hamburg ( <a href="https://www.cen.uni-hamburg.de/en/icdc/data/ocean/ar5-slr.html">https://www.cen.uni-hamburg.de/en/icdc/data/ocean/ar5-slr.html</a> ) - SROCC report Chapter 4 sup. mat.	- Church <i>et al.</i> (2013) - Oppenheimer <i>et al.</i> (2019)	Projections basées sur les résultats des modèles climatiques CMIP5 et dire d'experts avec prise en compte du processus MISI.
Projections IPCC-AR6 (2021)	<a href="https://sealevel.nasa.gov/ipcc-ar6-sea-level-projection-tool">https://sealevel.nasa.gov/ipcc-ar6-sea-level-projection-tool</a>	- Fox-Kemper, B <i>et al.</i> (2021)	Projections basées sur les résultats des simulations CMIP5 & CMIP6 et dire d'experts. Le MICI est utilisé pour les projections à confiance basse.
Empreintes spatiales (ou « fingerprint »)	ICDC Hamburg ( <a href="https://www.cen.uni-hamburg.de/en/icdc/data/ocean/ar5-slr.html">https://www.cen.uni-hamburg.de/en/icdc/data/ocean/ar5-slr.html</a> )	- Slangen <i>et al.</i> (2014)	Obtenus par résolution de l'équation du niveau de la mer en considérant la rotation terrestre et une Terre solide élastique.
Mouvements verticaux observés	Observations GPS distribuées par SONEL et traitées par les solutions ULR, NGL, JPL & GFZ <a href="https://www.sonel.org/-Vertical-land-movements-.html?lang=en">https://www.sonel.org/-Vertical-land-movements-.html?lang=en</a>	- Gravelle <i>et al.</i> (2022) - Blewitt <i>et al.</i> (2016) - Heflin <i>et al.</i> (2020) - Deng <i>et al.</i> (2015)	
Mouvements verticaux modélisés (GIA & GRD)	<a href="https://zenodo.org/record/3862995#.YyM8zrTP2Uk">https://zenodo.org/record/3862995#.YyM8zrTP2Uk</a>	- Frederikse <i>et al.</i> (2019)	

Tableau 3 : Jeux de données pour les projections du niveau marin



## Les projections AR6 (scénarios SSP)

En plus des projections de l'élévation du niveau de la mer selon les scénarios RCP dérivées du SROCC, nous avons effectué, à titre de comparaison, des projections SSPs émanant de l'AR6. Les projections régionalisées de l'AR6 sont élaborées suivant une méthode similaire et cohérente à celle de l'AR5 et du SROCC. Les différences principales avec le SROCC pour les projections jusqu'en 2100 sont :

- l'utilisation des nouvelles simulations CMIP6 pour la composante stérodynamique ;
- la prise en compte des résultats des exercices d'intercomparaison de modèles de glaciers (GlacierMIP, Marzeion *et al.*, 2020) et de calottes (ISMIP6, Nowicki *et al.*, 2020) ;
- le recours à des émulateurs pour la combinaison des différentes simulations (Edwards *et al.*, 2021) ;
- l'estimation des mouvements verticaux du sol à partir d'un traitement statistique des données marégraphiques mondiales (Kopp *et al.*, 2017).

## Mouvements verticaux du sol

Les mouvements verticaux du sol sont caractérisés par les observations des stations GPS (ou GNSS) de Kourou (période 1992-présent) et Cayenne (période 2006-2016). Les tendances des quatre solutions ULR (Université de la Rochelle), NGL (Nevada Geodetic Laboratory), JPL (Jet Propulsion Laboratory) et GFZ (GeoForschungsZentrum) sont calculées pour la station de Kourou, tandis que seules les solutions ULR et NGL le sont à la station de Cayenne. Pour la caractérisation des mouvements verticaux dus au GIA et au fontes contemporaines, les résultats et données associées de Frederikse *et al.* (2019) sont utilisés (Tableau 3).

## Désignation des incertitudes et terminologie

Dans ce rapport le calcul d'incertitudes sur les projections du niveau de la mer suit la méthode décrite dans l'AR5 et le SROCC. Ainsi, l'incertitude sur le niveau de la mer est estimée en prenant en compte les incertitudes de chaque composante individuelle selon l'équation suivante :

$$\sigma_{NM} = [(\sigma_{Stero} + \sigma_{SMB-G} + \sigma_{SMB-A})^2 + \sigma_{Glac}^2 + \sigma_{EC}^2 + \sigma_{DYN-G}^2 + \sigma_{DYN-A}^2 + \sigma_{GIA}^2]^{1/2} \text{ (Eq. 4)}$$

Notons que la composante stérodynamique et les bilans de masse de surface des calottes étant corrélés à l'évolution de la température terrestre globale, leurs incertitudes (notées  $\sigma$ ) ne peuvent être considérées comme indépendantes. Pour tenir compte de cette corrélation, le GIEC (AR5 & SROCC) préconise d'ajouter ces incertitudes<sup>5</sup> linéairement comme indiqué dans l'équation 4.

Dans la suite du rapport, la terminologie du GIEC concernant les projections et leurs incertitudes est adoptée. Ainsi, le terme « médiane » désigne la projection centrale ou « meilleure estimation » de chaque scénario (voir le trait plein sur la Figure 13). Les incertitudes sont désignées par des degrés de confiance dans des intervalles ; par exemple « virtuellement certain », « très probable », « probable ». Pour l'étude, nous nous concentrons sur l'intervalle « probable » (« likely-range » en anglais) qui est défini comme ayant une probabilité supérieure à 66 % (66 %-100 %). Dans ce qui suit, pour chaque scénario nous déterminons et utilisons la médiane et les limites hautes et basses de l'intervalle « probable ».

---

<sup>5</sup> Les incertitudes des composantes issues directement des sorties de modèles climatiques correspondent à la déviation standard de l'ensemble (i.e. pour la composante stérodynamique). Pour les autres composantes, l'incertitude correspond à l'erreur standard fournie dans les jeux de données ; elle combine la variabilité interne, l'incertitude sur l'amplitude du changement climatique et les erreurs méthodologiques.

## 3.2 RÉSULTATS

### 3.2.1 Caractérisation des mouvements verticaux du sol

La Figure 14b présente un exemple de série temporelle de mouvement vertical du sol entre 2000 et 2020 mesuré par la station GPS « KOUR » localisée au nord du centre spatial guyanais (Figure 14a). Ici, la solution ULR7A (solution fournie par l'Université de la Rochelle depuis l'été 2022) est utilisée pour cet exemple. La série temporelle montre que les mouvements verticaux fluctuent à différentes échelles de temps affichant d'une part un cycle saisonnier et d'autre part des variations à plus grande échelle de temps comme le suggèrent les alternances de périodes pluri-annuelles de subsidence et surrection entre 2000 et 2010. Ces fluctuations complexifient l'identification de tendances à long terme et sont prises en compte par les méthodes statistiques de calcul de tendances élaborées pour les solutions indépendantes ULR, NGL, JPL et GFZ. Les six traits verticaux indiquent une difficulté supplémentaire qui est l'existence de discontinuités dans les mesures GPS, pouvant par exemple être dues à des changements ou dysfonctionnements de matériel, des tremblements de terre ou encore des changements de référencements. Ces discontinuités constituent une source d'erreur importante et sont considérées dans le calcul de tendances.

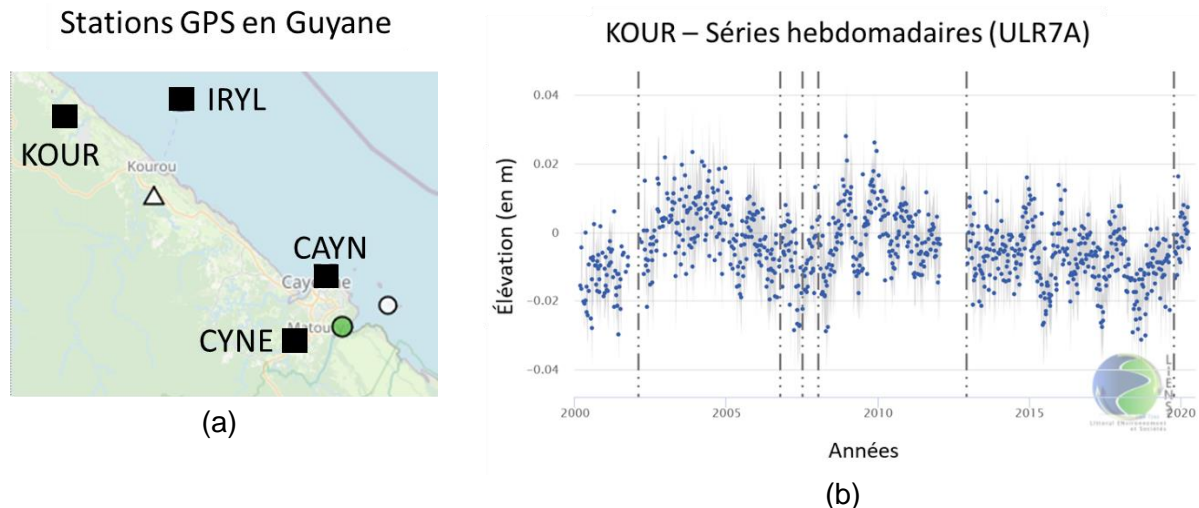


Figure 14 : Stations GPS en Guyane. (a) Carte de positionnement des stations GPS en Guyane. (b) Exemple de série temporelle (hebdomadaire) des changements d'élévations mesurés par le GPS Kourou selon la solution ULR7A. Source : SONEI.

Les résultats des mesures des mouvements verticaux enregistrés aux quatre stations GPS disponibles sur le portail SONEI sont présentés dans le Tableau 4. Notons que seule la station de Kourou dispose de tendances pour les quatre solutions. Elle présente également la série temporelle la plus longue en Guyane avec plus de 30 ans de mesures. À l'inverse, les mesures de la station CYNE localisée au sud-ouest de Cayenne ne sont traitées que par la solution NGL14 et la série est trop courte pour en déduire une tendance. Pour la station GPS de Kourou, les quatre solutions indiquent une subsidence allant de  $-0.39$  mm/an pour ULR7A à  $-1.96$  mm/an pour NGL14. Les intervalles d'erreurs montrent que les subsidences obtenues par les solutions ULR7A et GT2 ne sont pas significativement différentes de zéro, contrairement aux solutions NGL14 et JPL14. À la station d'Île Royale, les estimations des deux solutions ULR7A et NGL14 sont cohérentes mais ne permettent pas de conclure à de la subsidence compte tenu des larges marges d'erreurs sur les tendances calculées. Enfin, à la station CAYN, les observations semblent plutôt indiquer une surrection bien qu'à nouveau les marges d'erreurs sur les estimations et l'écart entre les deux solutions soient trop importantes pour confirmer cette tendance.

Station		KOUR	IRYL	CAYN	CYNE
Position		52.806°O 5.252°N	52.587°O 5.285°N	52.310°O 4.949°N	52.365°O 4.822°N
Dates		Depuis 18/10/1992	27/09/2013- 16/05/2022	16/09/2005- 29/08/2016	Depuis 23/10/2019
Vitesse verticale (mm/an)	ULR7A	-0.39 +/- 0.90	-0.37 +/- 1.30	0.11 +/- 1.63	-
	NGL14	-1.96 +/- 0.68	-0.65 +/- 1.25	1.11 +/- 1.24	Non robuste
	JPL14	-1.24 +/- 0.16	-	-	-
	GT2	-0.50 +/- 0.80	-	Non robuste	-

Tableau 4. Vitesses de déplacement vertical (en mm/an) enregistrées par les stations GPS situées à Kourou, Ile Royale et à Cayenne (les 2 stations CAYN-Montabo et CYNE-Cayenne) selon les quatre solutions indépendantes ULR7A, NGL14, JPL14 et GT2. Source des données : SONEL.

Pour obtenir les tendances des mouvements verticaux dues aux phénomènes locaux et les intégrer dans les projections du niveau marin relatif, les contributions des effets du GRD et GIA à la déformation de la terre solide doivent être retranchées. Un exemple de l'évolution temporelle de ces deux contributions à Kourou est montré sur la Figure 15. La tendance du GRD est estimée en effectuant une régression linéaire par la méthode des moindres carrés ordinaires. Les deux contributions montrent une subsidence faible :  $-0.24 \pm 0.17$  mm/an pour le GIA et  $-0.16 \pm 0.08$  mm/an pour le GRD. Ces tendances faibles ne sont pas surprenantes du fait de la grande distance qui sépare la Guyane des régions glaciaires et post-glaciaires.

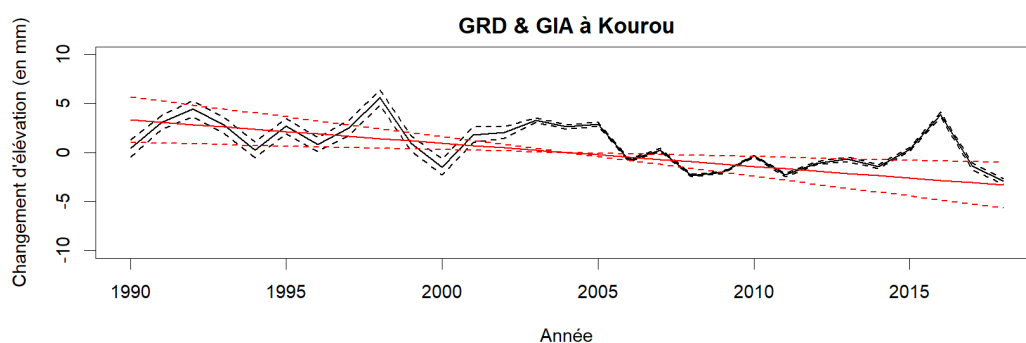


Figure 15 : Évolution temporelle annuelle des mouvements verticaux du sol associés au GIA (rouge) et au GRD (noir) à l'endroit de la station GPS de Kourou (Figure 14a). L'intervalle de confiance de 68 % (ou  $1\sigma^6$ ) est représenté en trait pointillé. Le GIA est donné sous forme de tendance linéaire ayant pour référence l'année 2004.

La Figure 16 résume l'analyse des tendances des mouvements verticaux du sol aux trois stations GPS guyanaises analysées. La soustraction des effets de subsidence du GIA et du GRD aux tendances dérivées des GPS a une faible influence sur l'estimation des tendances dues aux mouvements verticaux locaux du sol. Les résultats suggèrent :

- une stabilité des mouvements verticaux locaux à l'île Royale ;
- des indices de subsidence résiduelle à Kourou pouvant atteindre  $-2$  mm/an en considérant la marge d'incertitude de la solution NGL14. Deux solutions GPS (ULR7A et GT2) indiquent à l'inverse une très nette stabilité ;
- des indices de surrection résiduelle pouvant atteindre presque  $2$  mm/an pour une solution GPS (NGL14) sur les deux disponibles à Cayenne.

<sup>6</sup>Les intervalles de confiances 68 % ou 95 % (respectivement 1 ou 2 sigmas) signifient que pour une distribution normale, presque toutes les valeurs se situent dans un intervalle centré autour de la moyenne et dont les bornes se situent à respectivement 1 ou 2 écarts-types de part et d'autre.

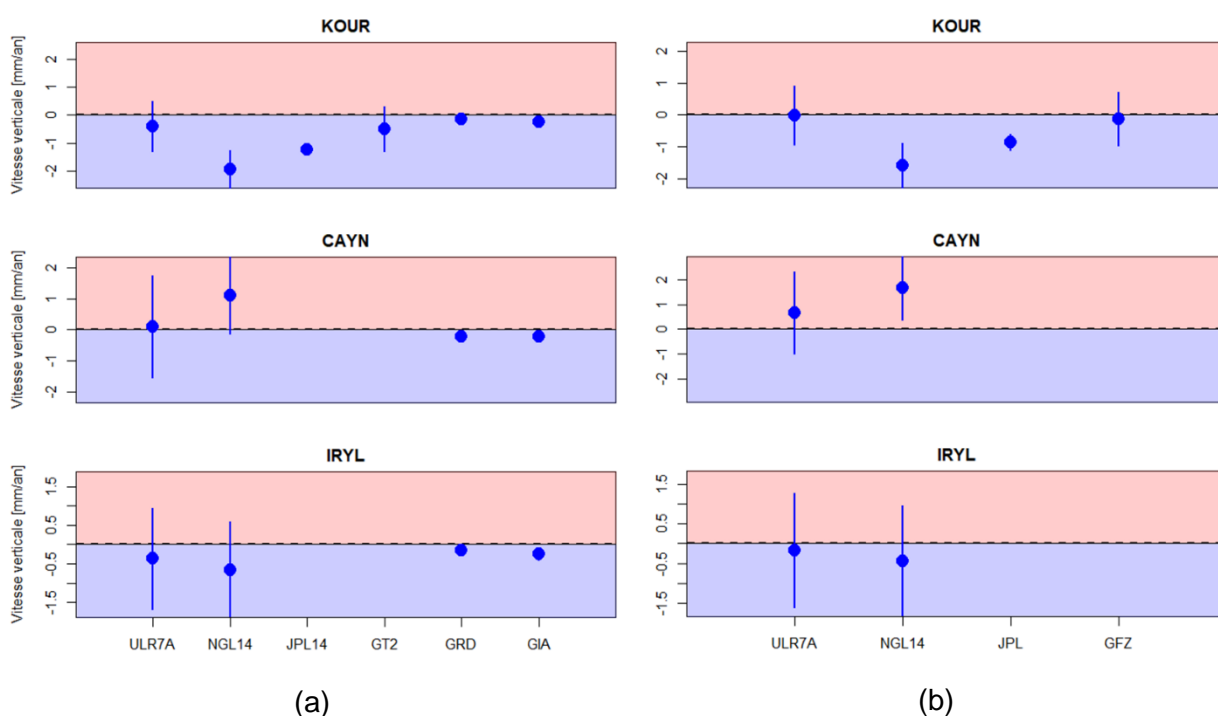


Figure 16 : (a) Vitesses verticales (en mm/an) à Kourou, Cayenne et Ile Royale mesurées par les GPS pour les solutions ULR7A, NGL14, JPL14 et GT2 et modélisées pour les contributions du GRD et GIA. (b) Estimation des vitesses verticales locaux pour chaque solution après retranchement des contributions du GRD et du GIA. Les barres verticales indiquent l'intervalle de confiance de 68%.

En résumé, l'analyse des mouvements verticaux à l'aide des observations GPS en Guyane ne permet pas de conclure à une tendance claire car (i) les marges d'erreur sur les tendances calculées par les différentes solutions GPS sont importantes (et globalement supérieures à l'estimation centrale) mais également (ii) car les disparités des estimations pour une même station entre les différentes solutions sont encore plus importantes. Ce dernier point est le plus critique car il suggère que les différents outils statistiques et approches utilisés pour le traitement des données GPS par les organismes de recherche (ULR, JPL, etc) sont une source d'erreur importante pour l'estimation des mouvements verticaux sur notre zone d'étude. Des travaux ont en effet montré que les tendances calculées peuvent être sensibles aux algorithmes de régression utilisés ou aux méthodes de traitement des discontinuités (Mazotti *et al.*, 2020). Ainsi, en l'absence d'éléments objectifs qui permettent de privilégier une solution par rapport à une autre, nous accordons un poids égal à chaque solution. Ce faisant, notre analyse suggère que les mouvements verticaux locaux sont plus probablement très faibles, mais que l'on ne peut exclure la possibilité de tendances allant de -2 à 2 mm/an. Les scénarios d'élévation du niveau de la mer définis par la suite incluent cette source d'incertitude.

Notons enfin que nos estimations déduites des mesures GPS sur de courtes période de temps (quelques dizaines d'années) sont cohérentes avec les résultats de Palvadeau (1999) qui suggèrent des alternances de périodes de subsidence et surrection sur de longues périodes de temps (de la dizaine à la centaine de milliers d'années) ne dépassant pas 2 mm/an. Globalement, l'analyse de Palvadeau (1999) sur le très long terme conclut plutôt à une surrection de la plaine côtière guyanaise de faible amplitude.

### 3.2.2 Reconstruction historique du niveau de la mer en Guyane

Afin de valider notre méthode, nous avons réalisé une comparaison entre les reconstructions historiques et observations du niveau de la mer à l'endroit du marégraphe d'Ilet la mère (52.19°W/4.89°N). Les résultats sont montrés Figure 17.

Les niveaux moyens annuels issus des observations marégraphiques sont représentés (rose foncé) ainsi que la régression polynomiale d'ordre 2 associée (rose clair). Notons également que les simulations CMIP5 historiques se terminant en 2005, le jeu de données permettant de réaliser les projections du niveau de la mer (Tableau 3) est utilisé au-delà de l'année 2006 (trait bleu). Sur la période de 40 années d'observations marégraphiques (1978-2018), la tendance à long-terme de la reconstruction basées sur les modèles CMIP5 (courbe noire puis bleue) est très cohérente avec la tendance déduite du marégraphe. On obtient une élévation du niveau marin moyen de près de 10 cm entre 1980 et 2015, soit environ 2.5 mm/an. La régression polynomiale d'ordre 2 permet de déceler l'accélération progressive de l'élévation du niveau de la mer et est en bon accord avec la reconstruction issue des simulations CMIP5 comme l'indique la superposition des courbes noires/bleues et rose claire. Sur la période 1993-2018, le niveau marin moyen à Ilet la Mère s'est élevé de près de 3.2 mm/an. Cette estimation est similaire à l'élévation du niveau marin global sur la même période (Frederikse *et al.*, 2020).

#### Évolution du niveau marin moyen à IMERE

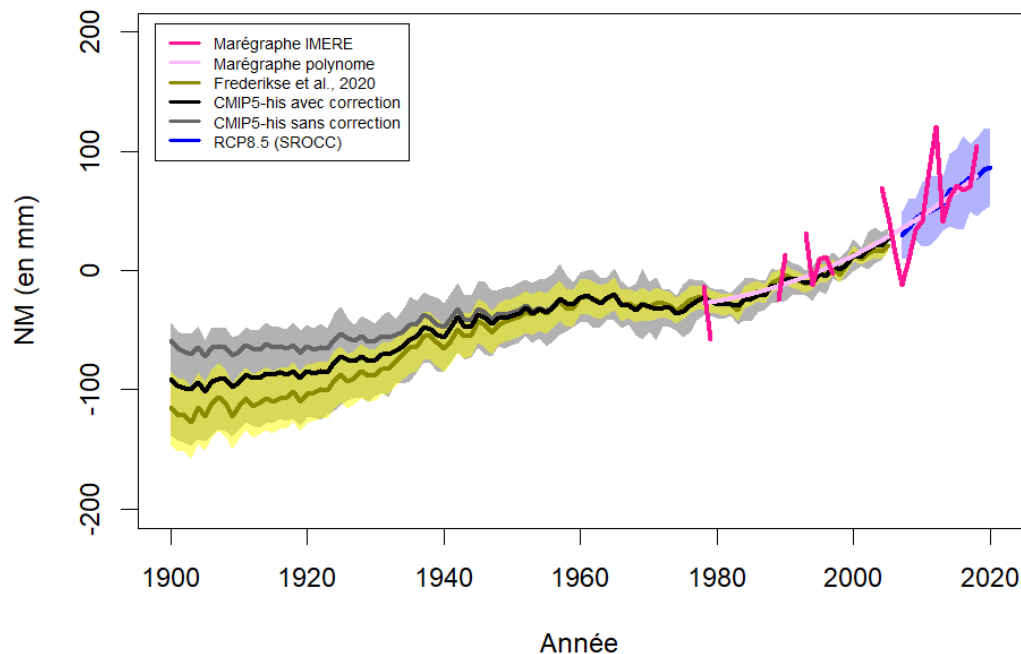


Figure 17 : Reconstruction historique et observation du niveau de la mer relatif à Ilet la Mère entre 1900 et 2020. La période de référence définie et commune aux jeux de données est 1990-2000.

Les enveloppes grises et jaunes délimitent respectivement l'intervalle vraisemblable (CMIP5) et l'intervalle de confiance 90 % (Frederikse *et al.*, 2020). Les reconstructions considèrent que le sol est stable (absence de mouvements verticaux), comme le suggèrent les résultats de la section §3.2.1.

Les observations marégraphiques montrent également de fortes fluctuations interannuelles du fait de la variabilité naturelle du climat. De telles variations n'apparaissent pas dans les reconstructions car ces dernières sont construites en moyennant des ensembles de simulations. Ainsi, bien que chaque réalisation de modèle simule sa propre variabilité naturelle climatique (ou intrinsèque), celle-ci (pouvant être assimilée à un bruit statistique) sera écrasée sous l'effet du moyennage de l'ensemble mais contribuera à l'élargissement de l'enveloppe d'incertitude. Ici,

l'enveloppe d'incertitude est calculée selon l'équation 4 et englobe une grande partie des fluctuations interannuelles mesurées par le marégraphe.

Sur la période 1900-1970, nous ne disposons pas de mesures directes du niveau de la mer en Guyane, mais seulement de reconstructions historiques issues d'observations telles que celles de Frederikse *et al.* (2020). L'accord entre la reconstruction issue d'observations (courbe dorée, cf. §3.1.2.5) et celle issues des modèles CMIP5 (courbe noire) est bon à partir de 1950. Il est intéressant de noter un palier temporaire au milieu du XX<sup>ème</sup> siècle dû à l'augmentation des retenues d'eau artificielles (Frederikse *et al.*, 2020). Sur la première moitié du XX<sup>ème</sup> siècle, les deux reconstructions divergent. Cette divergence s'accroît à mesure que l'on remonte dans le temps. Des études dédiées à la validation des bilans de masses glaciaires ont révélé que les résultats des simulations historiques CMIP5 sous-estiment les contributions des glaciers (Marzeion *et al.*, 2012, 2015) et de la calotte glaciaire arctique (Slangen *et al.*, 2017) à l'élévation du niveau de la mer avant 1960. Bien que les causes de ces sous-estimations soient multiples, les auteurs suggèrent que les raisons principales pourraient venir (i) des simulations historiques qui ne permettent pas de reproduire la variabilité climatique « réelle » (seulement ses tendances) et (ii) de la mise en évidence de biais dans les modèles climatiques impactant la circulation de masses d'air au niveau du sud Groenland. Les corrections recommandées par Slangen *et al.* (2017) et appliquées aux contributions des glaciers et de la calotte glaciaire arctique (courbe noire pleine comparées à la courbe grise foncée) permettent de réduire l'écart entre les deux types de reconstructions.

Le très bon accord entre les observations marégraphiques du niveau marin relatif en Guyane et sa reconstruction à partir des simulations historiques appuie la validité de notre méthode ainsi que les performances des modèles CMIP5 en vue de la réalisation de projections. Les résultats des projections sont décrits dans la section qui suit.

### 3.2.3 Projections du niveau de la mer en Guyane

Le Tableau 5 donne les valeurs par contribution des projections du niveau marin moyen en Guyane en 2050 et 2100 pour les différents scénarios RCPs selon la méthode décrite en §3.1.2 et les données détaillées en §3.1.3. Les estimations globales en 2100 issues du rapport du SROCC (Oppenheimer *et al.*, 2019) sont ajoutées à titre de comparaison. La Figure 18 montre les projections du niveau marin relatif en Guyane au XXI<sup>ème</sup> siècle pour les scénarios RCPs 2.6, 4.5, 8.5 et high-end, et l'effet de la prise en compte des mouvements verticaux du sol locaux.

À l'horizon temporel 2050, les scénarios RCPs projettent une élévation médiane (par rapport à la période de référence 1986-2005) allant de 24 cm à 28 cm avec un intervalle « probable » (cf §3.1.3.2) de 6 à 7 cm autour de cette valeur médiane indépendamment du scénario. En d'autres termes, l'élévation du niveau de la mer projetée jusqu'en 2050 est peu sensible au scénario climatique. Cette élévation projetée est dominée par la composante stérodynamique, suivie des glaciers, tandis que les composantes restantes contribuent à la marge. Pour le scénario high-end, la projection en 2050 atteint la partie supérieure de l'intervalle vraisemblable des scénarios RCPs avec une contribution des effets dynamiques antarctiques déjà marquée (8 cm).

En 2100, la divergence entre le scénario RCP8.5 et les scénarios RCP2.6 et 4.5 est nettement prononcée. Les scénarios RCP2.6 et 4.5 affichent des élévations de 46+/-17 cm et 54+/-19 cm, respectivement, tandis que le RCP8.5 atteint une élévation médiane de 84 cm. Ces valeurs sont très proches des estimations globales. Notons que l'intervalle de vraisemblance du scénario RCP8.5 affiche également une asymétrie avec une inflation de la borne supérieure conséquente aux incertitudes associées à la contribution des effets dynamiques en Antarctique. Pour les trois

scénarios RCPs, la contribution dominante reste la composante stérodynamique, suivie des glaciers. Pour le scénario RCP8.5, les contributions des calottes glaciaires ont un poids plus important que pour les RCP2.6 et 4.5. Le bilan de masse en surface en Antarctique est la seule contribution négative qui peut se comprendre comme une accumulation de masse consécutive à des chutes de neige plus importantes dans un climat plus chaud non compensée par l'augmentation des processus de fonte en surface. Le scénario high-end montre qu'en considérant la valeur la plus élevée simulée physiquement par les modèles les plus impactants pour chaque contribution, on ne peut exclure une élévation de plus de 2 m en 2100 compte tenu de la connaissance scientifique actuelle. Ce scénario est évidemment très improbable et repose en grande partie sur l'hypothèse d'un effondrement accéléré de la calotte antarctique via le processus MICI (DeConto et Pollard, 2016) qui reste encore très débattu.

SROCC	RCP2.6	RCP4.5	RCP8.5	High-end
<b>2050</b>				
Stérodynamique	0.11 [0.09 ; 0.13]	0.11 [0.09 ; 0.12]	0.12 [0.10 ; 0.14]	0.13
Glaciers	0.06 [0.03 ; 0.09]	0.06 [0.03 ; 0.09]	0.07 [0.04 ; 0.10]	0.06
Groenland (BMS)	0.01 [0.00 ; 0.03]	0.01 [0.00 ; 0.03]	0.02 [0.01 ; 0.04]	0.02
Groenland (DYN)	0.02 [0.01 ; 0.02]	0.02 [0.01 ; 0.02]	0.02 [0.01 ; 0.03]	0.02
Antarctique (BMS)	-0.01 [-0.02 ; -0.]	-0.01 [-0.02 ; -0.]	-0.01 [-0.02 ; 0.]	0
Antarctique (DYN)	0.03 [0. ; 0.07]	0.03 [0. ; 0.07]	0.05 [0.01 ; 0.10]	0.08
Eaux continentales	0.02 [0. ; 0.04]	0.02 [0. ; 0.04]	0.02 [0. ; 0.04]	0.02
GIA	0. [-0.01 ; 0.01]	0. [-0.01 ; 0.01]	0. [-0.01 ; 0.01]	0.
<b>Guyane 2050</b>	<b>0.24 [0.18 ; 0.31]</b>	<b>0.24 [0.18 ; 0.31]</b>	<b>0.28 [0.21 ; 0.36]</b>	<b>0.34</b>
<b>2100</b>				
Stérodynamique	0.17 [0.13 ; 0.20]	0.21 [0.18 ; 0.24]	0.33 [0.29 ; 0.38]	0.39
Glaciers	0.11 [0.05 ; 0.17]	0.13 [0.07 ; 0.20]	0.18 [0.10 ; 0.26]	0.29
Groenland (BMS)	0.03 [0.01 ; 0.08]	0.05 [0.02 ; 0.11]	0.10 [0.04 ; 0.22]	0.23
Groenland (DYN)	0.04 [0.01 ; 0.06]	0.04 [0.01 ; 0.06]	0.05 [0.02 ; 0.08]	0.11
Antarctique (BMS)	-0.02 [-0.05 ; -0.01]	-0.03 [-0.07 ; -0.01]	-0.05 [-0.10 ; -0.02]	0
Antarctique (DYN)	0.10 [-0.02 ; 0.22]	0.10 [-0.02 ; 0.22]	0.18 [0.02 ; 0.42]	0.92
Eaux continentales	0.05 [-0.02 ; 0.11]	0.05 [-0.02 ; 0.11]	0.05 [-0.02 ; 0.11]	0.11
GIA	-0.01 [-0.03 ; 0.02]	-0.01 [-0.03 ; 0.02]	-0.01 [-0.03 ; 0.02]	-0.01
<b>Guyane 2100</b>	<b>0.46 [0.29 ; 0.64]</b>	<b>0.54 [0.35 ; 0.73]</b>	<b>0.84 [0.59 ; 1.17]</b>	<b>2.05</b>
<b>Global 2100</b>	<b>0.43 [0.29 ; 0.59]</b>	<b>0.55 [0.39 ; 0.72]</b>	<b>0.84 [0.61 ; 1.10]</b>	<b>-</b>

Tableau 5 : Valeurs (en m) détaillées par contribution des projections du niveau marin moyen en Guyane selon les scénarios climatiques RCP2.6, RCP4.5, RCP8.5 et « High-end » en 2050 et 2100. Les projections sont calculées en terme d'écart par rapport à la période de référence 1986-2005.

Le détail des différentes contributions montre, comme attendu d'après l'analyse des mouvements verticaux (3.3.1), que l'effet du GIA est quasiment nul. En revanche l'analyse des mesures GPS ne permet pas d'exclure la possibilité de mouvements verticaux du sol locaux de subsidence ou de surrection, tandis que les résultats de Palvadeau (1999) suggèrent cette possibilité de mouvements verticaux. La Figure 18 (bas-droite) montre ainsi l'effet que pourraient avoir des taux de subsidence (- 2 mm/an) ou de surrection (2 mm/an) pour les scénarios climatiques RCP8.5 et RCP2.6. Pour ces scénarios de mouvements verticaux du sol locaux, nous faisons l'hypothèse d'une évolution linéaire sur l'ensemble du XXI<sup>ème</sup> siècle. Bien que l'hypothèse de stabilité soit la



plus vraisemblable, les résultats montrent qu'inclure l'incertitude relative aux mouvements verticaux du sol locaux a un effet non-négligeable : les projections du niveau marin pourraient varier de plus de 20 cm localement. Cette source d'incertitude sera considérée par la suite.

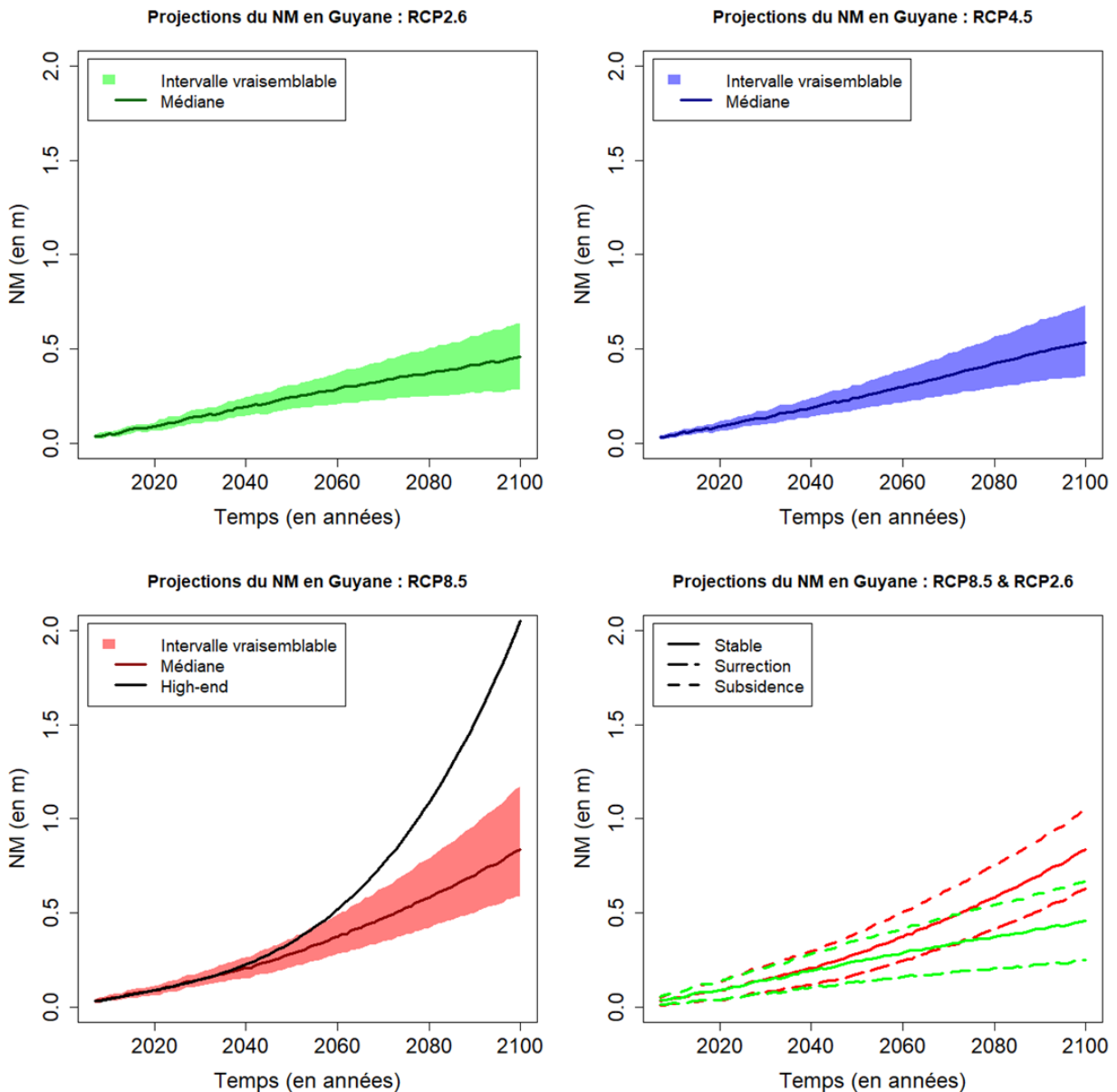


Figure 18 : Projections du niveau marin moyen en Guyane selon les scénarios climatiques RCP2.6 (haut-gauche), RCP4.5 (haut-droite), RCP8.5 et « High-end » (bas-gauche). La sensibilité de ces projections aux mouvements verticaux locaux (bas-droite) est montrée pour les scénarios climatiques RCP2.6 (vert) et RCP8.5 (rouge). Les projections sont calculées en terme d'anomalie par rapport à la période de référence 1986-2005.

En plus des scénarios RCPs, les projections des scénarios SSPs sont examinées à titre comparatif (Tableau 6). Notons que pour le dernier rapport du GIEC (AR6, 2021), les projections sont basées sur l'exercice CMIP6 dont la période de référence pour le calcul de l'anomalie est 1995-2014, soit une décennie plus tard que pour CMIP5 (les contributions de masse restent cependant forcées par les résultats des simulations CMIP5). Une correction de 2 cm est donc appliquée aux projections SSPs du niveau marin moyen pour tenir compte de l'élévation moyenne



entre les deux périodes de références. Les projections obtenues sont très similaires aux scénarios RCPs avec cependant une augmentation significative (3 cm et 8 cm) pour les scénarios SSP1-2.6 et SSP2-4.5 médians en 2100 par rapport aux scénarios RCP2.6 et RCP4.5. Le scénario SSP5-8.5 L (L signifie « Low-Confidence ») correspond à la nouvelle terminologie du GIEC et peut être considéré comme une forme de scénario probabiliste « high-end ». Les scénarios low-confidence incluent l'effet potentiel d'une fonte accélérée des calottes glaciaires par les processus MISI et MICI encore mal compris et quantifiés et pour lesquels l'indice de confiance est faible. Le scénario SSP5-8.5L projette en Guyane une élévation médiane de 0.95 m mais n'exclut pas la possibilité d'une élévation supérieure à 1.7 m.

AR6	SSP1-2.6	SSP2-4.5	SSP5-8.5	SSP5-8.5 L
<b>2050</b>	0.23 [0.15;0.32]	0.24 [0.17 ; 0.33]	0.26 [0.19 ; 0.36]	0.27 [0.19 ; 0.45]
<b>2100</b>	0.49 [0.31 ; 0.72]	0.62 [0.43 ; 0.88]	0.82 [0.62 ; 1.13]	0.95 [0.62 ; 1.71]

Tableau 6 : Valeurs (en m) des projections du niveau marin moyen en Guyane selon les scénarios climatiques SSP1-2.6, SSP2-4.5, SSP5-8.5 et SSP5-8.5L en 2050 et 2100. Les projections sont corrigées et exprimées en terme d'anomalie par rapport à la période de référence 1986-2005.

### 3.3 SYNTHÈSE SUR L'ÉLÉVATION DU NIVEAU MARIN

Les projections du niveau moyen marin relatif en Guyane sont obtenues en sommant les estimations futures (i) des contributions stérodynamiques (expansion thermique et changements de circulation corrigés des changements de pression atmosphérique en surface), (ii) des contributions de masses (glaciers, calottes glaciaires, eaux continentales) et leur variabilité spatiale, (iii) de la réponse de la terre solide à l'ancienne période interglaciaire et enfin (iv) des mouvements verticaux du sol locaux. Ces projections reposent également sur les résultats de modèles climatiques.

Dans un premier temps, les résultats des modèles climatiques ont été évalués en comparant une reconstruction historique du niveau marin en Guyane basée sur un échantillon de modèles CMIP5 avec les résultats issus d'observations marégraphiques et d'une reconstruction historique basée sur des observations. Cette comparaison montre un bon accord entre la reconstruction modélisée et les résultats issus d'observations. L'accord est particulièrement bon à partir de la seconde moitié du XX<sup>ème</sup> siècle. Cette première analyse nous a permis de valider la méthode et les performances des modèles climatiques qui ont ensuite été utilisés pour réaliser des projections du niveau marin relatif en Guyane.

Nos résultats suggèrent une élévation médiane du niveau moyen de la mer en Guyane de, respectivement, 24 cm, 24 cm et 28 cm en 2050 et 46 cm, 54 cm et 84 cm en 2100 selon les scénarios climatiques RCP2.6, RCP4.5 et RCP8.5 par rapport à la période de référence 1986-2005. En 2050, les incertitudes sur ces projections sont inférieures à 10 cm (« likely-range » ou probabilité supérieure à 66 %) tandis qu'elles peuvent dépasser 20 cm en 2100. Les mouvements verticaux du sol locaux contribuent à une incertitude supplémentaire de 20 cm en 2100. Enfin, notre scénario « high-end » révèle qu'une élévation de plus de 2 mètres à la fin du XXI<sup>ème</sup> siècle est possible (bien que très improbable). Ces estimations de niveau marin futur en Guyane servent de base à la projection des zones à risques de submersion chronique présentées dans le chapitre qui suit.

## 4. Caractérisation de la submersion chronique

Ce chapitre a pour objectif de caractériser les zones basses potentiellement exposées aux submersions chroniques de Guyane en s'appuyant sur les projections de niveau marin du chapitre 3. Nous rappelons que les submersions chroniques correspondent à une inondation des zones basses lors d'une période de marée haute et en conditions météorologiques calmes. L'aléa submersion chronique est typiquement la première manifestation visible de l'élévation du niveau de la mer, comme le montrent les retours d'expérience de la côte est des États-Unis. Ce chapitre met en évidence qu'il commence à se manifester également en Guyane.

### 4.1 MÉTHODES

#### 4.1.1 Préambule

La caractérisation des submersions chroniques implique :

- d'identifier les conditions de niveau d'eau maximales induites par la marée ;
- de les ajouter aux projections du niveau marin moyen (§3) ;
- de les ramener dans un référentiel vertical commun avec la topographie. En Guyane, le référentiel utilisé est le NGG77.

Pour estimer les changements de l'exposition des secteurs urbains guyanais aux submersions chroniques dans un contexte d'élévation du niveau de la mer, la méthode dite des zones basses est utilisée. Elle consiste à croiser la topographie des sites d'études avec les projections de niveau d'eau (**cf. encart page suivante et partie 4.1.4.1**).

**Encart : Zones basses potentiellement exposées aux submersions chroniques - Avertissement valable pour toute la suite du document**

Les cartes produites dans cette étude ne sont pas des cartes de submersions à proprement parler. Néanmoins elles permettent d'identifier **les zones basses potentiellement exposées aux phénomènes de submersions chroniques**. En d'autre terme, le zonage de ces cartes correspond aux zones situées sous le niveau d'eau maximum journalier au moins un jour par an. Cette méthode est décrite en détail dans la partie 4.1.4.1 du présent rapport et illustré par la Figure 19 -1).

Afin de prendre en compte les connexions hydrauliques, l'étude s'intéresse également aux **zones basses connectées potentiellement exposées aux submersions chroniques**. Cette méthode est décrite en détail dans la partie 4.1.4.2 du présent rapport et illustré par la Figure 19-2).

Dans la suite du document, à des fins de concision, les acronymes suivants sont utilisés :

- **ZB<sub>MJ</sub>** pour caractériser les zones basses potentiellement exposées aux submersions chroniques.
- **ZBC<sub>MJ</sub>** pour caractériser les zones basses connectées potentiellement exposées aux submersions chroniques.

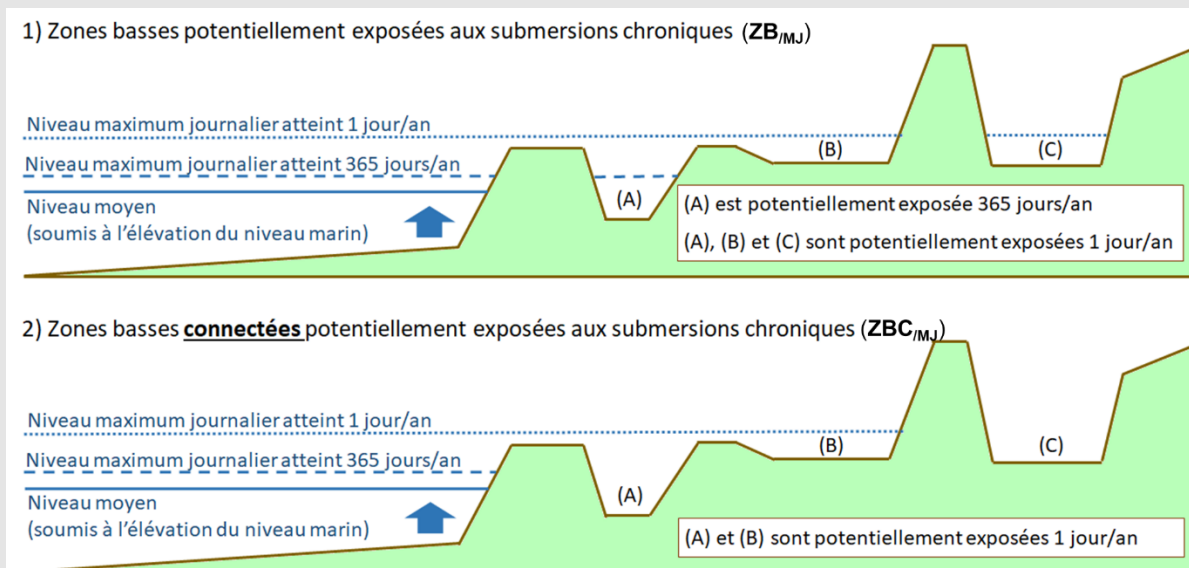


Figure 19 : Schéma décrivant les zones basses potentiellement exposées aux submersions chroniques utilisant la méthode non connectée (1) et connectée (2).

Le présent chapitre décrit la méthode générale permettant de cartographier les zones basses potentiellement exposées aux submersions chroniques (Figure 20). Les données topographiques collectées sont d'abord décrites (§4.1.3.1) puis les données et méthodes utilisées pour obtenir des projections probabilistes de niveaux d'eau locaux (§4.1.3.1). Le §4.1.3.2 décrit enfin les méthodes de cartographie et leurs limites.

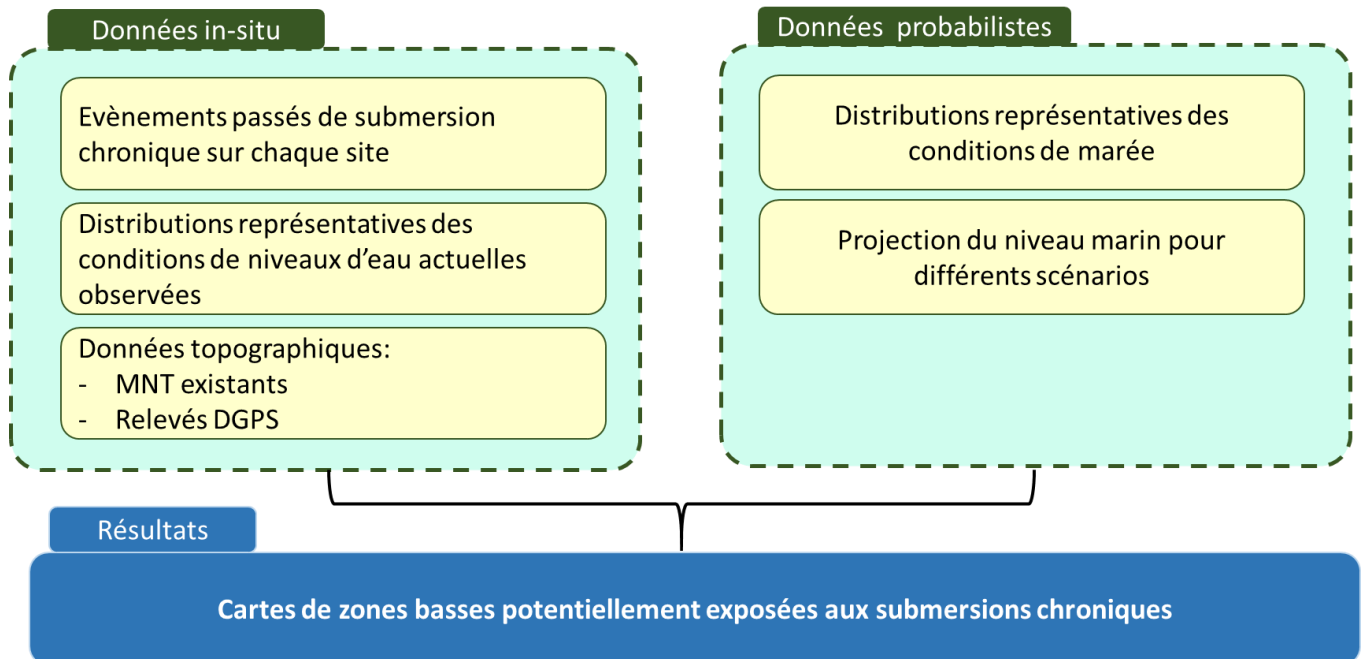


Figure 20 : Méthode générale permettant de caractériser la submersion chronique.

#### 4.1.2 Données topographiques

##### Modèles Numériques de Terrain (MNT) disponibles

À l'heure actuelle, il n'existe aucun MNT continu le long du littoral guyanais. Les données acquises au fur et à mesure des campagnes d'acquisition LiDAR (télédétection par laser) ne permettent qu'une couverture partielle des zones de la frange littorale et ce à des périodes de temps différentes. Contrairement au cahier des charges du projet GuyaClimat, étant donné qu'à la réalisation de ces travaux, il n'y a pas de MNT disponible sur l'embouchure du Maroni et qu'aucune submersion chronique actuelle n'a été recensée sur cette zone (Figure 21), l'étude ne se focalise pas sur ce secteur. De plus aucun évènement de submersion chronique n'a été recensé au niveau du fleuve Mahury contrairement à la rivière de Cayenne. Le travail de cartographie des zones basses potentiellement exposées par de la submersion chronique s'est donc focalisé sur les communes de Kourou, Mana et Cayenne du côté de la Rivière de Cayenne. La Figure 21 illustre la répartition des MNT's actuellement disponibles sur le territoire guyanais de résolution horizontale comprise entre 50 cm et 5 m.

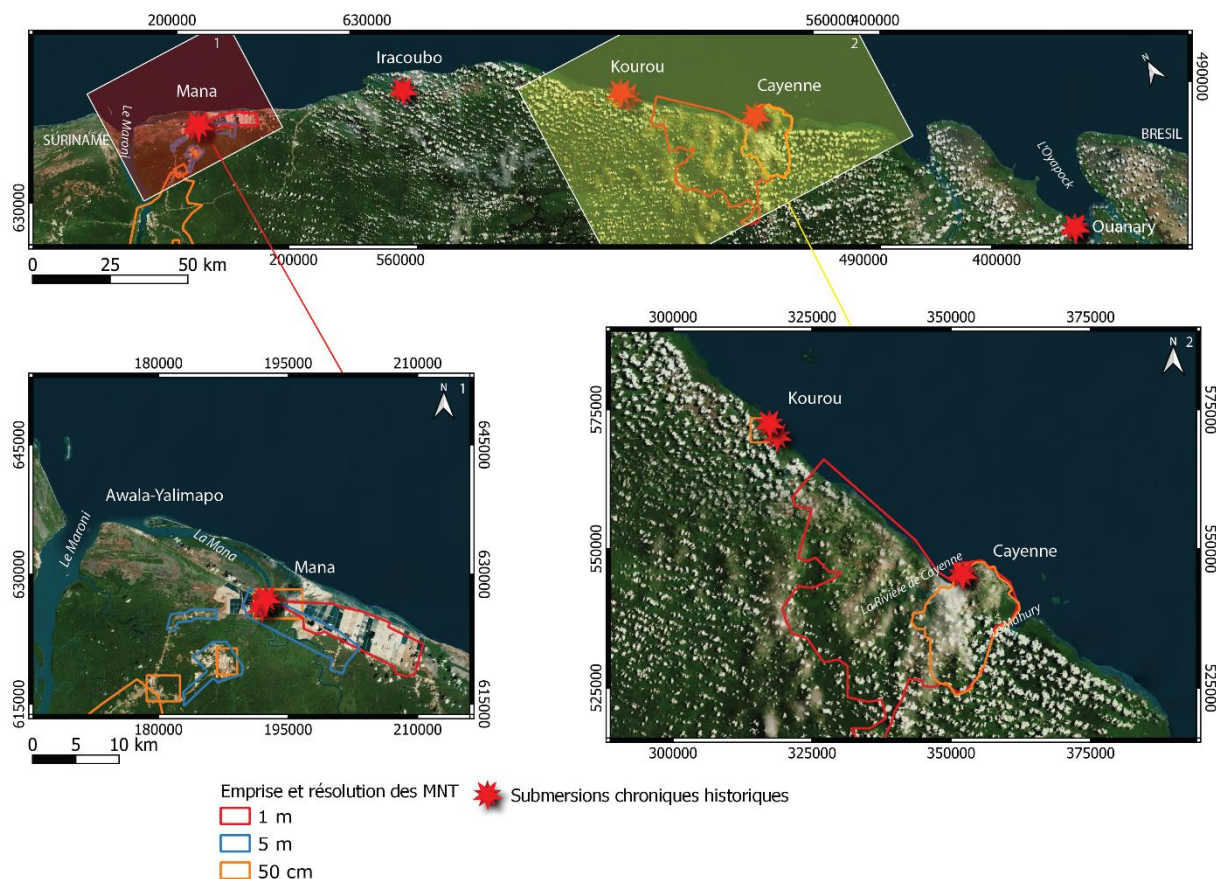


Figure 21 : Emprises des Modèles Numériques de Terrain (MNT) disponibles à l'échelle du littoral de la Guyane et positionnement des évènements historiques de submersion chronique recensés.

### Résolution et choix des MNT's

Pour Kourou et Mana, les MNT's utilisés pour la suite de l'étude sont issus de levés LiDAR à 50 cm de résolution réalisés respectivement en 2015 et 2017. Pour Cayenne deux MNT's issus de deux levés LiDAR couvrent la zone d'étude : un réalisé en 2014 à 50 cm de résolution et un autre en 2015 à 1 m de résolution.

Des points de contrôles topographiques (25 au total) à proximité du village chinois (Figure 22a), ont permis de quantifier les différences entre les deux MNT's. Ces mesures topographiques sont effectuées à l'aide d'un DGPS (Differential Global Positioning System) Trimble R8s en levé RTK (Real Time Kinematic). Le mode RTK permet d'obtenir des mesures de précision centimétrique en planimétrie et en vertical. Depuis 2020, la Guyane dispose du réseau TERIA développé par la société EXAGONE. Ce service de correction des données GPS par GSM permet d'acquérir une mesure en temps réel de précision centimétrique tout en s'affranchissant des bases du DGPS, communément déployées sur des repères géodésiques.



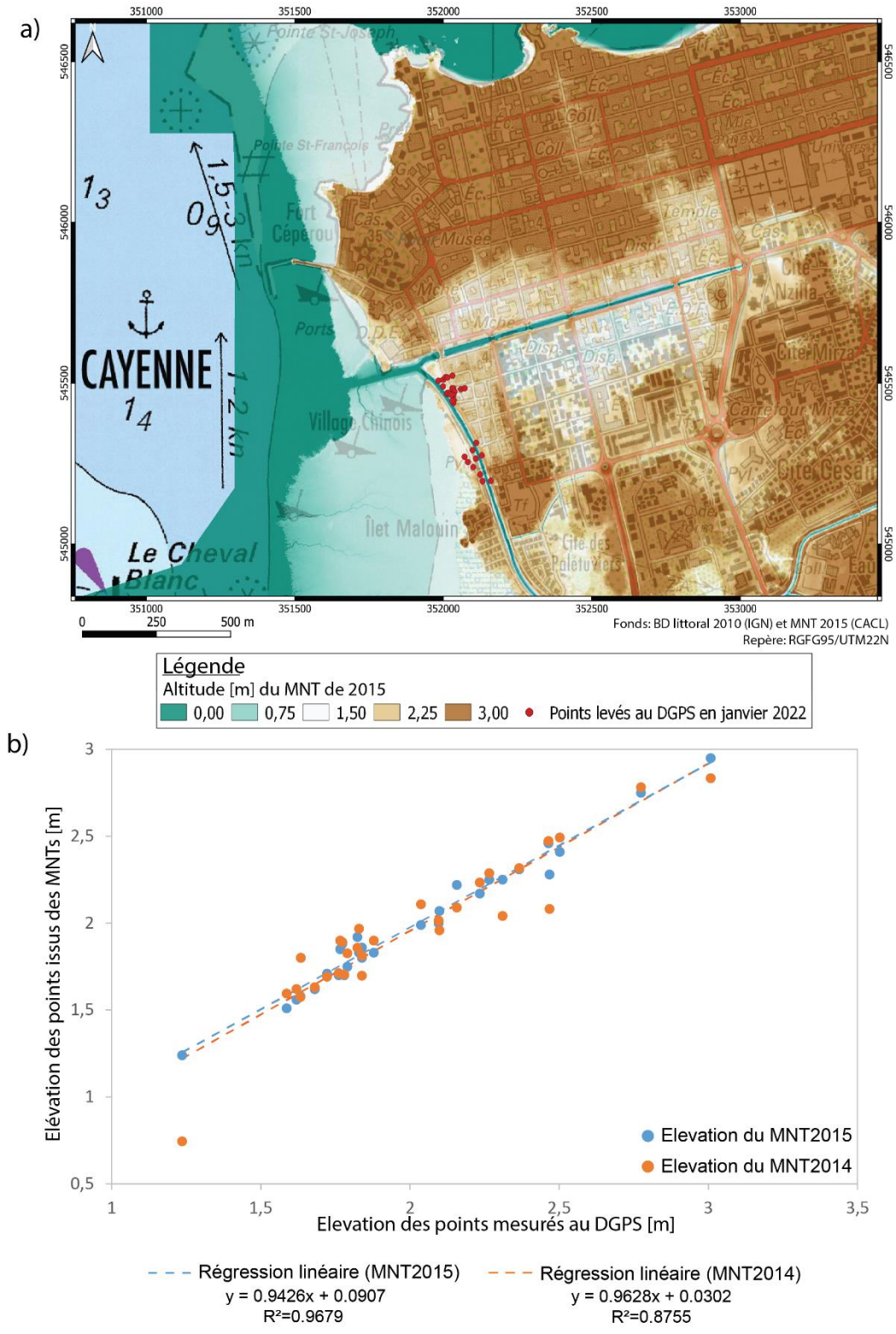


Figure 22 : a) Modèle Numérique de Terrain de 2015 (CACL) et cartographie des points de contrôle mesurés au DGPS. b) Comparaison entre les points mesurés in situ et ceux issus du MNT 2014 (orange) et du MNT 2015 (bleu). Référentiel vertical NGG77.

La Figure 22 montre la comparaison des altitudes de ces points de mesures *in situ* avec celles des points colocalisés issus des MNT's de 2014 et 2015. L'analyse croisée des points de contrôle topographique montre un meilleur accord avec le MNT de 2015 (coefficient de détermination  $R^2=0.97$ ) qu'avec le MNT de 2014 (coefficient de détermination  $R^2=0.88$ ). Le MNT de 2015, financé par la Communauté d'Agglomération du Centre Littoral (CACL), a donc été retenu pour la suite de l'étude.

Le Tableau 7 synthétise les caractéristiques des MNT's LiDAR utilisés dans le cadre de cette étude pour les trois sites analysés : Mana, Kourou, Cayenne. Notons une précision en x, y et z commune de 10 cm pour les trois sites d'intérêt.

Lieux	Année	Source	Résolution planimétrique	Précision en z	Précision en x,y
Cayenne	2015	CACL	1 m	10 cm	10 cm
Kourou	2015	DGTM	50 cm	10 cm	10 cm
Mana	2017	EFAG	50 cm	10 cm	10 cm

Tableau 7 : Caractéristiques des MNT's utilisés pour la caractérisation de la submersion chronique.

#### Limites des MNT's

Le littoral guyanais est continuellement en mouvement en fonction des apports sédimentaires et sous l'action du déplacement des bancs de vase. De nombreuses interrogations scientifiques perdurent sur la projection temporelle et spatiale des bancs de vase dans le futur, la variation de la charge sédimentaire de l'Amazonie ou encore les évolutions des estuaires. Ces incertitudes complexifient les projections à moyen et long terme des submersions chroniques et leur analyse.

Les MNT's représentent une situation topographique à un instant T. Aucune modification des MNT's dans le temps n'est envisageable dans le cadre de cette étude. Dans ce contexte et conformément au cahier des charges, il est considéré comme hypothèse forte que le MNT sur chaque secteur ne varie pas pour les horizons projetés.

### 4.1.3 Projections probabilistes de niveaux d'eau locaux

Pour définir les niveaux d'eau pouvant conduire à des submersions chroniques, la marée doit être caractérisée à un pas de temps horaire sur une période suffisamment longue (> 18.6 ans) pour en déduire une distribution de niveaux maximum journaliers, qui sera ensuite combinée avec les projections de remontée du niveau marin. Pour estimer la distribution de niveaux maximum journaliers, nous disposons de deux sources de données que nous détaillons dans ce qui suit : les prédictions de marée et les observations marégraphiques.

#### 4.1.3.1 Les prédictions de marées

Les données de prédiction de marée sont disponibles à la Pointe des Hattes, Iles du Salut et Ilet la Mère (Figure 23). Pour cette étude, nous avons commandé au SHOM ces données de marées prédites pour la période 2010-2029 (*i.e.* 20 ans, soit une durée supérieure au cycle nodal de la marée – 18.6 ans). Le Tableau 8. (colonne « D1 ») récapitule les données utilisées pour construire les distributions de maxima journaliers et, *in fine* des courbes fréquence (jour/an) de dépassement de niveau d'eau par rapport au niveau moyen, ainsi que les changements de référencements verticaux (cf §4.1.3.3).

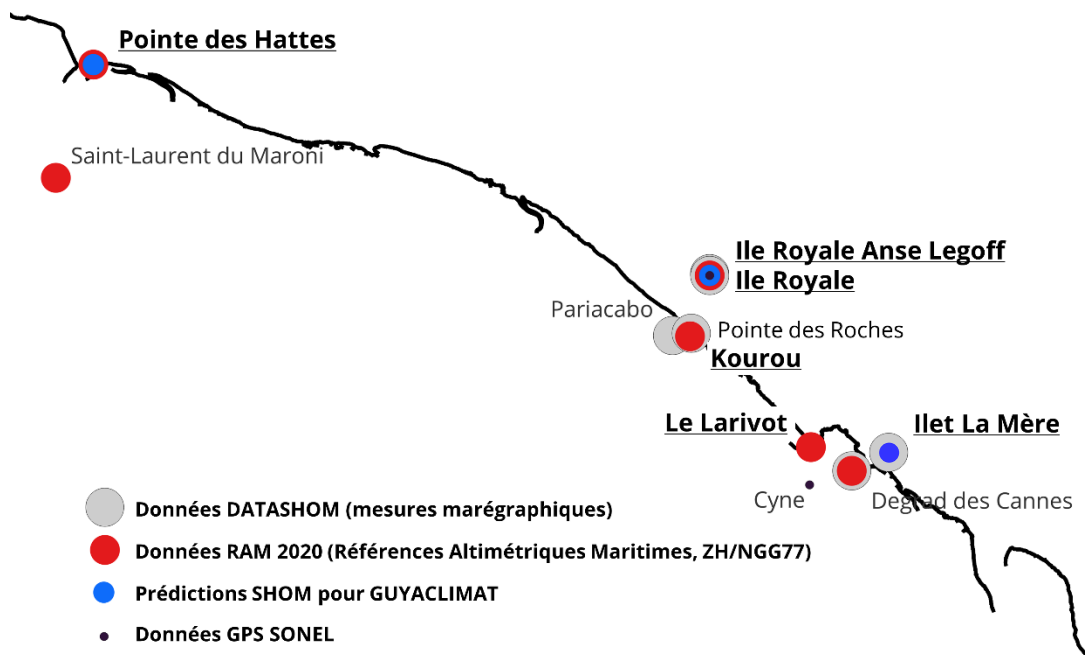


Figure 23 : Localisation des données utilisées pour estimer les distributions de marée et niveau d'eau (en gras, souligné). Les autres données disponibles sont aussi indiquées. NB : les localisations « Ile Royale » et « Ile Royale Anse Legoff » sont aussi appelées Iles du Salut dans ce rapport.

Type de données	Source	localisation	Référence	Commentaire	D1	D2
Niveau d'eau observé / ZH	datashom	Marégraphe « Ile Royale » et Marégraphe « Ile Royale – Anse Legoff »	<a href="http://dx.doi.org/10.17183/REFMAR#749">http://dx.doi.org/10.17183/REFMAR#749</a> <a href="http://dx.doi.org/10.17183/REFMAR#127">http://dx.doi.org/10.17183/REFMAR#127</a>	Données horaires		x
Marée prédite	SHOM	Pointe des Hattes, Iles du Salut, Ilet La Mère		Données horaires	x	
Mouvements verticaux	SONEL	GPS Ile Royale	Cf. Tableau 3			x
Niveau marin maillé	AVISO	Maille de 2° x 2° centrée autour du marégraphe d' « Ile Royale » ( 52.59°O 5.28°N)	<a href="https://cds.climate.copernicus.eu/cdsapp#!/dataset/10.24381/cds.4c328c78?tab=overview">https://cds.climate.copernicus.eu/cdsapp#!/dataset/10.24381/cds.4c328c78?tab=overview</a> (Mertz & Legeais, 2020)	Données journalières		x
Pression atmosphérique	ERA-5	Maille de 0.25° x 0.25° centrée autour du marégraphe d' « Ile Royale » ( 52.59°O 5.28°N)	<a href="https://cds.climate.copernicus.eu/cdsapp#!/dataset/reanalysis-era5-single-levels-monthly-means?tab=overview">https://cds.climate.copernicus.eu/cdsapp#!/dataset/reanalysis-era5-single-levels-monthly-means?tab=overview</a> (Hersbach et al., 2020)	Données mensuelles		x
Références Altimétriques Maritimes	SHOM	Pointe des Hattes, Iles du Salut, Kourou, Larivot, Ilet La Mère	SHOM (2020)		x	x

Tableau 8. Données utilisées pour déterminer les distributions de maximaux journaliers de niveaux de marée prédite (D1) et niveaux d'eau observées (D2). NB : les données AVISO et ERA5 sont utilisées uniquement pour le calcul de la distribution des maximaux journaliers des données observées.



Pour générer ces courbes de dépassement, nous avons procédé comme suit, pour chacun des 3 jeux de données de marée prédite fournis par rapport au zéro hydrographique (ZH) (cf. Tableau 8.) :

- extraction de la donnée sur un cycle nodal exact (*i.e.* 18.6 ans) (ex : Figure 24a) ;
- calcul du niveau moyen (NM') à partir de cette donnée et changement de référentiel vertical (ZH -> NM') (ex : Figure 24a) ;
- extraction des maximaux journaliers (ex : Figure 24a) ;
- calcul de la distribution des maximaux journaliers de niveau d'eau, de laquelle on déduit la courbe de dépassement de niveau d'eau / NM' (Figure 24b).

Les courbes de dépassement ainsi obtenues doivent être interprétées comme suit : en prenant pour exemple l'île du Salut (Figure 24b, courbe bleue), le maximum journalier de marée prédite par rapport au niveau moyen dépasse 1.08 m environ 100 jours / an, tandis que le niveau 1.55 m n'est jamais dépassé et le niveau 0.36 m est dépassé tous les jours.

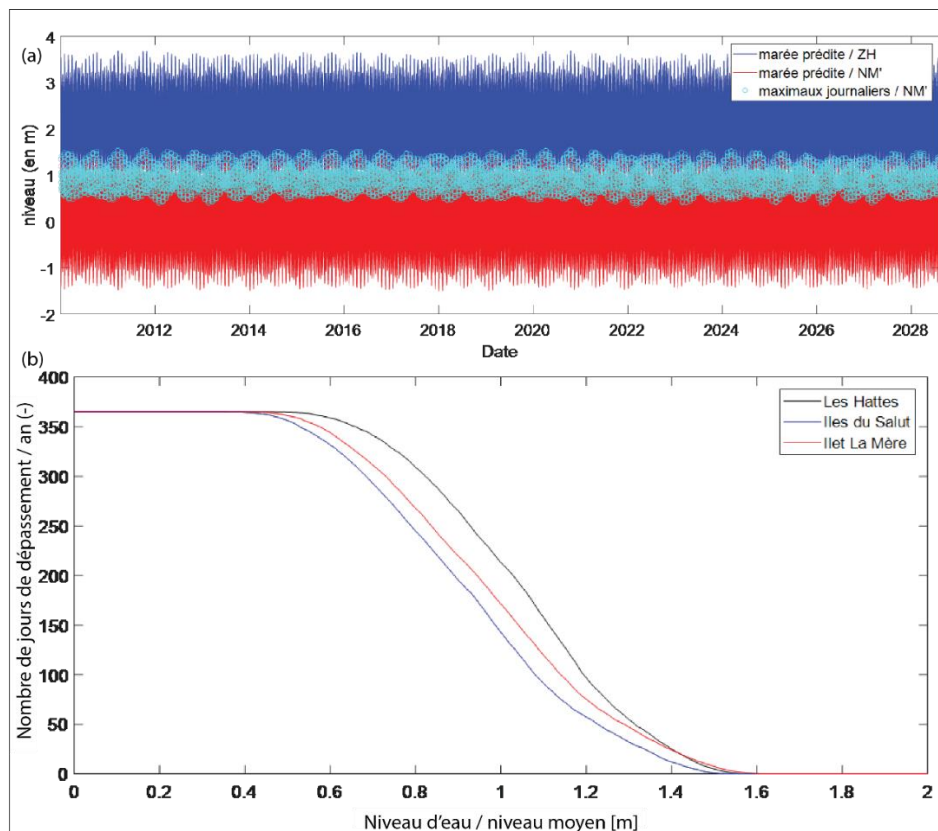


Figure 24 : Exploitation des données de marée prédite. (a) Données de marée prédite à Iles du Salut (donnée source fournie par le SHOM), (b) Nombre de jours de dépassement (par les maximaux journaliers de marée prédite) en fonction du niveau d'eau repéré par rapport au niveau moyen NM pour les 3 sites.

#### 4.1.3.2 Niveaux d'eau totaux observés

Les projections de niveau maximum construites dans §4.1.3.1 sont basées sur des prédictions de marée. Pour pouvoir valider notre approche par rapport à des événements passés de submersion chronique, nous exploitons aussi la donnée marégraphique disponible aux Iles du Salut (série temporelle la plus longue sur le littoral guyanais). Par rapport aux données de marée prédite, cette donnée observée intègre les évolutions du niveau moyen ainsi que les surcotes.

Pour déterminer la distribution de maximum journalier par rapport au niveau moyen, nous utilisons la même méthode que dans §4.1.3.1, en ajoutant une étape préliminaire qui consiste à enlever la tendance de remontée du niveau marin, de telle manière que cette distribution intègre les surcotes et la variabilité du niveau moyen (saisonniers, pluriannuelle), mais n'intègre plus la tendance.

Avant de décrire les données et la méthode pour construire ces distributions, notons que les surcotes événementielles qui peuvent être déduites des mesures sont modérées (quelques centimètres jusqu'à une vingtaine de centimètres), tandis qu'on note une fluctuation saisonnière du niveau moyen de l'ordre de 10 à 20 cm et des variations annuelles de quelques centimètres.

La méthode utilisée est la suivante :

- concaténation des mesures marégraphiques des deux marégraphes. La cohérence des mesures marégraphiques « Ile Royale » et « Ile Royale – Anse Legoff » a d'abord été vérifiée visuellement et statistiquement (ex : coefficient de détermination  $R^2=0.9985$ ), puis les séries temporelles ont été concaténées en prenant en priorité les données « Ile Royale » lorsque les données étaient disponibles aux 2 marégraphes en même temps ;
- sélection des années où la donnée couvre plus de 90% de l'année ( $R \geq R_c$  avec R la durée utile et  $R_c=0,9$ ) ;
- correction de la remontée du niveau marin et des mouvements verticaux du sol :
  - correction de la remontée du niveau marin absolu : tendance linéaire calculée à partir des données altimétriques (aviso) avec rétro-correction du baromètre inverse (à partir de ERA5). On obtient une tendance de 2.87 mm/an,
  - correction des mouvements verticaux du sol : à partir du GPS Ile Royale. Les données issues de Sonel indiquent des mouvements de -0.65 mm/an (+/- 1.25 mm/an). L'incertitude étant plus forte que l'estimation, nous considérons donc ces mouvements comme stables (car non significativement différents de zéro au sens statistique) avec une incertitude de +/- 1.25 mm/an,
  - au final, la tendance de remontée du niveau moyen relative estimée est de 2.87 mm/an (+/- 1.25 mm/an) ;
- référencement par rapport au niveau moyen en calculant les niveaux moyens annuels sur les années retenues ( $R \geq R_c$ ), puis la tendance linéaire, ce qui permet d'estimer un niveau moyen annuel (ici en 2020) n'intégrant pas la variabilité annuelle (cette variabilité sera bien présente dans la distribution) ;
- calcul de la distribution des niveaux maximaux journaliers par rapport au niveau moyen annuel (2020) ;
  - soustraction de ce niveau moyen à la série temporelle de niveau d'eau horaire (déjà corrigée de la tendance),
  - extraction des niveaux maximaux journaliers,
  - sélection des jours entièrement couverts par les mesures, *i.e.* où 24 mesures horaires sont disponibles ( $n_{valc}=24$ ),
  - calcul de la distribution des niveaux maximaux journaliers par rapport au niveau moyen annuel.

Ensuite, de la même manière que pour les données de marée prédite (§4.1.3.1), cette distribution est combinée avec les projections de niveau moyen, mais, cette fois-ci, comme la distribution contient le signal de variabilité pluriannuelle du niveau moyen, le signal de variabilité du niveau moyen est retiré des projections de niveau moyen.

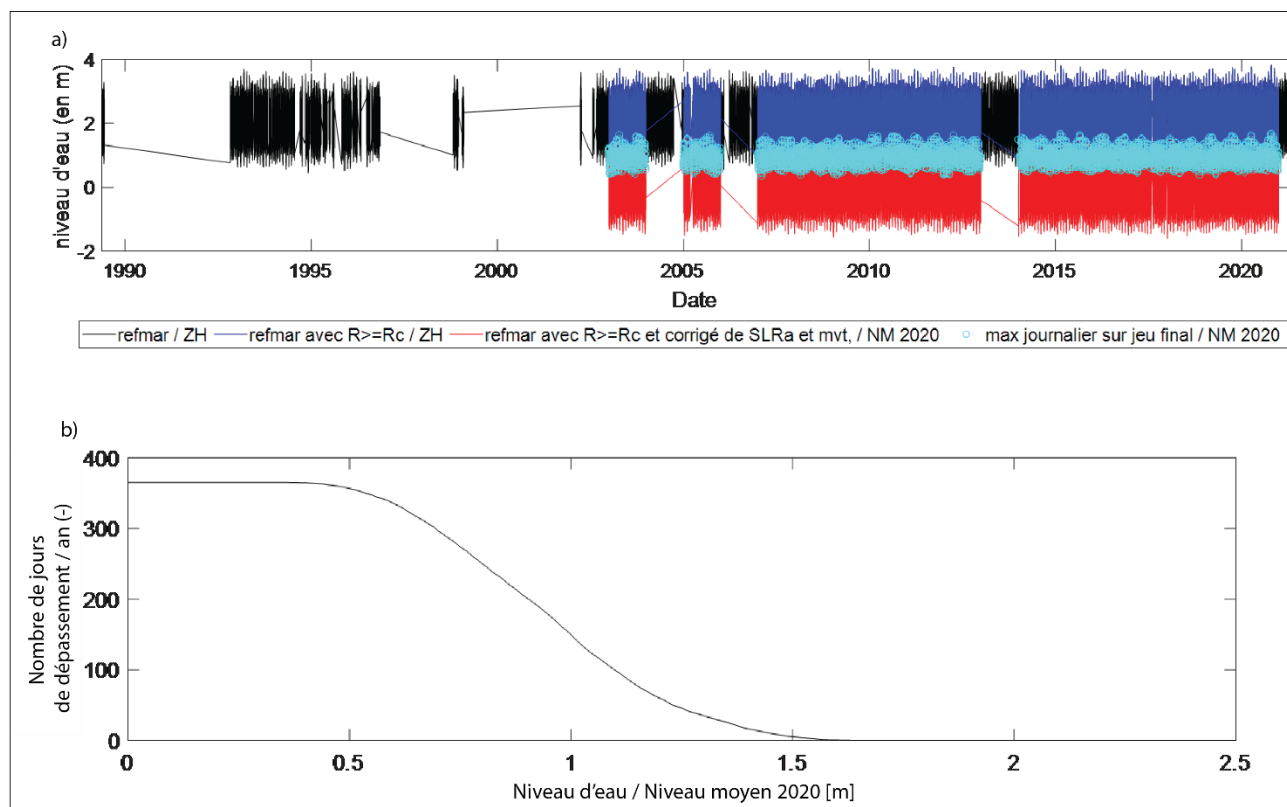


Figure 25 : Exploitation des données marégraphiques aux îles du Salut. (a) Données marégraphiques brutes, « corrigées » et maximales journaliers utilisés pour le calcul de distribution. (b). Figures pour une tendance de remontée du niveau moyen relative passée de 2.87 mm/an.

#### 4.1.3.3 Changement de référence verticale (en NGG77)

Pour intégrer l'élévation du niveau de la mer, les courbes de dépassement (fournies par rapport au niveau moyen ; §4.1.3.1 & §4.1.3.2) doivent être combinées avec les scénarios de projection du niveau marin moyen (§3). Avant de faire cette combinaison, il est nécessaire de référencer les courbes de dépassement par rapport au même référentiel vertical que les données topographiques, à savoir le 0-NGG77 pour chacune des zones où l'on veut estimer les zones basses potentiellement exposées à la submersion chronique ( $ZB_{MJ}$ ). Pour réaliser ce changement de référentiel, nous utilisons le RAM (cf. Tableau 8., SHOM 2020), en prenant en compte les dates d'estimations des NM dans le RAM. Par exemple pour les Iles du Salut, le RAM fournit le niveau moyen de 2.14 m par rapport au zéro hydrographique et le zéro hydrographique de -1.86 m par rapport au 0-NGG77. Ce niveau moyen a été estimé en 2013 (cf. Année CH dans le RAM). Ainsi, nous recalons la courbe de niveau moyen de telle manière qu'en 2013 cette courbe prenne la valeur 2.14 m.

La Figure 26 illustre la procédure permettant le changement de référence verticale (en NGG77) et l'étape de combinaison avec les projections de remontée du niveau marin. L'exemple est donné pour les projections médianes du scénario RCP8.5 aux Iles du Salut. Les projections de niveau moyen issues des jeux de données SROCC étant calculées par rapport à une référence temporelle (en 1986-2005, courbe discontinue), il convient dans un premier temps de les recaler sur le niveau moyen du RAM référencé par rapport au zéro hydrographique en 2013 (Figure 26a, courbe pointillée passant par la croix verte). On peut noter que nos projections référencées par rapport au zéro hydrographique (courbe pointillée « NM/ZH ») montrent un très bon accord avec le niveau marin annuel relatif du marégraphe d'île Royale (points bleus, par rapport au zéro hydrographique). La dernière étape consiste à recaler nos projections (ex : courbe « NM/ZH »)

dans le référentiel 0-NGG77 (courbe « NM/NGG77 » en trait plein). Il reste alors à ajouter les courbes de dépassement (cf. §4.1.3.1 et §4.1.3.2) aux projections du niveau moyen pour obtenir le niveau d'eau dans le référentiel NGG77 associé à une fréquence de dépassement (exprimée en j/an) montré sur la Figure 26b. Notons que le RAM ne fournit pas toujours les années CH exactes de référencement du niveau moyen : lorsqu'elles sont antérieures à 2006, celui-ci précise uniquement qu'elles sont antérieures à cette date. Dans ces cas-là, faute d'informations supplémentaires, l'année 2006 est alors prise comme année de référence CH.

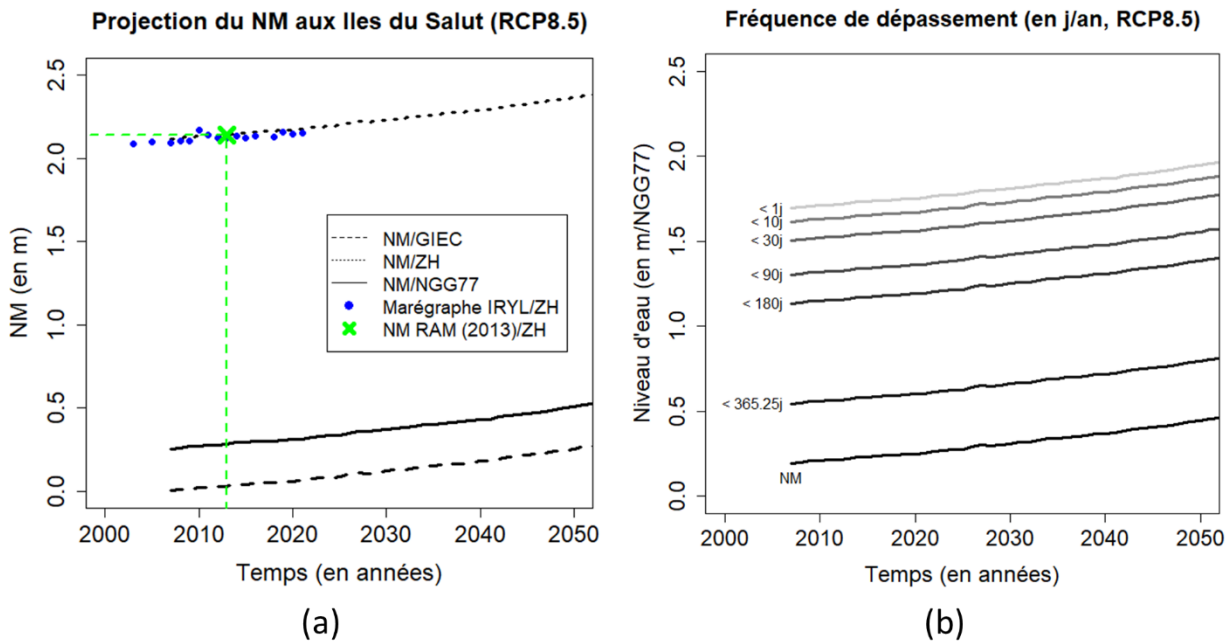


Figure 26 : Méthode de combinaison des projections de remontée du niveau marin et des distributions de niveau d'eau, illustrée sur le site des Iles du Salut, sur la période 2003-2050, en considérant les projections de niveau marin moyen relatif du scénario RCP8.5 (a) étapes permettant de référencer les projections du niveau marin moyen relatif par rapport au 0-NGG77. (b) évolution des niveaux d'eau pour les fréquences de dépassements allant de 1 jour/an à 365.25 jours/an.

Dans l'illustration ci-dessus, nous avons considéré l'île du Salut comme exemple, notamment car il permet la comparaison avec les données du marégraphe d'île Royale. Ceci étant, l'objectif de notre étude est d'estimer les zones basses potentiellement exposées aux submersions chroniques à Mana, Kourou et Cayenne. Tout d'abord, rappelons que nous faisons l'hypothèse que la remontée du niveau marin est uniforme à l'échelle de la Guyane. Ainsi, pour ces 3 sites, nous utilisons les projections de niveau moyen construites dans la section §3 (qui sont aussi celles utilisées pour l'exemple des Iles du Salut). Ensuite, au regard des données disponibles (Figure 23, Tableau 8), nous procédons comme suit :

- pour Mana, nous combinons ces projections avec la courbe de dépassement liée à la marée estimée pour la pointe des Hattes (§4.1.3.1) et les données de références altimétriques maritimes à la Pointe de Hattes (données qui permettent de raccorder le niveau moyen au 0-NGG77, comme dans l'exemple de l'île du Salut) ;
- pour Kourou, nous combinons les projections de niveau moyen avec la courbe de dépassement liée à la marée estimée pour les Iles du Salut (§4.1.3.1) et les données de références altimétriques maritimes à Kourou ;
- pour Cayenne, nous combinons les projections de niveau moyen avec la courbe de dépassement liée à la marée estimée pour l'île La Mère (§4.1.3.1) et les données de références altimétriques maritimes au Larivot.

Par ailleurs, au regard du recensement des données passées de submersions chroniques (cf. §4.2.1), ce sont principalement des observations et témoignages dans le secteur Cayenne qui sont utilisables pour valider notre approche. Ainsi, les courbes de dépassement journalier de niveaux d'eau observés aux Iles du Salut (§4.1.3.2) sont combinées avec les projections de niveau moyen et les données de références altimétriques maritimes à Larivot, pour fournir des courbes de dépassement de niveau d'eau intégrant non seulement le niveau moyen, ses fluctuations, la marée, mais aussi les surcotes.

#### 4.1.4 Cartographie des zones basses potentiellement exposés aux submersions chroniques ( $ZB_{/MJ}$ et $ZBC_{/MJ}$ )

Pour caractériser spatialement les  $ZB_{/MJ}$  et les  $ZBC_{/MJ}$  d'un site donné, nous croisons la topographie du terrain des secteurs étudiés (§4.1.2) avec les distributions de niveaux d'eau maximaux journaliers à la côte (§4.1.2) ramenées dans le référentiel vertical commun NGG77. En préambule, il convient de rappeler que les méthodes de cartographie s'appuyant sur le croisement d'un niveau d'eau au rivage avec la topographie négligent un certain nombre de phénomènes, et, en particulier la dynamique des écoulements à terre.

##### 4.1.4.1 Identification des zones basses : $ZB_{/MJ}$

Un point (ou un pixel du MNT) est considéré en zone basse potentiellement exposée aux submersions chroniques ( $ZB_{/MJ}$ ), quand son élévation  $Z_{MNT}$  est strictement inférieure au niveau d'eau maximum journalier  $Z_{WL}$ . Comme le montre la Figure 27, la distribution cumulée des niveaux d'eau maximum journaliers  $Z_{WL}$  permet d'associer une valeur de  $Z_{WL}$  à une probabilité de dépassement (ici exprimée en j/an). Ainsi, pour chaque point du MNT, on peut convertir son élévation  $Z_{MNT}$  en  $Z_{WL}$ , et ainsi déduire le nombre de jours par an où il se situe en  $ZB_{/MJ}$ . Par exemple, pour le cas « fictif » présenté Figure 27, l'élévation de 1.72 m du MNT se situe en  $ZB_{/MJ}$  135 jours/an. Un point du même MNT mais d'élévation de 2 m sera quant à lui situé en  $ZB_{/MJ}$  45 jours/an.

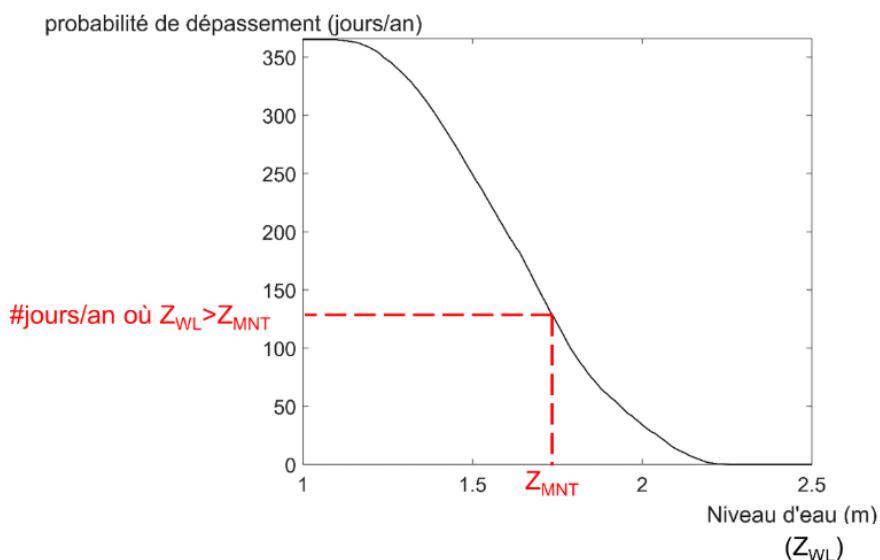


Figure 27 : Exemple d'évaluation du nombre de jours par an où l'élévation d'un point ( $Z_{MNT}$ ) est inférieure au niveau d'eau maximum journalier ( $Z_{WL}$ ). Notons que cet exemple est fictif et a pour seul objectif d'illustrer la méthode.

Dans cette étude nous avons produit les cartographies de  $ZB_{/MJ}$  pour les communautés maritimes de Mana, Kourou et Cayenne aux échéances 2050 (moyen terme) et 2100 (long terme).

La Figure 28 montre un exemple de résultat de cartographie pour une partie du secteur de Cayenne. La mise en page de cet exemple n'est pas celle des cartes finales (§4.2.3) et a pour seul objectif d'illustrer la méthode. L'échelle de couleur permet de visualiser à quelle fréquence (en jours/an) le secteur est en  $ZB_{MJ}$  en 2050 selon le scénario médian RCP4.5. Ainsi, les canaux apparaissent en  $ZB_{MJ}$  toute l'année tandis que de nombreux quartiers pourraient également se retrouver en  $ZB_{MJ}$  fréquemment dans l'année en 2050. Cela ne signifie cependant pas que ces derniers seront nécessairement soumis à une submersion chronique. En effet, la méthode de cartographie néglige d'une part la dynamique des écoulements et d'autre part, une fois  $ZB_{MJ}$  identifiée, il reste à vérifier s'il existe une connexion directe (*i.e.* un chemin possible en surface : autrement dit, s'il existe un chemin continu où  $Z_{MNT} < Z_{WL}$  entre cette zone et la mer ou les embouchures) ou indirecte (ex : buses) de ces zones avec la mer ou les embouchures. Par exemple, proche de la carrière des Maringouins à Cayenne ( $x=354\ 000\ m$ ,  $y=542\ 500\ m$ ), un terrain circulaire est identifié comme étant en  $ZB_{MJ}$  toute l'année sur la Figure 28. Or ce terrain est situé à plus de 3 km de la côte la plus proche et est largement ceinturé par des zones non-basses. L'absence de connexions hydraulique (directe ou indirecte) limite donc le risque de submersion chronique en dépit de l'altitude très basse de ce terrain.

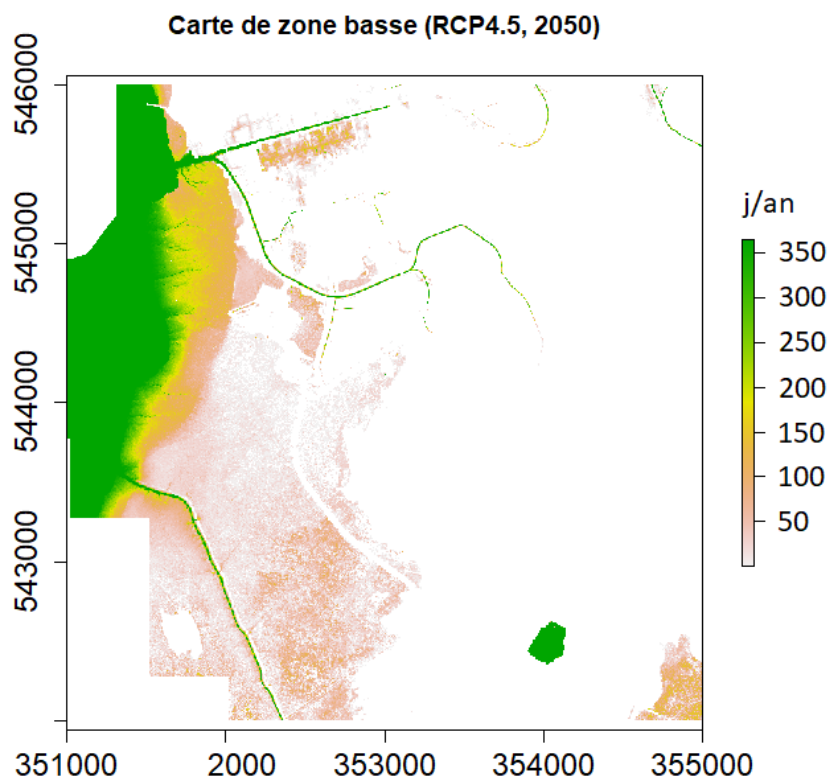


Figure 28 : Exemple de carte de  $ZB_{MJ}$  sur une partie de Cayenne pour le scénario RCP4.5 et l'année 2050.

La méthode décrite ici permet donc d'identifier toutes les  $ZB_{MJ}$  mais peut conduire à une surestimation de l'étendue du risque de submersion chronique si elle est considérée sans analyse du réseau de connexions hydrauliques. Bien qu'une expertise de terrain soit requise pour caractériser en détail ce réseau, il est possible de tenir compte des connexions hydrauliques en surface apparentes dans le MNT, en utilisant les cartographies de fréquence de zone basse telle que celle présentée sur la Figure 28. Nous en détaillons la méthode dans la section qui suit.



#### 4.1.4.2 Prise en compte des connexions hydrauliques de surface : $ZB_{MJ}$

La Figure 29 illustre la sensibilité des cartes de  $ZB_{MJ}$  à la prise en compte ou non des connexions hydrauliques en surface (*i.e.* est-ce que ces  $ZB_{MJ}$  sont reliées à la mer ou aux embouchures via un chemin continu en surface, où  $Z_{MNT} < Z_{WL}$ ). Pour simplifier, nous considérons ici un seul niveau d'eau de dépassement (3 mètres) et l'emprise du MNT de Cayenne (68 millions de pixels). La Figure 29a montre les zones basses situées en dessous de 3 mètres d'élévation. La Figure 29b permet de visualiser la différence d'identification de zones basses entre la carte initiale et la carte après détection des connexions de surface présentes dans le MNT. On constate bien que plusieurs zones isolées dans les terres sont en effet non connectées (en vert) comme par exemple le terrain circulaire proche de la carrière des Maringouins mentionné précédemment.

#### Zones basses (< 3m)

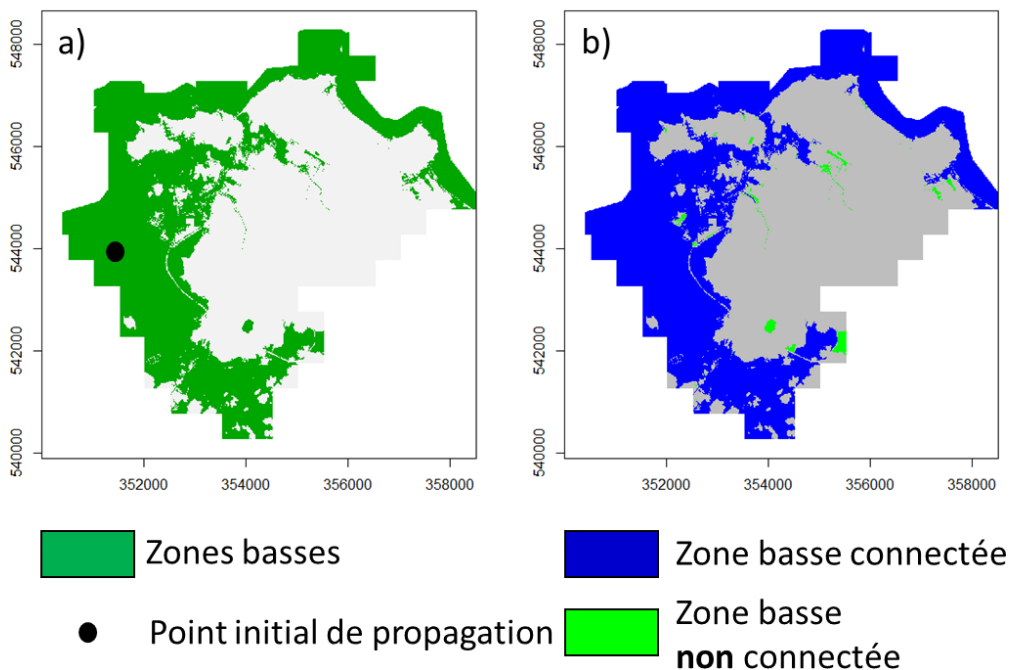


Figure 29 : Exemple d'application de l'algorithme de connexions de zones basses pour le MNT de Cayenne et un niveau d'eau maximum de 3 mètres.

Globalement, l'ajout de ces connexions de surface (identifiées uniquement à partir du MNT) permet d'éviter de trop surestimer les secteurs à risque de submersion chronique. Cependant, des connexions de surface existantes peuvent ne pas apparaître sur le MNT. C'est le cas par exemple de ponts qui peuvent apparaître sur le MNT comme des barrières à l'écoulement dans les canaux. Dans les cas les plus évidents, nous avons recréé ces connexions. De plus, ne connaissant pas le nombre et l'état des clapets anti-retour ou des écluses, excepté pour le canal Laussat, nous avons émis l'hypothèse forte que ces ouvrages hydrauliques sont transparents par rapport à l'écoulement de l'eau sur les trois sites analysés (Cayenne, Kourou et Mana). Pour le canal Laussat, suite à la lecture du diagnostic de la vanne-écluse (BRLi, 2018) et compte tenu des défauts d'étanchéités et de la vétusté de l'ouvrage, la vanne écluse du canal Laussat est supposée comme toujours ouverte (permettant ainsi la connexion du canal avec la mer).

#### 4.1.4.3 Superficies des $ZB_{/MJ}$

En complément des cartes  $ZB_{/MJ}$ , les superficies des  $ZB_{/MJ}$  au moins 1 j/an sont calculées pour chaque site, scénarios et échéances, en considérant exactement la même emprise que celle du MNT analysé, et donc en incluant les zones à terre (y compris les canaux), ainsi que la mangrove et une partie de la vase intertidale, et en excluant les estuaires (pour Cayenne et Kourou). Pour le site de Mana, ce calcul de superficie n'intègre pas non plus le fleuve Mana et la crique Acarouany. Afin de pouvoir discuter de l'évolution temporelle des superficies des  $ZB_{/MJ}$  (1 j/an), le jeu de données a été complété par le calcul de superficie pour la situation actuelle. Pour cela nous avons considéré le scénario RCP4.5 (médian) et avons combiné la projection de niveau moyen moyennée sur la période 2015-2025 (*i.e.* centrée sur 2020) pour prendre en compte les fluctuations annuelles, combinées avec la marée (comme pour les autres projections de niveau d'eau), et enfin la superficie des zones identifiées en a été extraite comme basses 1 j/an. Notons que, pour chaque site, en 2020, les superficies sont toutes très proches quel que soit le scénario considéré.

#### 4.1.4.4 Synthèse et mise en garde sur les méthodes cartographiques $ZB_{/MJ}$ et $ZBC_{/MJ}$

En résumé, les cartes de  $ZB_{/MJ}$  présentées dans la §4.1.4.1 permettent d'identifier toutes les  $ZB_{/MJ}$ , qu'elles soient connectées ou non. Elles ont donc un effet maximisant sur la caractérisation de l'exposition aux submersions chroniques mais on l'avantage de n'omettre aucune zone car elles permettent par exemple d'identifier des  $ZB_{/MJ}$  qui seraient connectées via le réseau urbain. Notons également que le littoral est très changeant sous l'action de la dynamique des bancs de vase (cf. §2.3.2), ces cartes  $ZB_{/MJ}$  présentent l'intérêt de permettre d'identifier les zones qui seraient sous le niveau maximal de la marée de vives eaux couplé avec une élévation du niveau marin et ceci quelques soit la situation d'envasement du littoral, de la morphologie de la frange littorale, et de la configuration des ouvrages de défenses.

Afin de limiter l'effet maximisant des cartes  $ZB_{/MJ}$ , nous avons produit des cartes  $ZBC_{/MJ}$  qui permettent de prendre en compte la majeure partie des connexions de surface. La méthode de cartographie des  $ZBC_{/MJ}$  comporte cependant un certain nombre de limites (pouvant engendrer une sous-estimation ou une surestimation) qu'il convient de rappeler :

- il peut arriver que la connexion ne s'effectue ici que sur un pixel unique, soit 1 m ou 50 cm (selon la résolution du MNT). Puisque l'approche de croisement d'un niveau d'eau avec un MNT néglige toute dynamique de l'écoulement et notamment les frottements, alors, en particulier dans ces cas-là, on peut s'attendre à une surestimation de l'emprise des zones basses réellement connectées ;
- les connexions indirectes via le réseau urbain sont ici négligées, ce qui peut mener une sous-estimation des zones potentiellement à risque ;
- notre méthode de cartographie fait l'hypothèse que le volume d'eau pouvant se propager (correspondant au niveau d'eau  $Z_{WL}$ ) est infini ; c'est-à-dire que le maximum journalier atteint est statique. Cette hypothèse engendre nécessairement une surestimation  $ZBC_{/MJ}$  car le maximum journalier est calculé à partir de données horaires et est donc atteint une heure par jour tout au plus.

Il est enfin à noter que l'hydrogéologie locale caractérisant les interactions entre les eaux de surfaces et les eaux souterraines (recharge, aquifère côtier etc.) sont très peu connues à l'échelle du territoire guyanais et ne sont pas considérés dans le cadre de cette étude.



## 4.2 RÉSULTATS

Ici, nous présentons tout d'abord les résultats obtenus en terme de validation de notre méthode de construction des projections de niveau d'eau et d'identification des ZB<sub>MJ</sub>. Après une description synthétique de chaque secteur (Mana, Kourou, Cayenne), les résultats globaux portant sur les ZB<sub>MJ</sub> et ZBC<sub>MJ</sub> obtenues sont présentés et discutés, en s'appuyant sur des focus de zones en particulier. L'ensemble des cartes produites est regroupé en annexe du rapport (Annexe I : A2 à A11).

### 4.2.1 Observations et analyses d'évènements de submersions chroniques passées

Dans un premier temps, les projections probabilistes sont comparées avec des observations de submersions chroniques historiques afin de valider notre méthode.

Le recensement de ces observations s'est traduit par des échanges email, téléphoniques et pour certains en présentiel, auprès de 16 organismes publics et acteurs du littoral. Les organismes et acteurs suivants ont été consultés :

- les 4 communautés de communes guyanaises (CACL, CCDS, CCOG et CCEG) ;
- les communes de Mana, Awala-Yalimapo, Macouria, Cayenne, Rémire-Montjoly, Kourou, Ouanary, Saint-Laurent du Maroni et Iracoubo ;
- 3 organismes étatiques : l'agence d'urbanisme et de développement de Guyane (AUDeG), l'Observatoire de la Dynamique Côtière de Guyane (ODyC) et le Grand Port Maritime de Guyane (GPMG) ;
- les pêcheurs du quartier du Village Chinois.

Les échanges ont amené à bien dissocier les inondations liées aux précipitations ou à la submersion marine de celles proprement liées à de la submersion chronique. Cependant, sans preuves objectives, une incertitude persiste dans les témoignages recueillis. C'est pourquoi, dans la mesure du possible, des photos ainsi que la date et l'heure de l'observation ont été recensées afin de pouvoir croiser précisément la côte topographique minimale du secteur impacté avec les données de niveau d'eau dont nous disposons.

Une dizaine d'observations exploitables a été retenue : 2 à Cayenne, 2 à Kourou, 2 à Mana, 2 à Ouanary et 1 à Iracoubo (Figure 21). Aucune observation de submersion chronique n'a été remontée pour les communes de Saint-Laurent du Maroni ou d'Awala-Yalimapo. Parmi les recensements, il est à noter celui d'un témoignage particulièrement précis et documenté à proximité du quartier du village chinois de Cayenne, fourni par la CACL (Figure 30). Ce dernier témoignage datant du 16 octobre 2020 et photographié (Figure 30) est utilisé pour tester la validité de nos méthodes. Les résultats sont présentés ci-dessous.



*Figure 30 : Submersion chronique à l'intersection de la rue Serge Brown et de la rue Docteur Arthur Henry sur la commune de Cayenne prise le 16 octobre 2020 à 16h00 (©CACL, fond photographie : C.SEJOURNE).*

En la date du 16 octobre 2020, les mesures du marégraphe d'Île Royale ont des valeurs journalières de niveau marin relatif particulièrement élevées et très rarement atteintes sur le reste de la chronique – ceci indique donc une situation où le niveau de la mer était anormalement haut. Les relevés au DGPS, le MNT de Cayenne, et le profil topographique montré sur la Figure 31, révèlent que le niveau d'eau doit avoir dépassé la cote minimale de 1.77 m (NGG77) sur la frange littorale pour aboutir à la submersion chronique survenue le 16 octobre 2020.

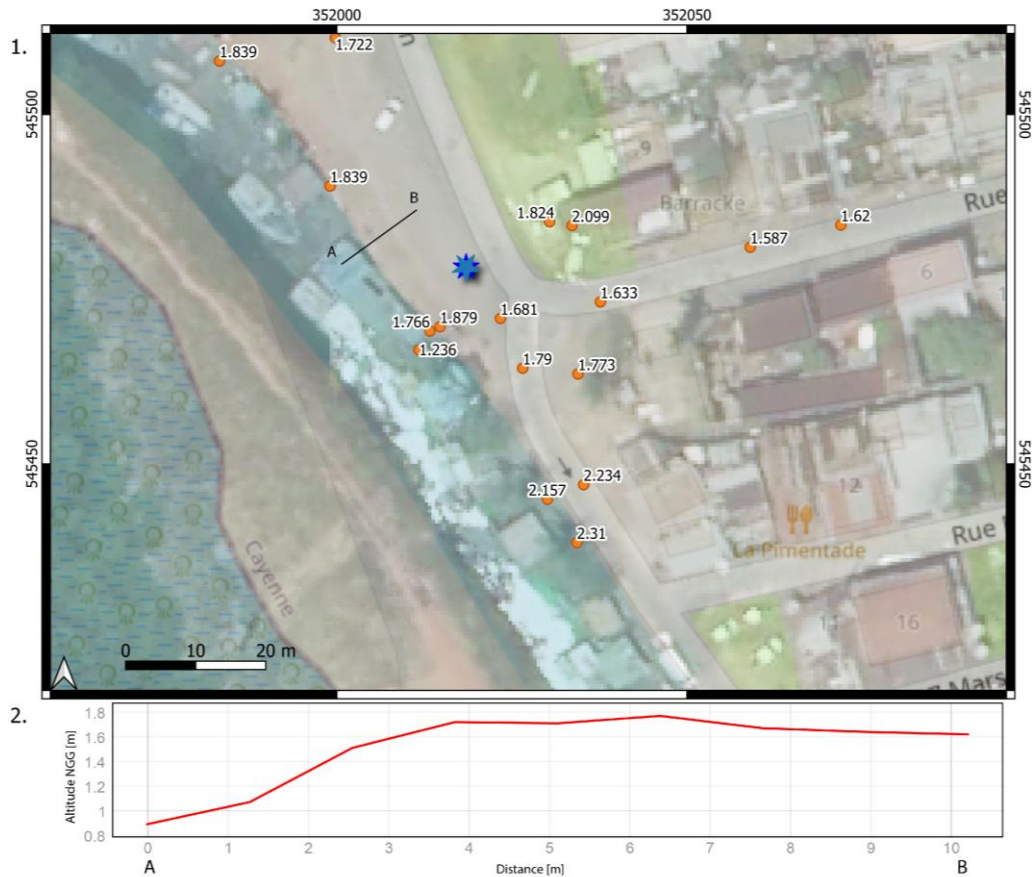


Figure 31 : (1) Localisation des points de contrôle mesurés au DGPS et leur valeur en z associée (points oranges). L'étoile bleue correspond à l'évènement historique recensé auprès de la CACL ; (2) profil topographique entre les points A et B caractérisant le point le plus haut de 1.77 m entre le canal et la zone basse dépassé lors de l'évènement historique d'intérêt.

Sur la Figure 32, nous avons reporté ce seuil de 1.77 m et analysé si, compte tenu de l'évolution du niveau moyen et de la distribution des niveaux maximum, il était possible que ce seuil soit dépassé. Pour le niveau moyen, les projections issues des modèles CMIP5 sont utilisées (§3). Tandis que pour l'analyse probabiliste des niveaux maximum, nous avons testé à la fois la distribution construite à partir des prédictions de marées (Figure 32a) et celle construite à partir des niveaux d'eau observés (Figure 32b). Dans les deux cas, une marge d'incertitude de 10 cm liée à la précision du MNT est considérée. L'incertitude liée à la variabilité interannuelle n'est en revanche considérée que pour l'analyse basée sur les prédictions de marées (Figure 32a), cette variabilité interannuelle étant déjà intégrée dans la distribution des niveaux maximum observés. L'intervalle de confiance 95 %<sup>6</sup> est représenté par l'enveloppe grise. Ainsi, nos résultats montrent très clairement que pour les deux méthodes, il est statistiquement possible (compte tenu des incertitudes) que le niveau de 1.77 m soit dépassé 1 fois par an. Les projections d'élévation du niveau marin moyen montrent par ailleurs que ce seuil sera de plus en plus souvent dépassé dans le futur tandis qu'il apparaît très exceptionnel avant 2007 (hors de la gamme d'incertitude).

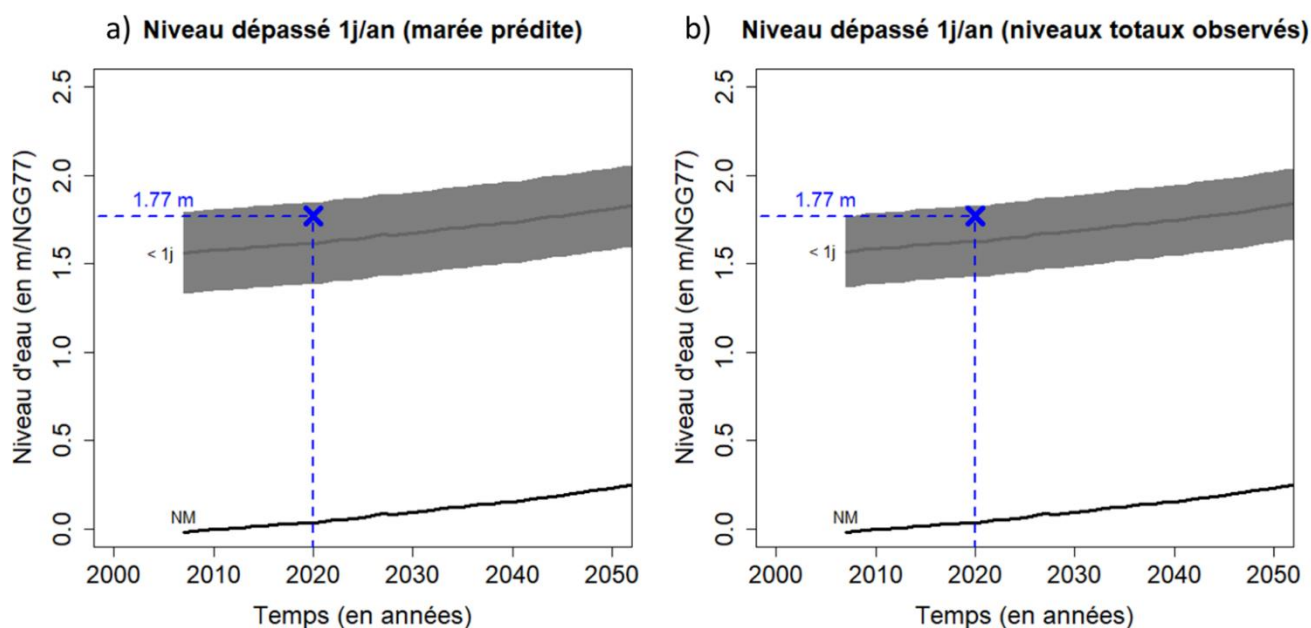


Figure 32 : Analyse probabiliste de dépassement de l'élévation 1,77m (NGG77) à Cayenne à partir des données de la marée prédite (a) et du marégraphe d'Île Royale (b). Le niveau moyen (NM) suit la projection RCP8.5.

Ces résultats montrent donc que notre méthode est en mesure d'identifier la plausibilité d'évènements récents, ce qui donne d'avantage confiance en son utilisation pour l'analyse de projections futures. Dans la suite, nos projections se basent sur la marée prédite, conformément au cahier des charges de GuyaClimat, et aussi car elle permet de prendre en compte la variabilité spatiale de la marée.

#### 4.2.2 Projections de niveau d'eau

Les projections de niveau d'eau moyen dans le référentiel NGG77 pour les 3 sites étudiés aux horizons 2050 et 2100 sont renseignées dans le Tableau 9. Pour chaque trajectoire climatique RCP, nous déclinons trois scénarios dits « bas », « médian » et « haut » permettant de couvrir une large gamme d'incertitude qui tient compte (i) de l'évolution future incertaine du climat, (ii) de sa variabilité intrinsèque, (iii) d'une connaissance incomplète des processus associés et (iv) des incertitudes des mouvements verticaux du sol (§3). Ces trois scénarios sont définis comme suit :

- le scénario « bas » considère (i) une élévation du niveau marin moyen qui suit la limite basse du « likely-range » (cf. §3.1.3.2) du scénario RCP associé et (ii) considère une surrection locale de 2 mm/an ;
- le scénario « médian » considère (i) une élévation du niveau marin moyen qui suit la médiane du scénario RCP associé et (ii) l'absence de mouvements verticaux du sol locaux (*i.e.* conditions stables) ;
- le scénario « haut » considère (i) une élévation du niveau marin moyen qui suit la limite haute du « likely-range » du scénario RCP associé (cf. §3.1.3.2) et (ii) considère une subsidence locale de 2 mm/an.

(a)

Cayenne/Larivot (en cm NGG77)	RCP2.6			RCP4.5			RCP8.5		
	Bas	Médian	Haut	Bas	Médian	Haut	Bas	Médian	Haut
2050	4	19 [12-25]	34	4	19 [13-25]	34	7	23 [16-31]	40
2100	4	40 [23-58]	77	11	48 [30-68]	87	35	78 [54-112]	131

(b)

Kourou (en cm NGG77)	RCP2.6			RCP4.5			RCP8.5		
	Bas	Médian	Haut	Bas	Médian	Haut	Bas	Médian	Haut
2050	17	33 [27-39]	48	18	33 [27-40]	48	22	37 [31-45]	54
2100	18	54 [37-72]	91	26	62 [44-82]	101	49	93 [68-126]	145

(c)

Mana/Pointe des Hattes (en cm NGG77)	RCP2.6			RCP4.5			RCP8.5		
	Bas	Médian	Haut	Bas	Médian	Haut	Bas	Médian	Haut
2050	28	43 [37-50]	59	28	43 [37-50]	59	32	47 [41-56]	64
2100	28	65 [47-83]	101	36	73 [55-92]	111	59	103 [78-137]	155

Tableau 9 : Projections du niveau d'eau moyen (en cm) dans le référentiel NGG77 aux horizons temporels 2050 et 2100 pour les sites de (a) Cayenne, (b) Kourou et (c) Mana. Pour chaque scénario climatique RCPs, les estimations des scénarios bas, médian et haut sont données. Pour le scénario médian, le « likely-range » est ajouté entre crochets.

À échéance 2050, nos projections de niveau moyen (/NGG77) varient entre 4 cm (Cayenne, RCP2.6/bas) et 64 cm (Mana, RCP8.5/haut) en fonction des sites et des scénarios. Pour chaque site, l'écart est en fait faible entre les différents scénarios climatiques RCPs en 2050 en cohérence avec les résultats de projection montrés précédemment (cf. §3.2). L'écart est important en revanche entre les scénarios « bas » et « haut » : passant par exemple de 4 à 34 cm d'élévation du niveau moyen à Cayenne entre 2015 et 2050 pour le scénario RCP4.5. Il est à noter que pour chaque scénario (p.ex. RCP2.6/médian), le niveau marin moyen dans le référentiel NGG77 varie fortement d'un site à l'autre. On trouve par exemple un écart de 25 cm entre les sites de Cayenne et Mana. Cela souligne l'importance de l'étape consistant à unifier le référencement vertical.

À l'horizon 2100, les projections de niveau moyen varient entre 4 cm (Cayenne, RCP2.6/bas) et 155 cm (Mana, RCP8.5/haut) en fonction des sites et des scénarios. L'influence du scénario RCP devient très significative et affiche 40 cm d'écart entre les scénarios « médians » RCP2.6 et RCP8.5, et plus de 50 cm pour les scénarios « hauts ». Il est intéressant de constater que pour le scénario le plus favorable (RCP2.6/bas), les projections du niveau d'eau moyen aux échéances 2050 et 2100 sont égales. Cela signifie que la surrection locale compense la faible élévation du niveau marin liée au changement climatique : un tel scénario est idéalement possible mais très improbable car il implique une évolution du climat conforme aux objectifs fixés par l'accord de Paris de 2015 combiné à une surrection locale anormalement importante compte tenu des observations GPS disponibles et de leurs incertitudes.

Le Tableau 10 reporte pour chaque site, chaque trajectoire climatique RCP et chaque scénario « bas », « médian » ou « haut », la projection de niveau d'eau total maximal journalier dépassé 1j/an, 10j/an et 100j/an. Ces niveaux d'eau combinent des projections de niveau marin moyen (Tableau 9) avec le signal de marée (et sa variabilité spatiale). On peut ainsi constater que le dépassement exceptionnel de la cote critique 1.77 m en octobre 2020 à Cayenne (§4.2.1)

interviendra au moins une fois par an à l'échéance 2050, même en considérant le scénario de changement climatique le plus faible (RCP2.6). À l'horizon 2100, les projections indiquent que ce même seuil sera dépassé probablement plus de 10 j/an dans un contexte climatique favorable (RCP2.6/médian) mais il n'est pas exclu qu'il soit dépassé plus de 100 j/an, soit plus de 3 mois par an (RCP4.5/haut et RCP8.5/médian/haut).

(a)

Cayenne/Larivot (en cm NGG77)		RCP2.6			RCP4.5			RCP8.5		
		Bas	Médian	Haut	Bas	Médian	Haut	Bas	Médian	Haut
2050	1 j/an	162	177	192	162	177	192	165	181	198
	10 j/an	153	168	183	153	168	183	156	172	189
	100 j/an	118	133	148	118	133	148	121	137	154
2100	1 j/an	162	198	235	169	206	245	193	236	289
	10 j/an	153	189	226	160	197	236	184	227	280
	100 j/an	118	154	191	125	162	201	149	192	245

(b)

Kourou (en cm NGG77)		RCP2.6			RCP4.5			RCP8.5		
		Bas	Médian	Haut	Bas	Médian	Haut	Bas	Médian	Haut
2050	1 j/an	167	183	198	168	183	198	172	187	204
	10 j/an	159	175	190	160	175	190	164	179	196
	100 j/an	133	149	164	134	149	164	138	153	170
2100	1 j/an	168	204	241	176	212	251	199	243	295
	10 j/an	160	196	233	168	204	243	191	235	287
	100 j/an	135	171	208	143	179	218	166	210	262

(c)

Mana/Pointe des Hattes (en cm NGG77)		RCP2.6			RCP4.5			RCP8.5		
		Bas	Médian	Haut	Bas	Médian	Haut	Bas	Médian	Haut
2050	1 j/an	182	197	213	182	197	213	186	201	218
	10 j/an	175	190	206	175	190	206	179	194	211
	100 j/an	147	162	178	147	162	178	151	166	183
2100	1 j/an	182	219	255	190	227	265	213	257	309
	10 j/an	175	212	248	183	220	258	206	250	302
	100 j/an	147	184	220	155	192	230	178	222	274

Tableau 10 : Projections des niveaux maximaux journaliers (en cm dans le référentiel NGG77) atteints dans un maximum de 1, 10 et 100 jours/an aux horizons temporels 2050 et 2100 pour les sites de (a) Cayenne, (b) Kourou et (c) Mana. Pour chaque scénario climatique RCPs, les estimations des scénarios bas, médian et haut sont données. Des cases ont été grisées pour améliorer la lisibilité du tableau en lien avec le texte principal.

### 4.2.3 Cartes

Cette section fournit tout d'abord quelques éléments de lecture et compréhension des cartes, et décrit ensuite les résultats principaux par zone.

#### 4.2.3.1 Description des cartes

Les cartes ont été réalisées pour les échéances 2050 et 2100, pour les scénarios RCP2.6, 4.5 et 8.5, et pour les sites de Mana, Kourou et Cayenne. En outre, deux types de planche de cartes sont fournies à chaque fois : une planche montrant les résultats de la méthode de zone basse potentiellement exposée aux submersions chroniques ( $ZB_{MJ}$ ) (§4.1.4.1) et une planche montrant les résultats de la méthode qui tient compte autant que possibles des connexions de surface ( $ZBC_{MJ}$ ) (§4.1.4.2). Au total, ce sont donc  $2 \times 3 \times 3 \times 2$  planches de cartes (soit 36 planches) qui ont été produites et sont toutes fournies en Annexe I : A2 à A11.



Les cartes produites fournissent une information en terme de nombre de jours par an sur les ZB<sub>MJ</sub>, comme illustré par les Figure 33 et Figure 34. Rappelons que N jours par an signifie que pour chacun de ces N jours, la zone est sous le niveau d'eau maximum au moins une partie de la journée (même si ce n'est que 1h ou moins), et que ça se reproduit N fois sur une année. Ces deux figures correspondent aux cartes de ZB<sub>MJ</sub> et ZBC<sub>MJ</sub> produites pour le site de Cayenne, le scénario RCP4.5 à échéance 2100. Dans ce qui suit, nous décrivons comment lire ces figures.

Pour les deux types de cartes, les informations sont fournies sur l'emprise des MNT's utilisés avec une limite marine correspondant à l'interface entre la mer et la mangrove ou les vases intertidales. Cette limite marine a été déterminée par analyse des ruptures de pentes dans les MNT's utilisés pour la cartographie sur chaque site.

La Figure 33 définit les ZB<sub>MJ</sub>. Cette planche contient 3 cartes correspondant aux trois scénarios à échéance 2100 décrits précédemment (§4.2.2) :

- la carte principale correspond au scénario « médian » (i.e. élévation du niveau marin moyen médian du scénario RCP associé sans mouvements verticaux du sol résiduels) ;
- la carte dite « scénario haut » (i.e. élévation du niveau marin moyen qui suit la limite haute du « likely-range » et subsidence locale) ;
- la carte dite « scénario bas » (i.e. une élévation du niveau marin moyen qui suit la limite basse du « likely-range » et surrection locale).

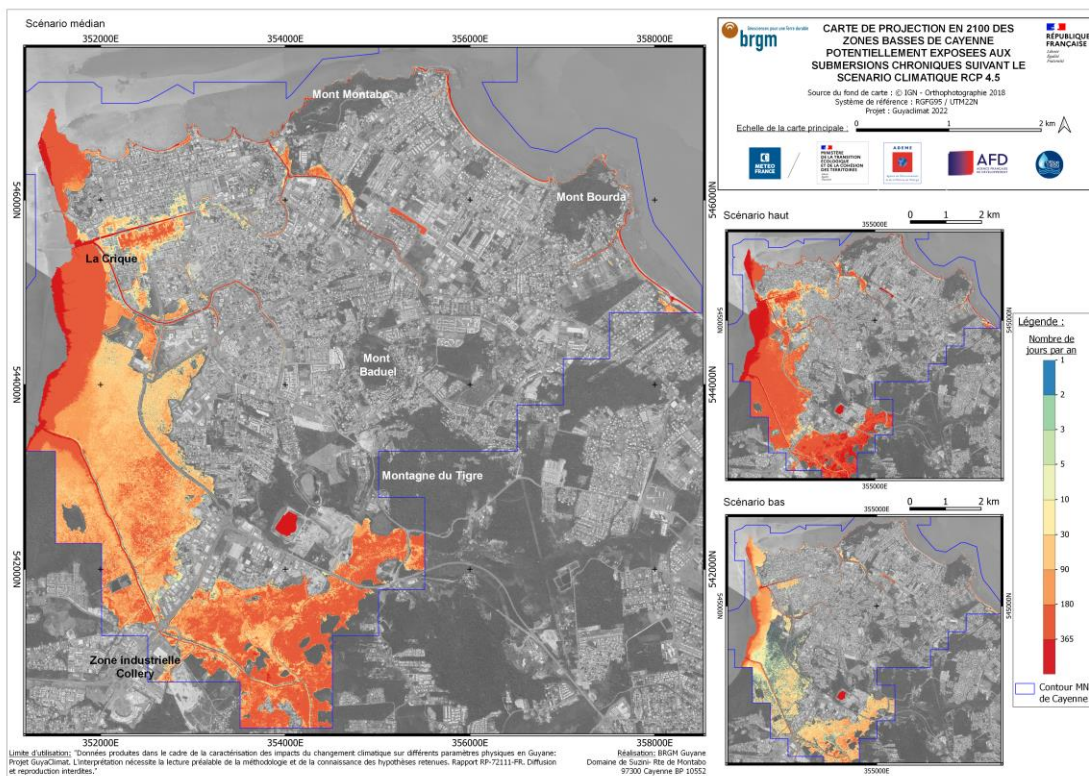


Figure 33 : Exemple de carte des ZB<sub>MJ</sub> produite, ici pour Cayenne et le scénario RCP4.5 à échéance 2100 (cf. Annexe I-A4) .

La Figure 34 définit les ZBC<sub>MJ</sub>, pour les mêmes scénarios que la planche présentée sur la Figure 33, à savoir : le « scénario médian », le « scénario haut » (dénommé Pmax sur la figure) et « scénarios bas » (dénommé Pmin sur la figure). Cette Figure 34 contient en plus une quatrième carte qui présente la différence relative entre le scénario haut et le scénario bas. Cette dernière

carte permet d'illustrer de manière qualitative la sensibilité d'un secteur à se retrouver en  $ZBC_{/MJ}$  compte tenu de l'incertitude sur le scénario climatique examiné. Par exemple, un secteur identifié en  $ZBC_{/MJ}$  1 j/ an pour le scénario bas et en  $ZBC_{/MJ}$  10 j/an pour le scénario haut aura une sensibilité plus importante qu'un secteur restant en  $ZBC_{/MJ}$  365 j/an quelque soit le scénario considéré.

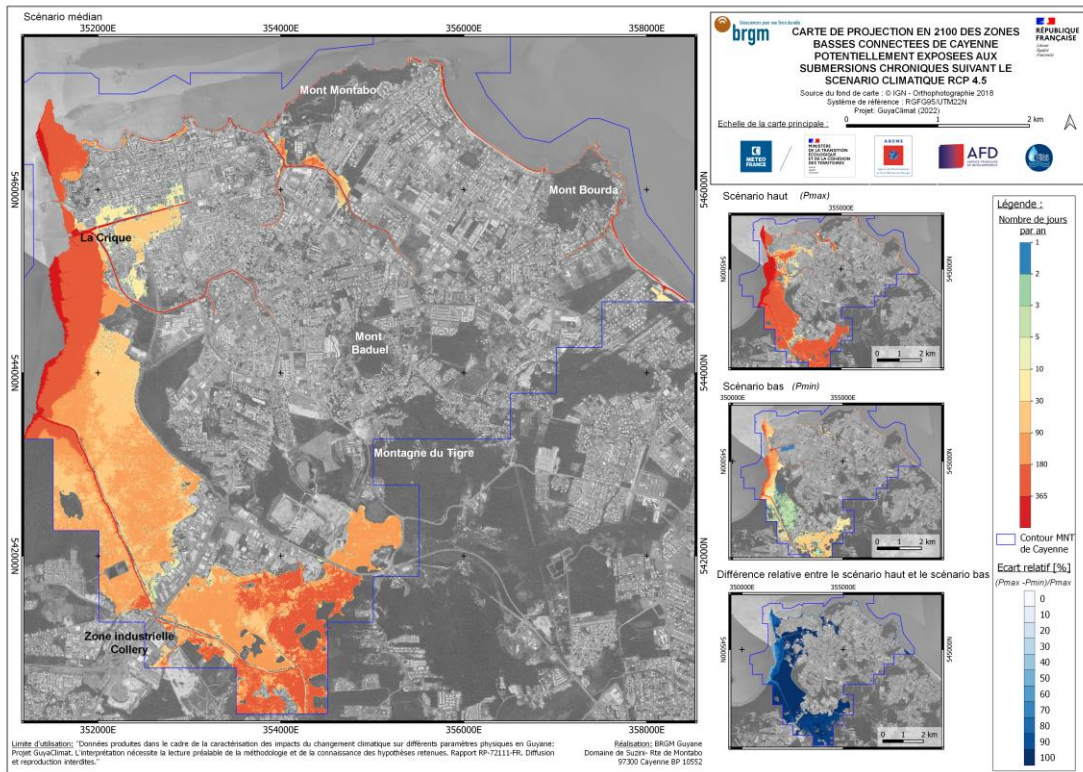


Figure 34 : Exemple de carte des  $ZBC_{/MJ}$  produite, ici pour Cayenne et le scénario RCP4.5 à échéance 2100 (cf. Annexe I-A5).

#### 4.2.3.2 Analyse générale

En terme d'analyse générale, les cartes des  $ZB_{/MJ}$  produites, pour chaque site, et pour les différents scénarios climatiques RCPs à échéance 2050 sont très proches (voire identiques entre les scénarios RCP2.6 et RCP4.5). Ce constat est en cohérence avec les résultats de projection de niveau d'eau montrés précédemment (cf. §4.2.2). L'écart est plus important en revanche entre les scénarios « bas » et « haut ». À l'horizon 2100, l'influence du scénario RCP (et donc des émissions de gaz à effets de serre) devient très significative. Pour le scénario le plus favorable (RCP2.6/bas), conformément aux projections de niveaux d'eau (§4.2.2), on peut noter que les cartes aux échéances 2050 et 2100 sont très proches.

Afin de caractériser l'évolution de l'étendue des zones basses potentiellement exposées aux submersions chroniques, nous analysons d'abord l'évolution des superficies des  $ZB_{/MJ}$  un j/an (cf. §4.1.4.3). La Figure 35 montre les enveloppes des scénarios « bas » à « haut » pour chaque scénario RCP et chaque site. Tout d'abord, Mana apparaît comme le site présentant la plus forte superficie des  $ZB_{/MJ}$ . En terme d'évolution temporelle, si l'on considère les scénarios RCP4.5 « médian » et RCP8.5 « haut » entre 2020 et 2100, la superficie augmente d'environ 50 % et 100 % aussi bien à Cayenne et Kourou, tandis qu'elle augmente plus modérément à Mana.



L'extension des zones basses potentiellement exposées aux submersions chroniques augmente au cours du XXI<sup>ème</sup> siècle, mais de manière inégale selon les sites et les scénarios. Par exemple, à Cayenne, pour le scénario RCP4.5 « médian » (Figure 35 trait central de la boîte bleu), contrairement à la remontée du niveau marin, la superficie augmente plus vite entre 2020 et 2050 qu'entre 2050 et 2100. À Kourou, pour ce même scénario, l'évolution semble plus proportionnelle au temps (*i.e.* pente constante).

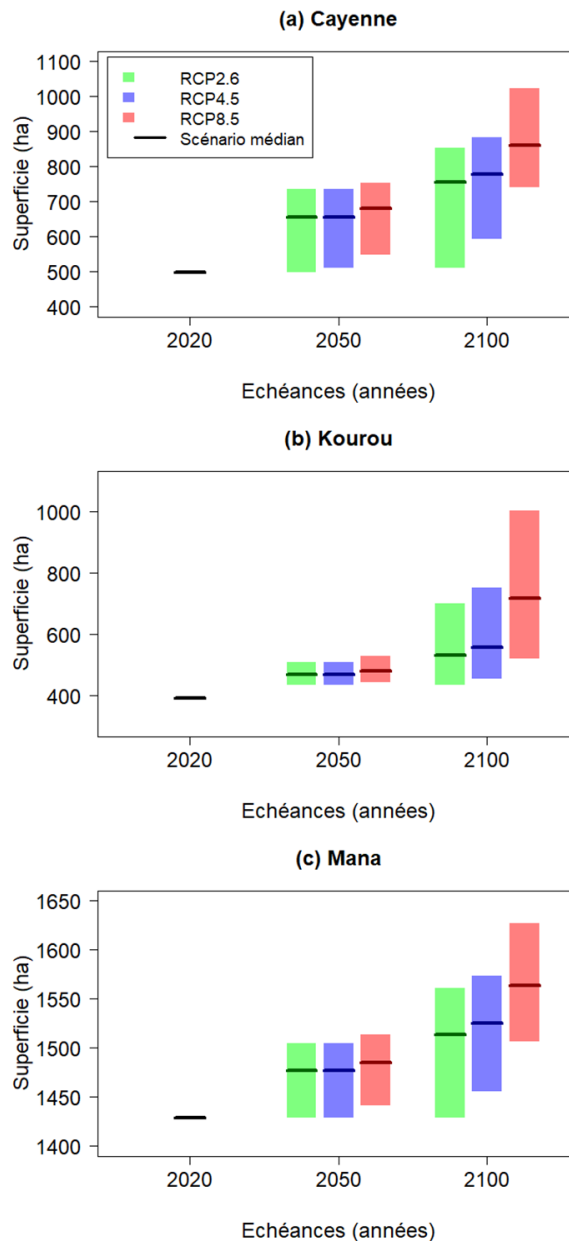


Figure 35 : Enveloppes probables de superficie des zones basses associées à chaque scénario (RCP2.6 : vert, RCP4.5 : bleu, RCP8.5 : rouge) et échéance. (a) : Cayenne. (b) : Kourou. (c) : Mana. Chaque enveloppe est délimitée par le scénario bas, la médiane (trait plein noir) et le scénario haut). La superficie indiquée en 2020 correspond au scénario RCP4.5 médian (pour plus d'explications, voir §4.1.4.1).

Afin de mieux comprendre les formes de ces courbes et les changements de pentes entre échéances, nous analysons plus en détails les MNTs, en calculant les superficies de zones basses pour la gamme de niveau d'eau allant de 1.5 à 3.2 m NGG77 (Figure 36), gamme qui permet d'encadrer les projections des niveaux maximaux journaliers (cf. Tableau 10). Sur ces courbes, nous avons ajouté : d'une part les valeurs pour 2020, 2050 et 2100 pour le scénario RCP4.5 « médian », et d'autre part indiqué en trait pointillé la gamme de variation des niveaux maximaux journaliers de fréquence 1 j/an pour tous les scénarios considérés dans cette étude. Ces courbes illustrent les caractéristiques très différentes des MNT's. Ainsi, on constate que pour le MNT de Cayenne (courbe bleu), la superficie augmente tout d'abord fortement entre les points repères 2020 et 2050 (RCP4.5 « médian »), puis plus lentement entre les points repères 2050 et 2100. Pour Kourou (rouge), l'évolution est relativement proportionnelle au niveau d'eau. Pour Mana (vert), on note une petite diminution de la pente de la courbe en fonction du niveau d'eau.

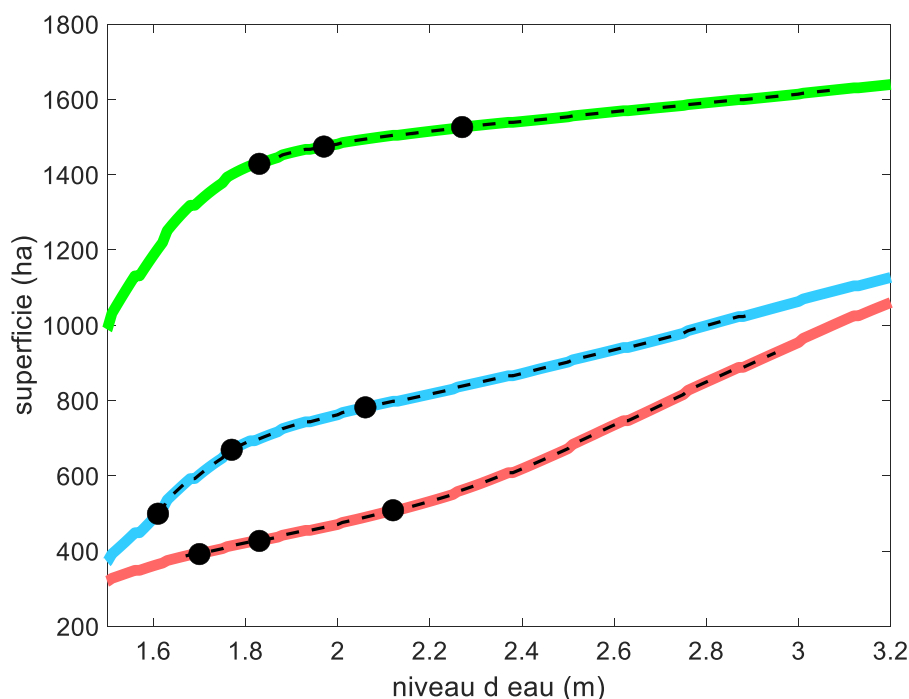


Figure 36 : Analyse des MNT's : superficie des zones dont l'altitude est inférieure au niveau d'eau considéré (cf. axe horizontal de la figure) pour Cayenne (bleu), Kourou (rouge) et Mana (vert). Les pointillés indiquent les gammes de valeurs de niveaux pour la fréquence 1 j/an entre 2020 et 2100. Le long de chaque courbe, les symboles se réfèrent au scénario RCP4.5 médian aux 3 horizons (2020, 2050, 2100) comme valeurs repères pour comparaison avec la Figure 35.

#### 4.2.3.3 Cayenne

La commune de Cayenne est le chef-lieu de la collectivité territoriale de Guyane. Implantée entre le fleuve de la rivière de Cayenne à l'est et le fleuve Mahury à l'ouest, cette commune avec les communes de Rémire-Montjoly et Matoury, forment la presqu'île de Cayenne.

La presqu'île de Cayenne présente une diversité de type de paysage, de nature et de topographie. Notamment la spécificité de la presqu'île de Cayenne est qu'elle est composée de différents monts rocheux comme le mont Bourda, le mont Montabo, la montagne du Tigre ou encore le mont Mahury. Ces monts, constitués de roches métamorphiques, peuvent atteindre jusqu'à 150 m de haut (Montagne du Tigre) et 234 m (Mont Mahury). Ces formations recourent

des formations plus récentes constituant la plaine côtière composée de sable et de vase. En-deçà de 10 m d'altitude, la plaine côtière est formée d'anciens cordons littoraux jusqu'aux plages sableuses actuelles qui composent la côte de Cayenne (cf §2.3.1). Le littoral de Cayenne concentre aussi des zones marécageuses au substrat vaseux colonisé par la mangrove, comme la zone située derrière la zone industrielle de Collery (Figure 33).

Au regard des résultats des cartes, les secteurs situés à proximité ou derrière les plages sableuses et les côtes rocheuses ne représentent pas des zones basses potentiellement exposées aux submersions chroniques (Figure 33 et Annexe I-A2 et A3). Ces dernières sont localisées à proximité des canaux qui se jettent directement en mer et au niveau des secteurs envasés et/ou colonisés par la mangrove.

Les canaux Laussat et Leblond, se jettent dans la rivière de Cayenne au niveau du Village Chinois. Le canal Leblond représente une voie d'accès privilégié pour les pêcheurs et est soumis à un envasement. Le canal Laussat est séparé avec le canal Leblond par une vanne-écluse et permet l'évacuation des eaux pluviales de Cayenne. Cet ouvrage hydraulique a fait l'objet d'un diagnostic est présente quelques défauts d'étanchéité et d'infiltration d'eau (BRLi, 2018).

Depuis 2020 (également en 2022), plusieurs observations de submersion chronique au niveau du canal Leblond (Figure 37 et §4.2.1) ont été recensées. Ce secteur matérialisé sur la Figure 37, à horizon 2050, est sous le niveau maximal 1 j/an pour le scénario RCP2.6 à 2050 et 3 j/an pour RCP 8.5. À horizon 2100 ces valeurs sont de 30 j/an pour le scénario RCP2.6 à 180 j/an pour RCP8.5.

Sur l'ensemble des cartes, le secteur, compris entre la rue Ernest Prévost et la Rue du 14 et 22 juin 1962, se situe en deçà du niveau d'eau maximal plusieurs fois par an (encadré bleu de la Figure 37). D'ici 2050, l'exposition aux submersions chroniques se fait par la connexion avec le canal Laussat (flèche rouge de la Figure 37). Comme indiqué dans le §4.1.4.2, la vanne écluse du canal Laussat est supposée comme toujours ouverte dans le cadre de cette étude, surestimant les résultats sur ce secteur. Néanmoins, ces résultats montrent l'importance d'une maintenance régulière de la vanne. À horizon 2100, cette zone est également connectée par le canal Leblond qui n'est pas contraint par un ouvrage hydraulique. À long terme cette zone est donc vulnérable aux submersions chroniques par l'accès du canal Leblond.

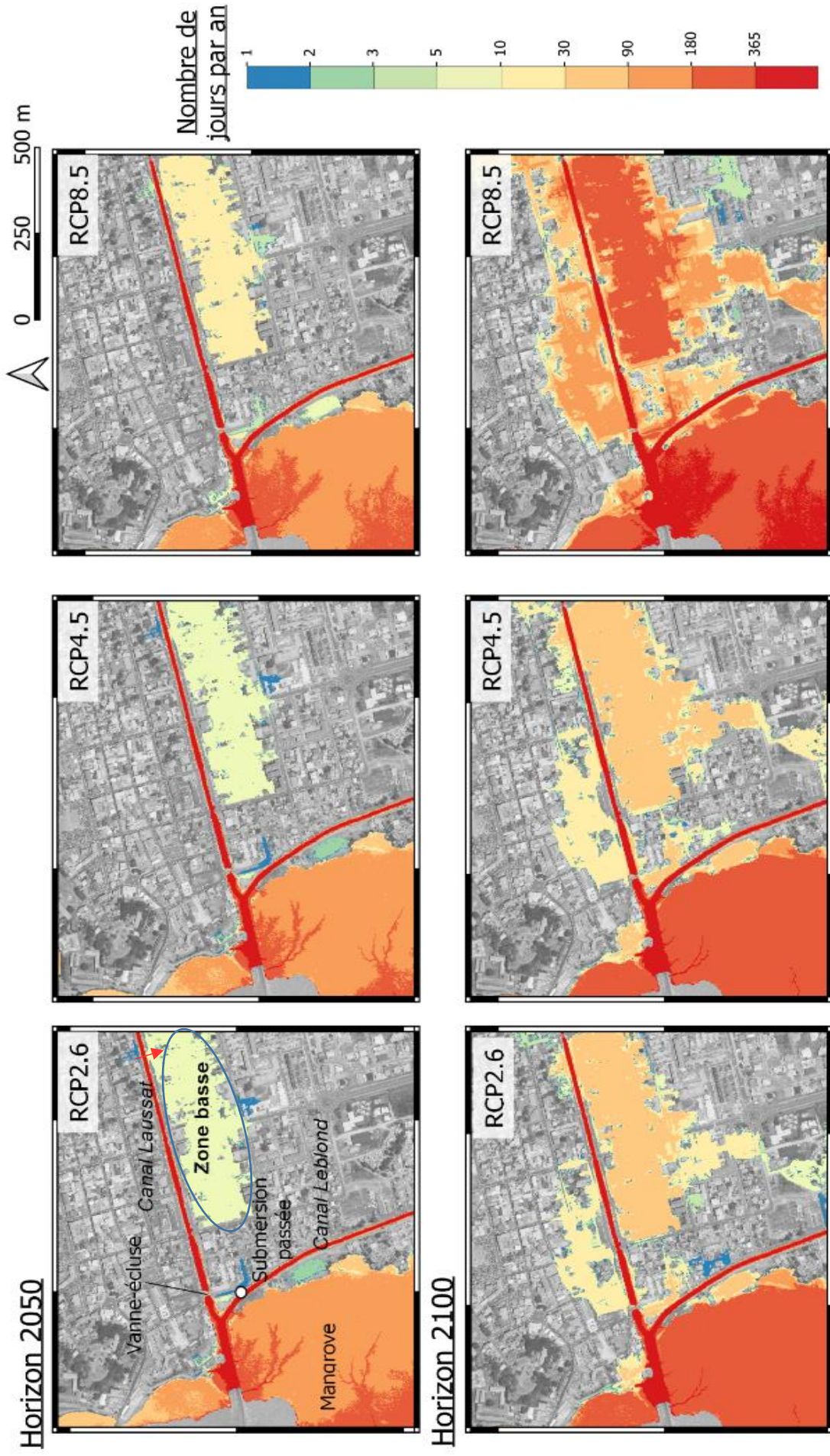


Figure 37 : Cartes de projection des ZBC<sub>maj</sub> au niveau du canal Laussat en fonction des différents scénarios « médians » RCP2.6, RCP4.5 et RCP8.5 pour l'horizon 2050 et 2100. Le cercle bleu correspond à la zone située entre la rue Ernest Prévost et la Rue du 14 et 22 juin 1962. La flèche en rouge indique l'endroit où se réalise la connexion avec le canal.



La zone Collery est recoupée par la crique Fouillée et est située à proximité d'une zone humide du nom éponyme. La partie ouest de la zone humide se situe au niveau de l'embouchure de la rivière de Cayenne et est colonisée par de la mangrove (Figure 38). La zone humide a été remblayée afin de pouvoir créer la zone industrielle. La carte de projection de  $ZBC_{MJ}$ , indique que la zone humide est plus de 30 j/an sous le maximum du niveau d'eau journalier dès 2050 (Figure 38). La zone Collery, située à proximité de la crique Fouillée, est plus de 90 j/an sous le niveau maximum à 2100 si le scénario RCP8.5 est considéré (cercle noir sur la Figure 38). La zone humide de la crique Fouillée représente un enjeu environnemental pour de nombreuses espèces végétales et animales. L'augmentation d'une contrainte de salinisation en nombre de jour par an de cette zone pourrait engendrer sur le long terme des impacts environnementaux sur ces écosystèmes.

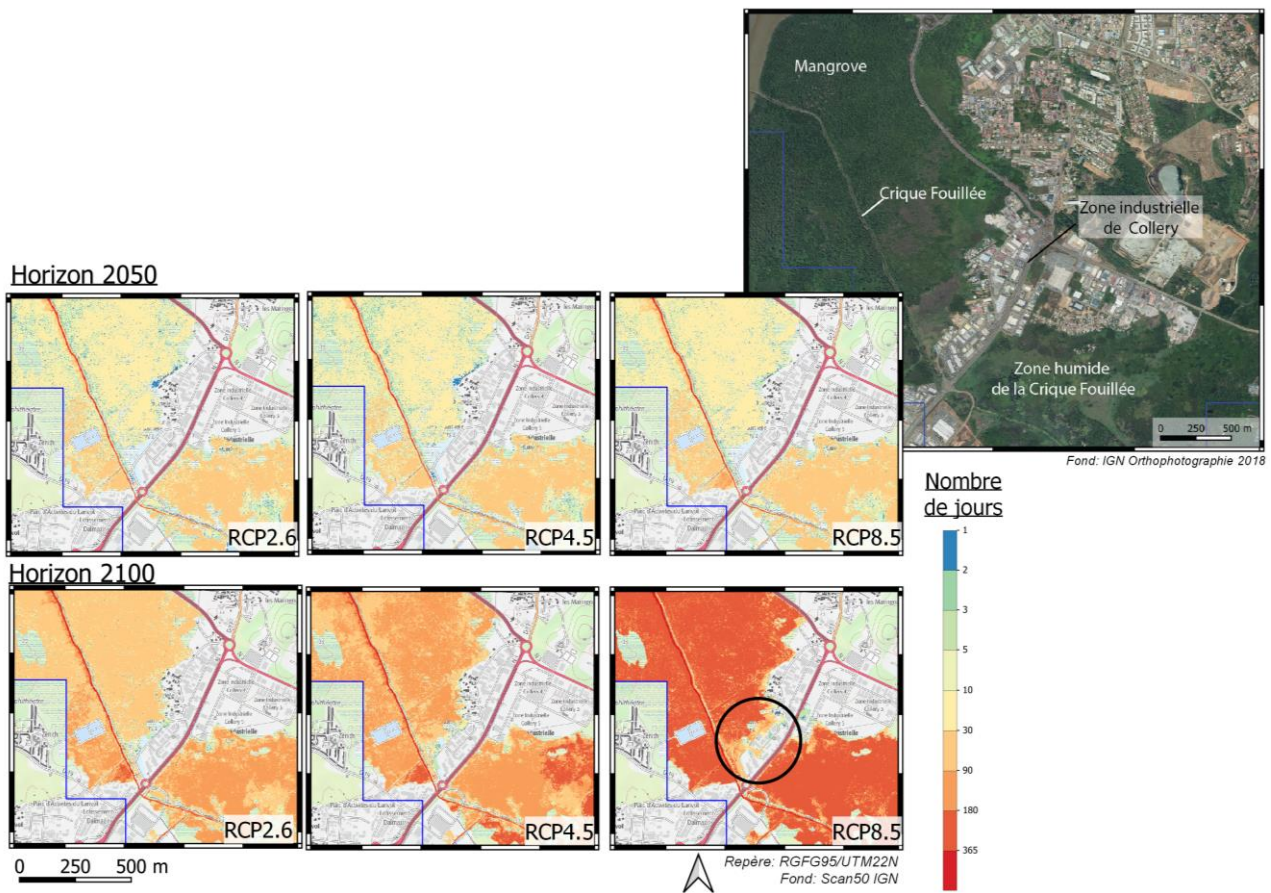


Figure 38 : Carte de projection pour les scénarios médians des  $ZBC_{MJ}$  pour les horizons 2050 et 2100, au niveau de la crique Fouillée. Le cercle noir correspond à la zone Collery.

#### 4.2.3.4 Kourou

Le littoral de Kourou est composé d'un promontoire rocheux au niveau de la pointe des Roches puis d'une zone basse continue d'altitude inférieure à 5 m. Typique de la plaine côtière (cf §2.3.1), ces zones basses sont constituées de succession de cordons sableux parallèles à la côte et de dépressions vaseuses. Le fleuve Kourou constitue la limite sud de la ville. Les berges basses sont vaseuses et colonisées par la mangrove.

La ville de Kourou est une ville récente qui a commencé à se développer dans les années soixante avec l'implantation du Centre Spatial Guyanais (CSG) sur la commune. À cette époque, des habitations ont été construites pour les employés du CSG. Les quartiers présents sur le front de mer ont été construits tout au long de la période 1964 -1992 en remblayant les différents « pripri » (ou marécages) en prélevant le sable au niveau de la carrière Guatemala sur la rive droite du fleuve Kourou et en créant les trois lacs actuellement présents sur la commune (Figure 39).

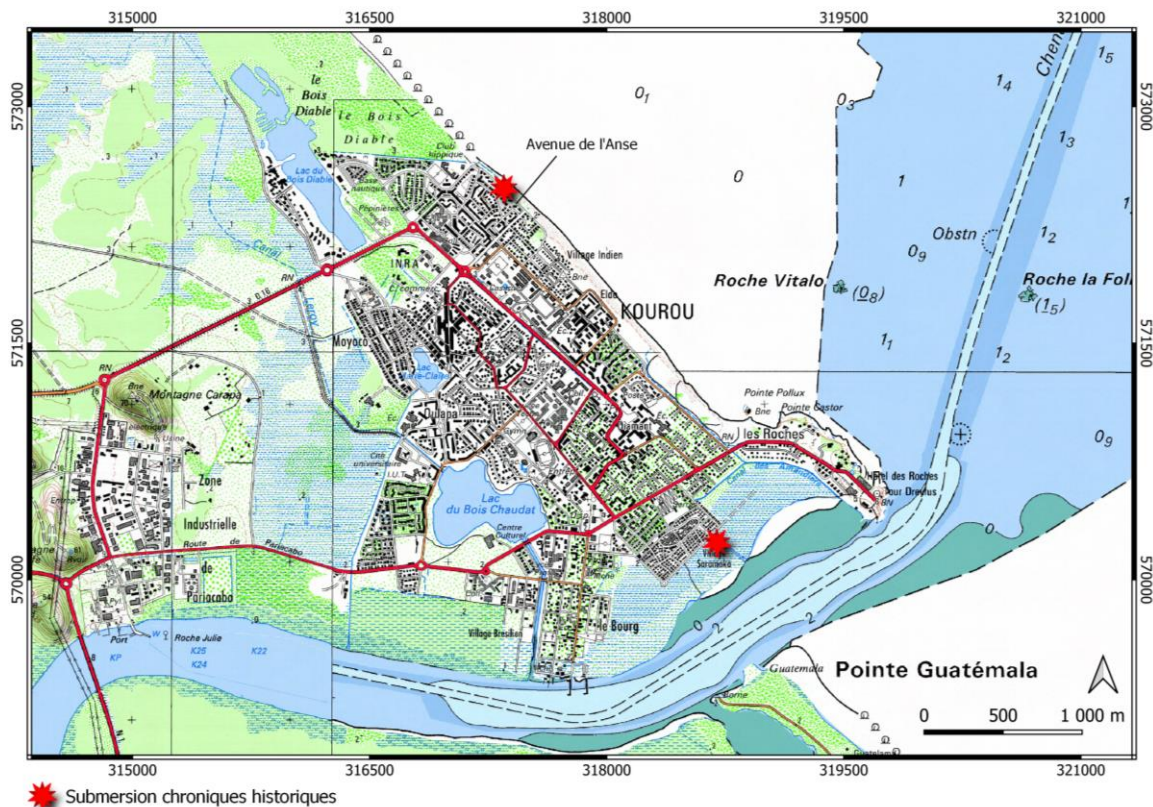


Figure 39 : Présentation du secteur de Kourou et des submersions chroniques passées associées (étoiles rouges).

À Kourou, les témoignages recueillis n'ont pas pu être vérifiés par des photographies. Deux témoignages ont été évoqués par la mairie de Kourou. Le premier concerne des inondations lors des marées de vives eaux passant par les canalisations d'évacuation d'eau pluviale au niveau de l'avenue de l'anse sur la plage de la Cocoteraie. Cette zone est complexe car elle a connu un recul de la position du trait de côte en 2016 et 2017 (Longueville *et al.*, 2017) entraînant la destruction de la route et d'ouvrages hydrauliques permettant l'évacuation des pluies. Des travaux d'urgence ont été réalisés pour protéger les biens et les personnes, mais des problèmes persistent dans la gestion de l'évacuation des eaux (obstruction des canalisations par le sable etc.). Ainsi, l'origine exacte des inondations est difficile à identifier. Toutefois, ce premier témoignage suggère que l'avenue de l'anse sur la plage de la Cocoteraie peut être inondé en marée de vives-eaux via les canalisations d'évacuation des eaux pluviales, et donc que les cartes des ZB<sub>MJ</sub> apportent une information utile, en complément des cartes des ZBC<sub>MJ</sub>.

Le second témoignage est situé à l'est de Kourou, au niveau du bourg du village Saramaca, où des inondations ponctuelles ont été recensées. Même si le témoignage ne précise pas si l'inondation venait des canaux, compte tenu de la morphologie du secteur et des informations recueillies, ce témoignage présente moins d'incertitude que le premier.



Bien que le bourg du village Saramaca (cercle bleu sur la Figure 40) ne soit pas connecté en surface avec le fleuve, les projections montrent qu'en 2050 pour le scénario RCP2.6, cette zone se situera sous le maximum du niveau d'eau journalier entre 90 et 180 j/an. Ce chiffre monte à 255 j/an pour le scénario RCP8.5 à 2100 (Figure 40). Au vu de la configuration du quartier avec les deux canaux qui recoupent le secteur, nos résultats suggèrent que le site sera particulièrement exposé aux submersions chroniques.

Horizon 2050

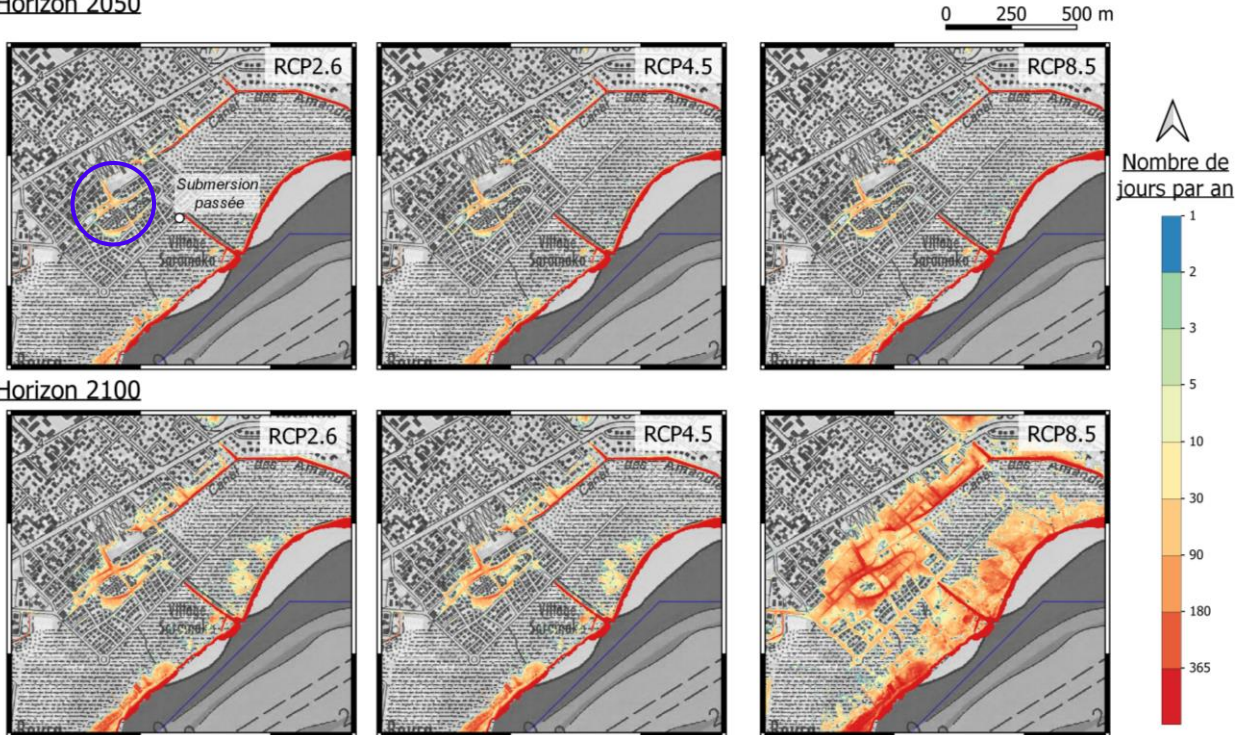


Figure 40 : Carte des projections  $ZB_{MJ}$  pour des scénarios médians au niveau du Village Saramaca, à horizon 2050 et 2100 pour les scénarios RCP2.6, 4.5 et 8.5. Cercle bleu : Zone basse du village Saramaca non reliée aux canaux mis à part pour le scénario RCP8.5 à horizon 2100 (fond : ScanLitto2010 IGN).

Ni la pointe des Roches, ni le front de mer sableux ne représentent des  $ZB_{MJ}$ . Comme pour Cayenne, les zones à risque sont situées à proximité des canaux et proche des berges colonisées par la mangrove au sud du site d'étude à l'intérieur du fleuve (Annexe I : A6 à A9).

L'extrémité est de la ville est une zone humide, reliée au fleuve par différents canaux. Cette zone concentre plusieurs enjeux car un projet d'Opération d'Intérêt National (OIN) est à l'étude. Il s'étend entre le lac Bois Chaudat et la zone industrielle de Pariacabo (Figure 41). D'après les cartes de projections des  $ZBC_{MJ}$  pour un scénario RCP8.5 (Figure 41), ce secteur ainsi que les autres zones humides et zones envasées constituant les berges sont sous le maximum du niveau d'eau journalier 180 j/an en 2050. En 2100, elles le sont sur la quasi totalité de l'année (Figure 41).

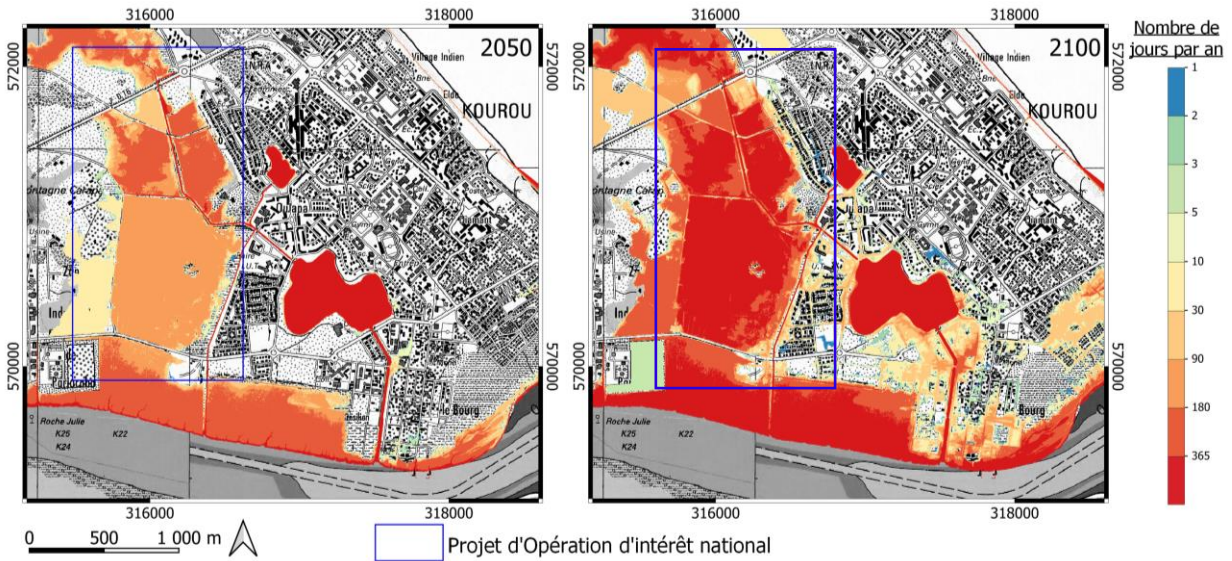


Figure 41: Projection des ZBC<sub>MJ</sub> pour le scénario médian à RCP8.5 à 2050 (gauche) et 2100 (droite). Encadré bleu : emprise large du projet d'OIN.

#### 4.2.3.5 Mana

Le bourg de Mana, localisé à l'ouest de la Guyane, a été initialement édifié sur un ancien cordon sableux caractéristique de la série de Cosvine (cf §2.3.1). Il se trouve enserré par des zones basses et marécageuses. Au sud de la ville en bordure du fleuve, des terrains ont été remblayés lors de la construction du pont. Le nord est quant à lui constitué de marécages. Comme les autres communes de la Guyane, Mana connaît une explosion démographique engendrant une pression en terme de construction d'infrastructures et de logements. Dans ce contexte, il est nécessaire de cibler les zones basses de la commune, potentiellement exposées aux submersions chroniques, pour appuyer le développement de la ville.

Néanmoins, contrairement à Kourou et Cayenne, le bourg de Mana ne donne pas directement sur l'océan. Son fleuve éponyme, se jette à environ 10 km du bourg et est soumis aux variations de la marée. En outre, rappelons que le niveau moyen de référence par rapport au 0/NGG77 est celui disponible à la Pointe des Hattes, située à environ 20 km de Mana, tout comme les prédictions de marées utilisées. Or le niveau moyen de l'eau par rapport au 0/NGG77 n'est pas uniforme, en particulier dans les rivières, où, généralement, il augmente de l'aval vers l'amont (voir par exemple Guo *et al.*, 2015,2020), via des phénomènes d'interaction avec la morphologie de la rivière et les débits continentaux. Ainsi, le niveau moyen que nous utilisons comme référence sous-estime vraisemblablement le niveau moyen à Mana. De plus, la marée elle aussi se déforme (en forme et amplitude) lorsqu'elle remonte une rivière (voir par exemple Guo *et al.*, 2015, 2020) et l'état et le fonctionnement des ouvrages hydraulique sur Mana sont peu connus et considérés comme transparent à l'écoulement. Ces éléments engendrent donc une incertitude supplémentaire. Par ailleurs, la méthode des ZBC<sub>MJ</sub> est très sensible à toute variation ou incertitude du MNT en particulier quand les connexions se passent via quelques pixels (par exemple, ici, entre la rivière et le bourg de Mana). Afin de limiter les incertitudes des cartes produites sur Mana, seules les cartes des ZB<sub>MJ</sub> sont fournies, ces cartes de zones basses étant donc surtout sujettes à l'incertitude liée au niveau moyen et à la déformation de la marée.



Les évènements historiques indiquent que sur la rue du 8 mai 1945 lors des marées de vives eaux l'eau a atteint le sommet du dégrad<sup>7</sup>, sans jamais inonder la route (Figure 42). Malgré l'absence de dates précises sur ces évènements, ce type de témoignage est cohérent avec les résultats obtenus suite à la cartographie des ZB<sub>MJ</sub> (Annexe I : A10 et A11).

Le second témoignage indique des inondations temporaires au sud du bourg au niveau de la rue Aurélien Attrée dans le secteur compris entre le bourg et le pont (Figure 42). Aucun témoignage précis sur la fréquence en nombre de jour/an, n'a pu être relevé. Néanmoins cette zone apparaît exposée aux submersions chroniques selon nos projections (Figure 43 et Annexe I : A10 et A11).

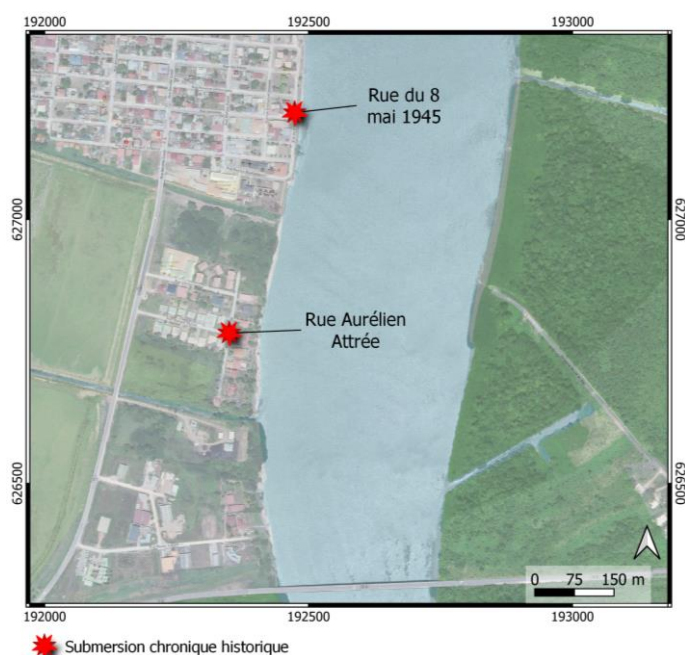


Figure 42 : Présentation du secteur de Mana et de la localisation des informations historiques de submersion collectées (étoiles rouges).

D'après les cartes des ZB<sub>MJ</sub>, le secteur sud de la ville est situé sous le maximum du niveau d'eau journalier, du scénario RCP2.6-2050 au scénario RCP8.5-2100.

Pour le scénario médian à RCP2.6-2050, ce secteur est sous le maximum du niveau d'eau environ 30 j/an. En 2100, la quasi-totalité du secteur sud passe de 90j/an pour le scénario RCP2.6 à presque 365 j/an pour le scénario RCP8.5 (Figure 43).

<sup>7</sup> En Guyane, le dégrad désigne un lieu de mise à l'eau de chargement, déchargement des pirogues ou autres embarcations.

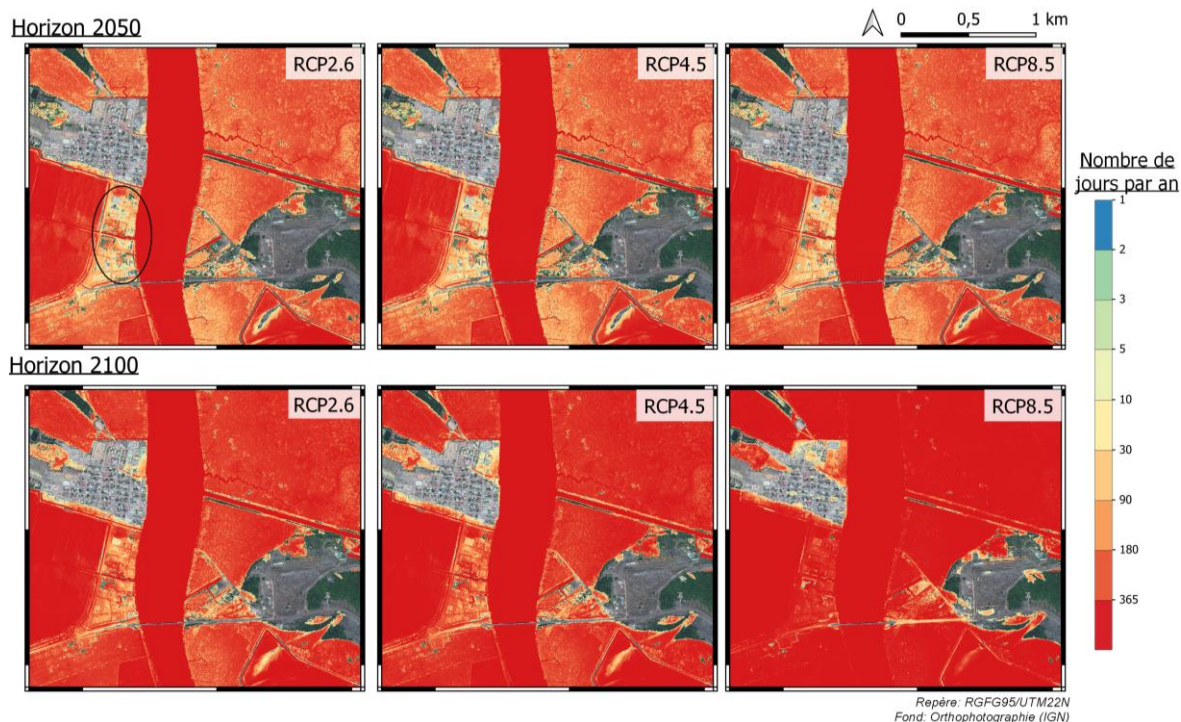


Figure 43 : Carte de projection des  $ZB_{MJ}$  des scénarios médians pour les horizons 2050 et 2100, au niveau de la commune de Mana. Le cercle noir correspond à la zone comprise entre le pont et le sud du bourg.

### 4.3 DISCUSSIONS

Les projections des  $ZB_{MJ}$  pour les différents scénarios présentés ci-dessus constituent une base de travail en amont de la mise en place de documents réglementaires et stratégiques de planification.

Toutefois, cette étude s'est limitée à trois sites et nous avons pu voir que la marée n'était pas uniforme entre nos 3 sites d'étude. Dans ce qui suit, nous apportons des éléments complémentaires sur les variations spatiales de la marée à l'échelle de la Guyane. Par ailleurs, nous revenons sur certaines limites de la méthode de cartographie utilisée.

#### 4.3.1 Variabilité spatiale de la marée

Les données de Références Altimétriques Maritimes (RAM ; source : SHOM, 2020) permettent de caractériser les variations spatiales de la marée, mais uniquement entre les marégraphes où des données sont fournies dans le RAM. Ainsi, avec des valeurs de PHMA de 1.63, 1.58, 1.59 et 1.65 m par rapport au niveau moyen, respectivement à Pointe des Hattes, Iles du Salut, Kourou et Ilet La Mère, on note des variations spatiales de l'ordre de 5 cm le long du littoral, avec un niveau qui diminue entre Pointe des Hattes et Kourou, puis qui ré-augmente à Cayenne et Ilet La Mère. On retrouve le même comportement dans les données de marée prédite SHOM (marégraphes Les Hattes, Ile Royale, Ilet La Mère ; Figure 44a).

En complément des données marégraphiques, il existe des bases de données de composantes harmoniques de marée pour tout le globe, comme par exemple la base de données FES2014 (Lyard *et al.*, 2021), qui a une résolution spatiale de  $1/16^\circ$ . Cette base de données a été constituée par modélisation numérique hydrodynamique avec assimilation de données. Elle comporte les

amplitudes et phases de 34 composantes de marée<sup>8</sup>, avec une résolution spatiale de 1/16°. La comparaison des prédictions issues de cette base de données avec les données de marée prédite par le SHOM (Pointe des Hattes, Iles du Salut, Ilet La Mère) montre un bon accord pour l'Ile du Salut et Ilet La Mère. Pour la Pointe des Hattes, les écarts sont plus forts, mais la variabilité spatiale est la même entre les deux jeux de données. Nous utilisons donc les données FES2014 pour compléter la caractérisation de la variabilité spatiale de la marée, à la résolution spatiale de 1/16°. Comme indicateur, nous considérons la PHMA (Plus Haute Mer Astronomique) et la valeur médiane des maximaux journaliers (*i.e.* les niveaux journaliers atteints la moitié de l'année). La Figure 44a confirme les variations spatiales déjà identifiées dans l'analyse des données du RAM et de la marée prédite, mais avec un peu plus de détails. On retrouve que, du Nord au Sud, on a tout d'abord une diminution de la PHMA jusqu'aux environs de Kourou, puis une augmentation jusqu'au Brésil, avec des valeurs atteignant 1.7 m. La visualisation des maximaux journaliers dépassés la moitié du temps (*i.e.* valeur médiane) montre les mêmes types de variation spatiale (Figure 44b).

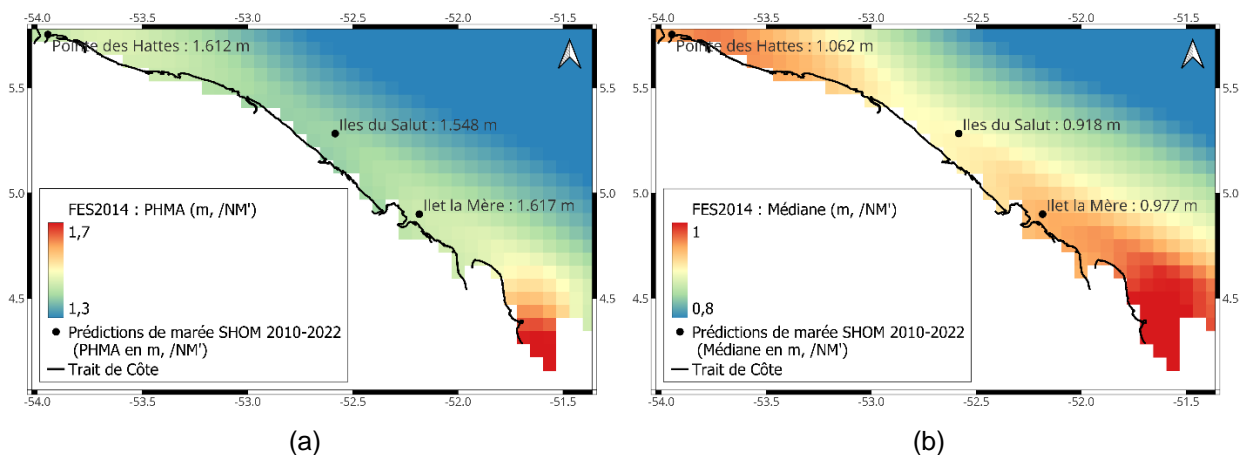


Figure 44 : Cartes (a) des plus hautes mers astronomiques (PHMA) et (b) médiane des maximaux journaliers par rapport au niveau moyen. Calculé à partir de FES2014 (génération séries temporelles de 18 ans et 11 jours). Les valeurs de PHMA et Médiane indiquées au niveau des 3 marégraphes sont obtenus par analyse des séries temporelles de prédictions de marée fournies par le SHOM. NM' est le niveau moyen calculé à partir de chacun des jeux de données (différent du niveau moyen NM donnée dans le RAM). Le trait de côte a été digitalisé à partir des images satellites Sentinel-2 acquises en septembre 2021 (©ESA).

#### 4.3.2 Limites de la cartographie

La cartographie des  $ZB_{/MJ}$  s'appuie sur des modèles numériques de terrain réalisés à un instant donné. Les évolutions topographiques naturelles (envasement, migration de la mangrove etc.) ou anthropiques (travaux, remblai, etc.) réalisées entre 2015 (date du MNT utilisé) et 2022 pour les communes de Cayenne et de Kourou et entre 2017 (date du MNT utilisé) et 2022 pour Mana ne sont pas prises en compte, ce qui peut influencer les points hauts et donc la cartographie des  $ZB_{/MJ}$  (en particulier les  $ZBC_{/MJ}$ ).

Le littoral guyanais est soumis à une importante variabilité de la position de son trait de côte sous l'action de la migration des bancs de vase (cf. §2.3.2). Plusieurs interrogations perdurent sur la cinétique des bancs de vase, l'évolution des estuaires ou encore les bilans sédimentaires au sein des plages. Néanmoins, à la lecture des cartes des  $ZBC_{/MJ}$ , les secteurs les plus vulnérables sont

<sup>8</sup> Les 34 composantes : 2N2, EPS2, J1, K1, K2, L2, La2, M2, M3, M4, M6, M8, Mf, MKS2, Mm, MN4, MS4, MSf, MSqm, Mtm, Mu2, N2, N4, Nu2, O1, P1, Q1, R2, S1, S2, S4, Sa, Ssa, T2

situées à proximité des canaux. La majorité de ces ouvrages est toujours en eau lors des coefficients de marées de vives eaux, quelle que soit la situation, envasée ou non, du littoral. Par exemple, le canal Leblond, qui est un point d'accès pour les pêcheurs de Cayenne, est entretenu régulièrement. Malgré la forte variabilité de l'évolution du littoral, en cas de marée de vives eaux, les zones basses en bordures des canaux restent donc exposées aux submersions chroniques.

Les cartes des  $ZB_{MJ}$  indiquent toutes les zones dont l'altitude est inférieure au maximum journalier de niveau d'eau à la côte, indépendamment de si elles sont connectées ou pas à la mer. Le croisement de ce type de carte avec les informations de réseaux urbains peut être utile pour identifier par exemple les zones potentiellement inondables par remontée de l'eau de mer dans le réseau urbain. En outre, ces cartes peuvent aussi être utiles pour identifier les zones vulnérables en cas de forte modification de la frange littorale ou des zones de points hauts.

Les cartes des  $ZBC_{MJ}$  produites dans cette étude présentent l'intérêt de prendre en compte les « connexions de surface ». En d'autre terme, elle cherche à identifier un chemin à la surface du sol connectant la mer et la zone basse concernée et tel que le point haut de ce chemin est inférieur au niveau d'eau à la côte. Ceci-étant, il est important de garder à l'esprit les limites de ce type de cartographie (§4.1.4.4). Elles n'intègrent notamment pas la dynamique des écoulements, en particulier l'absence de frottements et l'hypothèse d'un niveau maximum journalier constant. Ainsi, quelque soit le nombre de pixels par où passe l'eau, l'extension de la zone basse sera toujours la même.

Considérons par exemple le cas de points hauts (ex : digues, routes) qui séparent deux zones basses. À Cayenne, la nationale N1, qui relie le giratoire Leblond avec celui des Maringouins, sépare la zone humide en deux parties distinctes. Pour le scénario RCP8.5 à 2100, la zone à l'est est en  $ZBC_{MJ}$  2j/an (Figure 45). Pour identifier par quels pixels se fait la connexion, il faut regarder uniquement les pixels  $\geq 2j/an$ . Sur ce cas, on voit que la connexion entre les 2 zones se fait par un seul pixel au niveau de la route (Figure 45c). Dans cet exemple, on peut penser que ce type de méthode sur-estime l'exposition de la zone basse à l'est de la nationale. Seule une modélisation numérique hydrodynamique pourrait permettre de dresser des cartes de submersion prenant en compte de manière complète la dynamique des écoulements.



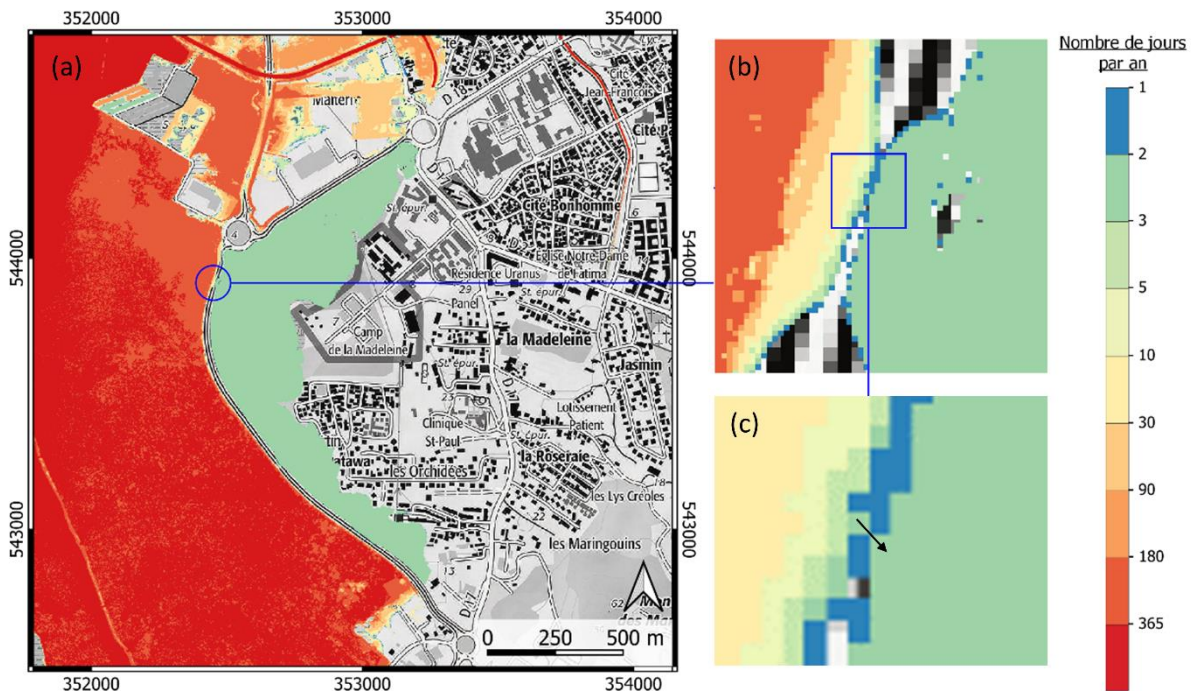


Figure 45 : Exemple de sur-estimation potentielle de l'emprise des ZBC<sub>/MJ</sub> liées à l'écoulement par un pixel, au niveau de la zone industrielle de Pariacoabo à Kourou pour le scénario haut RCP8.5 à horizon 2100. La flèche noire (c) indique par où se fait la connection entre la zone basse ouest et la zone basse est.

Excepté le bourg, le territoire de la commune de Mana, apparaît comme étant une zone potentiellement à risque (§4.2.3.5). La cartographie des cartes des ZB<sub>/MJ</sub> s'appuie sur la projection du niveau marin et sur les caractéristiques de la marée. Rappelons que les projections de remontée du niveau marin utilisées sont à l'échelle de la Guyane tandis que le niveau moyen de référence par rapport au 0-NGG77 est celui disponible à la Pointe des Hattes, située à environ 20 km de Mana, tout comme les prédictions de marées utilisées (ce sont les plus proches disponibles). Or le niveau moyen de l'eau par rapport au 0-NGG77 est probablement plus important que celui utilisé dans cette étude (à savoir, celui à la Pointe des Hattes), tandis que la marée, elle, se déforme (en forme et amplitude) lorsqu'elle remonte une rivière (voir par exemple Guo *et al.*, 2009) (cf §4.2.3.5). Ces éléments engendrent une incertitude sur la cartographie des ZB<sub>/MJ</sub> et ZBC<sub>/MJ</sub> pour le site de Mana. Une estimation plus fine du niveau moyen et de la marée le long des rives de Mana nécessiterait l'acquisition de données *in situ* en déployant par exemple un capteur de pression ou un marégraphe sur les zones à enjeux afin de restreindre finement les conditions aux limites.

## 5. Évolution des paramètres physiques : températures, précipitations, vents et vagues

### 5.1 MÉTHODES

#### 5.1.1 Préambule : Le climat guyanais sous l'influence de la ZCIT

Le climat de la Guyane, de type équatorial, est caractérisé par des températures élevées et stables tout au long de l'année, une forte humidité et des cumuls de précipitations importants, qui toutefois varient saisonnièrement en fonction des migrations nord-sud de la Zone de Convergence Inter-Tropicale (ZCIT). Parfois appelée « équateur météorologique », il s'agit d'une ceinture de basses pressions, de fortes précipitations et de faibles vents de surface, au déplacement méridional saisonnier. Elle évolue au gré du déplacement des centres d'action (dans le bassin Atlantique, il s'agit notamment des anticyclones des Açores dans l'hémisphère Nord et de Sainte-Hélène dans l'hémisphère Sud) et des flux d'alizés (vent d'est) qui lui sont associés. Précisons que la ZCIT, bien que considérée à grande échelle comme une structure atmosphérique continue, correspond en réalité à la position moyenne de masse nuageuses discontinues associées notamment à la convection profonde sur une échelle temporelle de l'ordre du mois.

Entre juillet et novembre (ci-après JASON), la ZCIT est située à sa position la plus septentrionale vers 7-9°N, au nord de la Guyane, avec un centre d'action à cheval sur l'Océan Atlantique et l'Afrique de l'Ouest : cet éloignement du territoire se traduit par une diminution de la pluviométrie guyanaise à cette période de l'année, communément appelée « saison sèche » (Héritier 2011). La position nord de la ZCIT implique également une dominance des alizés de sud-est en cette saison, bien que des effets locaux comme la brise de mer le long du littoral, ou transitoires liés par exemple au passage de dépressions au nord de la Guyane, puissent moduler la direction du vent. Entre décembre et février (DJF), la ZCIT se déplace vers sa position la plus méridionale aux alentours de 1-4°N avec un centre d'action positionné cette fois sur le Nord de l'Amérique du Sud. La Guyane se situe alors sous l'influence quasi-directe de la ZCIT, ce qui se traduit par des précipitations abondantes pendant la « petite saison des pluies ». La position sud de la ZCIT implique aussi une dominance des alizés de nord-est. Les précipitations sont encore plus importantes entre avril et juin (AMJ) pendant la « grande saison des pluies » avec le déplacement progressif de la ZCIT vers le nord entre 2°N et 5°N (correspondant aux latitudes de la Guyane). Entre les deux, le « petit été de mars » (M) se traduit par un minimum local de la pluviométrie résultant à la fois de la position très au Sud de la ZCIT (~1°N) et d'alizés bien établis. La force du vent est minimale vers juin-juillet, au moment de la bascule entre grande saison des pluies et saison sèche, lorsque la ZCIT et ses conditions de vents faibles recommencent à s'éloigner du territoire.

En plus de ses mouvements saisonniers, la ZCIT est également soumise à une variabilité interannuelle de sa position, en réponse notamment à ENSO (El Niño-Oscillation Australe, *El Niño Southern Oscillation* en anglais, Rasmusson & Carpenter 1982). Ce phénomène climatique du Pacifique tropical, mode dominant de la variabilité interannuelle (périodicité ~3-7 ans) à l'échelle planétaire du fait de ses téléconnexions avec de nombreuses régions du globe dont l'Atlantique tropical et le Nord de l'Amérique du Sud, voit l'alternance d'événements chauds (El Niño) et froids (La Niña). ENSO influence le déplacement méridien (*i.e.* latitudinal) de la ZCIT et les précipitations associées, El Niño étant généralement marqué par un déficit pluviométrique dans une large région incluant la Guyane, et la Niña par un excédent (Jiang *et al.* 2021). D'autres modes de variabilité interannuelle à grande échelle jouent également un rôle dans la modulation

de la pluviométrie sur le Plateau des Guyanes via celle des températures de surface océaniques dans l'Atlantique (Nurmohamed *et al.* 2007), comme le Niño Atlantique, lui-même lié dynamiquement à ENSO (Hounsou-Gbo *et al.* 2020).

Par ailleurs, concernant les vagues océaniques qui jouent un rôle important dans l'exposition des populations côtières aux risques littoraux tels que la submersion marine ou l'évolution du trait de côte, le littoral guyanais est soumis à l'influence des houles distantes (Gratiot *et al.* 2007). Celles-ci sont issues des dépressions hivernales (au sens de l'hémisphère Nord cad entre novembre et avril, NDJFMA) des latitudes moyennes de l'Atlantique Nord, ou plus rarement d'origine cyclonique pendant la saison du même nom, qui coïncide avec la saison sèche en Guyane (JASON). Des vagues sont également générées localement par le vent de surface (on parle de « mer du vent »), en particulier les alizés de nord-est et de sud-est, et ce toute l'année compte tenu de la persistance de ces vents en dépit des variations saisonnières associées à la ZCIT.

Enfin, en plus de cette description du climat moyen de la Guyane et de ses variations saisonnières et interannuelles en termes de températures, précipitations, vents et vagues, il est important de garder à l'esprit que ces variables météorologiques sont également soumises à une variabilité de plus haute fréquence, de l'ordre de quelques heures à quelques semaines. Ces variations à haute fréquence peuvent parfois conduire à l'apparition d'événements rares voire extrêmes tels que fortes pluies, épisodes secs (sécheresses), vagues de chaleur, vents violents, ou encore fortes houles (Héritier 2011, Osinski *et al.* 2018). Ces événements souvent impactants pour les populations, les infrastructures et les écosystèmes méritent une attention particulière lors de l'analyse du climat guyanais et de son évolution avec le changement climatique.

### **5.1.2 Approche générale : Modélisation climatique globale et descente d'échelle sur la Guyane**

Afin de caractériser l'impact du changement climatique sur les variables météorologiques précitées (précipitations, températures, vents<sup>9</sup>) à l'échelle territoriale guyanaise et à l'horizon de la fin du siècle, la modélisation climatique est indispensable. D'une manière générale, l'approche retenue ici comprend deux scénarii d'émissions de gaz à effet de serre (GES) et de nombreux modèles de climat afin d'évaluer plusieurs possibilités d'évolution climatique future. Les données historiques observées extraites du réseau de mesures de Météo-France en Guyane sont également mobilisées, afin de contextualiser les projections<sup>10</sup> au climat local et de corriger certaines erreurs des modèles dans le cadre d'une approche dite de descente d'échelle et de correction de biais.

À partir des simulations à échelle globale effectuées dans le cadre de l'exercice international CMIP6 (Coupled Model Intercomparison Project 6 – Eyring *et al.* 2016, <https://pcmdi.llnl.gov/CMIP6/><sup>11</sup>) sur lequel s'appuie le Groupe d'experts Intergouvernemental sur l'Évolution du Climat (GIEC), il est possible de caractériser les évolutions potentielles à long terme des paramètres météorologiques sus-mentionnés. Nous pouvons alors comparer les résultats d'un grand nombre (52) de modèles climatiques (cf. Tableau A1 en annexe) soumis à des scénarii d'émissions de GES identiques. Ceux-ci correspondent à diverses caractéristiques de développement socio-économique et de stratégies d'adaptation et d'atténuation du changement climatique.

<sup>9</sup>Les vagues font l'objet d'une méthodologie particulière décrite dans la section 5.1.7.

<sup>10</sup>Simulations du climat futur.

<sup>11</sup>Les données sont extraites des plateformes ESGF et CEDA.



Les scénarii considérés dans cette étude sont :

- SSP2-4.5 (SSP pour *Shared Socioeconomic Pathways*) : forçage radiatif intermédiaire (4.5 W/m<sup>2</sup> en 2100) ; c'est l'équivalent de l'ancien RCP4.5 (RCP pour *Representative Concentration Pathways*) avec en complément, un défi intermédiaire en termes d'adaptation et d'atténuation des émissions de GES. Il s'agit d'un monde caractérisé par une stabilisation mitigée des tendances actuelles ;
- SSP5-8.5 : forçage radiatif élevé (8.5 W/m<sup>2</sup> en 2100) ; c'est l'équivalent de l'ancien RCP8.5 et le plus pessimiste des SSP, avec un faible défi d'adaptation et un défi d'atténuation élevé. Il s'agit d'un monde qui se concentre sur un développement traditionnel et rapide, fondé sur une forte consommation d'énergie fossile et des technologies émettrices de carbone.

Le choix de ces deux scénarii, l'un pessimiste et l'autre plus mesuré, correspond à ce qui est fait dans la plupart des études, dont le rapport BRGM/Météo-France précédent sur le changement climatique en Guyane (Moisan *et al.* 2013), même s'il s'agissait alors des scénarii SRES (*Special Report on Emissions Scenarios*, IPCC 2000) plus anciens, antérieurs aux SSP et RCP. Le scénario SSP1-2.6, équivalent du RCP2.6 considéré aux deux chapitres précédents, n'a pu être traité par manque de temps.

Malgré les progrès importants réalisés au cours des dernières décennies, les modèles de climat continuent à souffrir de certaines erreurs systématiques dans leur capacité à représenter le climat historique. Pour cette raison, il n'est généralement pas correct de comparer les simulations futures avec les observations pour en déduire les signaux d'évolution propres à chaque scénario. Il faut plutôt comparer les simulations futures avec une simulation historique réalisée avec chacun des modèles (en considérant les valeurs historiquement mesurées des émissions de GES), car on peut supposer que les biais des modèles s'expriment de façon similaire quelle que soit la période simulée. C'est une hypothèse forte mais inévitable dans l'état actuel des connaissances. Bien entendu, la condition est que malgré l'existence de biais, les modèles considérés soient capables de représenter le climat de la période historique de façon raisonnablement satisfaisante.

Partant du principe que tous les modèles ne se valent pas pour étudier un problème donné à cause de l'existence de ces biais (Hausfather *et al.* 2022), et considérant de plus qu'une analyse exhaustive de l'ensemble des modèles CMIP6 est incompatible avec la durée d'exécution relativement courte du projet, nous avons choisi d'identifier un petit nombre de modèles plus pertinents que les autres pour la Guyane. Le but étant d'esquisser des scénarios possibles d'évolution future, et non de quantifier les incertitudes liées au choix du modèle climatique.

La méthode retenue s'appuie ainsi sur un premier sous-échantillonnage des modèles, dont le critère est le degré de réalisme des processus climatiques clés pour la région Atlantique tropical – Nord de l'Amérique du Sud et pour le territoire : structure et variations saisonnières de la ZCIT, impacts d'ENSO (Héritier 2011, Jiang *et al.* 2021). Ce degré de réalisme est évalué au moyen de l'intercomparaison des simulations historiques avec des jeux de données observées ou estimées, utilisés comme points de référence.

Une seconde étape du sous-échantillonnage consiste en une évaluation rapide de l'évolution future projetée pour ces variables par chacun des modèles du premier échantillon pour la région en général et pour la Guyane en particulier, permettant d'identifier une poignée de modèles aux évolutions moyennes et saisonnières contrastées. À partir de ce second échantillon, des projections territoriales sont générées pour la Guyane au moyen d'une descente d'échelle statistique des variables météorologiques issues des simulations climatiques. Ces modèles raisonnablement réalistes, aux trajectoires climatiques différentes, corrigés et descendus en échelle, permettent alors l'étude des possibles évolutions futures des précipitations, températures et vents de surface sur le territoire guyanais.

Enfin, le calcul d'indices climatiques permet d'inclure l'évolution des événements extrêmes dans l'analyse, avec une approche sectorielle préliminaire au développement de futures études d'impact (agriculture, énergie, ressource et risques liés à l'eau). Ces indices, construits à partir des données journalières (températures et précipitations) des projections corrigées sur la Guyane, permettent d'estimer la fréquence et l'intensité de ces événements en climat historique et futur.

### 5.1.3 Évaluation des simulations historiques

Elle consiste en une comparaison des données de précipitations (taux journalier RR) de 52 modèles CMIP6 (Tableau A1) avec des données grillées (*i.e.* discrétisées sur une maille ou « grille » régulière) de référence pour la période historique récente (1980-2014, Tableau A2) : analyses CMAP<sup>12</sup> et GPCP<sup>13</sup> partiellement basées sur des observations satellitaires (Xie & Arkin 1996, Adler *et al.* 2018), réanalyse atmosphérique ERA5 (Hersbach *et al.* 2020). Le domaine d'étude comprend l'Atlantique tropical et le Nord de l'Amérique du Sud ; il s'étend sur 90°W–20°E en longitude et 20°S–20°N en latitude (Figure 46).

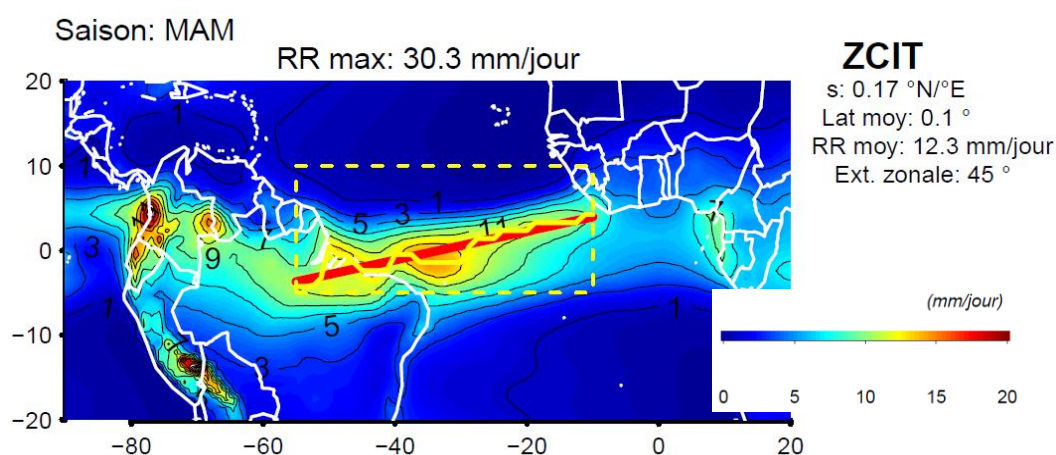


Figure 46 : Normales trimestrielles (MAM) des taux journaliers de précipitations RR pour le modèle FIO-ESM-2-0 sur le domaine d'étude. La ligne brisée jaune relie les points où RR est maximal pour une longitude donnée dans la zone en pointillés. Les métriques de la ZCIT (droite de régression représentée par le segment rouge) sont également calculées dans cette zone : pente  $s$ , latitude moyenne, RR moyennes et extension zonale (*i.e.* longitudinale).

La comparaison repose sur les éléments suivants :

- détection de la ZCIT dans les normales trimestrielles de RR, saisonnalité des métriques associées ;
- anomalies composites de RR durant les événements ENSO.

Ces éléments servent ensuite de base à la sélection d'un premier échantillon de modèles jugés plus réalistes en termes de représentation à grande échelle des processus clés pour le climat guyanais.

<sup>12</sup> CMAP est l'acronyme de « CPC Merged Analysis of Precipitation » qui est un de données de précipitations global construit à partir de données satellitaires et mesures pluviométriques.

<sup>13</sup> GPCP est l'acronyme de « Global Precipitation Climatology Project », autre jeu de données de précipitations global basé sur les observations.

### Détection et saisonnalité de la ZCIT

Pour chaque modèle (et pour les données de référence), la méthode de détection de la ZCIT, inspirée de celle de Brown *et al.* 2013 pour la Zone de Convergence du Pacifique Sud, procède de la façon suivante :

- les données grillées des moyennes mensuelles du taux journalier de précipitations sur la période historique sont utilisées pour calculer des normales mensuelles à chaque point de grille (ex : la normale du mois de janvier correspond à la moyenne des 35 moyennes mensuelles des mois de janvier 1980 à janvier 2014) ;
- ces 12 normales mensuelles permettent ensuite d'obtenir 12 normales trimestrielles des RR par trimestre glissant (ex : la normale JFM correspond à la moyenne des normales mensuelles des mois de janvier, février et mars) ;
- au sein d'un domaine rectangulaire dont les dimensions et l'emplacement ont été choisis afin d'inclure les signaux de pluies climatologiques associés à la ZCIT dans la plupart des cas<sup>14</sup> (cadre en traits pointillés sur la Figure 46), pour chaque longitude de la grille, on recherche l'emplacement du maximum des RR avec un seuil d'au moins 5 mm/jour ;
- on obtient ainsi une série de points (ligne brisée jaune sur la Figure 46) sur laquelle on ajuste une droite de régression linéaire (segment rouge sur la Figure 46) ;
- les métriques de la droite de régression permettent d'estimer les principales caractéristiques de la ZCIT en termes de structure horizontale : 1) latitude moyenne (des points du segment rouge aux longitudes de la grille), 2) pente (droite de régression), 3) extension zonale (du segment rouge) ;
- en complément, les maxima des RR permettent d'estimer 4) la valeur moyenne des RR au cœur de la ZCIT (moyenne aux points constituant la ligne brisée jaune) ;
- la représentation graphique des 4 métriques indiquées ci-dessus en fonction des 12 trimestres glissants de l'année permet d'apprécier les variations saisonnières de la ZCIT.

### Anomalies ENSO

La période historique récente 1980-2014 inclut un large échantillon d'événements ENSO : 10 événements El Niño et 12 événements La Niña<sup>15</sup> (cf. [origin.cpc.ncep.noaa.gov/products/analysis\\_monitoring/ensostuff/ONI\\_v5.php](http://origin.cpc.ncep.noaa.gov/products/analysis_monitoring/ensostuff/ONI_v5.php)). Cet échantillon est cependant variable d'un modèle à l'autre : les simulations historiques des modèles climatiques ne permettent pas de représenter la chronologie historique des événements observés, seulement leurs statistiques. Précisons que les anomalies observées de température de surface de la mer (TSM) dans le Pacifique tropical atteignent typiquement leurs valeurs maximales en fin d'année/début d'année suivante : JFM pour El Niño, NDJ pour La Niña (Figure 47). L'écart entre les moyennes composites d'ONI pendant La Niña – El Niño est quant à lui maximal en NDJ. C'est généralement le cas aussi pour les modèles CMIP6 (Jiang *et al.* 2021).

<sup>14</sup>Les distributions spatiales des normales trimestrielles des précipitations (RR) sur la période 1980-2014 sont présentées en annexe II pour les 52 modèles CMIP6 (Figures A1-A52) et les données de référence (Figures A53-A55).

<sup>15</sup>El Niño : 1982-83, 1986-87, 1987-88, 1991-92, 1994-95, 1997-98, 2002-03, 2004-05, 2006-07 et 2009-10.

La Niña : 1983-84, 1984-85, 1988-89, 1995-96, 1998-99, 1999-2000, 2000-01, 2005-06, 2007-08, 2008-09, 2010-11 et 2011-12.

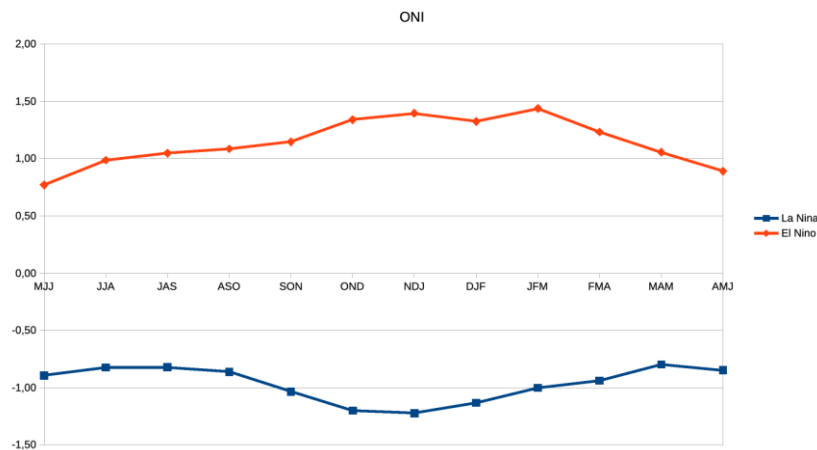


Figure 47 : Moyennes composites sur 1980-2014 de l'indice ONI (Oceanic Niño Index, °C, cf. méthode de calcul ci-dessous) pendant El Niño (rouge) et La Niña (bleu) en fonction du trimestre glissant. Le calcul est basé sur les données HadISST1 (Rayner et al. 2003).

Pour chaque modèle (et pour les données de référence, cf. Tableau A2) :

- on calcule la moyenne spatiale des champs mensuels de TSM sur la boîte Nino3.4 (centre du Pacifique équatorial, Figure 48) ;
- on retranche de la série temporelle de TSM ainsi obtenue la tendance linéaire due au réchauffement climatique (*linear trend* en anglais), en appliquant une simple régression linéaire, obtenant ainsi une série « redressée » ;
- on calcule l'anomalie de cette série mensuelle de TSM « redressée » (écart à la normale mensuelle correspondante ; ex : l'anomalie pour janvier 1980 correspond à la valeur de janvier 1980 moins la normale du mois de janvier calculée sur 1980-2014) ;

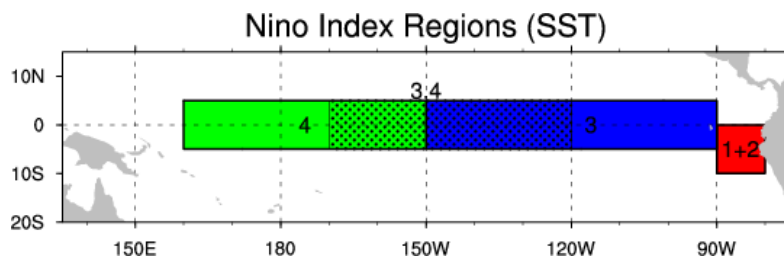


Figure 48 : Régions utilisées pour le calcul des indices ENSO, dont Nino3.4 (170°W–120°W, 5°S–5°N). Source : <https://climatedataguide.ucar.edu/climate-data/nino-sst-indices-nino-12-3-34-4-oni-and-tni>

- on calcule la moyenne de cette anomalie de TSM par trimestre glissant (ex : l'anomalie de JFM 1980 correspond à la moyenne des anomalies des mois de janvier, février et mars 1980) : obtention de l'indice ONI ;
- on classe chaque trimestre glissant de la période 1980-2014 comme correspondant à des conditions El Niño, La Niña ou neutres selon la valeur de l'ONI :
  - si  $ONI > + 0.5^{\circ}\text{C}$  sur au moins 5 trimestres glissants consécutifs : événement El Niño,
  - si  $ONI < - 0.5^{\circ}\text{C}$  sur au moins 5 trimestres glissants consécutifs : événement La Niña,
  - sinon : conditions neutres ;
- similairement à Jiang *et al.* 2021, pour NDJ (pic climatologique d'ENSO) ainsi que pour chacun des 6 trimestres glissants précédents (MJJ à OND) et suivants (DJF à MJJ de l'année

suivante), on calcule les moyennes composites des champs de pluie sur le domaine d'étude Atlantique tropical – Nord de l'Amérique du Sud pendant El Niño/La Niña<sup>16</sup> (équivalent au calcul des normales trimestrielles RR mais en ne prenant en compte qu'une partie des 35 valeurs disponibles sur 1980-2014, correspondant aux années El Niño/La Niña) ;

- on obtient les écarts à la normale trimestrielle (RR) de ces moyennes composites, qui représentent donc les anomalies typiques des taux journaliers de précipitations pendant les événements El Niño et La Niña, (ou anomalies composites) et ce en fonction de la phase de l'événement (développement de MJJ à OND, pic en NDJ, décroissance de DJF à MJJ) ;
- la détection de la ZCIT précédemment réalisée sur les normales trimestrielles RR (cf. *Détection et saisonnalité de la ZCIT*), est appliquée ici aux moyennes composites pendant El Niño et La Niña, afin de calculer les 4 métriques correspondantes (latitude moyenne, pente, RR moyennes, extension zonale) ;
- enfin, deux métriques associées aux anomalies et moyennes composites de RR sont calculées : 1) pour représenter la structure, la moyenne des deux coefficients de corrélation spatiale en JFM<sup>17</sup> dans la boîte ZCIT (avec GPCP) correspondant aux anomalies El Niño et La Niña, et 2) pour l'amplitude, la différence des anomalies La Niña – El Niño en JFM (en termes de précipitations moyennes dans la ZCIT via le calcul de la métrique RR sur les composites de pluie), relativement à cette différence pour GPCP ; à noter qu'on choisit GPCP mais CMAP convient également, car les coefficients sont proches.

### *Sélection des modèles*

Sur la base des évaluations précédentes et des métriques associées (structure et saisonnalité de la ZCIT, anomalies de précipitations liées à ENSO), des critères sont définis pour la sélection des modèles CMIP6.

Concernant la ZCIT, ils sont basés sur les valeurs de biais (moyenne annuelle de l'écart à la référence GPCP) et du RMSD (Root Mean Square Deviation, écart-type annuel de l'écart à la référence GPCP) sur la latitude moyenne<sup>18</sup>. Ces valeurs doivent alors satisfaire les critères suivants :

- biais compris entre  $-1.50^\circ$  et  $+1.50^\circ$  ;
- et/ou  $\text{RMSD} \leq 4.0^\circ$ .

---

<sup>16</sup>Précisons qu'afin de ne pas mélanger les anomalies correspondant à différentes phases de l'ENSO (développement, pic, décroissance), les trimestres glissants précédant et suivant le trimestre NDJ d'une année donnée sont considérés séparément, que le seuil ONI de  $\pm 0.5^\circ\text{C}$  soit atteint ou non. Par exemple, même si MJJ 1995 (resp. MJJ 1996) correspond à des conditions neutres dans les observations, il est pris en compte dans le calcul du composite MJJ de l'année précédant (resp. suivant) le pic de La Niña car NDJ 1995 correspond à des conditions La Niña.

<sup>17</sup>Ce trimestre est par la suite identifié comme un de ceux pour lesquels les anomalies composites des précipitations sont parmi les plus élevées pendant El Niño/La Niña (cf. section 5.2.1).

<sup>18</sup>L'inclusion de critères similaires sur les autres métriques ZCIT (pente, RR, extension zonale) aboutissait généralement à la sélection des mêmes modèles et n'a donc pas été appliquée par souci de simplicité, la latitude moyenne étant la métrique la moins bien représentée par les modèles CMIP6 et la plus discriminante (cf. section 5.2.1).

Concernant ENSO, deux critères supplémentaires sont retenus (cf. *Anomalies ENSO*) et appliqués aux modèles ayant passé la première étape de sélection ci-dessus :

- le coefficient de corrélation spatiale des anomalies JFM des RR (avec GPCP) moyenné sur El Niño et La Niña  $\geq 0.50$  ;
- la différence relative (avec GPCP) des anomalies La Niña – El Niño en JFM  $\geq 50\%$  et  $\leq 150\%$ .

#### 5.1.4 Évaluation des projections futures à grande échelle

Contrairement à l'évaluation des simulations historiques, il s'agit ici de caractériser les signaux d'évolution future non seulement pour les précipitations (moyennes mensuelles des taux journaliers RR), mais aussi les températures (moyennes mensuelles des valeurs journalières moyennes, ci-après tas) et le vent de surface (composantes zonale et méridienne à 10 m,  $uas$  et  $vas$  respectivement). Pour certains modèles pour lesquels ce dernier n'était pas disponible, nous avons considéré à la place le vent à 1 000 hPa ( $ua$ ,  $va$ ), complété par la force du vent de surface ( $sfcWind = \sqrt{uas^2 + vas^2}$ ) lorsque cette dernière variable était présente. Ainsi, il reste possible pour ces modèles d'évaluer les évolutions futures du vent en altitude (force et direction), ainsi que celles de la force du vent en surface le cas échéant. Ces informations peuvent fournir des éléments complémentaires à l'analyse directe du vent à 10 m réalisée pour les autres modèles.

Les signaux issus de l'échantillon réduit des modèles CMIP6 résultant de la phase de sélection précédente (cf. §5.1.3) sont comparés sur le domaine d'étude (avec une attention particulière pour les points de grille situés sur le territoire guyanais ou à proximité) en considérant la période future complète (2015-2100) pour chacun des deux scénarii SSP2-4.5 et SSP5-8.5, ainsi qu'une période historique de référence de durée égale (1929-2014, 85 ans). On peut ainsi tracer les écarts des moyennes à long terme (moyennes annuelles et saisonnières sur JFMA et JASO) des RR, des tas et du vent (force et vecteurs) entre les périodes future et historique pour les deux scénarii.

Afin d'évaluer la significativité statistique et donc la robustesse de ces évolutions, la méthode FDR (Control of the False Discovery Rate) est utilisée en complément d'un test de Student (Benjamini & Hochberg 1995, Wilks 2016, Belmadani *et al.* 2021). Cette méthode, qui consiste en une modification des *p-values* issues du test de Student, s'applique lorsque les tests de significativité sont très nombreux, comme ceux retrouvés en points de grille d'une zone géographique étendue comme notre domaine d'étude. Le FDR permet de réduire nettement les erreurs d'interprétations dites de type I en statistiques, qui correspondent au rejet erroné de l'hypothèse nulle, *i.e.* dans le cas présent à la conclusion que les écarts entre champs futur et historique sont significativement différents de zéro (signal d'évolution future) là où ils ne le sont pas (pas de signal). Ces erreurs, bien que statistiquement inévitables, sont aggravées en cas d'autocorrélation spatiale de données grillées comme les nôtres, d'où l'intérêt de l'approche.

Ces analyses spatiales à grande échelle et en point de grille sur la Guyane servent ensuite de base à l'établissement de tableaux synthétiques décrivant les principales évolutions futures quantitatives ou qualitatives des précipitations, températures et vents en moyenne annuelle et pour deux saisons et deux scénarii contrastés d'émissions de GES. Ces tableaux permettent alors l'identification simple d'un très petit nombre de modèles CMIP6 aux évolutions futures contrastées du point de vue du contexte guyanais. Les projections issues de ces modèles peuvent alors être exploitées pour fournir plusieurs scénarii climatiques possibles pour la Guyane, après une procédure de correction des biais détaillée à la section suivante.



### 5.1.5 Correction des biais et descentes d'échelle statistique

Il s'agit d'apporter une correction aux données modèles historiques puis futures via la calibration par la méthode dite « quantile-quantile » (QQ, Déqué 2007, Cantet *et al.* 2021). Cette méthode consiste à établir une correspondance entre les valeurs des quantiles (ou centiles) d'une variable météorologique calculées à partir des observations journalières d'un point de référence donné et celles obtenues à partir d'un point de grille voisin du modèle dont on souhaite corriger les biais. Il s'agit donc d'une correction de la distribution des valeurs historiques simulées au moyen de la distribution historique observée, correction qui est appliquée aux chroniques journalières « brutes » simulées afin de produire les chroniques journalières corrigées correspondantes. Les distributions étant variables d'une saison à l'autre (ex : un événement de précipitations intenses n'aura généralement pas la même intensité en saison sèche qu'en saison des pluies), cette correction est appliquée séparément pour chaque mois de l'année calendaire (12 corrections différentes), de préférence sur une période commune aux observations et à la simulation historique. Puis les quantiles fournis par le modèle sur le climat futur (et les séries journalières associées) sont corrigés à leur tour en utilisant la relation obtenue auparavant. On reconstitue ainsi des séries débiaisées en termes de distributions (mais pas en termes de chronologie). Ajoutons que la correction QQ est bien adaptée aux extrêmes, car c'est toute la distribution qui est ainsi redressée et pas seulement la moyenne ou la médiane par exemple.

Pour chaque point de référence disponible (chaque station météorologique dans le cas présent), c'est typiquement le point de grille modèle géographiquement le plus proche qui est considéré pour la correction, avec toutefois certaines considérations supplémentaires. Compte tenu de la superficie de la Guyane qui inclut toujours plusieurs points de grille pour les modèles CMIP6, et du relief peu accidenté du territoire, le choix de la distance horizontale comme principal critère de choix d'un point de grille modèle pour une station donnée, apparaît comme raisonnable. Cependant, la fraction terre-mer des modèles a également été prise en compte : sans cela, dans certains cas les données issues d'un point modèle situé en mer seraient corrigées par des données mesurées sur le continent, d'autant que de nombreuses stations du réseau guyanais sont situées sur la frange littorale (Figure 49). Cela n'était pas souhaitable compte tenu des différences marquées entre la dynamique climatique au-dessus de l'océan et du continent. Ainsi, le point de grille modèle le plus proche n'est sélectionné que parmi ceux qui sont situés sur le continent, cad dont la fraction terre-mer dépasse un certain seuil (quitte à ce qu'il soit parfois un peu plus éloigné). Celui-ci est fixé à 95 % de part de terre, excepté dans le cas des stations situées dans la zone climatique du littoral, pour lesquelles le seuil n'est que de 5 % afin de rendre compte de l'influence de l'océan sur le climat du littoral dans les modèles comme dans les observations (Héritier 2011). Dans le cas d'un modèle pour lequel la fraction terre-mer n'était pas disponible, le point de grille le plus proche est systématiquement considéré pour toutes les stations.

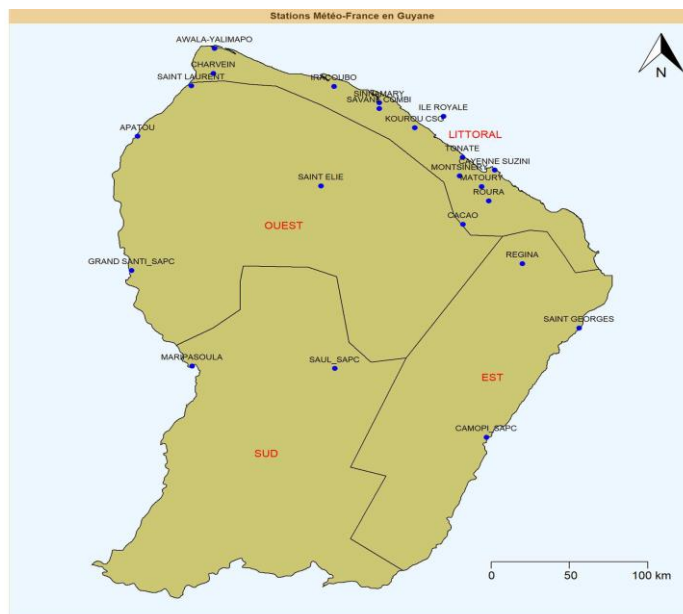


Figure 49 : Stations pluviométriques utilisées (sauf Charvein dans la zone littorale) et zonage climatique de la Guyane (Papazzoni 2021).

Cette correction des biais est souvent qualifiée aussi de descente d'échelle (statistique). En effet, une fois corrigées, les données modèles sont géo-référencées à l'emplacement de la station dont les observations ont servi de référence pour la correction. Ainsi, on quitte le cadre des données brutes grillées du CMIP6 pour passer dans celui du réseau (irrégulier) des stations météorologiques du territoire guyanais pour ces projections futures corrigées et descendues en échelle. Les données corrigées issues des stations situées dans une même zone climatique sont également moyennées afin de fournir un indicateur agrégé pour chacune des zones : Littoral, Est, Ouest et Sud (Figure 49).

Des moyennes mensuelles sont calculées à partir des données journalières. Elles permettent ensuite d'obtenir des normales mensuelles d'une part (moyennes d'ensemble mois par mois des données mensuelles), des moyennes annuelles d'autre part, afin d'évaluer l'évolution de la saisonnalité aux horizons intermédiaire (2041-2070) et lointain (2071-2100) ainsi que celle du climat moyen. La robustesse des changements des normales est évaluée au moyen d'un test de Student (à 2 échantillons indépendants de variances inégales, ou test t de Welsh). Il est appliqué mois par mois sur l'échantillon des 35 moyennes mensuelles historiques et des 30 moyennes mensuelles projetées (séries au pas de temps annuel) pour chaque modèle, période et scénario. Les échantillons sont suffisamment grands pour être considérés comme asymptotiquement normaux, une hypothèse requise pour l'application de ce test. La robustesse des tendances à long terme dans les moyennes annuelles est évaluée avec un test de Mann-Kendall, test statistique non paramétrique visant à déterminer si une tendance est identifiable et significative dans une série temporelle. Les résultats de ces 2 tests (Student et Mann-Kendall) au niveau de confiance de 95 % ( $p \leq 0.05$ ) permettent de nuancer les graphes d'évolution des normales et des moyennes.

Un des avantages de la méthode tient au fait que par construction, quel que soit le modèle CMIP6 considéré, les données historiques corrigées ont la même saisonnalité que les observations (normales mensuelles identiques). Ainsi, les données produites permettent de caractériser non seulement les écarts futurs relativement au climat présent (cf. §5.1.4), mais aussi les valeurs futures de la variable météorologique considérée qui devient alors directement comparable aux observations. En revanche, la procédure conserve dans une large mesure les variations aux

échelles de temps différentes du cycle annuel, tant synoptiques (événements météorologiques) qu'à basse fréquence (ex : ENSO), et les biais associés. D'où l'intérêt de la présélection de modèles plus réalistes dans la base CMIP6 des points de vue à la fois de l'état moyen et de la variabilité interannuelle associée à ENSO (cf. §5.1.3).

Dans le détail, on souhaite corriger les données simulées des précipitations (taux journaliers, RR) et du vent à 10 m (moyennes journalières des composantes cartésiennes uas et vas). On corrige également les températures, mais contrairement à l'analyse à l'échelle mensuelle (cf. §5.1.4), il s'agit ici de corriger les valeurs minimales et maximales journalières (tasmin, tasmax) et non les moyennes journalières. Concernant le vent, les données journalières moyennes observées ne sont disponibles que pour la force du vent. Les données tri-horaires de force et direction ont cependant permis de recalculer les composantes cartésiennes tri-horaires, puis leurs moyennes journalières utilisées pour la correction QQ. Toutefois, les données tri-horaires n'étant pas toujours disponibles aux stations pour tous les pas de temps, les données journalières associées ont été considérées comme manquantes dès lors qu'au moins une des données tri-horaires était manquante (sur les huit quotidiennes). Ceci afin de ne pas biaiser le calcul des moyennes journalières compte tenu du cycle diurne conséquent pour ces données (Héritier 2011).

Les stations fournissant les données journalières souhaitées pour chaque variable météorologique considérée sont présentées dans les Tableaux A3-A5. Bien qu'il existe d'autres stations au sein du réseau Météo-France, on recherche des séries d'une longueur suffisante ( $\geq 30$  ans) au sein de la période historique du modèle considérée (1980-2014) afin de limiter les biais liés à la variabilité climatique à basse fréquence (décennale et multi-décennale) pouvant contaminer l'analyse du changement climatique anthropique. On recherche également un compromis entre le pourcentage de données manquantes que l'on cherche à minimiser ( $< 10\%$ ) et la couverture géographique qui doit être la plus vaste et la plus homogène possible, compte tenu des spécificités du territoire avec de larges zones inaccessibles et inhabitées, notamment dans la partie sud et centrale (Figure 49). On retient ainsi 21 stations pluviométriques, 9 stations mesurant les températures et seulement 5 stations de mesure du vent. Certaines stations, au nombre de 2 pour les précipitations et 5 pour les températures, fournissent des archives labellisées séries quotidiennes de référence (SQR), dont les projections associées bénéficient donc des traitements de la plus haute qualité possible. Cette distinction est à garder en tête notamment pour les indices climatiques sectoriels, dont le calcul repose directement sur les données journalières (et non mensuelles par exemple). Les SQR ne sont pas disponibles pour les mesures de vent. Celles-ci étant généralement plus courtes, moins nombreuses et moins complètes que pour les autres variables, le critère de complétion de 90 % n'est pas pris en compte (Tableau A5).

### 5.1.6 Indices climatiques sectoriels

Jusqu'ici, les analyses étaient exclusivement basées sur l'exploitation de données mensuelles, qu'elles soient directement disponibles (cf. §5.1.3 et §5.1.4) ou reconstruites en moyennant des données journalières (cf. §5.1.5). Pour évaluer les propriétés statistiques des événements météorologiques rares et extrêmes, qui ne durent typiquement que quelques jours tout au plus, il est nécessaire d'isoler les données des jours concernés plutôt que de les moyennner avec le reste des enregistrements. Une façon simple d'y parvenir est de calculer des indices climatiques basés sur la définition du type d'événement auquel on s'intéresse (fortes pluies, sécheresses, vagues de chaleurs...) par le dépassement d'un certain seuil pour la ou les variables météorologiques concernées (températures, précipitations, force du vent...). Ce seuil peut correspondre à un quantile extrême (élevé comme le 90<sup>e</sup> centile, ou au contraire faible) de la distribution historique de la variable considérée, ce qui présente l'avantage pour l'indice de pouvoir s'adapter au climat local quelles que soient ses caractéristiques (pluvieux ou non, chaud ou frais...), ou à une valeur

fixe considérée comme standard. La comparaison des données journalières avec le seuil choisi permet d'identifier les dates des événements auxquels on s'intéresse afin de pouvoir les compter (et donc calculer leur fréquence), évaluer leur durée s'ils s'étendent sur plusieurs jours, et traiter les données correspondantes (calcul de la moyenne, du maximum...) afin d'estimer leur intensité. L'application des indices climatiques retenus aux données corrigées historiques et futures (cf. §5.1.5) permet alors d'en apprécier l'évolution future.

Ces indices peuvent être qualifiés de sectoriels dans la mesure où les événements extrêmes provoquent généralement des impacts importants sur un ou plusieurs secteurs d'activité. Dans le domaine de l'agriculture par exemple, des températures diurnes trop élevées peuvent réduire la production des cultures voire les menacer ; des périodes prolongées de sécheresse (absence de précipitations significatives) trop fréquentes peuvent impacter négativement le bilan hydrique au point d'atteindre le point de flétrissement (quantité minimale d'eau du sol au-delà de laquelle les plantes ne peuvent plus extraire l'eau efficacement) ; à l'inverse, des pluies abondantes et/ou prolongées trop fréquentes peuvent entraîner le dépassement de la capacité de rétention en eau du sol et l'inondation des cultures (Taylor *et al.* 2018, Selbonne *et al.* en préparation). Les sécheresses, en réduisant les volumes d'eau souterraine et superficielle, constituent aussi un défi pour les gestionnaires de la ressource en eau, tandis que les fortes pluies augmentent les risques liés à l'eau tels que glissements de terrain, crues et inondations. Les températures élevées peuvent par ailleurs affecter la demande énergétique liée notamment à la climatisation, même si dans ce cas précis c'est l'effet cumulatif qui importe plus que l'occurrence de températures extrêmes (Angeles *et al.* 2018). La liste des secteurs socio-économiques impactés par les événements météorologiques extrêmes est longue (santé, transports, assurances, tourisme...). Plutôt que de rechercher une exhaustivité incompatible avec la durée d'exécution du projet GuyaClimat, notre approche consiste à évaluer l'évolution de quelques indices clé pour les secteurs de l'eau, de l'agriculture, de la forêt (jours secs, jours de fortes pluies, journées et nuits chaudes) et de l'énergie (degrés-jour de climatisation). Il s'agit d'une première évaluation qui pourrait être prolongée dans le cadre d'études futures.

#### *Jours secs (fréquence)*

Les jours secs sont définis par un cumul journalier de précipitations inférieur à 1 mm et utilisés pour évaluer les conditions de sécheresse météorologique. Pour chaque modèle CMIP6 retenu et chaque station, le nombre de jours secs est compté pour chaque mois des périodes historique (1980-2014) et future (2015-2100, scénarios SSP2-4.5 et SSP5-8.5), permettant ensuite le calcul de moyennes annuelles, similairement au traitement des variables météorologiques (cf. §5.1.5). Il en est de même pour le reste des indices de fréquence présentés ci-dessous.

#### *Jours de fortes pluies (fréquence et intensité)*

Les jours de fortes pluies sont définis par un cumul journalier de précipitations supérieur au 90<sup>e</sup> centile (Q90 ; *i.e.* parmi les 10 % les plus élevés) de la distribution historique (1980-2014) et utilisés pour évaluer les risques d'inondation et/ou de glissement de terrain ainsi que l'impact potentiel sur les cultures et la ressource en eau. En plus de leur fréquence (nombre de jours par mois), l'intensité des jours de fortes pluies est évaluée en moyennant les cumuls journaliers correspondants au sein de chaque mois des chroniques historiques et futures, permettant à nouveau le calcul de moyennes annuelles.

#### *Journées et nuits chaudes (fréquence et intensité)*

Les journées (resp. nuits) chaudes sont définies par une température maximale (resp. minimale) journalière supérieure au Q90 de la distribution historique. Elles permettent notamment d'estimer les impacts possibles sur l'agriculture via le calcul de leur fréquence et de leur intensité

(moyennes mensuelles des températures maximales/minimales journalières pendant les journées/nuits chaudes). Bien qu'elles soient également liées à la demande énergétique, un indice dédié a été appliqué afin d'en estimer l'évolution.

### *Degrés-jours de climatisation*

Les degrés-jours de climatisation sont directement liés à l'énergie nécessaire pour climatiser un bâtiment en fonction des températures extérieures. Cet indice permet d'anticiper la hausse attendue des besoins en climatisation et en énergie associée dans un contexte de réchauffement climatique. Lorsque les températures dépassent un seuil défini pour une région donnée, les bâtiments ont généralement besoin de climatisation afin de maintenir des conditions de chaleur confortables pour l'organisme. Un jour de climatisation est identifié par l'écart en degrés entre la température moyenne du jour (définie ici comme la moyenne des températures maximale et minimale) et le seuil choisi. Celui-ci est fixé à 25 °C, valeur utilisée par Météo-France pour les Antilles et La Réunion sur la plateforme ClimatHD<sup>19</sup> (<https://meteofrance.com/climathd>). Ainsi, pour chaque modèle et station, les degrés-jour sont calculés à partir des températures journalières puis cumulées sur chaque mois des périodes historique et future avant d'en déduire les moyennes annuelles.

## **5.1.7 Modélisation du climat de vagues**

### *5.1.7.1 COWCLIP*

Similairement à celle de l'atmosphère, la représentation de l'évolution des vagues océaniques avec le changement climatique repose sur la modélisation numérique. Cependant, jusqu'à présent les modèles climatiques des exercices CMIP n'incluent pas les interactions vent-vagues et donc ne produisent pas de projections futures des champs de vagues. Pour pallier à ce manque, l'Organisation Météorologique Mondiale (OMM) et la Commission Océanographique Internationale (COI) ont créé le groupe de travail COWCLIP (Coordinated Ocean Wave Climate Project). Dans le cadre de COWCLIP, différents groupes de modélisation internationaux (Tableau 11) se sont coordonnés pour réaliser des projections globales de vagues. Chaque groupe développe sa propre méthode de descente d'échelle dynamique ou statistique de la donnée de climat (Hemer *et al.*, 2018). Ces projections sont ainsi issues de différents modèles de génération de vagues, eux-mêmes forcés par les résultats de simulations climatiques CMIP5 de différents modèles.

<b>Groupe de modélisation</b>	<b>Méthode modélisation</b>	<b>Référence</b>
CSIRO	Dynamique	<a href="https://doi.org/10.1016/j.ocemod.2015.10.009">https://doi.org/10.1016/j.ocemod.2015.10.009</a>
DELFT-IHE	Dynamique	<a href="https://doi.org/10.3390/jmse6030090">https://doi.org/10.3390/jmse6030090</a>
ECCC	Dynamique	<a href="https://doi.org/10.1016/j.ocemod.2017.12.003">https://doi.org/10.1016/j.ocemod.2017.12.003</a>
ECCC	Statistique	<a href="https://doi.org/10.1002/2015JC010699">https://doi.org/10.1002/2015JC010699</a>
IHC	Statistique	<a href="https://doi.org/10.1002/2017EF000609">https://doi.org/10.1002/2017EF000609</a>
JRC	Dynamique	<a href="https://doi.org/10.1002/2016GL072488">https://doi.org/10.1002/2016GL072488</a>
KU	Dynamique	<a href="https://doi.org/10.1002/2016GL067924">https://doi.org/10.1002/2016GL067924</a>
LBNL	Dynamique	<a href="https://doi.org/10.1002/2016GL071681">https://doi.org/10.1002/2016GL071681</a>

<sup>19</sup>Le seuil est de 18 °C pour la France hexagonale, où une sensation de chaleur est généralement ressentie par la population pour des températures plus faibles que dans les régions tropicales.





entre la période 2081-2099 et 1979-2004 pour chaque membre de l'ensemble multi-modèle. Pour chaque ensemble de projections, la significativité statistique (ou la robustesse) des changements des paramètres de vagues a été évaluée dans l'hypothèse que les projections suivent une distribution cumulative t-student.

#### 5.1.7.2 ARPEGE-Climat et MFWAM

L'exploitation des données de COWCLIP permet d'avoir des informations sur la variation future des conditions de vagues issues de l'ensemble multi-modèles extraites pour le cas spécifique du littoral guyanais. Cependant, une approche complémentaire à plus haute résolution et avec une plus grande maîtrise des données et des phénomènes régionaux associés est également souhaitable. Elle est rendue possible par le développement à Météo-France à la fois de modèles climatiques globaux et de modèles numériques de vagues.

Pour modéliser les champs de vent servant à forcer le modèle de vagues en surface, on utilise le modèle atmosphérique global ARPEGE-Climat dans une configuration proche de celle utilisée par le modèle couplé du CNRM (CNRM-CM) au sein de l'ensemble CMIP6. Cette configuration dite basculée-étirée a été développée dans le cadre du projet C3AF (Changement Climatique et Conséquences sur les Antilles françaises) et permet entre autres d'atteindre une résolution horizontale suffisamment précise pour modéliser convenablement l'activité cyclonique de l'Océan Atlantique (Chauvin *et al.* 2020, Cantet *et al.* 2021) ainsi que les houles associées (Belmadani *et al.* 2021).

Ce modèle à haute résolution est lui-même forcé par les TSM mensuelles issues de la version CMIP5 de CNRM-CM sous le climat historique et pour le scénario RCP 8.5. Les TSM des simulations historiques ont été préalablement corrigées avec les TSM mensuelles observées (HadISST1, Rayner *et al.* 2003) au moyen de la méthode QQ pour assurer une climatologie moyenne non biaisée. Par cohérence, une correction similaire a été appliquée aux TSM des simulations RCP8.5 (Chauvin *et al.* 2020). Ce modèle a ensuite été appliqué avec un pas de temps de 6 heures pour 3 expériences climatiques (voir plus bas), fournissant les champs de vecteur vent à 10 m qui ont ensuite été interpolés sur une maille régulière de 50 km pour forcer le modèle de vagues. Par souci de compromis entre le coût numérique de ce dernier et le besoin de disposer de périodes suffisamment longues, seules les 29 dernières années sont conservées parmi les ~50 ans disponibles pour chaque expérience climatique. Ainsi pour les simulations futures, l'analyse porte sur les projections à long terme après le milieu du 21<sup>e</sup> siècle (2051-2079) et donc sur les changements potentiellement les plus importants. Pour les simulations historiques (1984-2012), l'ère pré-satellite (avant 1979) est exclue, garantissant ainsi des observations de la meilleure qualité possible pour la calibration et la validation du modèle.

Le modèle de vagues MFWAM est un modèle spectral développé par Météo-France à partir du modèle communautaire WAM (WAMDI Group 1988). Il calcule l'état de la mer grâce à une équation de bilan énergétique en utilisant le code ECWAM-IFS-38R2, avec un terme de dissipation développé par Ardhuin *et al.* (2010) et mis à jour pour le Copernicus Marine Service. Pour cela le spectre des vagues est discrétisé en 24 directions (15°) et 30 fréquences (de 0,035Hz à 0,58Hz soit des longueurs d'onde de 1 300 m à 5 m). Une grille de 50 km de résolution (MFWAM05) est utilisée sur un domaine de calcul comprenant l'Atlantique Nord et Sud pour permettre la propagation des houles distantes jusqu'à la côte guyanaise (Belmadani *et al.* 2021). Le domaine s'étend au sud jusqu'à 59.5°S et les latitudes au nord de 70°N ont été exclues, car les houles locales y sont peu susceptibles d'influencer les latitudes inférieures de manière significative. La glace de mer n'est pas prise en compte. Une zone d'étude proche des côtes guyanaises (1.5-12°N, 46-58.5°W) permet de rendre compte des évolutions des états de la mer et du vent dans la région. À la différence des champs de vent, les données obtenues pour le spectre des vagues sont tri-horaires.

## Simulations

Trois expériences climatiques appelées Hist-Obs, Hist-Model et RCP-8.5 sont considérées (Belmadani *et al.* 2021). Chacune est constituée d'un ensemble de 5 simulations (ou membres) de 29 années chacune pour la saison hivernale, qui démarre le 1<sup>er</sup> novembre et se termine le 30 avril de l'année suivante (NDJFMA). Les membres ARPEGE-Climat sont soumis aux mêmes forçages en TSM et suivent globalement la même évolution climatique mais diffèrent dans la chronologie précise des événements météorologiques grâce à des conditions initiales légèrement différentes, conduisant à une propagation de ces différences sur l'ensemble du globe : c'est le fameux 'effet papillon'.

Les membres MFWAM sont forcés par ces différents membres ARPEGE-Climat. L'utilisation des ensembles permet la prise en compte des incertitudes liées à l'échantillonnage, particulièrement critique pour évaluer l'évolution future des événements rares ou extrêmes (forte houle). Les expériences Hist-Obs et Hist-Model, respectivement utilisées pour calculer le biais du modèle (en comparaison des observations) et pour la comparaison entre simulations historiques et futures, se déroulent de 1984 à 2012. L'expérience RCP-8.5 se déroule de 2051 à 2079.

Ces simulations fournissent de nombreuses variables caractérisant les vagues et le vent de surface. L'analyse porte sur les hauteurs significatives (Hs), la période moyenne (Tm) et la direction moyenne (Dir<sup>21</sup>) des vagues et sur la force et la direction du vent à 10 m (U10), qui sont fréquemment considérées pour ce type d'étude.

## Biais du modèle

Les données Hist-Obs ont été comparées avec différents jeux de données représentatifs du vent et des vagues observés historiquement : la réanalyse ERA5, les données satellitaires d'ESA-CCI et les bouées houlographes au large des côtes guyanaises. Cette phase préliminaire est primordiale pour l'interprétation ultérieure des résultats obtenus avec RCP-8.5.

ERA5 (Hersbach *et al.* 2020) est une reconstitution (ou réanalyse) de l'atmosphère et de l'océan de surface produite par le Centre Européen de Prévisions Météorologiques à Moyen Terme (CEPMMT). Elle est alimentée par un grand nombre de mesures atmosphériques depuis 1979 à un pas de temps horaire, et basée sur un modèle atmosphérique couplé à un modèle de vagues appelé ECWAM (European Centre Wave Action Model)<sup>22</sup>. Les données ERA5 sont comparées avec U10, Hs et Tm issus d'Hist-Obs (moyenne et quantile 95 représentatif des extrêmes) avec un pas de temps de 6 h (resp. 3 h) pour le vent (resp. les vagues), interpolés à 0.5° pour la période 1984-2012.

Bien qu'à la pointe de la connaissance scientifique et du développement technologique, ERA5 reste une réanalyse et non une observation directe des vagues et du vent. ERA5 a de plus tendance à sous-estimer la hauteur des vagues, notamment dans l'Atlantique Nord (Belmadani *et al.* 2021, Dodet *et al.* 2020, Timmermans *et al.* 2020, Hawkins *et al.* 2022). Afin de confirmer l'analyse des biais du modèle, les données de Hist-Obs ont été comparées avec les données satellitaires ESA-CCI (European Space Agency Climate Change Initiative) Sea State 1° monthly level 4 multimission product version 1.1 (Piolle *et al.* 2020 ; Dodet *et al.* 2020) qui contient des données mensuelles de Hs à 1°. Les observations spatiales comportent aussi des limitations (corrections atmosphériques, fréquence de passage du satellite...) et ne constituent donc qu'une source complémentaire d'informations. De plus, les données ESA-CCI ne couvrent pas le début

<sup>21</sup> La direction moyenne est notée Dir pour l'analyse Arpege-Climat et Dm pour l'analyse COWCLIP.

<sup>22</sup>Version CEPMMT du WAM avec un noyau dynamique similaire à MFWAM.

de l'expérience Hist-Obs, limitant la comparaison à la période 1991-2012. Après avoir regrillé les données de Hist-Obs, la comparaison porte sur la moyenne et les valeurs extrêmes, estimées avec la probabilité que Hs dépasse certaines valeurs seuil. ESA-CCI fournit un décompte mensuel des jours pendant lesquels Hs a dépassé certaines valeurs : 1 m, 1.5 m, 2 m et 3 m.

Enfin et en complément des données précédentes, Le Centre d'Études et d'expertise sur les Risques, l'Environnement, la Mobilité et l'Aménagement (CEREMA) met à disposition les données des bouées houlographiques par le biais du Centre d'Archivage National de Données de Houle In Situ (CANDHIS). Des campagnes de relevés sur 4 bouées différentes ont eu lieu au large de la Guyane entre 2007 et 2018. Les bouées 97301, 97302 et 97304 étaient situées à l'embouchure du Mahury, la dernière étant beaucoup plus au large que les 2 autres (Figure 48). La bouée 97303 était située au large de Kourou.



Figure 50 : Emplacement des bouées au large de la Guyane, face à Cayenne (97301, 97302, 97304) et Kourou (97303) Source : [https://candhis.cerema.fr/public/\\_cartes.php](https://candhis.cerema.fr/public/_cartes.php)

Les données sont d'abord recensées en fonction de l'année et du mois. Les périodes d'échantillonnage ne sont pas très longues, variant d'une saison (incomplète de surcroît) pour les moins longues (97301, 97303) à 4 saisons consécutives pour la bouée 97302 (Figure 51a). De plus, certaines bouées n'arrivent même pas à dépasser les 20 % des données sur tous les mois de la saison (97303 et 97304, Figure 51b).

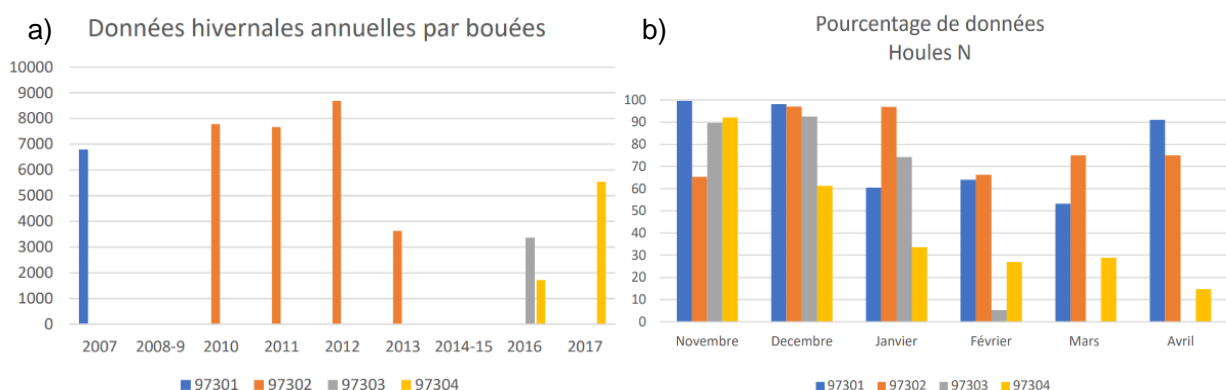


Figure 51: a) Nombre d'enregistrements semi-horaires par année et b) pourcentage de données disponibles par mois calendaire, pour chacune des bouées en saison hivernale.

Ainsi plusieurs points peuvent limiter notre analyse des biais du modèle avec les bouées houlographiques :

- la quantité limitée de données disponibles par bouée (manques et longueur des séries) ;
- les fréquences d'échantillonnage différentes entre les bouées (toutes les 30 min) et Hist-Obs (toutes les 3 heures)<sup>23</sup> ;
- la disparité mensuelle de présence des données au sein d'une même saison (manques).

Malgré les contraintes, les bouées restent utiles car ce sont des données *in situ* et non télédéfectées (ESA-CCI) ou estimées (ERA5). Après cette analyse préliminaire, les données des bouées sont comparées à celles de Hist-Obs aux coordonnées 52° W ; 5° N pour les bouées 97301<sup>24</sup>, 97302 et 97304 et 52,5° W ; 5,5° N pour la bouée 97303, correspondant aux points modèle les plus proches. Les comparaisons prennent la forme de "boîtes à moustaches" pour Hs et Tm (Q25/50/75, minimum et maximum) et de "roses des vagues" pour Dir (histogrammes des directions en coordonnées polaires).

### Évolutions futures des états de mer

L'expérience historique Hist-Model est ensuite comparée à l'expérience future RCP8.5 pour évaluer les évolutions du vent et des vagues au large des côtes guyanaises à l'horizon 2080.

Dans un premier temps, les évolutions des valeurs moyennes sont cartographiées. Pour évaluer leur significativité statistique, les données sont d'abord sous-échantillonnées afin d'appliquer des tests statistiques qui requièrent des échantillons de valeurs indépendantes, ce qui n'est pas le cas pour des séries temporelles tri-horaires marquées par des événements météo-marins dont la durée s'étend typiquement sur plusieurs jours (présence d'autocorrélation). Afin de fixer la fréquence du sous-échantillonnage pour chaque variable étudiée, des cartes de décorrélation temporelle pour la saison hivernale sont utilisées (Figure 52, cf. Belmadani *et al.* 2021 pour l'équivalent en saison cyclonique).

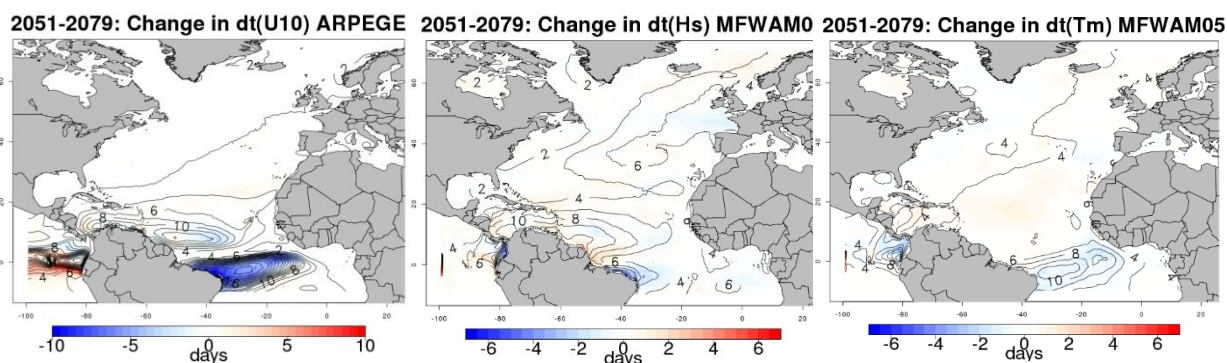


Figure 52 : Écart des échelles temporelles de décorrélation (jours) pour (à g.) la force du vent de surface U10 d'ARPEGE-Climat, (au m.) la hauteur significative Hs et (à d.) la période moyenne des vagues Tm de MFWAM05 entre l'historique (1984-2012) et le scénario RCP8.5 (2051-2079). Les contours représentent les moyennes historiques. Les données ARPEGE-Climat sont masquées en gris sur la terre.

<sup>23</sup>Les enregistrements des bouées n'ont pu être sous-échantillonnés par manque de temps.

<sup>24</sup>Excepté pour la direction moyenne des vagues Dir dont les données ne sont pas disponibles pour cette bouée.

Ainsi, seule une valeur est conservée tous les 5 jours (resp. 10 jours) pour Hs et Tm (resp. pour U10)<sup>25</sup>. Les tests de significativité sont ensuite appliqués en chaque point de grille pour obtenir les *p-values* correspondantes selon la méthode représentée à la Figure 53, complétée par la procédure FDR comme pour les variables atmosphériques (Wilks 2016). Pour Dir, la médiane est préférée à la moyenne. Afin d'évaluer sa représentativité pour l'incidence réelle des vagues (en fonction de leurs distributions cela peut être le cas ou non), la rose des vagues est également tracée pour 5 points modèles au large des côtes guyanaises.

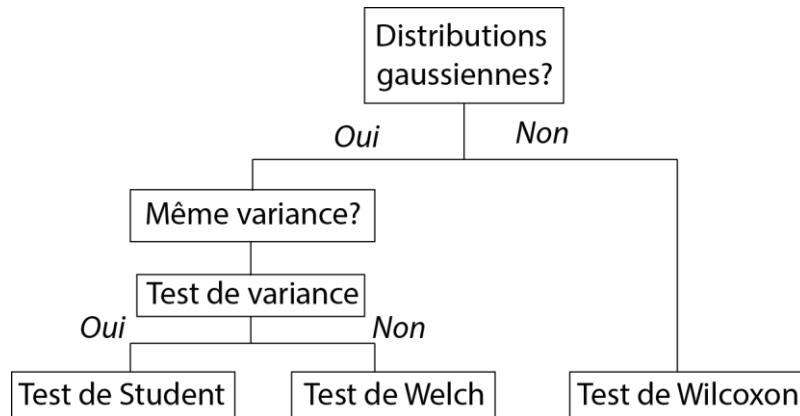


Figure 53 : Schéma du processus de calcul de la significativité des évolutions des états de mer.

La saisonnalité du vent de surface et des états de la mer dans la région est ensuite évaluée. Pour cela, une zone trapézoïdale excluant les parties trop proches de la côte est définie (Figure 54), car le modèle ne représente pas la dynamique côtière susceptible d'influencer fortement les vagues (Gratiot *et al.* 2007). La moyenne spatiale journalière est ensuite calculée au sein de ce trapèze. Pour chaque date du calendrier (pour les 6 mois de la saison hivernale), la moyenne des  $5 \times 29 = 145$  valeurs obtenues pour l'ensemble des années et des membres (moyenne d'ensemble interannuelle) permet ainsi d'obtenir un cycle saisonnier moyen pour les différentes variables dans la zone, pour Hist-Model et RCP8.5. Ce cycle saisonnier réalisé à l'échelle journalière (et non mensuelle) est bruité par l'occurrence aléatoire d'événements météo-marins dans l'échantillon. Le signal est donc lissé avec une moyenne glissante sur 30 jours avant application des tests de significativités. La méthode est décrite en détails par Belmadani *et al.* (2021).

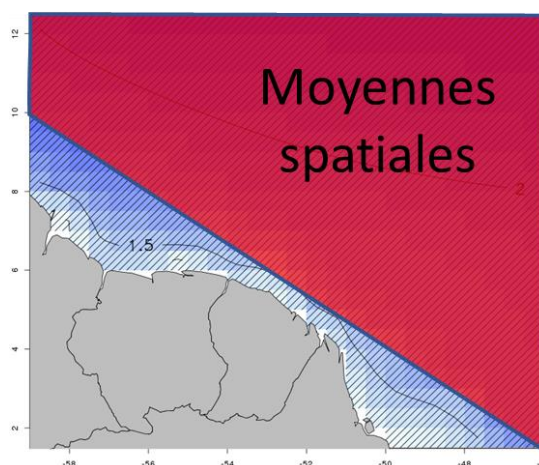


Figure 54 : Cartographie de la zone utilisée pour les graphes de saisonnalité.

<sup>25</sup>Par manque de temps, les tests de significativité n'ont pas été appliqués pour Dir.

En plus de Hs, Tm et U10, la variable  $E = Hs^2 \times Tm$ , proportionnelle à l'énergie des vagues est incluse. C'est un indicateur répandu de la capacité d'érosion de la houle et des vagues arrivant sur les côtes, bien que d'autres indicateurs tels que  $Hs^3/Tm^2$  ont également été proposés pour le cas spécifique de la Guyane (Gratiot *et al.* 2007).

Enfin, l'évolution des valeurs extrêmes, qui sont des indicateurs indispensables dans la prévention des risques climatiques du littoral, est évaluée au moyen du niveau de retour à 10 ans des différentes variables (en saison hivernale). Ces niveaux de retour décennaux sont calculés en ajustant des distributions de valeurs extrêmes généralisées (GEV pour leurs initiales en anglais) aux 145 maxima annuels des expériences Hist-Model et RCP 8.5. Pour évaluer la significativité statistique des évolutions associées, la méthodologie proposée par Belmadani *et al.* (2021), basée sur l'utilisation des bornes de l'intervalle de confiance à 95 % associé aux niveaux de retour issus de l'analyse GEV, est suivie. Les résultats sont considérés comme significatifs si l'intervalle de confiance de Hist-Model et celui de RCP 8.5 ne se recouvrent pas. En complément, la durée de retour pour RCP 8.5 correspondant aux niveaux de retour décennaux de Hist-Model est évaluée, afin de déterminer si les niveaux atteints tous les 10 ans dans l'expérience historique arriveraient plus fréquemment dans le futur ou non, et quantifier cette évolution (Wang *et al.* 2014).

La saisonnalité des valeurs extrêmes de Hs, Tm, U10 et E est évaluée en suivant une approche similaire à celle des valeurs moyennes. Pour chaque variable et à chaque pas de temps, le maximum spatial de la zone définie précédemment (Figure 54) est déterminé. On obtient ainsi 145 maxima spatiaux par jour de la saison. Les probabilités journalières que ces *maxima* dépassent une certaine valeur seuil (définies comme la proportion des valeurs supérieures au seuil dans l'ensemble) sont ensuite calculées. Pour finir, la moyenne glissante de ces probabilités sur 30 jours est obtenue. Plusieurs valeurs seuil ont été testées et celles qui paraissaient les plus pertinentes pour représenter des événements extrêmes ont été sélectionnées, considérant leur rareté et leur intensité.

## 5.2 RÉSULTATS

### 5.2.1 Évaluation des simulations historiques

#### *Détection et saisonnalité de la ZCIT*

La Figure 55 est un exemple de normales des pluies (période 1980-2014) sur les douze trimestres glissants pour les observations GPCP (se référer en annexe Figures A1-A55 pour l'ensemble des modèles CMIP6 et des données de référence). Pour chaque trimestre, on a calculé les caractéristiques de la ZCIT (pente, latitude moyenne, précipitations moyennes et extension zonale). Pour certains trimestres (OND et NDJ), la boîte ZCIT est réduite en latitude ; il a en effet été constaté que le critère de détection des pluies prenait en considération des zones de précipitations continentales principalement amazoniennes contenues dans la boîte ZCIT, faussant alors la détection. Pour ces trimestres, il s'agissait de restreindre l'extension de la boîte ZCIT vers le sud pour la raison précédente et parce que la ZCIT est bien délimitée et localisée au nord de l'équateur à cette période de l'année. Le Tableau A6 précise les trimestres concernés par la boîte ZCIT réduite pour chaque modèle CMIP6, qui ne coïncident pas toujours avec ceux choisis pour les données de référence compte tenu des biais saisonniers des modèles, particulièrement au 1<sup>er</sup> semestre.



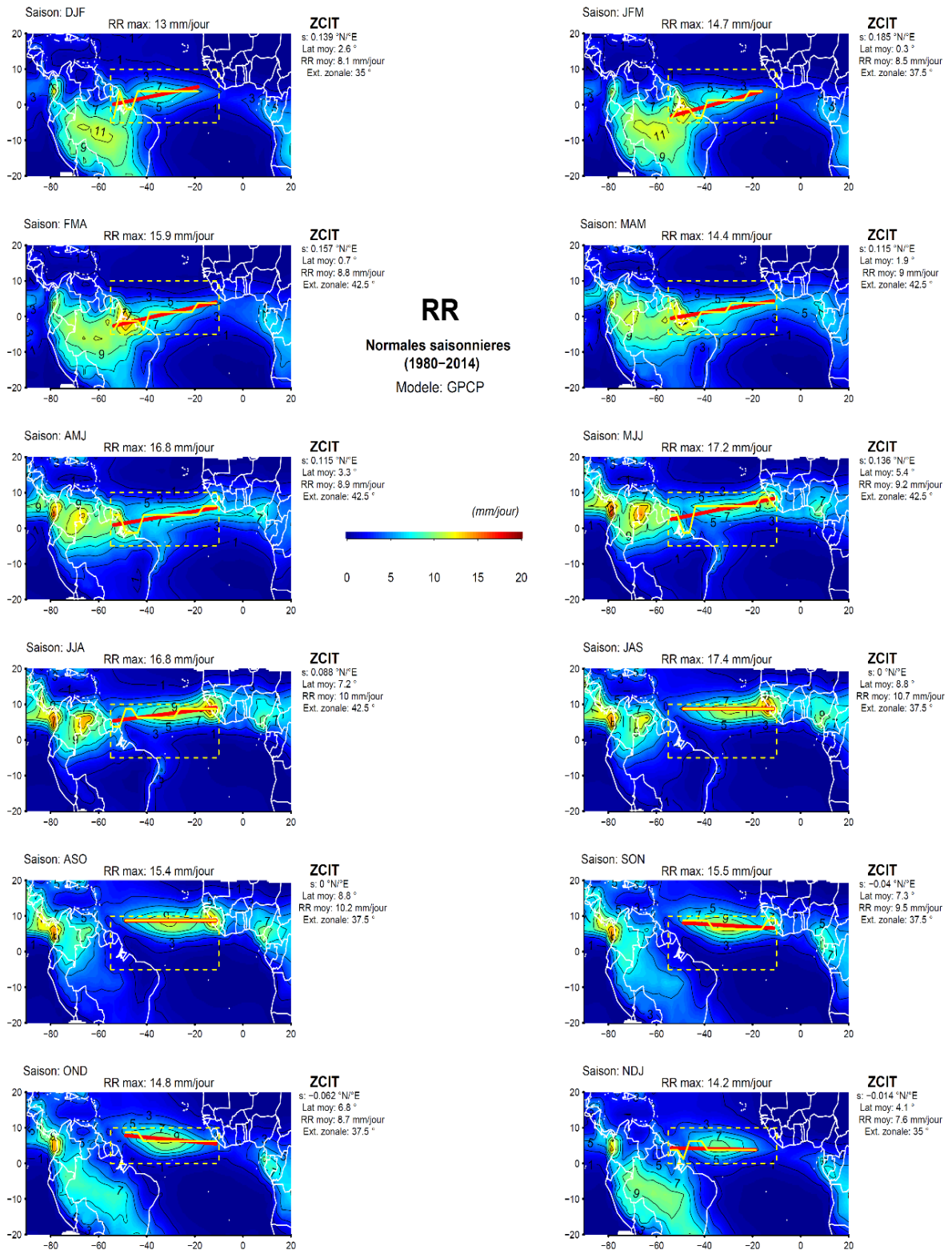


Figure 55 : Distributions des normales trimestrielles des taux journaliers de précipitations (RR) sur la période 1980-2014 et les douze trimestres glissants de l'année pour les données GPCP, avec les métriques ZCIT associées (s représente la pente de la droite de régression linéaire).

Conformément aux attentes, la ZCIT oscille en latitude avec la saison, avec une position plus au sud durant la première partie de l'année puis se déplaçant vers le nord le reste de l'année (Figure 55). On peut apprécier le lien entre la saisonnalité des pluies en Guyane (située à la limite Ouest de la boîte ZCIT) et la position de la ZCIT. La saison des pluies (DJF à MJJ) voit l'extrémité Ouest de la ZCIT se positionner à proximité du territoire, notamment pendant les trimestres les plus pluvieux en MAM et AMJ<sup>26</sup>. À l'inverse, la saison sèche (JAS à OND) correspond à une ZCIT située plus au nord et moins étendue vers l'ouest du fait des centres d'actions déplacés en direction de l'Afrique.

La Figure 56 illustre bien la saisonnalité de la ZCIT en latitude, largement dominée par l'harmonique annuelle dans les modèles et les données de référence (Jiang *et al.* 2021). Durant la première partie de l'année (DJF à MAM, saison des pluies en Guyane), la plupart des modèles présentent un déplacement de la ZCIT au sud de l'équateur, contrairement aux observations (CMAP, GPCP) et données de réanalyse (ERA5). Il s'agit d'un biais climatique bien connu (Richter & Tokinaga 2020). La dispersion au sein de l'ensemble est cependant forte à cette période de l'année, la latitude moyenne de la ZCIT variant de 4°N à quasiment 5°S selon les modèles. Une ZCIT située trop au sud entraînant nécessairement des précipitations réduites en Guyane (comme observé pendant le petit été de mars), un tel biais est critique pour la représentation de la saison des pluies, d'où l'importance de cette métrique pour l'identification des modèles les plus pertinents. La seconde partie de l'année, quand la ZCIT se déplace jusqu'à sa position la plus septentrionale à 8-9°N en JAS et ASO (saison sèche en Guyane), montre de meilleures performances en général : la latitude moyenne atteint 7.5°N en ASO pour la moyenne multi-modèles (8-9°N pour les observations) et la dispersion est bien moins importante au sein de l'ensemble CMIP6.

---

<sup>26</sup>Le petit été de mars se produit lorsque la ZCIT occupe sa position la plus méridionale mais reste difficile à distinguer sur la Figure 55 du fait des moyennes trimestrielles influencées par la petite et la grande saison des pluies.

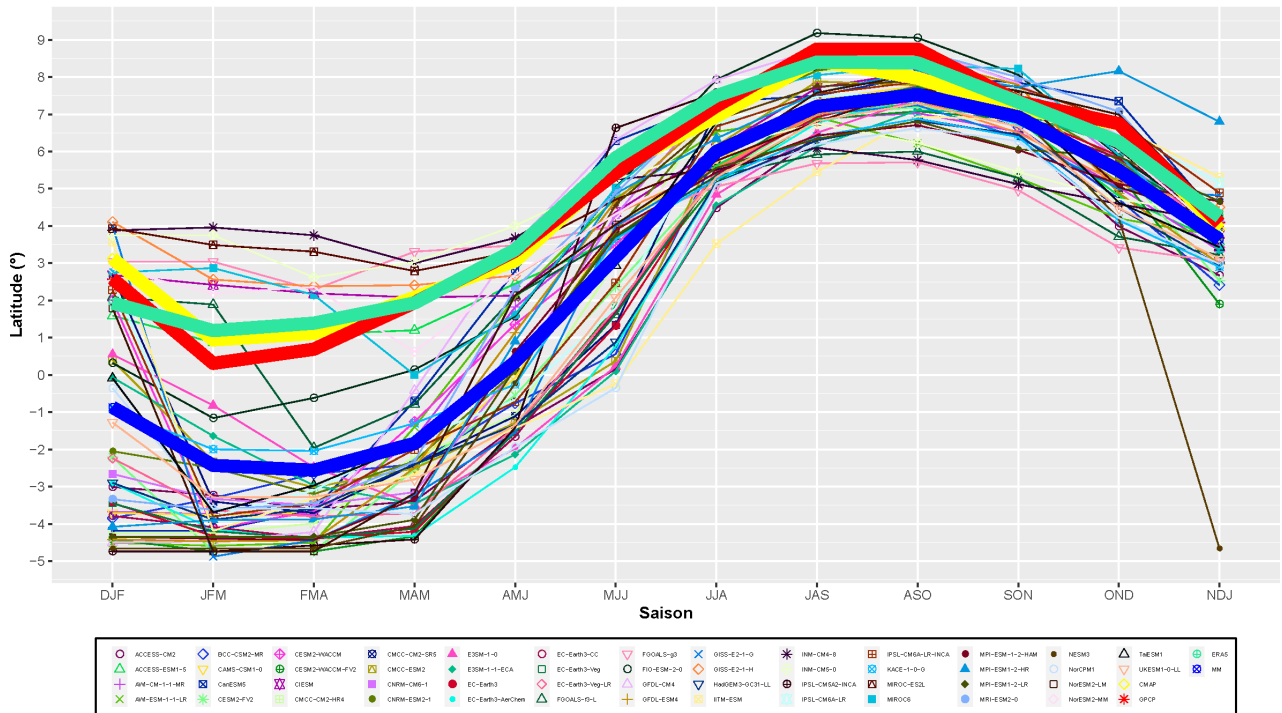


Figure 56 : Normales trimestrielles glissantes de la latitude moyenne de la ZCIT sur 1980-2014 pour 50 modèles CMIP6<sup>27</sup> et 3 jeux de données de référence. Les courbes en traits gras représentent CMAP (jaune), GPCP (rouge), ERA5 (vert) et la moyenne d'ensemble multi-modèle (bleu).

L'évolution saisonnière de la pente de la ZCIT est représentée sur la Figure 57. La saisonnalité observée présente une pente positive jusqu'en JAS, puis un basculement avec une pente négative le reste de l'année (correspondant à une orientation nord-ouest/sud-est, Figure 56). En moyenne, la ZCIT des modèles est beaucoup trop zonale durant le premier semestre, avec des valeurs de pente inférieures à 0.05 °N/°E (*cad* à 1° en latitude tous les 20° en longitude), 2 à 3 fois plus faibles que dans les données de référence. La moyenne multi-modèle cache cependant une forte dispersion au sein de l'ensemble, certains des modèles pouvant atteindre des valeurs de pente aussi élevées que dans les observations, voire plus (ex : FIO-ESM-2-0). Cette dispersion diminue durant le second semestre entre JJA et SON, en même temps que la pente de la ZCIT change de signe, avant d'augmenter à nouveau en fin d'année lorsque les pentes redeviennent positives.

<sup>27</sup>Deux modèles, BCC-ESM1 et MCM-UA-1-0 ont été évincés du reste des analyses car ils ne génèrent quasiment aucune précipitation sur l'océan pendant au moins une partie de l'année (Figures A6 et A40).

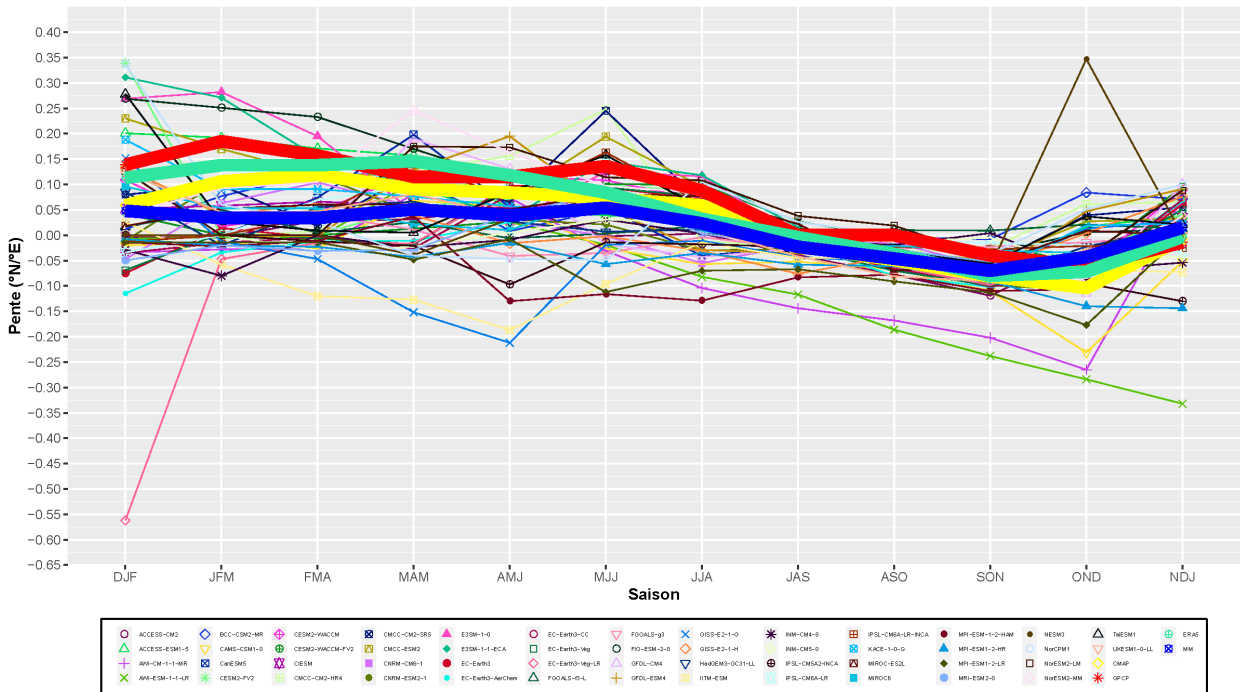


Figure 57 : Normales trimestrielles glissantes de la pente de la ZCIT sur 1980-2014 pour 50 modèles CMIP6 et 3 jeux de données de référence. Les courbes en traits gras représentent CMAP (jaune), GPCP (rouge), ERA5 (vert) et la moyenne d'ensemble multi-modèle (bleu).

Dans les observations, le cumul moyen de pluie dans la ZCIT est assez stable au cours de l'année, variant de 8 à 10-11 mm/jour d'après CMAP/GPCP (9 à 12 mm/jour d'après ERA5, probablement dû à la résolution plus élevée, cf. Tableau A2), avec un pic principal en JAS (JJA pour ERA5) et un maximum local vers MAM (Figure 58). En moyenne, on constate pour les modèles :

- un biais humide en comparaison de CMAP et GPCP dont les résolutions sont identiques, culminant en JAS avec 13 mm/jour en moyenne (et jusqu'à 16 mm/jour pour une poignée de modèles dont FIO-ESM-2-0). Le biais est cependant faible (voire inversé) comparé à ERA5 ;
- une saisonnalité bien reproduite, avec un pic principal en JAS et un pic secondaire en AMJ.

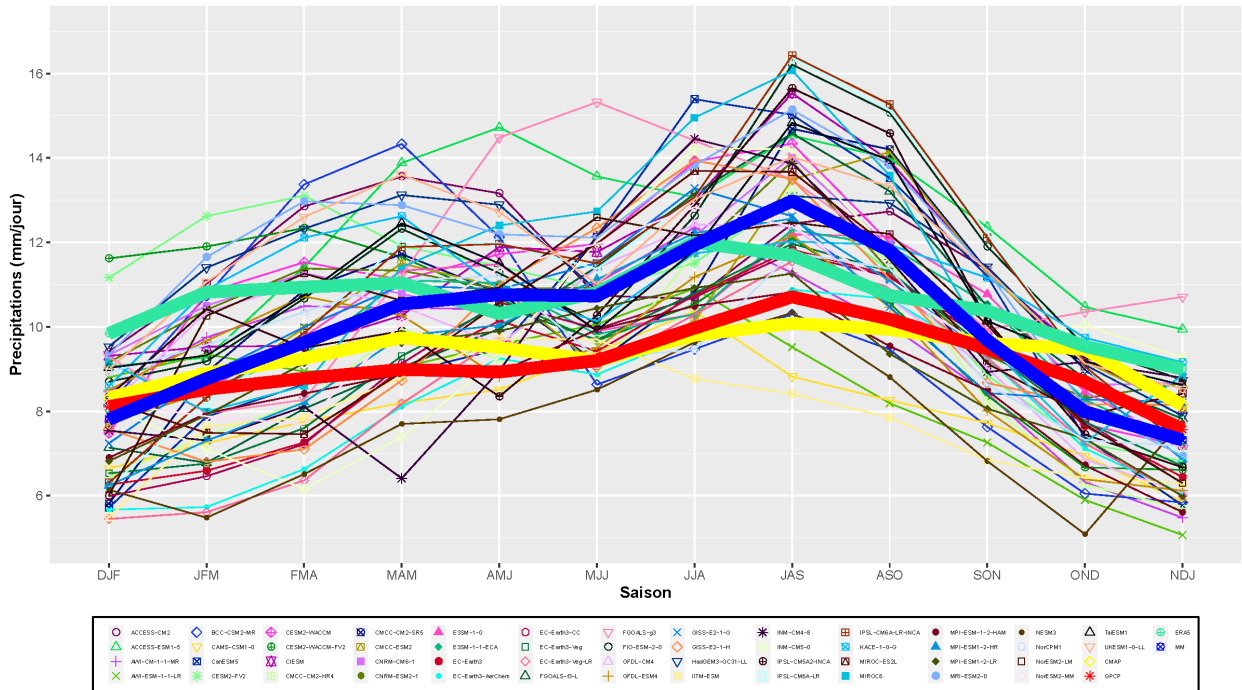


Figure 58 : Normales trimestrielles glissantes pour le taux journalier moyen des précipitations dans la ZCIT sur 1980-2014 pour 50 modèles CMIP6 et 3 jeux de données de référence. Les courbes en traits gras représentent CMAP (jaune), GPCP (rouge), ERA5 (vert) et la moyenne d'ensemble multi-modèle (bleu).

L'extension zonale de la ZCIT indique une faible saisonnalité dans CMAP et GPCP<sup>28</sup> (35-42.5°), avec un maximum de FMA à JJA et un minimum en NDJ et DJF (Figure 59). En moyenne pour les modèles, la saisonnalité est relativement bien reproduite, avec une extension en baisse dès JJA jusqu'à 30° en NDJ, avant de remonter de DJF à MAM puis suivre un plateau à 40-45° jusqu'en MJJ. La dispersion au sein de l'ensemble est toutefois forte, sauf de MAM à JJA.

<sup>28</sup>Quasi-absente des données ERA5, ce qui pourrait résulter des niveaux de pluie plus élevés dans la réanalyse (Figure 58) et nécessiterait de relever le seuil de 5 mm/jour pour la mettre en évidence.

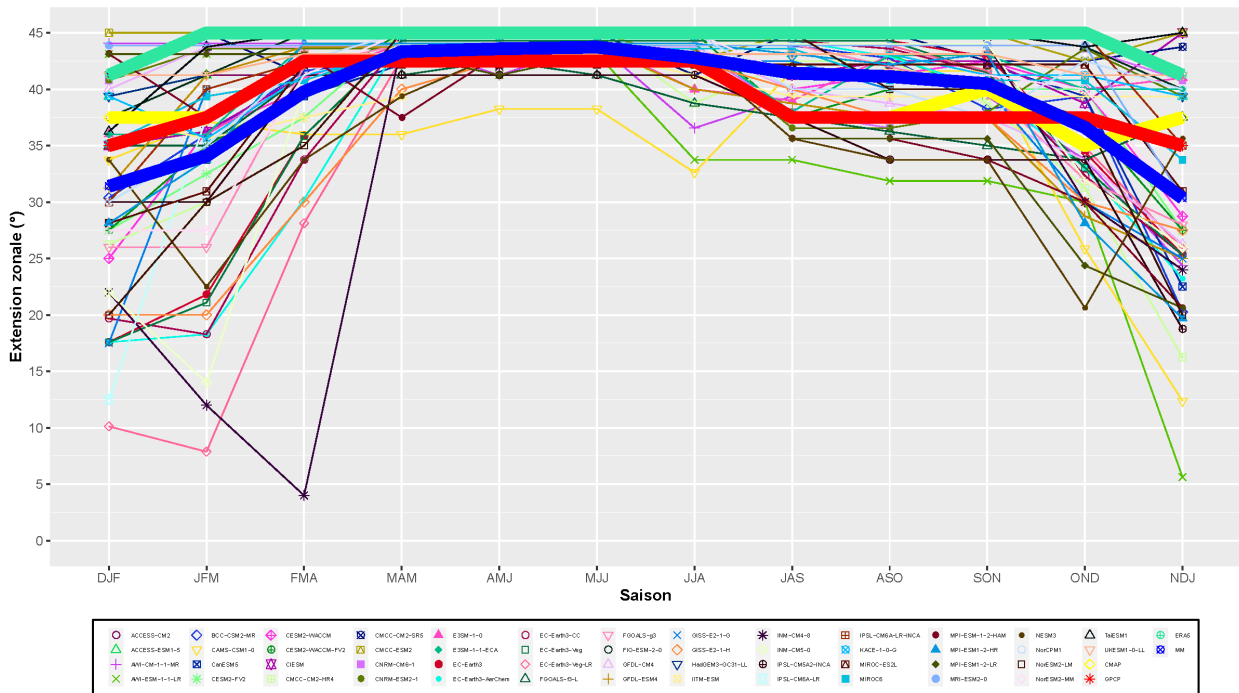


Figure 59 : Normales trimestrielles glissantes pour l'extension zonale de la ZCIT sur 1980-2014 pour 50 modèles CMIP6 et 3 jeux de données de référence. Les courbes en traits gras représentent CMAP (jaune), GPCP (rouge), ERA5 (vert) et la moyenne d'ensemble multi-modèle (bleu).

En résumé, alors que les modèles CMIP6 représentent relativement bien les valeurs annuelles et saisonnières à la fois des quantités de pluie et de l'extension zonale de la ZCIT, les performances sont plus nuancées concernant la pente et surtout la latitude moyenne de la ZCIT, qui présente des biais marqués en début d'année avec une position située trop au sud. Cette dernière métrique ayant une incidence cruciale sur la saisonnalité des pluies en Guyane, une ZCIT déplacée dans l'hémisphère Sud devrait entraîner un déficit de pluviométrie sur le territoire, au moment même où celle-ci est climatologiquement la plus importante. Ainsi, comme précisé à la section §5.1.3 et afin de simplifier la sélection des modèles, celle-ci sera basée en premier lieu sur cette métrique clé.

### Anomalies ENSO

Après avoir déterminé les années El Niño et La Niña pour chaque modèle et pour les observations HadISST1, on trace les écarts à la normale des moyennes composites des champs de pluie sur ces années particulières pendant la période 1980-2014, afin de décrire les anomalies des précipitations liées aux téléconnexions ENSO et leur évolution saisonnière dans notre domaine d'étude (cf. §5.1.3). Les anomalies associées à El Niño et La Niña sont représentées sur les Figure 60 et Figure 61 à partir des données GPCP, les résultats obtenus avec CMAP et ERA5 étant très semblables. En accord avec les connaissances sur le sujet (Jiang *et al.* 2021), les anomalies de RR vont dans le sens d'un déficit (resp. excédent) pluviométrique durant les événements El Niño (resp. La Niña).



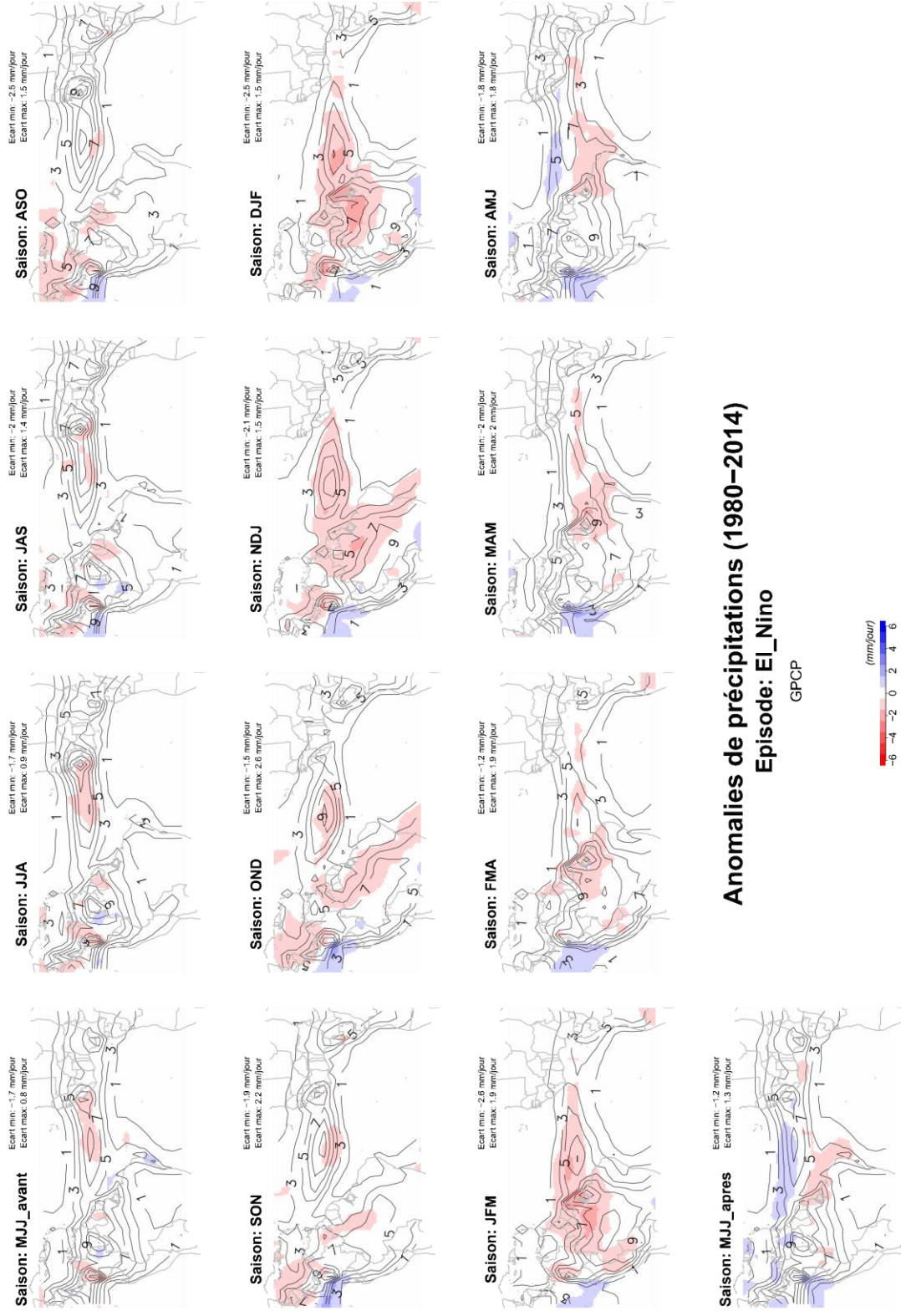


Figure 60 : Anomalies composites des taux journaliers de précipitations RR durant les événements El Niño (période 1980-2014) pour les données GPCP, par trimestre glissant en fonction de la phase de l'événement. Les contours représentent les normales trimestrielles des champs de pluie.

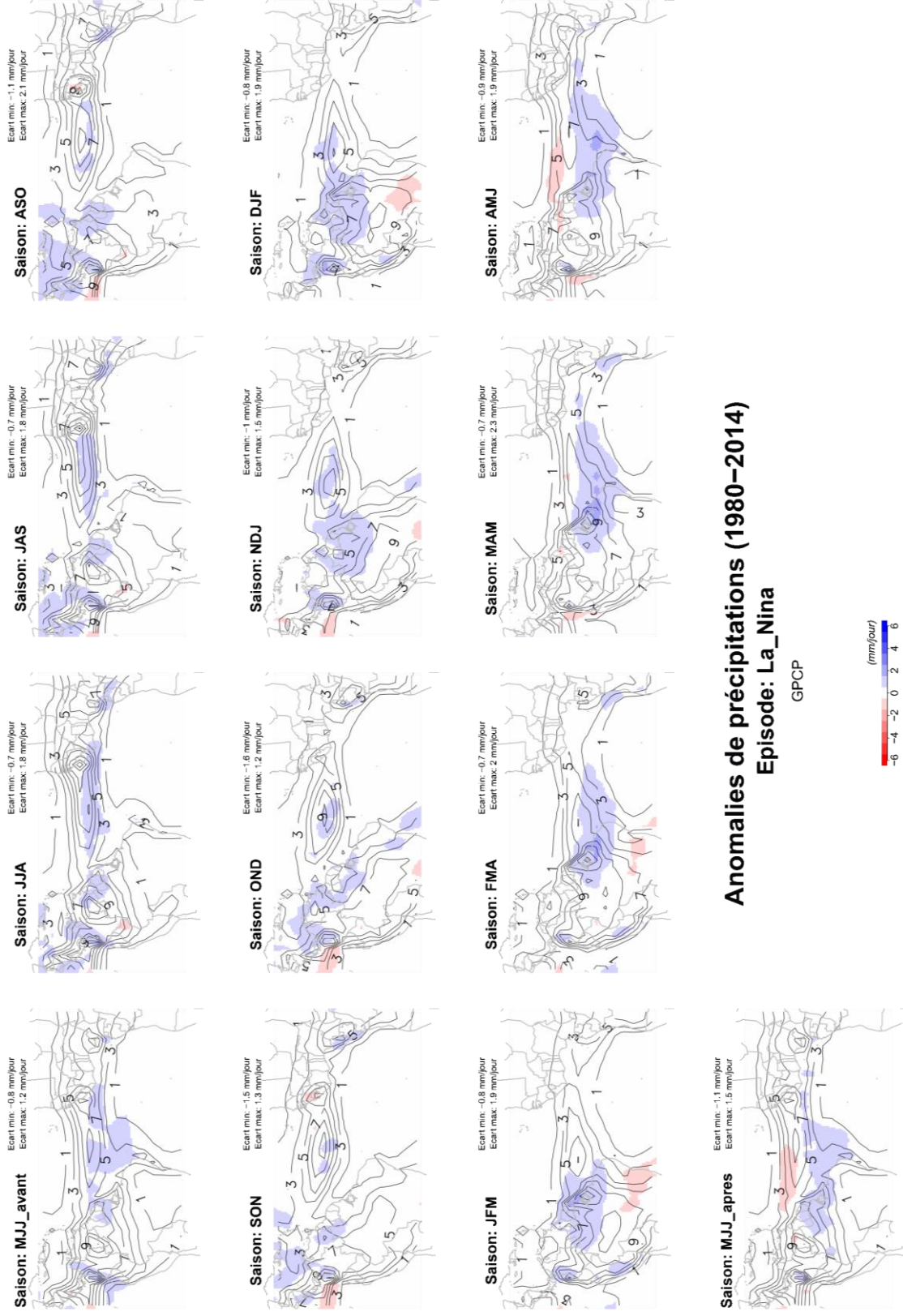


Figure 61 : Anomalies composites des taux journaliers de précipitations RR durant les événements La Niña (période 1980-2014) pour les données GPCP, par trimestre glissant en fonction de l'événement. Les contours représentent les normales trimestrielles des champs de pluie.

Les phases El Niño et La Niña présentent une symétrie remarquable, les anomalies les plus fortes se produisant autour du pic de l'événement et persistant ensuite jusqu'au printemps (boréal) suivant : les anomalies sèches associées à El Niño sont les plus marquées de OND à JFM (Figure 60), tandis que c'est le cas entre NDJ et AMJ pour les anomalies humides associées à La Niña (Figure 61). Les anomalies des deux signes sont largement en phase avec les normales (correspondance spatiale des couleurs et des contours sur les deux figures), sauf en fin d'événement vers AMJ-MJJ lorsque des anomalies du signe opposé font leur apparition et annoncent la transition vers la phase suivante d'ENSO. Cette correspondance spatiale traduit une modulation des niveaux de pluie dans la ZCIT (plutôt qu'une anomalie de position) ainsi qu'une migration méridionale de l'impact d'ENSO pilotée par la saisonnalité de la ZCIT. Elle corrobore les résultats récents de Jiang *et al.* 2021, qui complètent les connaissances précédentes selon lesquelles ces signaux de téléconnexion étaient principalement restreints au printemps boréal (García-Serrano *et al.* 2017).

La capacité de l'ensemble CMIP6 à reproduire ces signaux de téléconnexion est évaluée en traçant à nouveau les anomalies composites des pluies, cette fois pour les 43 modèles capables de représenter des événements El Niño et La Niña durant la période historique (Figure 62 et Figure 63) ; par souci de simplicité, cette analyse est restreinte au trimestre JFM pendant lequel les anomalies observées sont particulièrement prononcées pendant El Niño comme pendant La Niña (Figure 60 et Figure 61). La quasi-totalité de ces modèles vont dans le sens des observations, à savoir :

- un déficit pluviométrique durant El Niño et un excédent durant La Niña ;
- des anomalies de RR conséquentes, de l'ordre de quelques mm/jour ;
- des réponses largement symétriques à El Niño et à La Niña.

En revanche, la correspondance spatiale des anomalies et normales de RR n'est pas systématique, certains modèles étant capables de la représenter (ex : GFDL-CM4), tandis que d'autres présentent un déphasage traduisant des anomalies de position de la ZCIT pendant les événements ENSO (ex : CNRM-CM6-1). Ces résultats sont largement cohérents avec ceux de Jiang *et al.* 2021, qui montrent de plus que les modèles CMIP6 sont généralement capables de représenter la migration latitudinale saisonnière des anomalies ENSO en lien avec celle de la ZCIT, et ce malgré les biais dans la représentation de celle-ci, et dans une moindre mesure dans la synchronisation saisonnière du développement d'ENSO (pic observé vers NDJ, Figure 47).



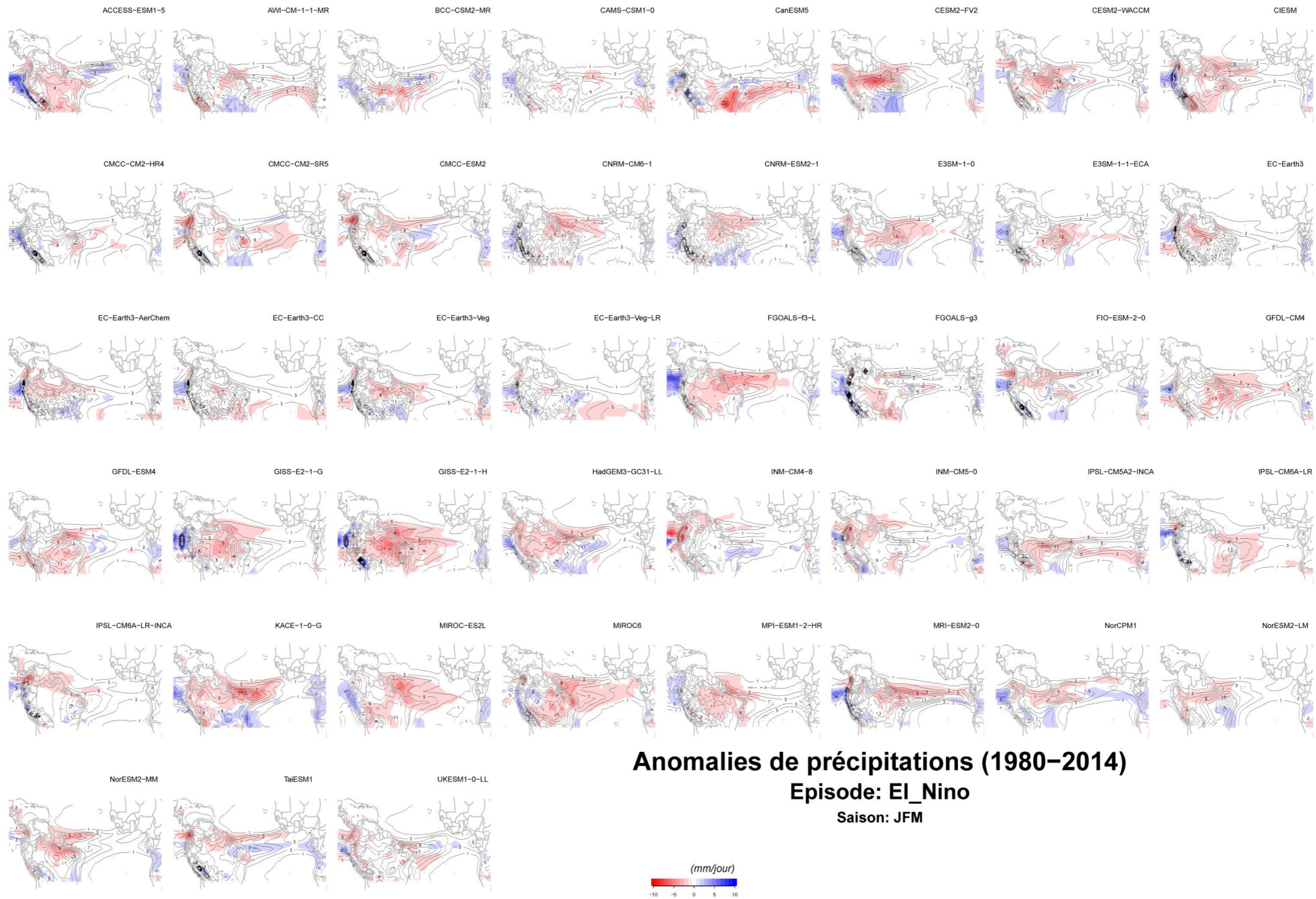
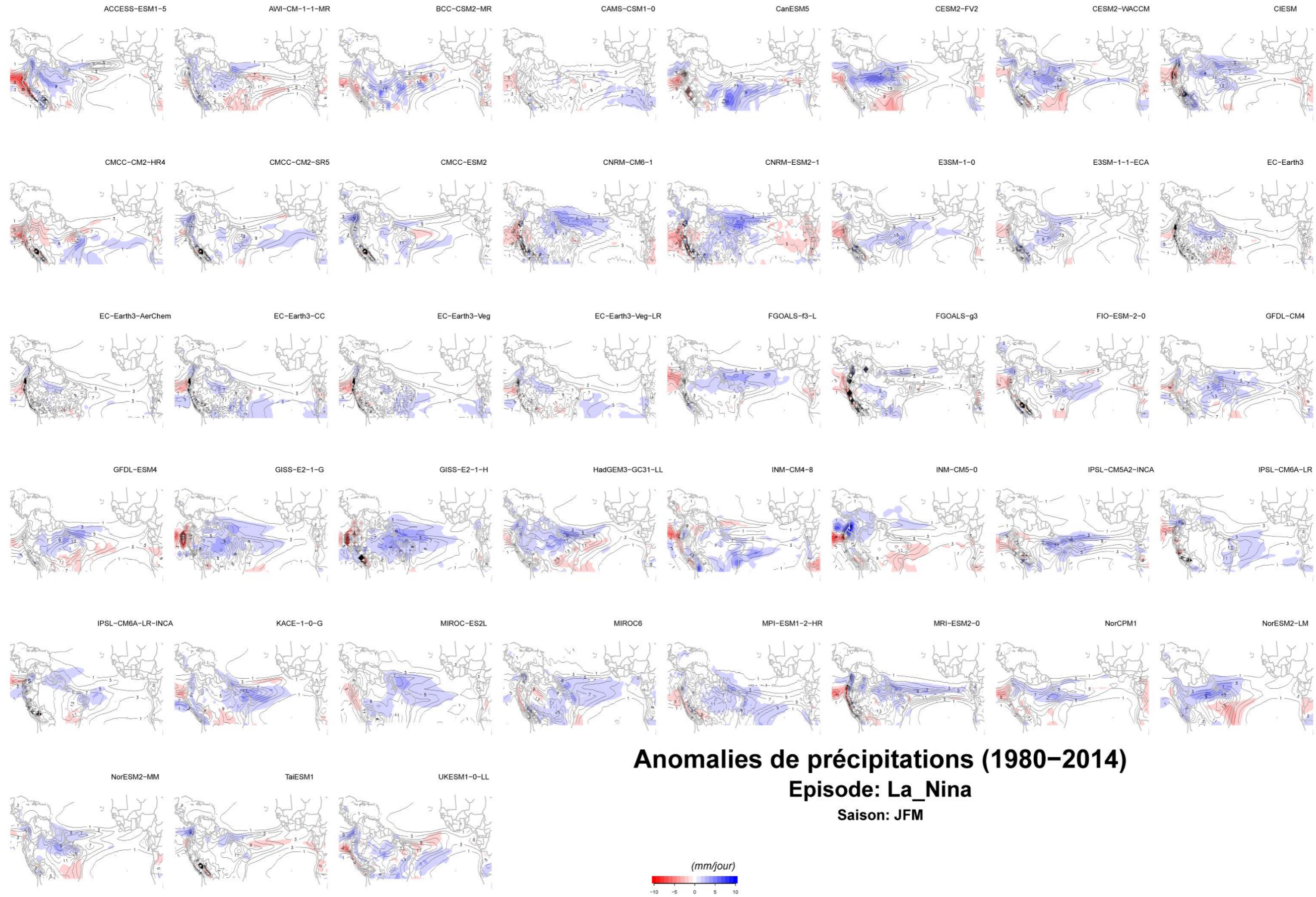


Figure 62: Anomalies composites des taux journaliers de précipitations RR durant les événements El Niño (période 1980-2014) pour les 43 modèles CMIP6 capables de représenter ENSO dans le Pacifique et pour le trimestre JFM. A noter la différence d'échelle de couleurs avec la Figure 60. Les contours représentent les normales trimestrielles des champs de pluie.





**Anomalies de précipitations (1980–2014)**  
**Episode: La\_Nina**  
**Saison: JFM**

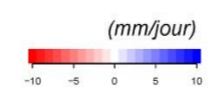


Figure 63: Anomalies composites des taux journaliers de précipitations RR durant les événements La Niña (période 1980-2014) pour les 43 modèles CMIP6 capables de représenter ENSO dans le Pacifique et pour le trimestre JFM. À noter la différence d'échelle de couleurs Figure 61. Les contours représentent les normales trimestrielles des champs de pluie.



Sélection des modèles

À l'issue de l'évaluation de la structure et de la saisonnalité de la ZCIT, on ne retient d'abord que les modèles ayant validé au moins un des deux critères sur la latitude moyenne de la ZCIT (biais et/ou RMSD). On obtient alors 13 modèles considérés comme plus réalistes en termes de ZCIT et des précipitations associées (Tableau 13). Comme indiqué à la section §5.1.3, les autres métriques ZCIT étaient peu discriminantes (sauf l'extension zonale) et les 13 modèles pré-sélectionnés sur la base de la latitude de la ZCIT remplissaient souvent la plupart des critères sur les autres métriques, justifiant ainsi le choix de la latitude comme unique métrique de sélection pour la ZCIT.

Modèle	LATITUDE		PENTE		RR		EXTENSION		ENSO (13 modèles)			
	Biais	RMSD	Biais	RMSD	Biais	RMSD	Biais	RMSD	Corrélation	RR ZCIT (%)		
ACCESS-CM2	-3,401	6,476	-0,078	0,178	2,178	4,464	2,708	6,156	0,49	14,1		
ACCESS-ESM1-5	-0,931	2,113	-0,008	0,097	3,093	5,929	2,552	5,581				
AWI-CM-1-1-MR	-2,485	5,156	-0,133	0,274	0,445	2,711	0,365	8,758				
AWI-ESM-1-1-LR	-2,706	5,822	-0,164	0,309	-0,543	2,628	-3,854	17,128				
BCC-CSM2-MR	-2,951	5,887	-0,02	0,142	0,578	4,454	-0,26	8,944				
CAMS-CSM1-0	-2,398	5,323	-0,112	0,22	-1,118	2,357	-4,573	15,149				
CanESM5	-1,547	4,886	-0,06	0,159	0,988	4,531	-0,964	8,619				
CESM2-FV2	-2,911	5,815	-0,017	0,166	1,732	4,325	-0,625	7,181				
<b>CESM2-WACCM</b>	-1,799	3,961	-0,024	0,117	1,701	4,073	0,312	7,474			0,718	67,3
CESM2-WACCM-FV2	-3,478	7,008	-0,041	0,159	1,128	3,721	-0,417	6,374			0,704	85,9
<b>CIESM</b>	-0,178	1,768	-0,044	0,109	2,027	4,2	2,708	6,96				
CMCC-CM2-HR4	-2,469	5,796	-0,021	0,176	-0,192	2,631	-2,292	12,343				
CMCC-CM2-SR5	-1,945	4,759	-0,015	0,127	1,289	3,779	4,375	9,437				
CMCC-ESM2	-2,322	4,943	0,011	0,082	1,234	3,126	5,417	10,897				
<b>CNRM-CM6-1</b>	-1,915	4,921	-0,072	0,162	1,566	3,121	2,435	6,091				
<b>CNRM-ESM2-1</b>	-1,899	4,39	-0,067	0,138	1,519	3,156	2,201	5,805				
E3SM-1-0	-2,434	5,314	0,006	0,115	0,895	2,32	1,75	5,557				
E3SM-1-1-ECA	-2,752	5,684	0,017	0,118	0,772	2,042	2,167	5,16				
EC-Earth3	-3,062	6,526	-0,07	0,184	-0,236	2,023	-2,194	14,42				
EC-Earth3-AerChem	-3,256	6,744	-0,085	0,216	-0,924	2,474	-3,6	16,41				
EC-Earth3-CC	-3,037	6,498	-0,07	0,185	-0,206	2,215	-2,839	15,108				
EC-Earth3-Veg	-3,008	6,431	-0,071	0,184	-0,063	1,938	-2,487	14,592				
EC-Earth3-Veg-LR	-2,817	5,833	-0,118	0,389	-0,791	2,681	-4,948	21,779				
<b>FGOALS-f3-L</b>	-1,718	3,704	-0,053	0,167	0,938	3,384	-1,25	3,644	0,479	122,4		
FGOALS-g3	-0,843	3,717	-0,078	0,19	2,341	5,433	-1,167	9,624	0,238	39,7		
FIO-ESM-2-0	-0,648	2,095	0,032	0,095	2,264	4,766	4,375	8,432	0,38	-5,8		
<b>GFDL-CM4</b>	-1,421	5,107	-0,061	0,191	0,769	2,773	0,729	6,525	0,552	86,5		
GFDL-ESM4	-2,303	5,666	-0,041	0,183	0,222	2,249	-1,25	7,395				
GISS-E2-1-G	-2,271	5,485	-0,104	0,277	0,968	2,822	-1,875	11,25				
<b>GISS-E2-1-H</b>	-0,218	2,41	-0,058	0,163	0,664	3,393	-5	14,252	0,534	51,9		
HadGEM3-GC31-LL	-3,187	6,093	-0,063	0,155	2,282	4,461	3,021	6,389				
IITM-ESM	-2,559	5,977	-0,14	0,304	-1,281	2,973	0,365	4,474				
INM-CM4-8	-0,204	3,677	-0,09	0,212	0,678	3,591	-6	25,556	0,183	-25,6		
INM-CM5-0	-0,101	3,08	-0,078	0,185	0,851	3,781	-2,333	15,608	0,039	13,5		
IPSL-CM5A2-INCA	-2,41	6,564	-0,111	0,221	1,252	3,922	-3,854	9,941				
IPSL-CM6A-LR	-1,74	4,424	-0,037	0,138	1,938	5,059	1,458	13,75				
IPSL-CM6A-LR-INCA	-1,739	4,421	-0,038	0,14	1,983	5,065	3,125	8,385				
KACE-1-0-G	-2,336	4,282	-0,029	0,106	1,819	3,504	2,24	5,838				
<b>MIROC-ES2L</b>	0,111	2,744	-0,043	0,125	0,846	3,167	-0,026	6,986	0,6	155,1		
<b>MIROC6</b>	-0,122	2,136	-0,05	0,124	1,956	5,014	1,615	4,535	0,378	130,1		
MPI-ESM-1-2-HAM	-2,896	6,149	-0,132	0,27	-0,538	1,725	-1,979	9,703				
MPI-ESM1-2-HR	-1,833	5,725	-0,126	0,236	0,358	2,274	-0,964	10,968				
MPI-ESM1-2-LR	-2,909	6,266	-0,129	0,251	-0,198	1,819	-1,51	11,071				

Tableau 13: Valeurs des huit métriques ZCIT pour 50 modèles CMIP6 et des deux métriques ENSO pour les 13 modèles pré-sélectionnés (référence GPCP). Les 8 modèles retenus (ainsi qu'en complément, les 2 modèles du CNRM) sont indiqués en rouge. Les coefficients validant les critères respectifs (cf. §5.1.3<sup>29</sup>) sont surlignés en jaune.

<sup>29</sup>Pour la pente, les RR et l'extension zonale de la ZCIT, les intervalles de biais sont [-7.0 10<sup>-2</sup>-7.0 10<sup>-2</sup>], [-1.50 mm/jour-1.50 mm/jour] et [-2.0°-2.0°], respectivement, et les seuils de RMSD sont 0.250, 4.0 mm/jour et 6.0°, respectivement.



Cette liste est ensuite raffinée en se basant sur la validation d'au moins un des deux critères relatifs à ENSO durant JFM (cf. §5.1.3). À la fin de la sélection, il ne reste que 8 modèles. Les 2 modèles du Centre National de Recherches Météorologiques (CNRM) de Météo-France sont également considérés dans le reste des analyses, à titre purement indicatif. Pour le détail des calculs relatifs aux critères ENSO, on se référera aux Tableaux A7 et A8 en annexe. Les moyennes composites JFM des RR pendant El Niño/La Niña ainsi que la ZCIT associée y sont également présentées pour ces 10 modèles à titre d'illustration (Figures A56-A57).

Les variations saisonnières des paramètres de la ZCIT pour ces 10 modèles (et leur moyenne d'ensemble) ainsi que pour les données de référence figurent en annexe. Si certains modèles présentent le biais systématique de la ZCIT déplacée au sud de l'équateur en début d'année (CESM2-WACCM, GFDL-CM4, FGOALS-f3-L, en plus des deux modèles du CNRM – Figure A58), généralement compensé par un biais faible au deuxième semestre et/ou une bonne représentation de l'harmonique annuelle, les autres sont les rares modèles à ne pas présenter de tel biais (CIESM, GISS-E2-1-H, MIROC-ES2L, MIROC6 et NorESM2-MM). La moyenne d'ensemble des 10 modèles montre ainsi une proximité remarquable avec les observations, illustrant l'efficacité de la sélection réalisée pour la réduction des biais. C'est également le cas pour l'extension zonale de la ZCIT (Figure A61), pour laquelle le biais moyen est encore plus réduit qu'il ne l'était avec l'ensemble des 50 modèles (Figure 59). Le biais précédemment relevé concernant une ZCIT trop zonale pendant le premier semestre reste présent pour l'échantillon de 10 modèles, bien que réduit (Figure A59). À l'inverse, le biais sur les précipitations est similaire à celui obtenu précédemment mais s'est un peu accentué (Figure A60), bien que cela dépende aussi de la référence utilisée : le biais est faible par rapport à ERA5, notamment en moyenne annuelle.

Les distributions spatiales des anomalies des précipitations liées à ENSO en JFM sont également rappelées en annexe pour ces 10 modèles (Figures A62-A63). Les deux métriques utilisées pour en traduire l'accord avec les observations en termes de structure et d'intensité se révèlent elles aussi efficaces, compte tenu de la similitude des signaux obtenus pour ces modèles avec les observations des points de vue qualitatif et quantitatif, bien que d'autres modèles comme ceux du CNRM sont eux aussi capables de représenter ces téléconnexions d'ENSO (voir aussi Figure 62 et Figure 63).

La section suivante présente l'analyse des projections climatiques à grande échelle issues de cet échantillon, qui servira à réduire encore le nombre de modèles considérés pour la descente d'échelle sur la Guyane.

## 5.2.2 Évaluation des projections futures à grande échelle

### *Disponibilité des données*

Le Tableau 14 décrit la disponibilité des données mensuelles pour l'échantillon des 10 modèles retenus après l'étape de sélection précédente.

Modèle	RR	tas	uas	vas
CESM2-WACCM	x	x		
CIESM	x	x		
CNRM-CM6-1	x	x	x	x
CNRM-ESM2-1	x	x	x	x
FGOALS-f3-L	x	x	x	x
GFDL-CM4	x	x	x	x
GISS-E2-1-H	x	x	x	x
MIROC-ES2L	x	x	x	x
MIROC6	x	x	x	x
NorESM2-MM	x	x		

Tableau 14 : Données mensuelles de surface disponibles pour les 10 modèles CMIP6 retenus (les cellules vides indiquent les données manquantes). Ces disponibilités s'appliquent tant pour les simulations historiques que futures (SSP2-4.5 et SSP5-8.5).

Pour trois modèles (CESM2-WACCM, CIESM, NorESM2-MM), les données de vent à 10 m sont manquantes. Toutefois, celles du vent à 1 000 hPa (ua, va) sont disponibles, ainsi que les données de force du vent en surface (sfcWind) pour deux des modèles (Tableau 15). Ceci permettra de fournir des éléments complémentaires à l'analyse directe du vent à 10 m réalisée pour les 7 autres modèles.

Modèle	ua	va	sfcWind
CESM2-WACCM	x	x	x
CIESM	x	x	
NorESM2-MM	x	x	x

Tableau 15 : Données mensuelles de vent en altitude et de force du vent de surface pour les 3 modèles CMIP6 retenus dont les composantes cartésiennes du vent de surface sont manquantes.

### Précipitations

Les écarts des précipitations représentés ici pour le scénario SSP5-8.5 montrent, excepté pour quelques modèles (CNRM-CM6-1, CNRM-ESM2-1, GFDL-CM4, FGOALS-f3-L), une diminution des pluies dans l'Atlantique tropical au nord de la ZCIT et dans la partie nord de l'Amérique du Sud (Figure 64). À l'inverse, on constate une augmentation des précipitations sur l'océan au sud de la ZCIT pour la majeure partie des modèles. En conséquence, la ZCIT se déplacerait légèrement vers le sud en moyenne sur l'année, induisant une diminution des précipitations visible sur la Guyane pour la plupart des modèles, excepté pour les modèles GISS-E2-1-H et FGOALS-f3-L (aucune évolution significative).

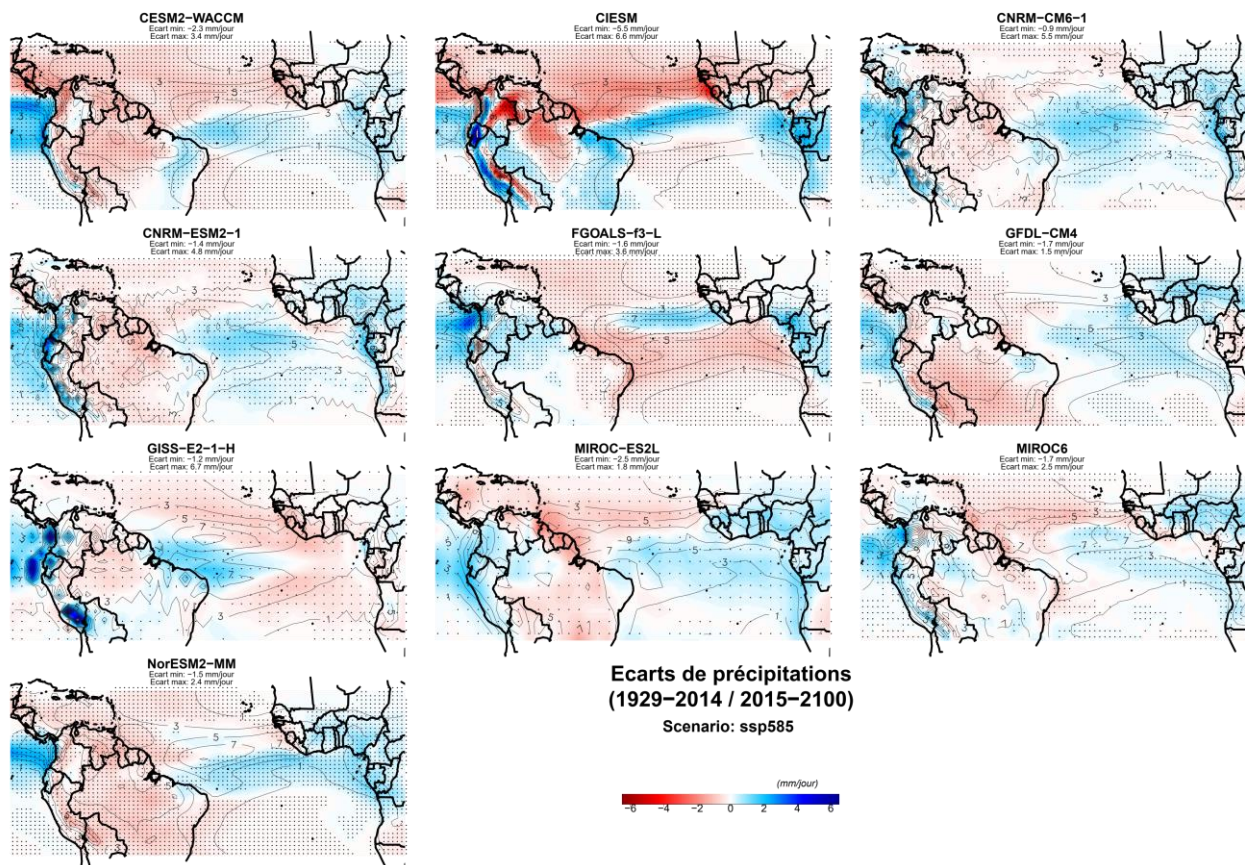


Figure 64 : Écarts des moyennes annuelles à long terme des taux journaliers des précipitations RR entre l'historique (1929-2014) et le scénario SSP5-8.5 (2015-2100) pour les 10 modèles CMIP6 retenus. Les contours représentent les moyennes historiques (mm/jour). Les points indiquent les zones où les écarts sont significatifs au niveau de confiance de 95 %.

Les résultats du scénario SSP2-4.5 sont très semblables à ceux de SSP5-8.5, avec toutefois des écarts moins forts en amplitude et une significativité moins étendue (Figure A64), suggérant que l'intensité des changements régionaux des précipitations est directement liée à celle du réchauffement global.

Compte tenu de la forte variabilité annuelle de la ZCIT, il est pertinent d'analyser ces écarts à l'échelle saisonnière (Figure 65 et Figure 66).



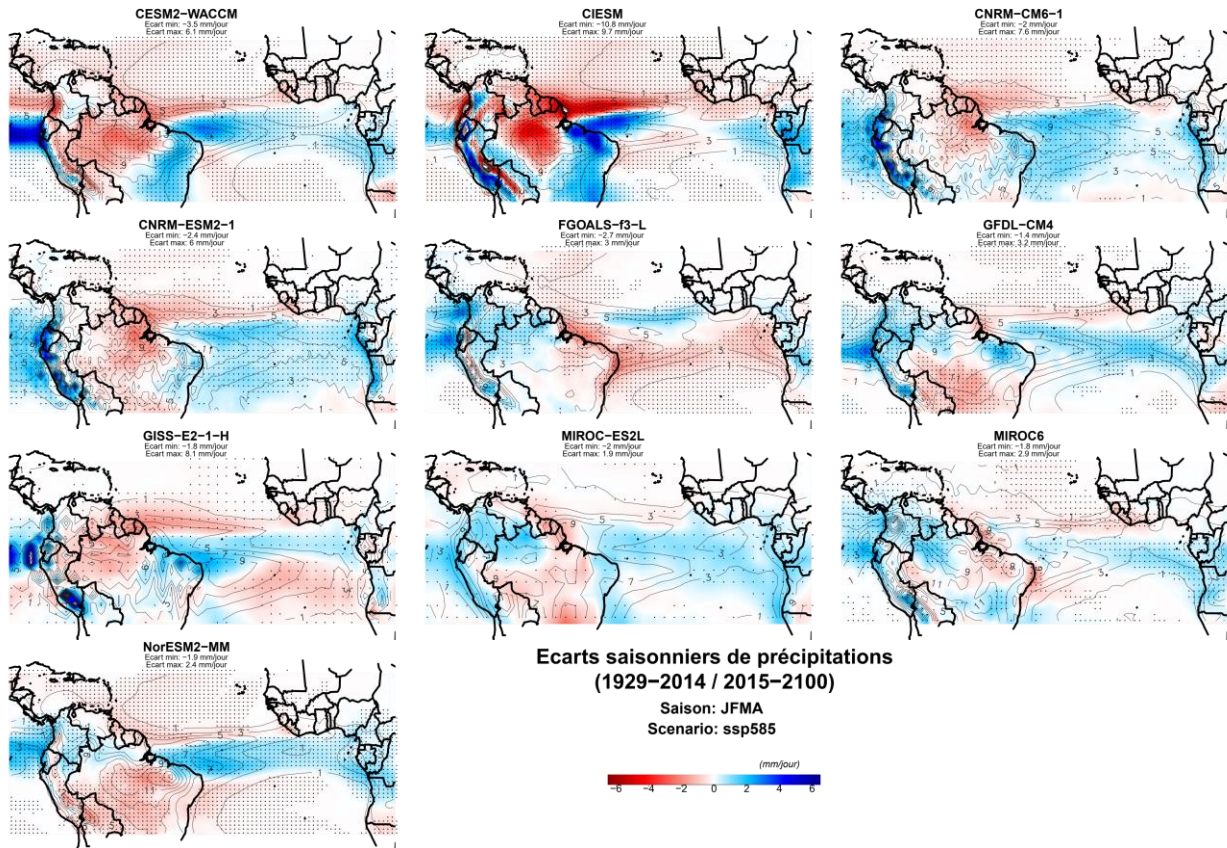


Figure 65 : Écart des moyennes saisonnières en JFMA à long terme des taux journaliers des précipitations RR entre l'historique (1929-2014) et le scénario SSP5-8.5 (2015-2100) pour les 10 modèles CMIP6 retenus. Les contours représentent les moyennes historiques (mm/jour). Les points indiquent les zones où les écarts sont significatifs au niveau de confiance de 95 %.

Pour la saison JFMA (moyenne des normales mensuelles de janvier à avril, Figure 65), la plupart des modèles montrent un assèchement au nord de la ZCIT et une intensification des pluies au cœur de celle-ci, voire un peu plus au sud (les signaux étant particulièrement marqués pour le modèle CIEM). En accord avec les résultats précédemment obtenus pour la moyenne annuelle, ces évolutions s'accompagnent d'une diminution de la pluviométrie guyanaise en saison des pluies. Seules exceptions à cette tendance générale, FGOALS-f3-L prévoit une diminution des précipitations sur la majeure partie de l'océan, un léger déplacement de la ZCIT vers le nord et pas d'évolution significative des pluies sur la Guyane ; GFDL-CM4 ne présente pas non plus de signal significatif sur la Guyane malgré une réponse à grande échelle similaire à celle des autres modèles ; la diminution de la pluviométrie guyanaise mise en évidence pour le modèle MIROC-ES2L n'est pas significative non plus.

La saison JASO (moyenne des normales mensuelles de juillet à octobre, Figure 66) présente un assèchement plus étendu sur le continent sud-américain comme sur l'Océan Atlantique pour tous les modèles. Cependant, le dipôle (diminution des précipitations au nord de la ZCIT augmentation au sud) et/ou l'intensification des précipitations constatées au niveau de la ZCIT en JFMA se manifestent également en JASO (à nouveau très marqués pour CIEM), avec de nouveau pour conséquence un déplacement de la ZCIT vers le sud. Cependant, compte tenu de la position de la ZCIT en cette saison, plus à l'est du bassin en direction des côtes africaines, ce déplacement vers le sud a généralement peu d'influence sur la pluviométrie guyanaise qui a tendance à diminuer pour la plupart des modèles. De nouveau, FGOALS-f3-L se distingue par un déplacement de la ZCIT vers le nord. Les changements des précipitations dans la ZCIT sont également singuliers pour GISS-E2-1-H et NorESM2-MM, avec des différences nord/sud mais

aussi est/ouest. GISS-E2-1-H se distingue aussi dans la mesure où c'est le seul modèle présentant une augmentation des pluies en Guyane, conséquence d'une ZCIT dont le cœur est situé plus près de l'Amérique du Sud, permettant ainsi à ses évolutions d'y avoir plus d'influence. Comme mis en évidence précédemment pour la moyenne annuelle, les écarts saisonniers sont moins prononcés et les champs de significativité moins étendus avec le scénario SSP2-4.5 (Figures A65 et A66).

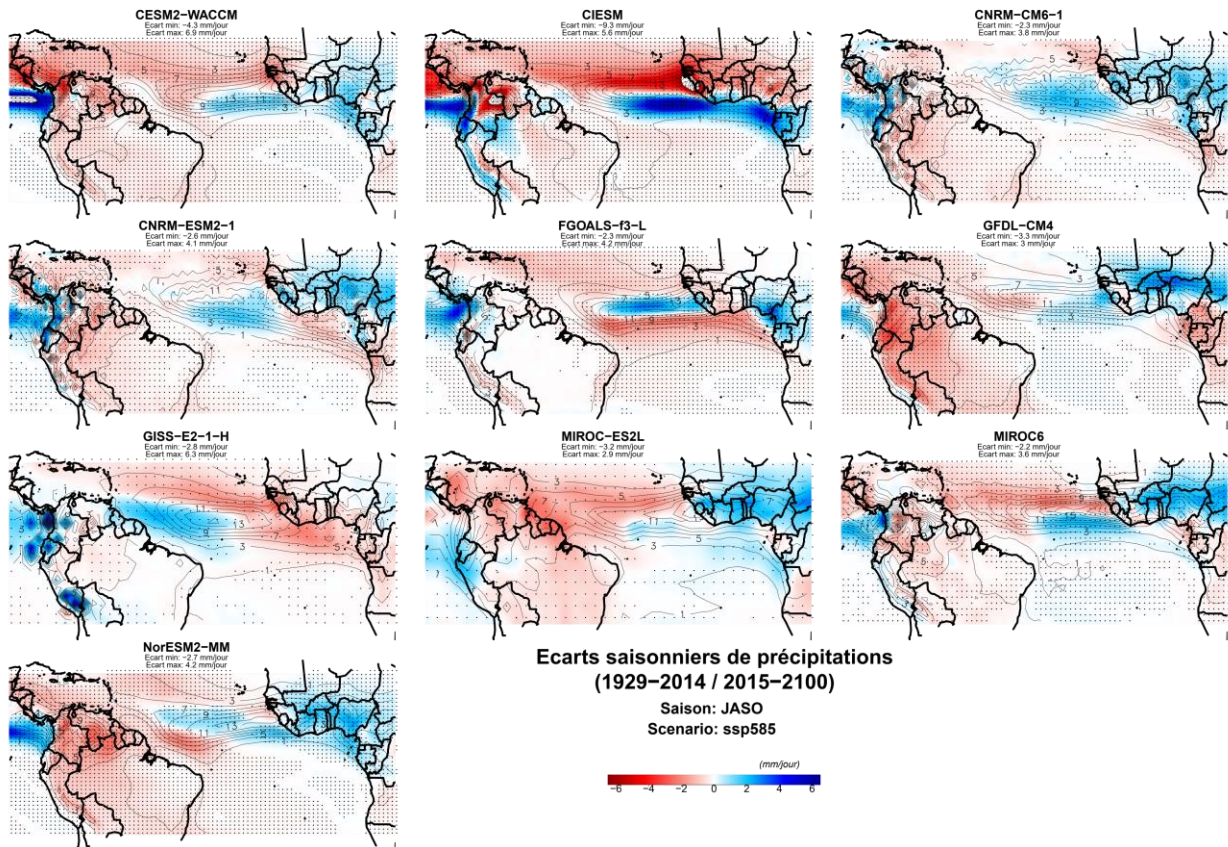


Figure 66 : Écarts des moyennes saisonnières en JASO à long terme des taux journaliers des précipitations RR entre l'historique (1929-2014) et le scénario SSP5-8.5 (2015-2100) pour les 10 modèles CMIP6 retenus. Les contours représentent les moyennes historiques (mm/jour). Les points indiquent les zones où les écarts sont significatifs au niveau de confiance de 95 %.



### Température de surface

Tous les écarts de température sont positifs et statistiquement significatifs, quel que soit le scénario (Figure 67 et A67). Pour le scénario SSP5-8.5, le réchauffement de surface est de l'ordre de 2-3 °C sur l'océan en moyenne annuelle, tandis qu'il est supérieur à 3 °C sur les continents pour la plupart des modèles, voire bien plus : la hausse des températures sur une partie du bassin amazonien dépasse les 8 °C pour le modèle CIESM. Sur la Guyane, le réchauffement est compris entre ~2 °C (GISS-E2-1-H) et 4-6°C (CIESM).

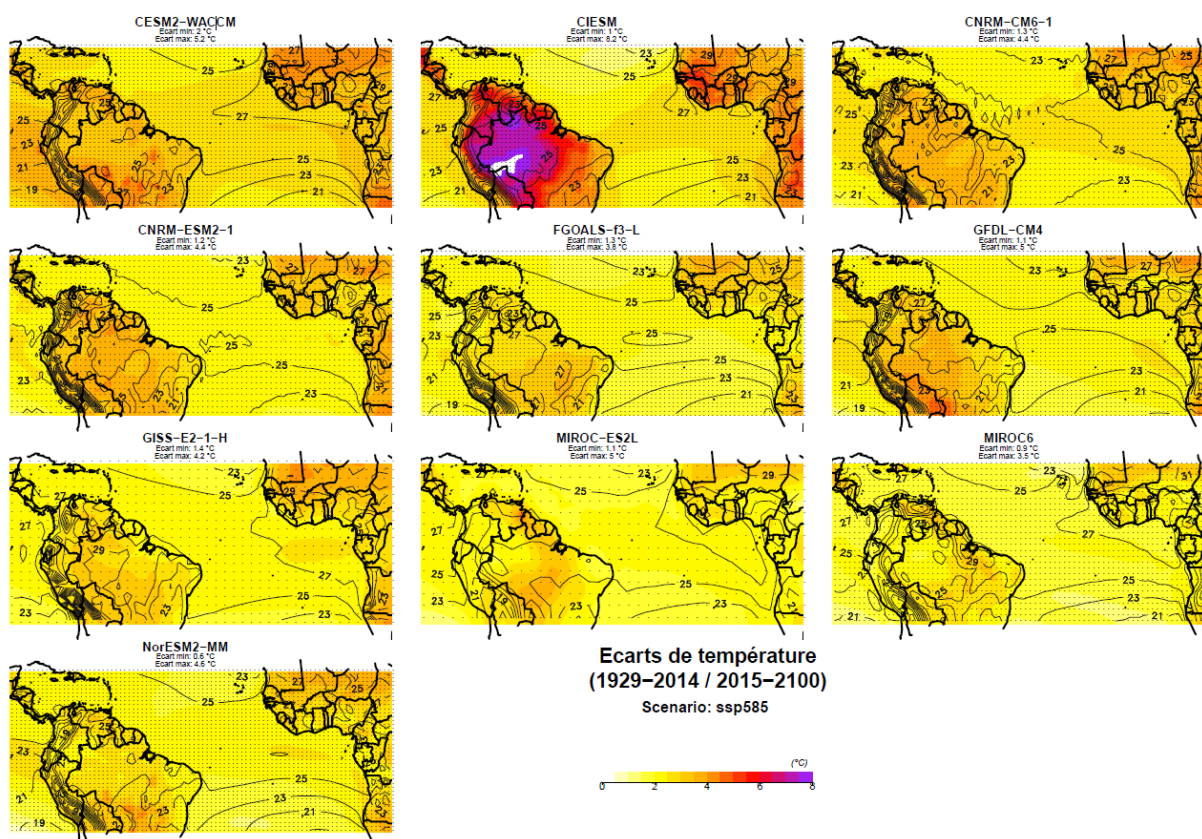


Figure 67 : Écarts des moyennes annuelles à long terme des températures moyennes journalières entre l'historique (1929-2014) et le scénario SSP5-8.5 (2015-2100) pour les 10 modèles CMIP6 retenus. Les contours représentent les moyennes historiques. Les points indiquent les zones où les écarts sont significatifs au niveau de confiance de 95 %.

L'utilisation d'une fourchette de valeurs réduite pour l'échelle de couleurs (Figure 68 et A68) permet de se focaliser sur les écarts de température au niveau de l'Océan Atlantique. Tous les modèles (sauf FGOALS-f3-L) présentent un réchauffement maximal pouvant atteindre 2.5-3 °C au niveau de la langue d'eau froide (ou *cold tongue*) de l'Atlantique tropical oriental. Celle-ci connecte les zones d'upwelling côtier (remontée d'eau froide en surface depuis les profondeurs) entre la Namibie et le Golfe de Guinée et l'upwelling équatorial situé plus à l'ouest (contours de TSM non représentés, voir Richter & Tokinaga 2020). La ZCIT est généralement située plus au nord, là où l'océan est plus chaud en surface (*warm pool*) et favorise la convection (Héritier 2011, Richter & Tokinaga 2020). Ainsi le réchauffement de la cold tongue étend la warm pool vers le sud, en cohérence avec le déplacement de la ZCIT vers le sud déjà constaté pour la plupart des modèles (Figure 56). Les signaux d'augmentation des précipitations tendent d'ailleurs à coïncider avec ceux du réchauffement océanique à l'Est du bassin, même pour FGOALS-f3-L dont le réchauffement sur le flanc Nord de la ZCIT est cohérent avec le déplacement de celle-ci vers le nord.



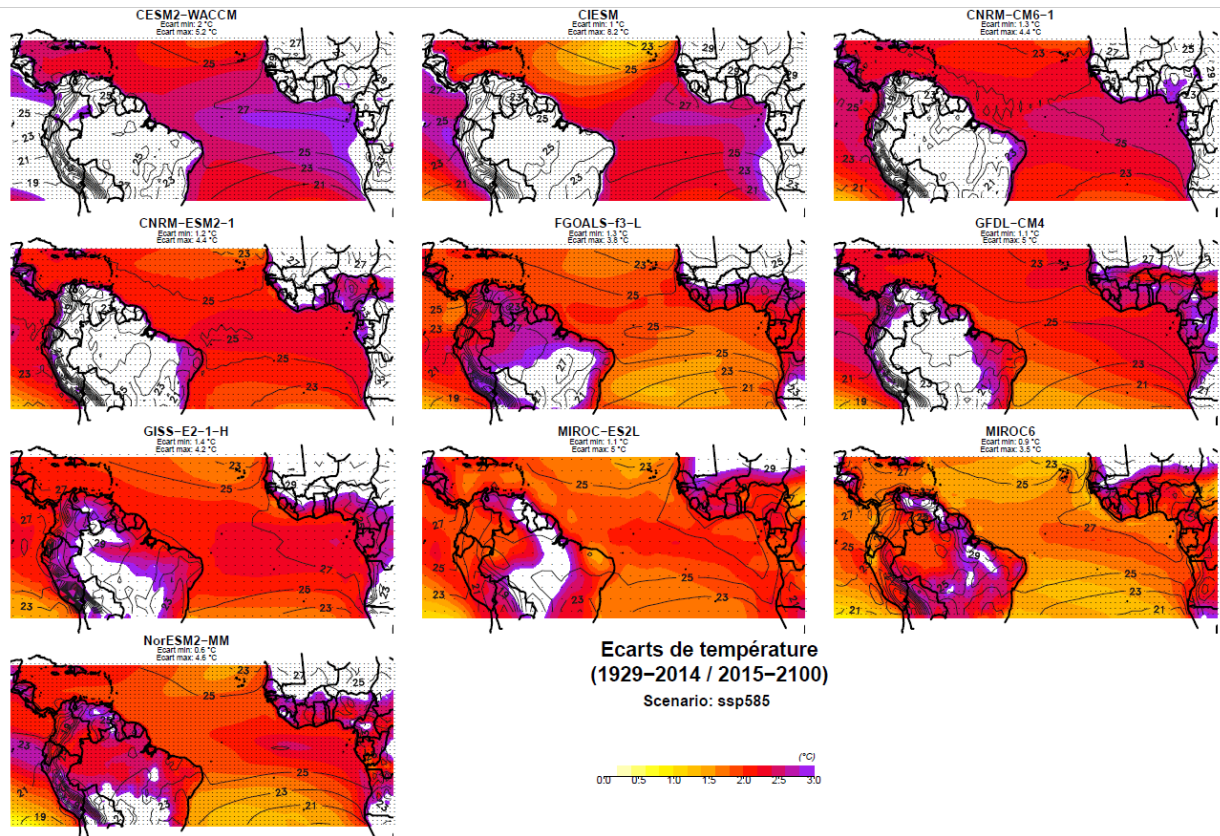


Figure 68 : Écarts des moyennes annuelles à long terme des températures moyennes journalières de surface entre l'historique (1929-2014) et le scénario SSP5-8.5 (2015-2100) pour les 10 modèles CMIP6 retenus. Les contours représentent les moyennes historiques. Les points indiquent les zones où les écarts sont significatifs au niveau de confiance de 95 %. Les zones pour lesquelles la température augmente de plus de 3 °C sont représentées en blanc.

Comme pour les précipitations, on trace les écarts saisonniers des températures (Figure 69 et Figure 70 et A69-A70). On constate une saisonnalité du réchauffement continental en général, avec des écarts plus intenses sur tout le continent sud-américain en JASO (3-5 °C pour SSP5-8.5, voire plus selon les modèles CIESM, GFDL-CM4 et MIROC-ES2L) qu'en JFMA (2.5-4 °C). Ces contrastes saisonniers restent généralement valables dans le cas particulier de la Guyane, mais sont plus nuancés pour certains modèles (FGOALS-f3-L, GISS-E2-1-H, NorESM2-MM).

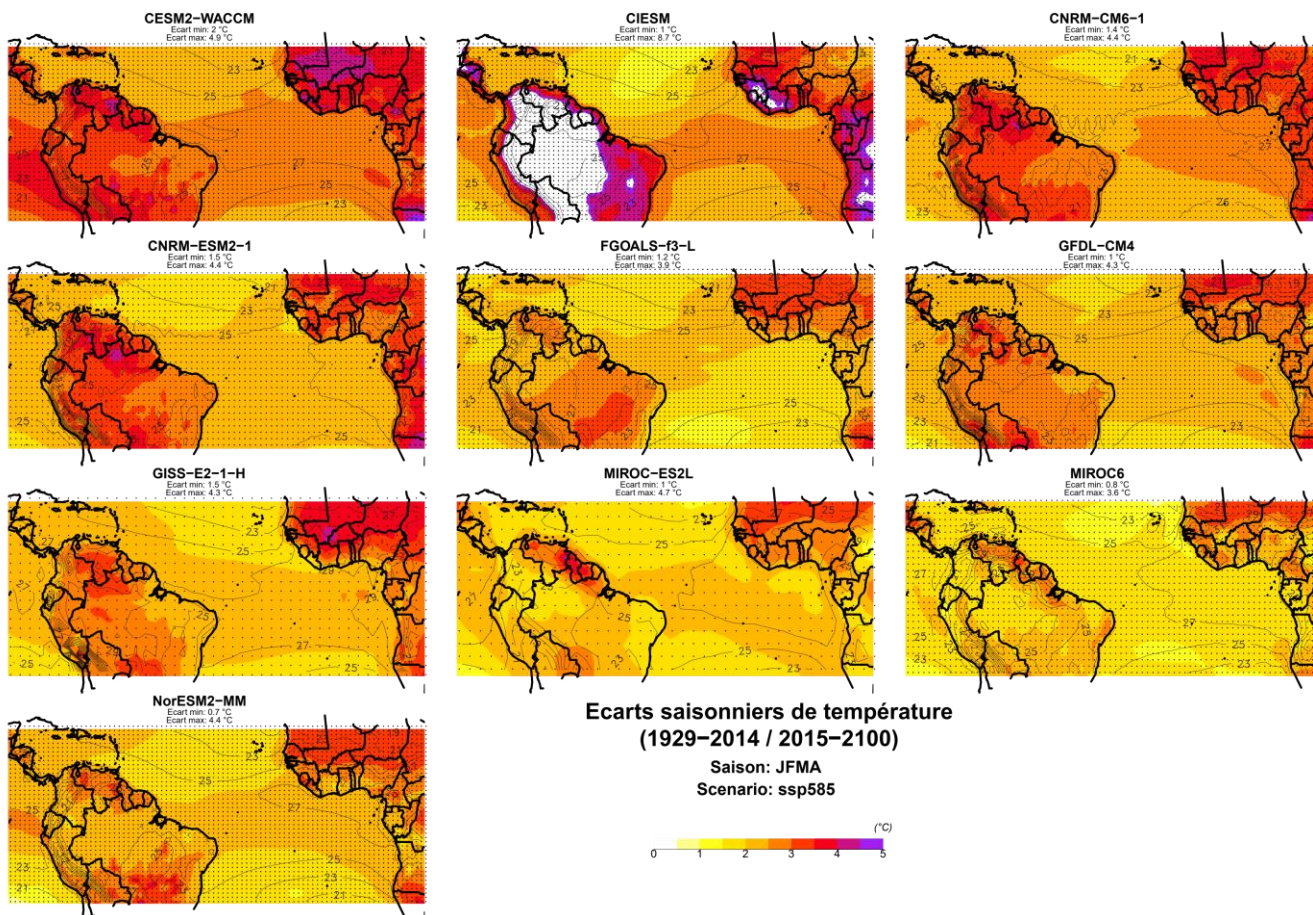


Figure 69 : Écarts des moyennes saisonnières en JFMA à long terme des températures moyennes journalières de surface entre l'historique (1929-2014) et le scénario SSP5-8.5 (2015-2100) pour les 10 modèles CMIP6 retenus. Les contours représentent les moyennes historiques. Les points indiquent les zones où les écarts sont significatifs au niveau de confiance de 95 %. Les zones pour lesquelles la température augmente de plus de 5 °C sont représentées en blanc.



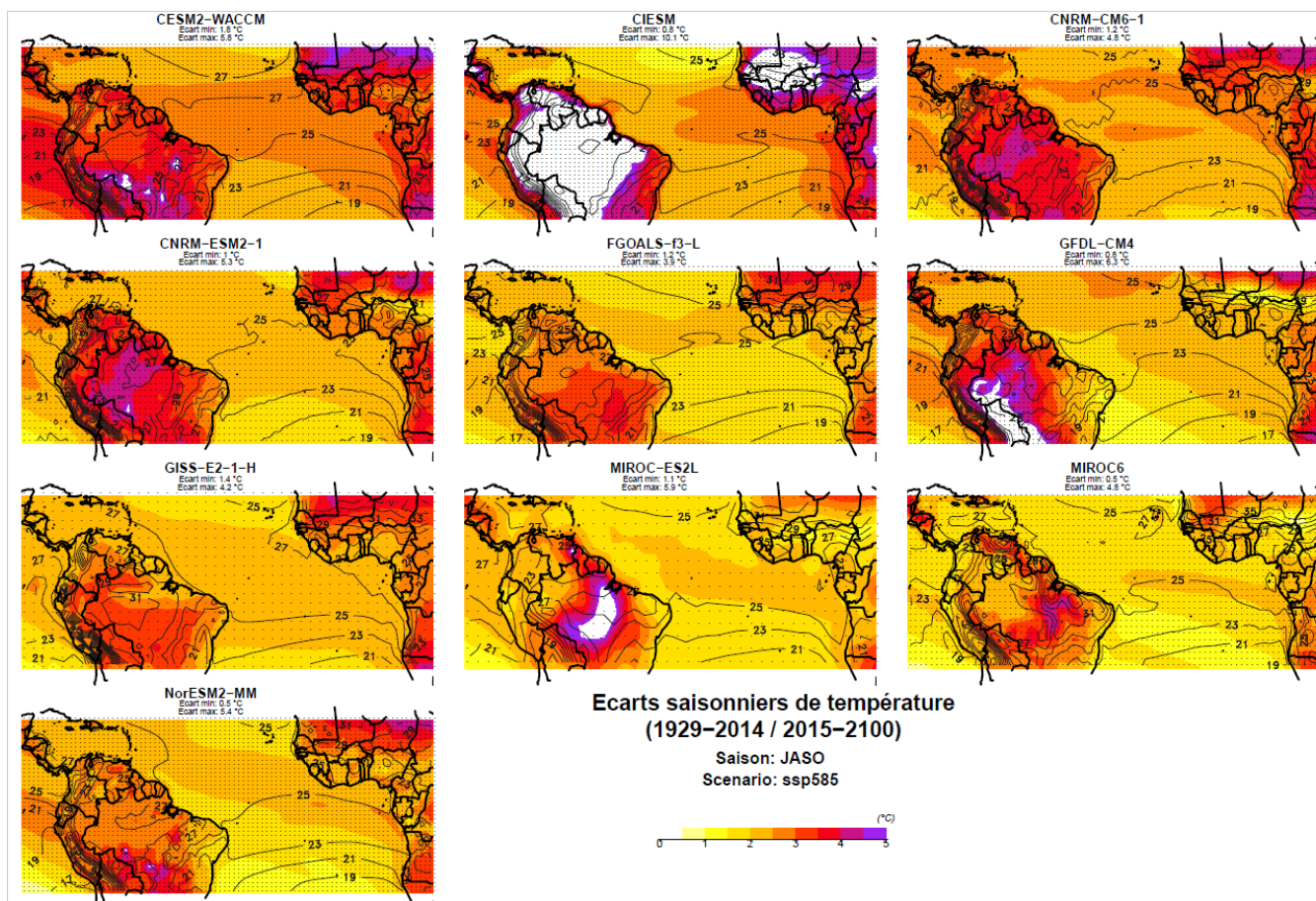


Figure 70 : Écarts des moyennes saisonnières en JASO à long terme des températures moyennes journalières de surface entre l'historique (1929-2014) et le scénario SSP5-8.5 (2015-2100) pour les 10 modèles CMIP6 retenus. Les contours représentent les moyennes historiques. Les points indiquent les zones où les écarts sont significatifs au niveau de confiance de 95 %. Les zones pour lesquelles la température augmente de plus de 5 °C sont représentées en blanc.

Sur l'océan, même si la *cold tongue* est généralement moins bien définie en JFMA (Richter & Tokinaga 2020), le signal de réchauffement a tendance à présenter un léger décalage au sud de la *warm pool*, à l'exception de FGOALS-f3-L pour lequel ce décalage est à nouveau dirigé vers le nord. En JASO, quand la *warm pool* est située plus au nord de concert avec la ZCIT, les signaux de réchauffement superficiel sont également situés plutôt sur le flanc sud de la *warm pool*, donc dans la *cold tongue* qui est plus marquée en cette saison. Ainsi, comme déjà vu pour l'annuel, ces changements saisonniers sont assez cohérents avec ceux des précipitations (Figure 64 et Figure 65).



### Vent à 10 m

À partir des composantes zonale et méridienne, on trace les moyennes annuelles du vent à 10 m et les écarts associés en climat futur pour les 7 modèles CMIP6 pour lesquels la donnée est disponible (Figure 71, A71). Les évolutions futures pour SSP2-4.5 étant généralement similaires à celles pour SSP5-8.5, mais moins intenses (cf. Annexe), seuls les résultats obtenus pour ce dernier scénario sont détaillés dans ce qui suit.

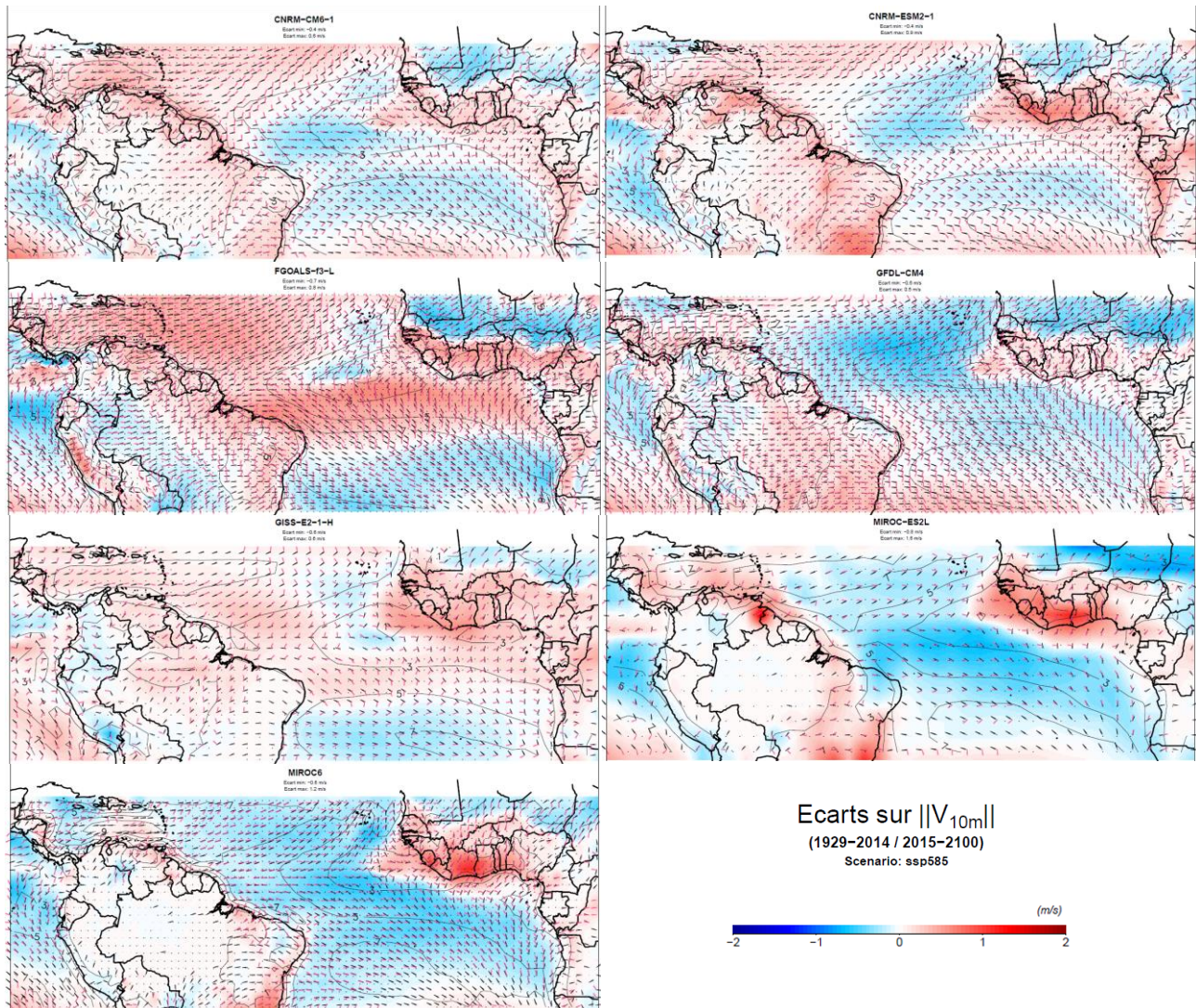


Figure 71 : Écarts des moyennes annuelles à long terme des moyennes journalières du vent à 10 m normalisé<sup>30</sup> (flèches rouges) et de la force du vent (couleurs) entre l'historique (1929-2014) et le scénario SSP5-8.5 (2015-2100) pour 7 modèles CMIP6. Les flèches noires et les contours représentent les moyennes historiques du vent à 10 m normalisé<sup>30</sup> et de la force du vent (m/s), respectivement. Les points indiquent les zones où les écarts de la force du vent sont significatifs au niveau de confiance de 95 %.

En climat historique, les minima de la force du vent coïncident approximativement avec les maxima des précipitations associés à la ZCIT (Figure 64), et sont situés entre deux bandes

<sup>30</sup>Les flèches rouges (resp. noires) sont obtenues après normalisation des écarts du vecteur de vent (resp. après normalisation du vecteur de vent) et représentent donc la direction des écarts du vent (resp. la direction du vent).

correspondant aux alizés des hémisphères Nord et Sud. Pour certains modèles (CNRM-CM6-1, CNRM-ESM2-1, FGOALS-f3-L, GFDL-CM4), les régions où le vent s'affaiblit (resp. se renforce) correspondent à celles où les précipitations augmentent (resp. diminuent), traduisant ainsi les déplacements futurs de la ZCIT. Cependant, ce n'est pas le cas pour les autres modèles. Pour GISS-E2-1-H, un renforcement du vent à proximité du Nord de l'Amérique du Sud s'accompagne d'une augmentation des précipitations d'après ce modèle dont le cœur de la ZCIT est situé plus à l'ouest que les autres (du moins en JASO), ce qui pourrait traduire une dynamique différente liée par exemple à une augmentation du transport d'humidité en direction du continent. À l'inverse, les modèles MIROC-ES2L et MIROC6 projettent une diminution de la force du vent sur une large fraction du domaine d'étude (particulièrement sur l'océan), qui ne paraît pas directement liée aux changements des précipitations, caractérisés essentiellement par le contraste nord-sud associé au déplacement de la ZCIT vers le sud. Cet affaiblissement des alizés (également constaté dans une certaine mesure pour GFDL-CM4 voire les modèles du CNRM) est en accord avec le ralentissement projeté de la circulation de Walker dans l'Atlantique (Tokinaga & Xie 2011, Park & Latif 2020).

En JFMA, la zone de vents faibles est située plus au sud qu'en moyenne annuelle (Figure 72, A72), conformément à la position Sud de la ZCIT en cette saison (Figure 65). Contrairement à la perspective en moyenne annuelle, les signaux d'évolution de la force du vent en JFMA ne coïncident pas avec les changements de précipitations pour les modèles du CNRM et GFDL-CM4 (c'est en revanche le cas pour FGOALS-f3-L), qui présentent un ralentissement des alizés dans la partie Nord (et Ouest) et sur la majeure partie du domaine océanique, respectivement. Pour GISS-E2-1-H, un transport accru d'humidité vers l'Amérique du Sud est de nouveau soupçonné, compte tenu de l'intensification des alizés et des pluies dans la ZCIT au niveau du Nordeste brésilien. Pour les deux modèles du JAMSTEC (MIROC6 et MIROC-ES2L), la situation précédemment décrite en moyenne annuelle (ralentissement des vents, déplacement méridional de la ZCIT) reste également valable en JFMA, bien qu'une intensification du vent en partie Nord allant des Caraïbes au Cap-Vert soit également constatée.



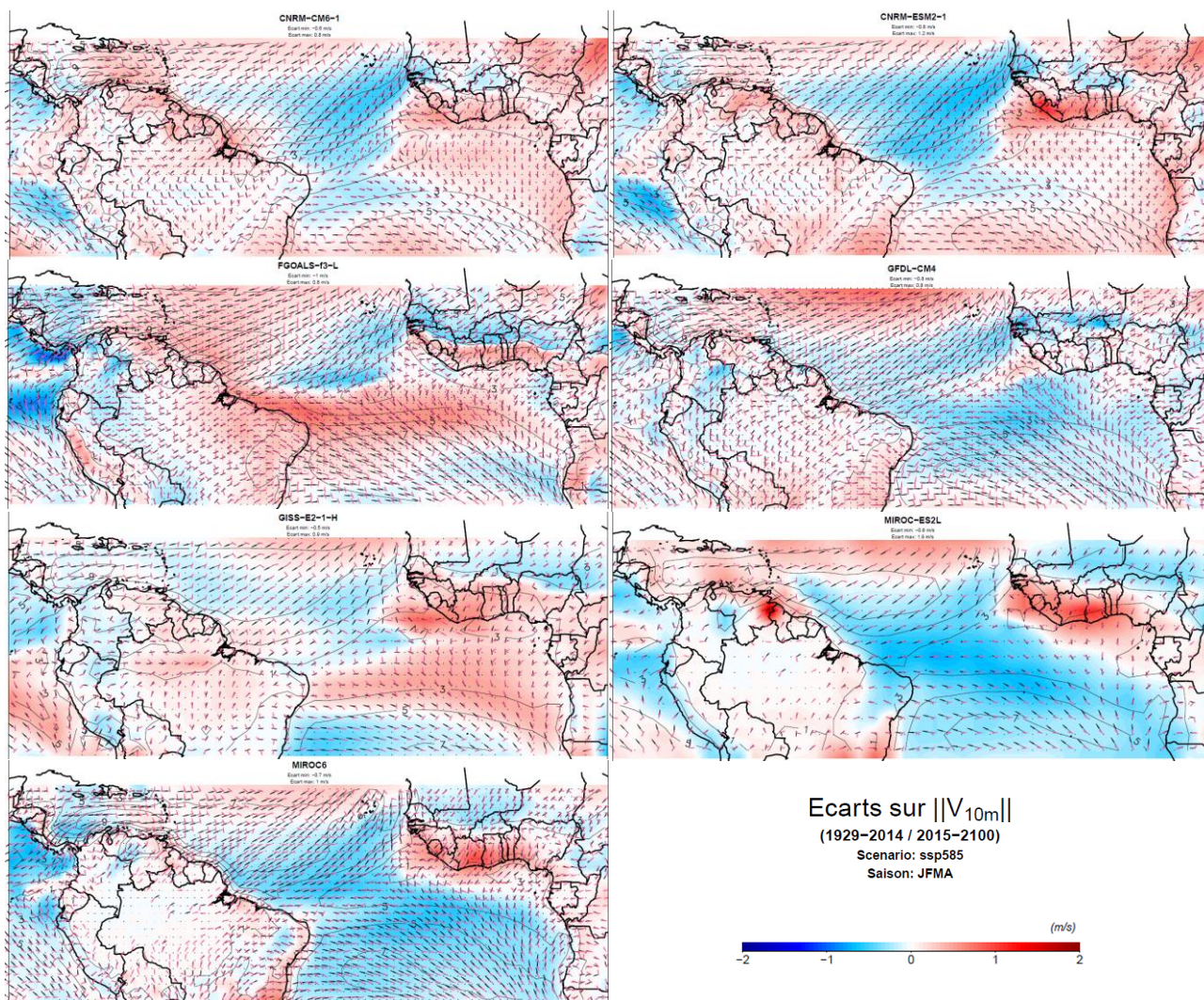


Figure 72 : Écarts des moyennes saisonnières en JFMA à long terme des moyennes journalières du vent à 10 m normalisé (flèches rouges) et de la force du vent (couleurs) entre l'historique (1929-2014) et le scénario SSP5-8.5 (2015-2100) pour 7 modèles CMIP6. Les flèches noires et les contours représentent les moyennes historiques du vent à 10 m normalisé et de la force du vent (m/s), respectivement. Les points indiquent les zones où les écarts de la force du vent sont significatifs au niveau de confiance de 95 %.

En JASO, la plupart des modèles présentent des évolutions similaires à celles précédemment décrites pour la moyenne annuelle, mais plus intenses (Figure 73, A73). Principale exception, GFDL-CM4 présente un dipôle très marqué au sud et à l'ouest du Cap-Vert, traduisant un déplacement de la zone de vents faibles vers le sud, pourtant nettement moins clair dans les champs de précipitations (Figure 66). On peut également noter un renforcement du vent au sud du Cap-Vert et en bordure Sud du domaine d'étude.



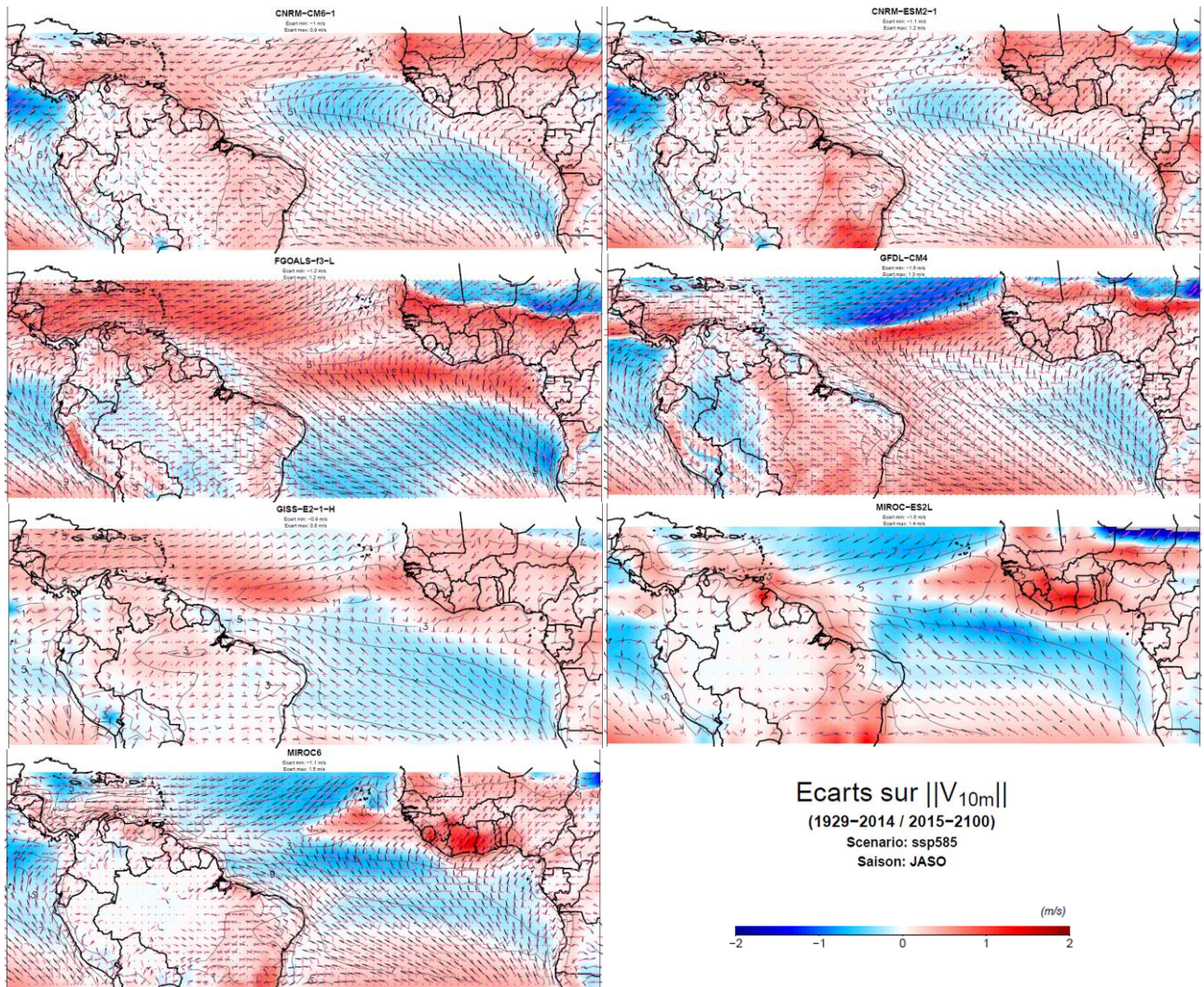


Figure 73 : Écarts des moyennes saisonnières en JASO à long terme des moyennes journalières du vent à 10 m normalisé (flèches rouges) et de la force du vent (couleurs) entre l'historique (1929-2014) et le scénario SSP5-8.5 (2015-2100) pour 7 modèles CMIP6. Les flèches noires et les contours représentent les moyennes historiques du vent à 10 m normalisé et de la force du vent (m/s), respectivement. Les points indiquent les zones où les écarts de la force du vent sont significatifs au niveau de confiance de 95 %.

Il est important de noter que les évolutions du vent sur le territoire guyanais apparaissent souvent décorréées avec celles des alizés à grande échelle, ce qui est lié aux forts gradients thermiques et éoliens à l'interface océan-continent, dont les modèles de climat ne sont pas toujours capables de saisir toute la complexité de la dynamique associée. Ainsi, les projections futures du vent de surface prises en point de grille sur un petit territoire côtier comme la Guyane, sont à prendre avec précaution. Pour la sélection des modèles, on préférera considérer ici les signaux d'évolution pris sur de plus grandes régions, tant au large de la Guyane que sur le continent sud-américain.



## Vent à 1000 hPa

Pour les raisons exposées précédemment, on trace le vent à 1 000 hPa (environ 110 m d'altitude) pour les 3 modèles restants (cf. *Disponibilité des données*). Tel que constaté pour le vent à 10 m des 7 autres modèles, les minima de l'intensité du vent en altitude (Figure 74, A74) sont à peu près colocalisés avec les maxima des pluies de la ZCIT (Figure 64) et bordés par les alizés de nord-est et de sud-est. Les signaux d'évolution de la force du vent à 1 000 hPa sont très similaires pour CESM2-WACCM et CIESM (accentués pour ce dernier), inversement proportionnels à ceux des précipitations et cohérents avec un déplacement de la ZCIT vers le sud, comme déjà constaté pour la plupart des modèles dans l'analyse du vent à 10 m. NorESM2-MM présente un comportement très similaire aux modèles du JAMSTEC, avec un affaiblissement généralisé du vent au-dessus de l'océan sans lien direct avec le déplacement de la ZCIT vers le sud dans ce modèle aussi.

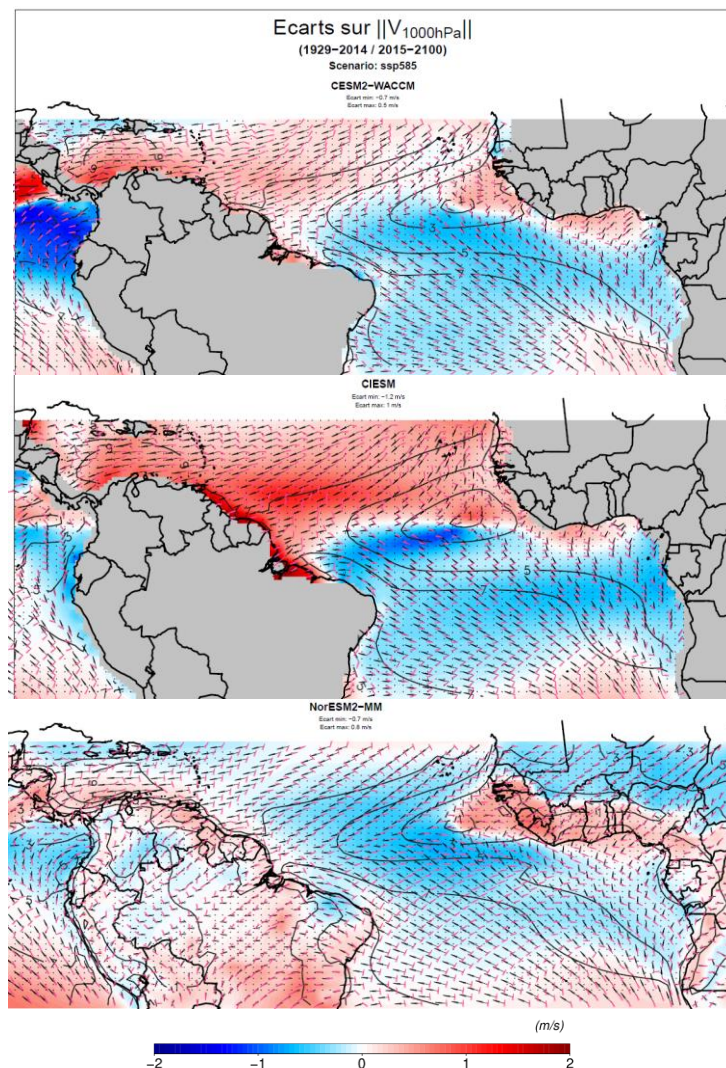


Figure 74 : Écarts des moyennes annuelles à long terme des moyennes journalières du vent à 1 000 hPa normalisé (flèches rouges) et de la force du vent (couleurs) entre l'historique (1929-2014) et le scénario SSP5-8.5 (2015-2100) pour les 3 modèles CMIP6 restants parmi les 10 retenus. Les flèches noires représentent les moyennes historiques du vent à 1 000hPa normalisé et les contours celles de la force du vent (m/s). Les points indiquent les zones où les écarts de la force du vent sont significatifs au niveau de confiance de 95 %. La terre est grisée sur les cartes du haut et du milieu car les données à 1 000 hPa y sont manquantes pour ces 2 modèles.

En JFMA, comme pour les autres modèles la zone de vents faibles est située plus au sud dans ces 3 modèles qu'en moyenne annuelle (Figure 75, A75). Tandis que pour NorESM2-MM les signaux d'évolution pendant cette saison sont similaires à ceux de la moyenne annuelle (diminution générale de la force du vent), les deux autres modèles présentent des différences nettes avec celle-ci. CESM2-WACCM est caractérisé par une réponse similaire à celle de NorESM2-MM. CIESM, quant à lui, présente dans la partie Nord du domaine une alternance latitudinale de bandes zonales d'affaiblissement et de renforcement du vent (particulièrement marqué au large de l'embouchure de l'Amazone et de la Guyane) et un affaiblissement dans la partie Sud. Pour cette saison, les signaux d'évolution du vent et des précipitations (Figure 72) ne présentent pas de lien évident.

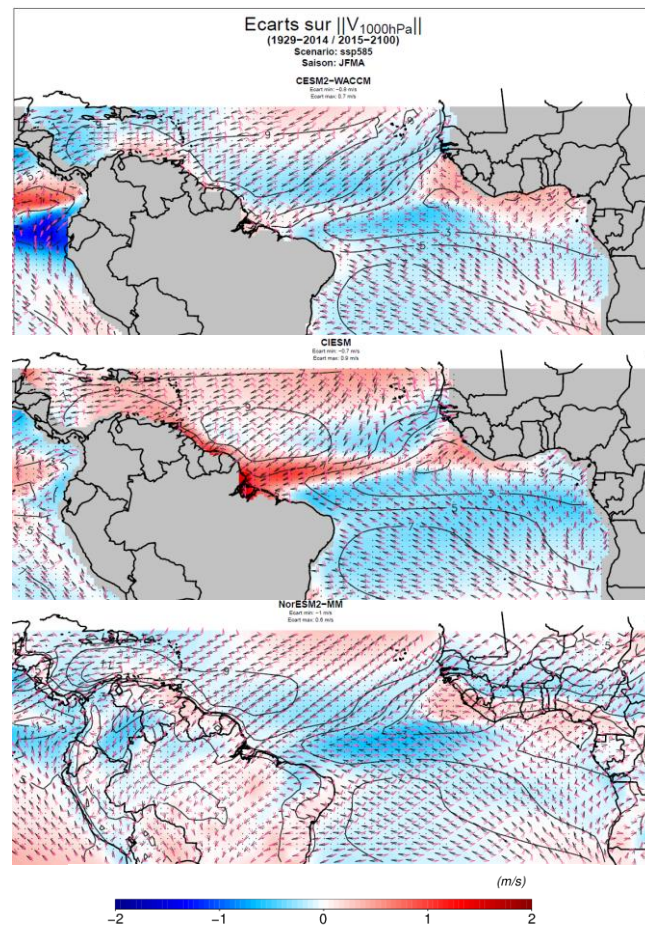


Figure 75 : Écarts des moyennes saisonnières en JFMA à long terme des moyennes journalières du vent à 1 000 hPa normalisé (flèches rouges) et de la force du vent (couleurs) entre l'historique (1929-2014) et le scenario SSP5-8.5 (2015-2100) pour les 3 modèles CMIP6 restants parmi les 10 retenus. Les flèches noires et les contours représentent les moyennes historiques du vent à 1 000hPa normalisé et de la force du vent (m/s), respectivement. Les points indiquent les zones où les écarts de la force du vent sont significatifs au niveau de confiance de 95 %. La terre est grisée sur les cartes du haut et du milieu car les données à 1 000 hPa y sont manquantes pour ces 2 modèles.

En JASO, les évolutions du vent à 1 000 hPa sont semblables à ceux précédemment décrits pour les moyennes annuelles, excepté pour NorESM2-MM (Figure 76, A76). Pour ce modèle, les changements les plus marqués concernent une diminution (resp. augmentation) de l'intensité du vent sur le flanc Nord (resp. Sud) de la zone de vents faibles, ce qui ne se traduit toutefois pas par des signaux de précipitations concomitants (Figure 66).



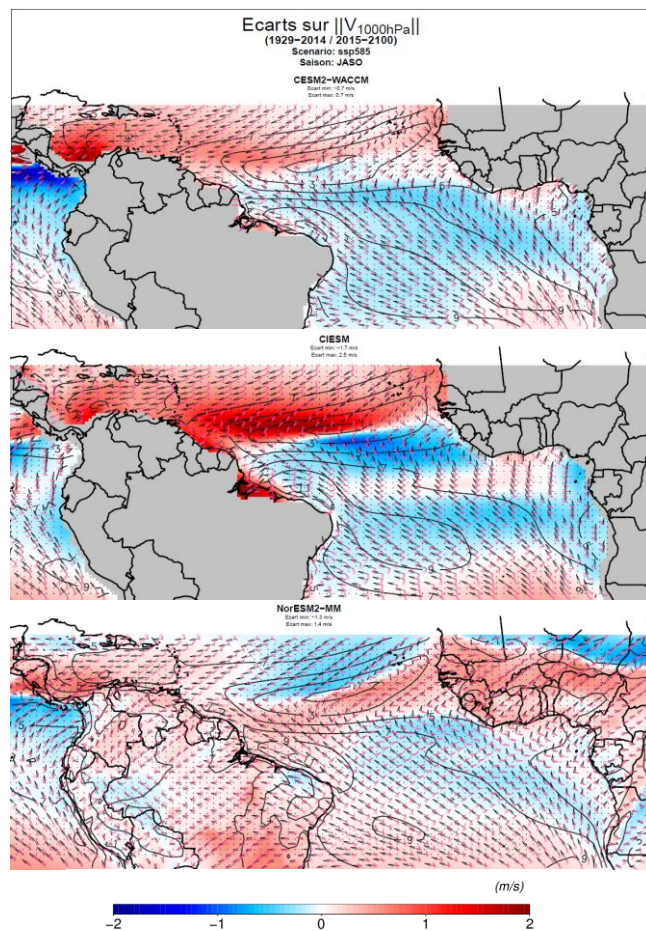


Figure 76 : Écarts des moyennes saisonnières en JASO à long terme des moyennes journalières du vent à 1 000 hPa normalisé (flèches rouges) et de la force du vent (couleurs) entre l'historique (1929-2014) et le scénario SSP5-8.5 (2015-2100) pour les 3 modèles CMIP6 restants parmi les 10 retenus. Les flèches noires et les contours représentent les moyennes historiques du vent à normalisé et de la force du vent (m/s), respectivement. Les points indiquent les zones où les écarts de la force du vent sont significatifs au niveau de confiance de 95 %. La terre est grisée sur les cartes du haut et du milieu car les données à 1 000 hPa y sont manquantes pour ces 2 modèles.



### Force du vent en surface

Les Figure 77 à 79 et A77 à A79 illustrent les écarts de la force du vent en surface pour CESM2-WACCM et NorESM2-MM, en complément de l'analyse du vent en altitude. Bien que moins marquées en amplitude, les évolutions futures de la force du vent en surface apparaissent très largement cohérentes avec celles à 1 000 hPa (Figure 74-Figure 76), tant en moyennes annuelles que saisonnières, ce qui est également vrai pour les champs historiques. Ceci tend à valider l'approche précédemment adoptée pour les 3 modèles ne fournissant les vecteurs du vent qu'en altitude.

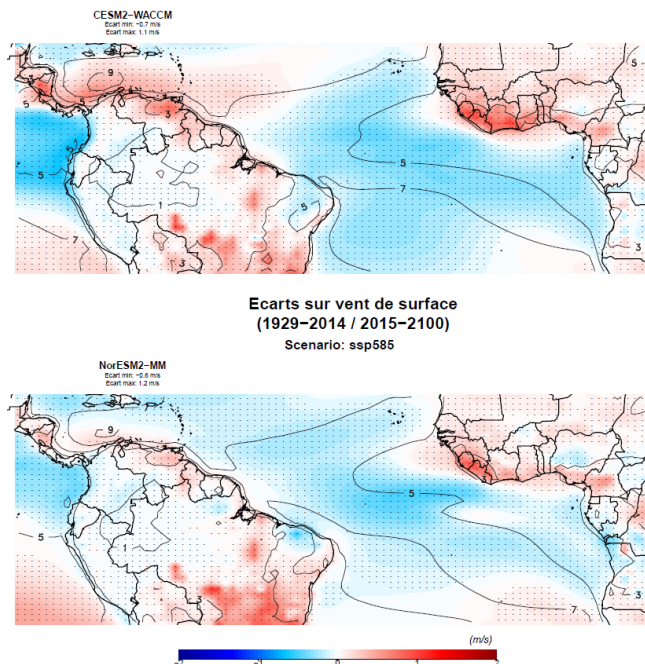


Figure 77 : Écarts des moyennes annuelles à long terme des moyennes journalières de la force du vent de surface entre l'historique (1929-2014) et le scénario SSP5-8.5 (2015-2100) pour les 2 modèles CMIP6 fournissant cette donnée mais pas les composantes cartésiennes parmi les 10 retenus. Les contours représentent les moyennes historiques (m/s). Les points indiquent les zones où les écarts de la force du vent sont significatifs au niveau de confiance de 95 %.

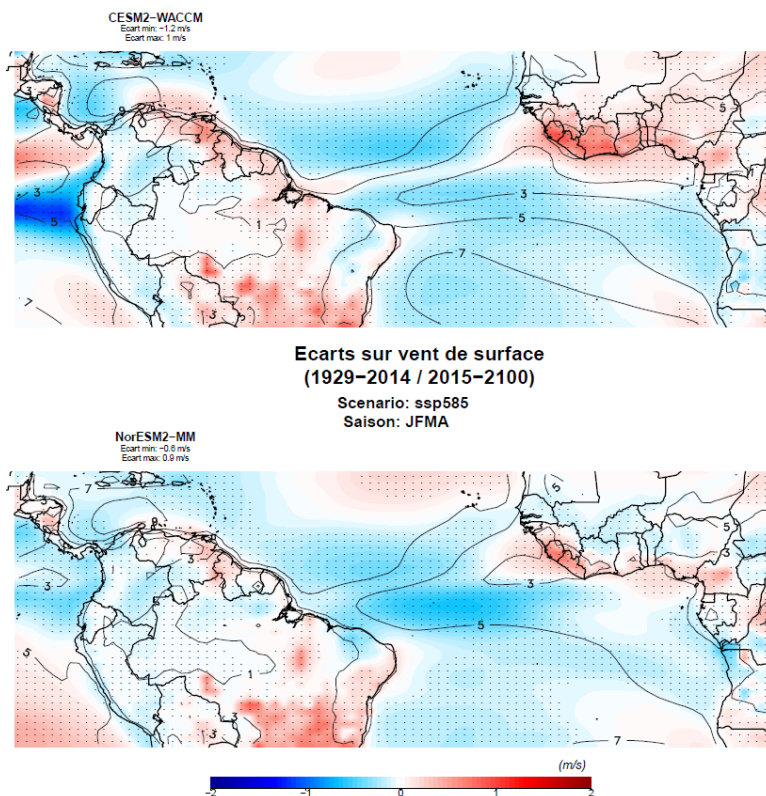


Figure 78 : Écarts des moyennes saisonnières en JFMA à long terme des moyennes journalières de la force du vent de surface entre l'historique (1929-2014) et le scénario SSP5-8.5 (2015-2100) pour les 2 modèles CMIP6 fournissant cette donnée mais pas les composantes cartésiennes parmi les 10 retenus. Les contours représentent les moyennes historiques (m/s). Les points indiquent les zones où les écarts de la force du vent sont significatifs au niveau de confiance de 95 %.

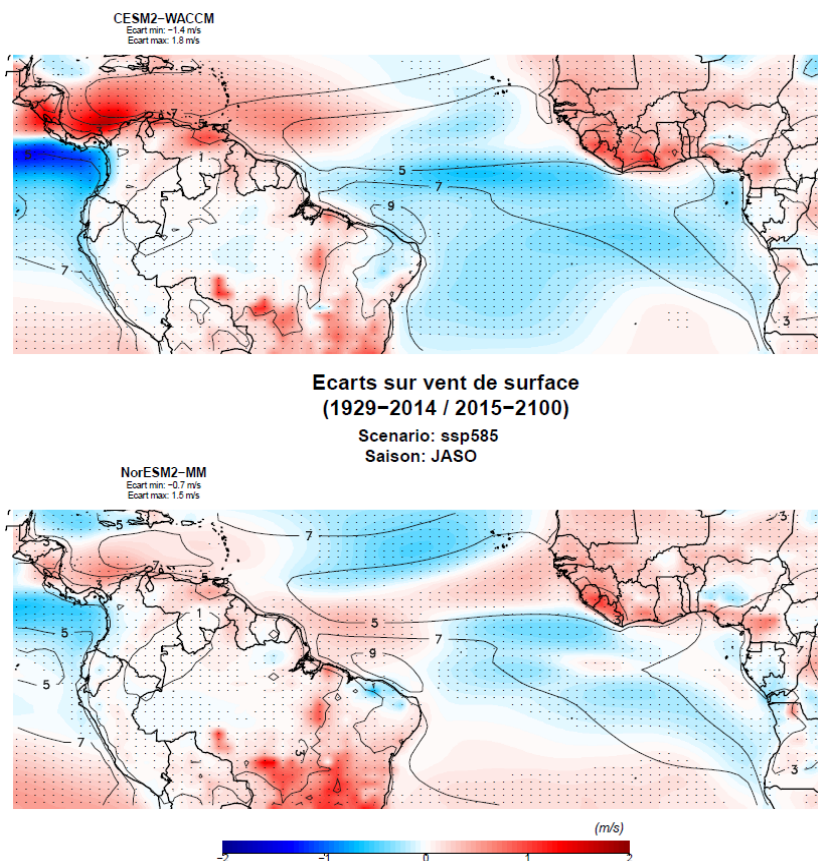


Figure 79 : Écarts des moyennes saisonnières en JASO à long terme des moyennes journalières de la force du vent de surface entre l'historique (1929-2014) et le scénario SSP5-8.5 (2015-2100) pour les 2 modèles CMIP6 fournissant cette donnée mais pas les composantes cartésiennes parmi les 10 retenus. Les contours représentent les moyennes historiques (m/s). Les points indiquent les zones où les écarts de la force du vent sont significatifs au niveau de confiance de 95 %.

### Sélection des modèles

Les Tableaux 16 à 18 résument les évolutions futures en moyenne annuelle (cf. Tableaux A9-A14 pour les moyennes saisonnières) mises en évidence pour les 10 modèles retenus à l'issue de la sélection précédente et pour les deux scénarios SSP2-4.5 et SSP5-8.5. Sans surprise, tous les modèles présentent un réchauffement entre les périodes 1929-2014 et 2015-2100, avec une intensité toutefois variable sur la Guyane en fonction du modèle, du scénario, de la saison et de la portion du territoire, allant de 1.5°C (GISS-E2-1-H en annuel pour SSP2-4.5, Tableau 17) à plus de 5 °C (CIESM en JASO pour SSP5-8.5, Tableau A12). La quasi-totalité des modèles présentent également un signal d'assèchement plus ou moins marqué ou à défaut, peu de signal (exceptés GISS-E2-1-H et CIESM qui présentent une tendance à l'augmentation de la pluviométrie en saison sèche, Tableau 16 et A10). Sur le continent, le vent de surface est généralement caractérisé soit par une intensification (en accord avec l'assèchement), soit par un *statu quo* (sauf pour GISS-E2-1-H en saison sèche où le vent a tendance à s'affaiblir sous le scénario SSP5-8.5, Tableau A14). Sur l'océan, les évolutions du vent sont plus variables.

RR (annuel)	↓ RR N ZCIT/Am. S		RR Guyane	
	SSP2-4.5	SSP5-8.5	SSP2-4.5	SSP5-8.5
Modèle				
CESM2-WACCM	Y	Y	↓	↓
CIESM	Y	Y	↓	↓
CNRM-CM6-1	N	N	↓	↓
CNRM-ESM2-1	N	N	~	↓
FGOALS-f3-L	N	N	~/↓	~
GFDL-CM4	N	N	~	↓
GISS-E2-1-H	Y	Y	~/↑	~
MIROC-ES2L	Y	Y	↓	↓
MIROC6	Y	Y	~	↓
NorESM2-MM	N	Y	~/↓	↓

Tableau 16 : Résumé des évolutions qualitatives des précipitations annuelles RR entre l'historique (1929-2014) et les scénarii SSP2-4.5/SSP5-8.5 (2015-2100) pour les 10 modèles CMIP6 retenus : diminution (Y) ou non (N) des RR au nord de la ZCIT/de l'Amérique du Sud (cad migration de la ZCIT vers le sud, 2 colonnes de g.) et évolution des RR en Guyane (diminution ↓, augmentation ↑ ou absence de signal ~<sup>31</sup>, 2 colonnes de d.).

<sup>31</sup>Deux pictogrammes séparés par "/" signifient que différentes tendances apparaissent au sein du territoire guyanais.

T (annuel) Modèle	T Guyane (°C)	
	SSP2-4.5	SSP5-8.5
CESM2-WACCM	+2	+3.5
CIESM	+3-5	+3-6
CNRM-CM6-1	+2	+3-3.5
CNRM-ESM2-1	+2	+3-3.5
FGOALS-f3-L	+1.5-2	+2.5
GFDL-CM4	+1.5-2	+3
GISS-E2-1-H	+1.5	+2-2.5
MIROC-ES2L	+1.5-2	+2.5-3
MIROC6	+1.5-2	+2.5-3
NorESM2-MM	+1.5-2	+2.5

Tableau 17 : Résumé des évolutions quantitatives des températures (moyennes journalières) annuelles de surface T en Guyane (°C) entre l'historique (1929-2014) et les scénarii SSP2-4.5/SSP5-8.5 (2015-2100) pour les 10 modèles CMIP6 retenus.

Force du vent (annuel) Modèle	Evolution inverse à celle des RR		Force du vent Guyane	
	SSP2-4.5	SSP5-8.5	SSP2-4.5	SSP5-8.5
CESM2-WACCM	Y	Y	L:↑/O:~	L:↑/O:~
CIESM	Y	Y	L:~/O:↑↑	L:~/O:↑↑
CNRM-CM6-1	Y	Y	L:↑/O:~	↑
CNRM-ESM2-1	Y	Y	L:↑/O:~	↑
FGOALS-f3-L	Y	Y	↑	↑
GFDL-CM4	Y	Y	L:~/O:↓	L:↑/O:↓
GISS-E2-1-H	N	N	↑	L:~/O:↑
MIROC-ES2L	N	N	~	~
MIROC6	N	N	L:~/O:↓	~
NorESM2-MM	N	N	~	~

Tableau 18 : Résumé des évolutions de la force du vent (moyen journalier) annuel entre l'historique (1929-2014) et les scénarii SSP2-4.5/SSP5-8.5 (2015-2100) pour les 10 modèles CMIP6 retenus : évolution inverse (Y) ou non (N) à celle des RR (2 colonnes de gauche) et évolution de la force du vent au voisinage de la Guyane sur la terre (L) et l'océan (O)<sup>32</sup> (2 colonnes de droite).

GISS-E2-1-H se démarquant assez nettement des autres modèles (plus faible réchauffement, augmentation des précipitations, affaiblissement du vent sur la terre), il paraîtrait logique de le retenir dans l'échantillon final de modèles aux trajectoires d'évolution contrastées à considérer pour la descente d'échelle sur la Guyane. Cependant, les données journalières historiques et futures nécessaires à l'application de la correction QQ n'étant pas toujours disponibles, certains modèles sont exclus *de facto* du reste des analyses, dont celui-ci (cf. §5.2.3).

<sup>32</sup> ↑↑ signifie une forte augmentation, "?" que la tendance n'a pas pu être évaluée par manque de données sur terre.



Considérant l'ensemble des caractéristiques étudiées pour l'évolution des précipitations, des températures et du vent de surface en Guyane et à plus grande échelle (migration de la ZCIT, lien entre vent et précipitations<sup>33</sup>), les 3 modèles suivants sont finalement retenus :

- GFDL-CM4 : + migration sud de la ZCIT la moins marquée des trois ;  
+ le seul avec un lien (inverse) entre vent et pluies (avec les modèles du CNRM) ;  
+ assèchement le moins marqué des trois (plutôt en saison sèche) ;  
+ le plus fort réchauffement en moyenne annuelle ;  
+ le seul à présenter un renforcement du vent sur terre (en JASO et en annuel).
- MIROC-ES2L : + migration sud de la ZCIT la plus marquée (toute l'année) ;  
+ assèchement le plus marqué des trois (toute l'année) ;  
+ le plus fort réchauffement en JASO et le plus faible en JFMA ;  
+ peu de changement du vent, particulièrement sur terre.
- NorESM2-MM : + migration sud de la ZCIT en JFMA seulement ;  
+ assèchement toute l'année mais seulement par endroits en saison des pluies ;  
+ le plus faible réchauffement en moyenne annuelle ;  
+ évolution du vent similaire à MIROC-ES2L.

En résumé, nous retenons un modèle "chaud" (GFDL-CM4), un modèle "sec" (MIROC-ES2L) et un modèle "tiède" (NorESM2-MM). Ces appellations restent arbitraires et toutes relatives puisque les 3 modèles projettent à la fois un réchauffement et un assèchement pour la Guyane : c'est l'intensité de ces évolutions qui les distingue.

À titre d'information, les points saillants des deux modèles du CNRM sont les suivants :

- CNRM-XXX-1 : + comportement similaire entre les deux modèles ;  
+ assèchement marqué toute l'année ;  
+ réchauffement systématiquement plus fort que les autres ;  
+ renforcement du vent (toute l'année sur terre et en saison sèche sur l'océan).

Comparé aux trois précédents qui sont considérés comme plus réalistes pour la régionalisation des projections sur la Guyane (cf. §5.2.1), il s'agit donc de modèles particulièrement "chauds". Comme précisé §5.2.1, leur inclusion dans le reste des analyses n'est que purement indicatif. Pour cette raison, les valeurs de tendances et d'autres calculs d'évolution future excluent celles issues de ces deux modèles, sauf mention explicite.

---

<sup>33</sup>N.B. La structure du réchauffement sur l'océan (présence ou non d'un maximum dans la *cold tongue*) étant un critère peu discriminant (ex : seul FGOALS-f3-L ne le représente pas en annuel et les données quotidiennes de ce modèle ne sont pas disponibles pour la correction QQ, cf. 5.2.3), il n'a finalement pas été pris en compte.

### 5.2.3 Correction des biais et descente d'échelle statistique

#### Disponibilité des données

Les données journalières modèles disponibles sont détaillées dans le Tableau 16. Plusieurs données sont manquantes en fonction du modèle, de la période (historique ou future) et de la variable considérée. Ainsi, sur les 10 modèles analysés à la section 5.2.2, seuls 7 fournissent l'ensemble des données nécessaires à la correction des RR, 6 pour les tasmin/tasmax et 5 pour les vents. Ces chiffres incluant les deux modèles du CNRM, la correction QQ n'est réalisable pour l'ensemble des variables précitées que pour 3 des 8 modèles identifiés pour le réalisme de leur climat historique<sup>34</sup> (cf. §5.2.1 : GFDL-CM4, MIROC-ES2L et MIROC6), dont 2 des 3 modèles aux évolutions futures contrastées (cf. §5.2.2). Pour NorESM2-MM, les corrections ne sont donc pas réalisées pour le vent. À noter que les modèles CIESM et GISS-E2-1-H ne fournissent aucune donnée quotidienne, et que FGOALS-f3-L ne les fournit que pour la période historique, raison pour laquelle ces 3 modèles ont été exclus du processus de sélection en fin de section §5.2.2.

Modèle	RR	tasmin	tasmax	uas	vas
CESM2-WACCM	H+F	F	F		
CIESM					
CNRM-CM6-1	H+F	H+F	H+F	H+F	H+F
CNRM-ESM2-1	H+F	H+F	H+F	H+F	H+F
FGOALS-f3-L	H	H	H	H	H
GFDL-CM4	H+F	H+F	H+F	H+F	H+F
GISS-E2-1-H					
MIROC-ES2L	H+F	H+F	H+F	H+F	H+F
MIROC6	H+F	H+F	H+F	H+F	H+F
NorESM2-MM	H+F	H+F	H+F		

Tableau 19 : Données quotidiennes de surface historiques (H) et futures (F) disponibles pour les 10 modèles CMIP6 retenus à la section §5.2.1 (les cellules vides indiquent les données manquantes). Les disponibilités des données futures s'appliquent pour SSP2-4.5 comme pour SSP5-8.5.

#### Associations modèles-stations

Pour chacun des modèles CMIP6 retenus, les Figure 80 et A80-A81 illustrent le résultat de la sélection du point de grille à corriger pour une station donnée de mesure des précipitations, températures et vents selon la procédure décrite à la section §5.1.5. Il s'agit bien la plupart du temps du point le plus proche de la station, mais dans certains cas pour des stations du littoral comme Awala-Yalimapo à l'extrême Nord-Ouest, ou situées à proximité de cette zone climatique comme Regina à l'Est (Figure 49, Tableaux A3-A5), un point plus éloigné sur le continent est sélectionné pour satisfaire la contrainte sur la fraction terre-mer. Celle-ci n'étant pas disponible pour NorESM2-MM, le point le plus proche est systématiquement choisi pour ce modèle. Au final, ce sont respectivement 5, 9, 1 et 8 points modèles qui sont considérés pour corriger les précipitations de CNRM-CM6-1 (et CNRM-ESM2-1), GFDL-CM4, MIROC-ES2L et NorESM2-MM (4, 6, 1 et 4 points pour les températures ; 4, 5, 1 et 0 points pour le vent). Ainsi, quel que soit le nombre de stations, l'information fournie par les projections d'un modèle de basse résolution comme MIROC-ES2L (500 km, Tableau A1) est issue d'un seul et même point de grille et donc nécessairement moins riche du point de vue spatial, même après descente d'échelle statistique, que celle d'un modèle de "haute" résolution comme GFDL-CM4 (100 km), pour lequel 5 à 9 points de grille sont utilisés.

<sup>34</sup>C'est également le cas pour CNRM-CM6-1 et CNRM-ESM2-1.

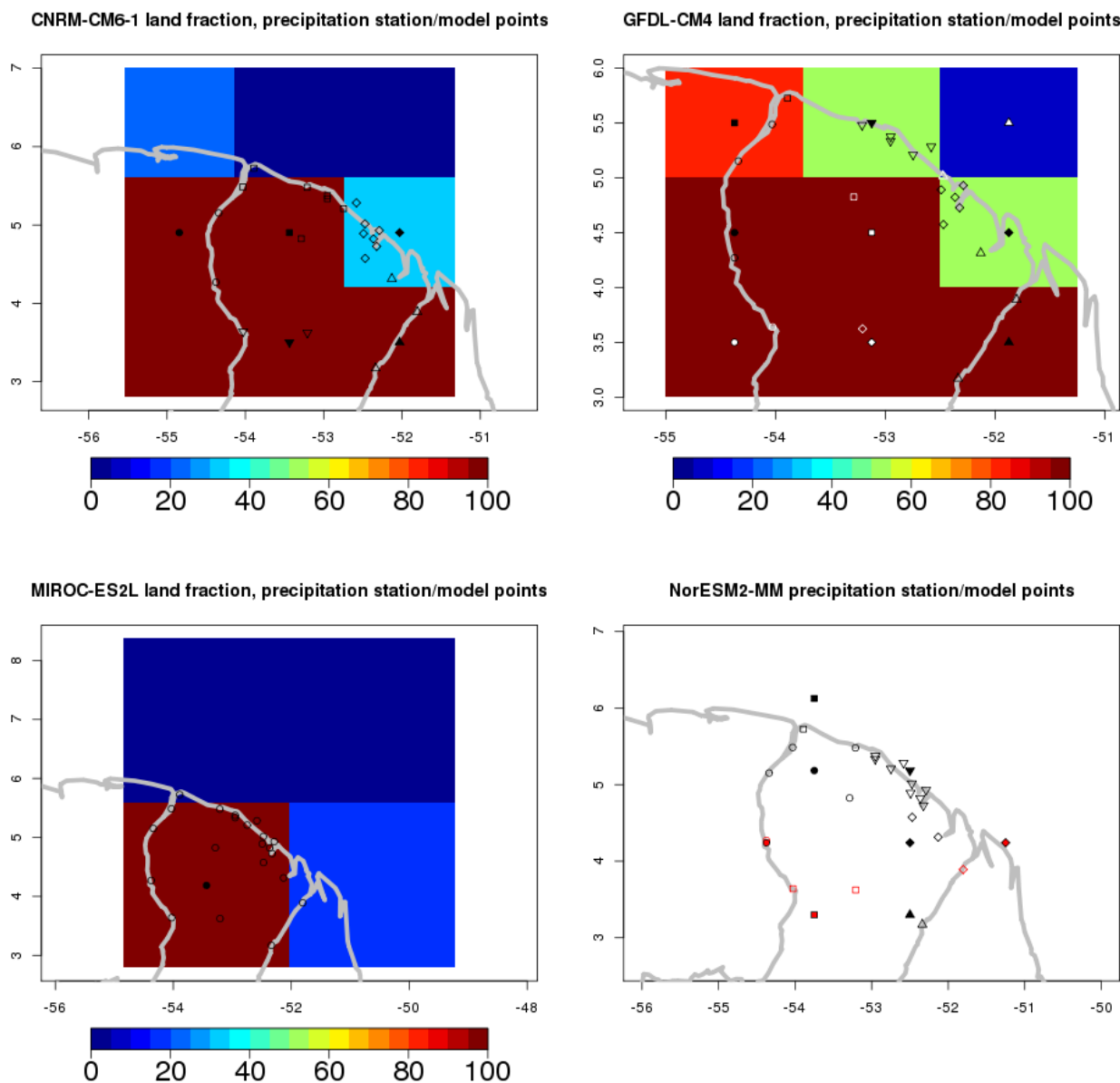


Figure 80 : Emplacement des points de grille modèle (symboles pleins) et des stations météorologiques (symboles vides) utilisés pour la correction QQ des précipitations issues de CNRM-CM6-1, GFDL-CM4, MIROC-ES2L et NorESM2-MM. Les stations utilisées pour corriger les simulations d'un point modèle donné sont représentées avec le même symbole que ce dernier. Le fond de carte représente la fraction terre-mer des modèles (0 % pour l'océan, 100 % pour la terre) lorsqu'elle est disponible. Les informations présentées pour CNRM-CM6-1 s'appliquent aussi à CNRM-ESM2-1 (mêmes grille et fraction terre-mer).

Dans ce qui suit, les résultats de la correction QQ sont illustrés pour la zone climatique du littoral (Figure 49), cœur économique du territoire, zone la plus peuplée et comportant le plus de stations : respectivement 12, 6 et 2 stations de mesure des précipitations, températures et vents, (Tableaux A3-A5). Des représentations cartographiques permettent d'apprécier les disparités spatiales dans la réponse au réchauffement au sein du territoire guyanais.

### Normales mensuelles

La Figure 81 présente les normales mensuelles futures des précipitations selon les 5 modèles climatiques et les 2 scénarii d'émissions de GES retenus pour la période 2071-2100 (cf. Figure A82 pour 2041-2070). Ces projections sont comparées aux normales mensuelles historiques de la période 1980-2014.

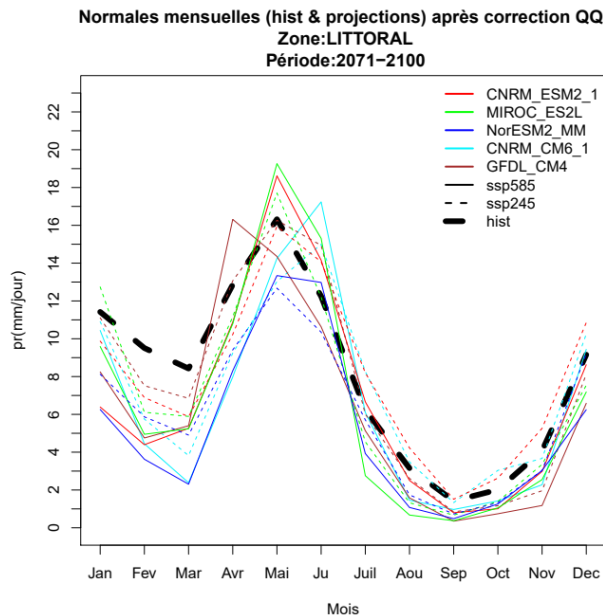


Figure 81 : Normales mensuelles des RR futures corrigées (2071-2100) pour 5 modèles climatiques et 2 scénarios d'émissions, et des RR historiques (1980-2014) pour la zone littorale.

Celles-ci illustrent l'alternance des saisons en Guyane : petite saison des pluies (DJF, ~9-12 mm/jour), petit été de mars (~8-9 mm/jour), grande saison des pluies (AMJ, ~12-17 mm/jour) et enfin saison sèche (JASON, ~2-8 mm/jour). Pour les deux périodes futures et scénarios d'émissions et pour la plupart des modèles, on constate une diminution statistiquement significative des précipitations de décembre à avril, ainsi que durant la saison sèche dans une moindre mesure, en accord qualitatif avec les résultats précédemment obtenus à partir des données modèle brutes (cf. §5.2.2). Les réponses sont plus variables et donc plus incertaines en mai-juin pendant la grande saison des pluies. Globalement la pluviométrie projetée est plus faible à l'horizon 2100 qu'à l'horizon 2070, et pour SSP5-8.5 comparé à SSP2-4.5. L'écart entre les deux scénarios est cependant moins marqué à l'horizon 2070. Ces résultats suggèrent la possibilité d'un assèchement progressif en lien direct avec le niveau de réchauffement.

La Figure 82 représente les normales mensuelles des températures minimales et maximales historiques et projetées pour 2071-2100 (cf. Figure A83 pour 2041-2070). Conformément aux connaissances sur le sujet (Héritier 2011), du fait de la situation équatoriale de la Guyane, les températures de surface varient assez peu dans l'année : ~1 °C d'écart pour les minimales et ~3° C pour les maximales. Les minimales suivent des variations saisonnières similaires à celles des précipitations : plus fraîches en saison sèche et plus chaudes en saison des pluies. Étant généralement atteintes la nuit, une plus faible couverture nuageuse en saison sèche permet un plus fort refroidissement de la surface par rayonnement infrarouge. Pour les températures maximales la saisonnalité est inversée : plus chaudes en saison sèche et plus fraîches en saison des pluies, ce qui s'explique par le fait qu'elles sont atteintes en milieu de journée lorsque l'ensoleillement est maximal, lui-même plus important en saison sèche avec une nébulosité moins dense. L'amplitude thermique journalière est ainsi maximale en saison sèche.

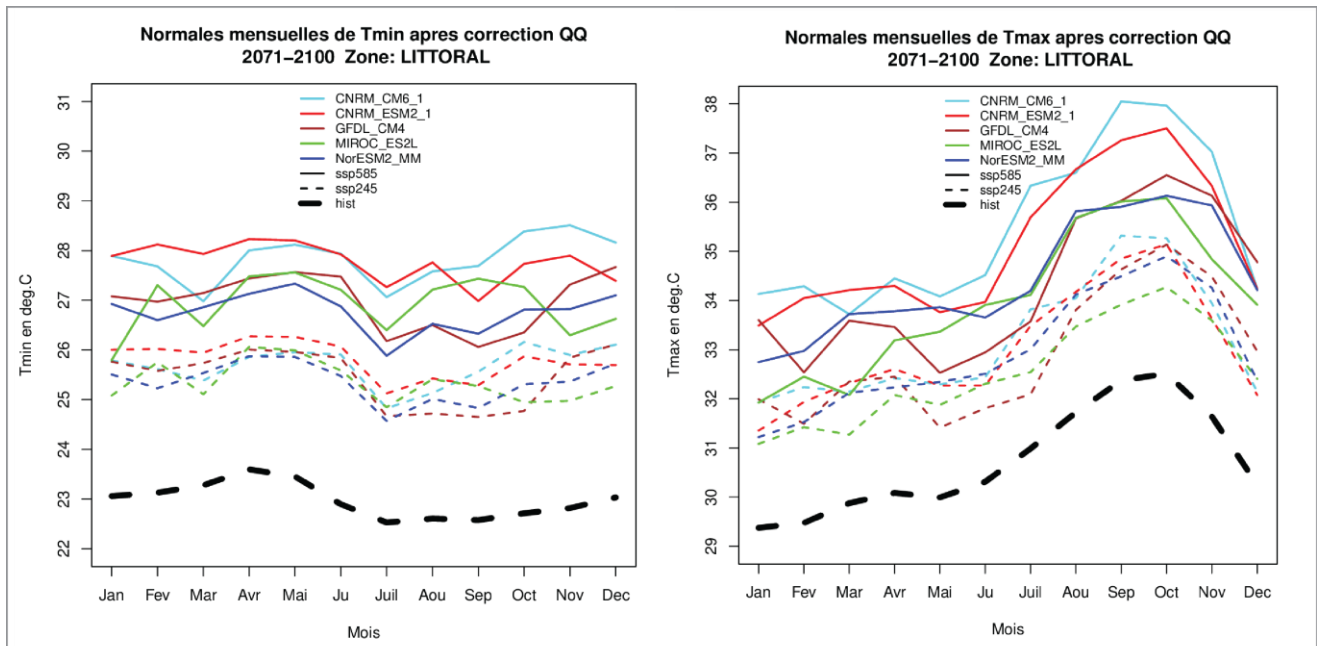


Figure 82 : Normales mensuelles des températures minimales (à g.) et maximales (à d.) futures corrigées (2071-2100) pour 5 modèles climatiques et 2 scénarios d'émissions, et historiques (1980-2014) pour la zone littorale.

Concernant leurs évolutions au cours du XXI<sup>e</sup> siècle, les tests de Student indiquent que les écarts entre les normales historiques et projetées des températures (minimales et maximales) sont significatifs pour tous les modèles, scénarii, horizons et mois de l'année. En fonction du scénario et du modèle, pour 2071-2100 (resp. 2041-2070), l'augmentation des minimales atteint 2-6 °C (resp. 1.5-3.5 °C) et celle des maximales 1-6 °C (resp. 0.5-3 °C)<sup>35</sup>. Conformément aux attentes, le scénario pessimiste SSP5-8.5 prévoit des hausses systématiquement plus fortes que le scénario intermédiaire SSP2-4.5. Comme pour les précipitations, cette distinction est cependant plus claire pour la période lointaine 2071-2100 que pour la période intermédiaire 2041-2070. Les différences entre les modèles sont également plus marquées à l'horizon 2100. Conformément aux résultats précédents (cf. §5.2.2), les 2 modèles du CNRM prévoient généralement les niveaux de réchauffement les plus forts, avec 37-38 °C pour les maximales en septembre-octobre pour la période 2071-2100 sous le scénario SSP5-8.5, contre ~32 °C actuellement.

La saisonnalité de la force du vent sur la bande littorale (Figure 83) présente deux maxima en JFMA (2,8-3,4 m/s) et SON (~2 m/s) et un minimum en juin-juillet (~1,2 m/s). Comme précisé à la section §5.1.1., ceci s'explique par les migrations nord-sud de la ZCIT au cours de l'année (Héritier 2011) : celle-ci, caractérisée notamment par un minimum de la force du vent, est située aux latitudes de la Guyane en juin-juillet, tandis qu'elle se déplace plus au sud (resp. au nord) en saison des pluies (resp. en saison sèche), permettant aux alizés de nord-est (resp. de sud-est) de ventiler le littoral guyanais. À noter que le vent est beaucoup plus fort et varie davantage au cours de l'année sur les stations du littoral (Cayenne-Matoury et Kourou CSG, Tableau A5) où l'influence des alizés est plus forte, comparé au reste du territoire guyanais.

<sup>35</sup>Si l'on exclut les modèles du CNRM, pour 2071-2100 l'augmentation des minimales atteint 2-4.5 °C et celle des maximales 1-4 °C (pas de changement pour 2041-2070).



**Normales mensuelles de la force du vent a 10 m apres correction QQ  
2071-2100 Zone: LITTORAL**

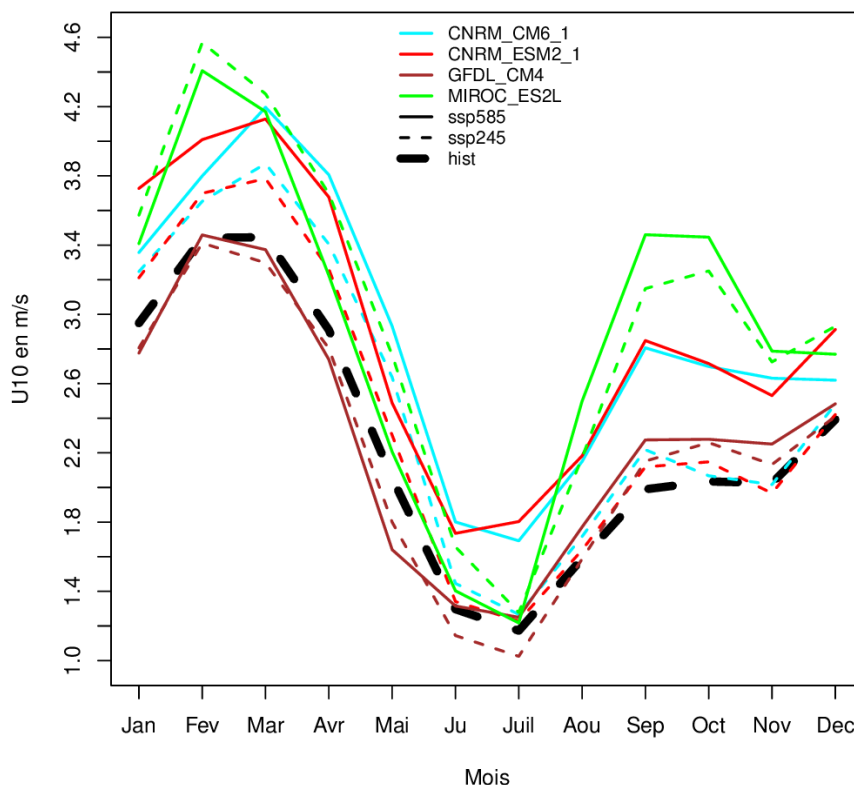


Figure 83 : Normales mensuelles de la force du vent de surface futures corrigées (2071-2100) pour 4 modèles climatiques et 2 scénarios d'émissions, et historiques (1980-2014) pour la zone littorale.

Comme constaté précédemment lors de l'analyse des données grillées (cf. §5.2.2), la plupart des modèles projettent une augmentation statistiquement significative de la force du vent, plus importante pour l'horizon lointain que pour l'horizon intermédiaire et souvent plus importante pour SSP5-8.5 que pour SSP2-4.5 (Figure 83 et A84). Ce renforcement du vent, qui présente donc une association directe avec le niveau de réchauffement, est également cohérent avec la tendance à la diminution de la pluviométrie (Figure 81), associée à une tendance des modèles à présenter une ZCIT déplacée vers le sud dans le futur (cf. §5.2.2). Deux modèles se distinguent cependant par leurs évolutions contrastées. Le modèle GFDL-CM4 présente peu ou pas d'évolution significative, tandis que le modèle MIROC-ES2L présente un net renforcement du vent toute l'année, excepté en MJJ.

*Moyennes annuelles*

Elles permettent d'identifier les tendances à long terme des variables étudiées et la variabilité à basse fréquence associée. Il est important de rappeler que si la correction QQ (mois par mois) permet de débiaiser les distributions et donc les normales mensuelles, elle ne redresse que partiellement les variations temporelles : ainsi et contrairement aux analyses des normales mensuelles, les moyennes annuelles historiques simulées ne coïncident pas avec les moyennes observées (même si elles s'en rapprochent à long terme) et sont variables d'un modèle à l'autre.

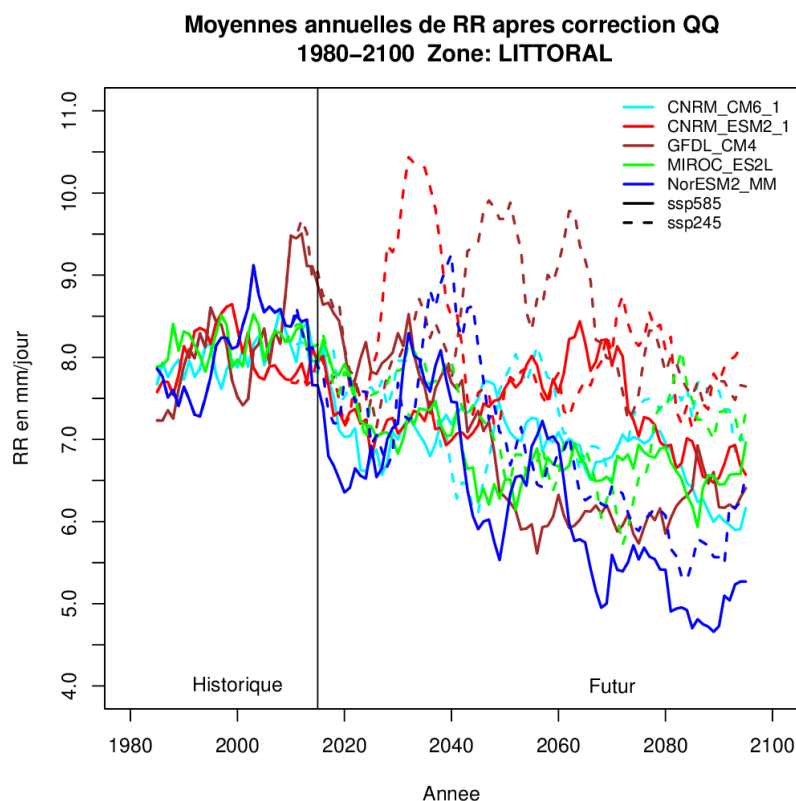


Figure 84 : Moyennes annuelles des RR historiques et futures corrigées dans la zone littorale pour 5 modèles climatiques et 2 scénarios d'émissions. Afin d'éliminer le bruit de haute fréquence, les séries ont été lissées avec une moyenne mobile de largeur 11 ans après concaténation des périodes historiques (1980-2014) et futures (2015-2100), entraînant la perte des données des 5 premières et 5 dernières années.

En accord avec l'analyse du cycle saisonnier, une tendance à la baisse (statistiquement significative<sup>36</sup>) des précipitations annuelles est ainsi mise en évidence pour l'ensemble des modèles (Figure 84) : -0.09-0.32 (resp. -0.03-0.24) mm/jour par décennie pour le scénario SSP5-8.5 (resp. SSP2-4.5). Cette baisse à long terme n'est cependant pas monotone, avec des périodes prolongées de stagnation et même d'augmentation des précipitations aux échelles interannuelles à multi-décennales. Certains modèles sont ainsi soumis à une variabilité de basse fréquence particulièrement élevée : CNRM-ESM2-1, GFDL-CM4 (scénario SSP2-4.5 notamment) et NorESM2-MM.

<sup>36</sup> Sauf pour CNRM-ESM2-1 et GFDL-CM4 sous SSP2-4.5.

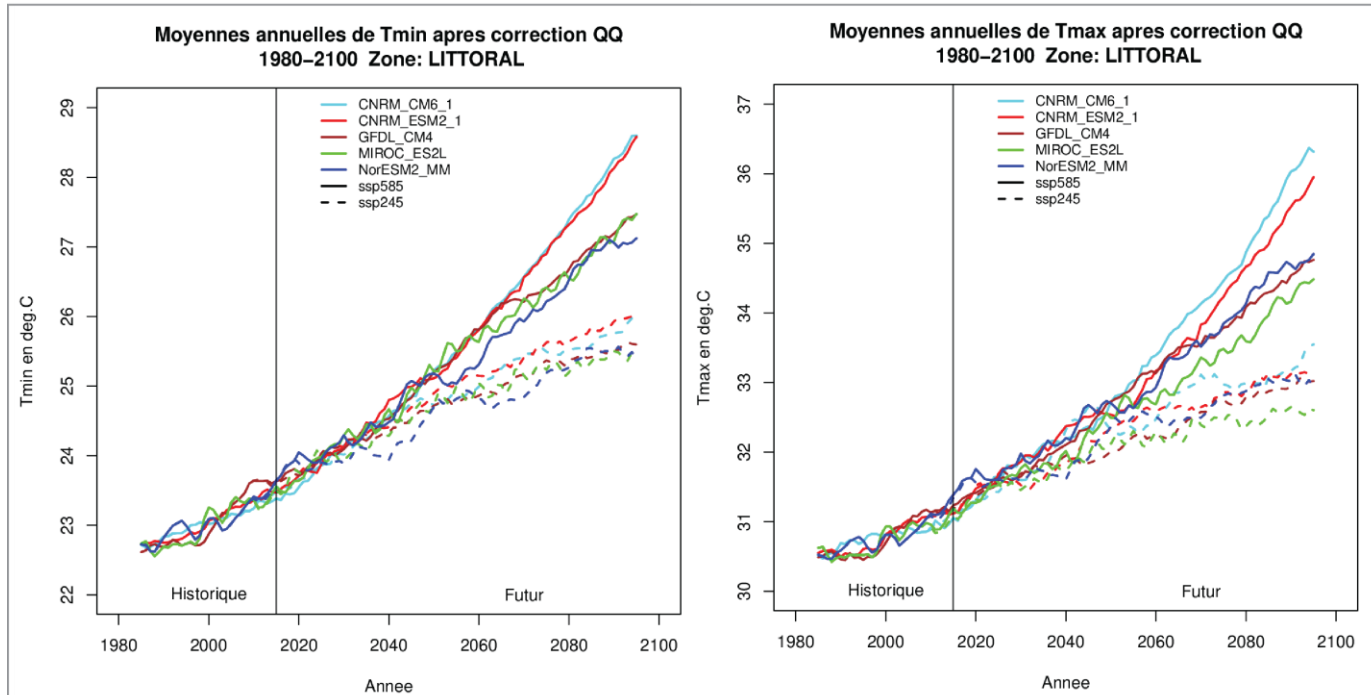


Figure 85 : Moyennes annuelles des températures minimales (à g.) et maximales (à d.) historiques et futures corrigées dans la zone littorale pour 5 modèles climatiques et 2 scénarios d'émissions. Afin d'éliminer le bruit de haute fréquence, les séries ont été lissées avec une moyenne mobile de largeur 11 ans après concaténation des périodes historique (1980-2014) et futures (2015-2100), entraînant la perte des données des 5 premières et 5 dernières années.

L'augmentation statistiquement significative des températures minimales (+0.43-0.54 et +0.27-0.33 °C par décennie pour SSP5-8.5 et SSP2-4.5, respectivement) et maximales (+0.37-0.52 et +0.22-0.28 °C par décennie pour SSP5-8.5 et SSP2-4.5, respectivement) est au contraire beaucoup plus monotone et quasi-linéaire, voire exponentielle pour les modèles du CNRM (Figure 85). Les projections du scénario SSP5-8.5 ne commencent à s'écarter de celles du scénario SSP2-4.5 qu'à partir de 2040 environ, et plus fortement à partir de 2060 environ. Pour un même scénario, les écarts entre les différents modèles se font également plus marqués à partir de cette date, en particulier les modèles du CNRM dont les projections de températures à la fin du siècle sous le scénario SSP5-8.5 sont 1-1.5 °C plus élevées que celles des autres modèles. Ces derniers prévoient une augmentation des températures minimales à l'horizon 2100 de 4-4.5 °C (resp. 2.5-3 °C) et des maximales de 3.5-4 °C (resp. 1.5-2 °C) pour SSP5-8.5 (resp. SSP2-4.5) par rapport à l'historique. De manière générale, le réchauffement nocturne apparaît plus rapide que le réchauffement diurne, entraînant une diminution de l'amplitude thermique journalière dans les projections futures.

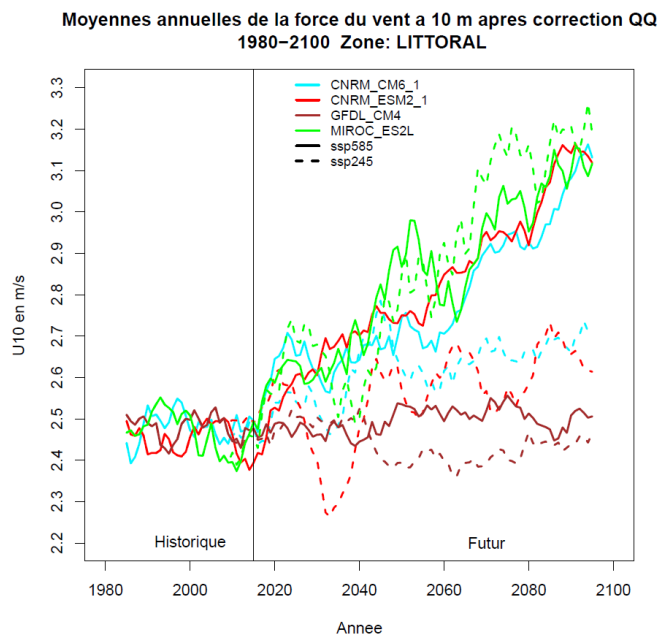


Figure 86 : Moyennes annuelles de la force du vent de surface historiques et futures corrigées dans la zone littorale pour 4 modèles climatiques et 2 scénarios d'émissions. Afin d'éliminer le bruit de haute fréquence, les séries ont été lissées avec une moyenne mobile de largeur 11 ans après concaténation des périodes historique (1980-2014) et futures (2015-2100), entraînant la perte des données des 5 premières et 5 dernières années.

Concernant la force du vent, les projections des moyennes annuelles, à la hausse (et statistiquement significatives) pour la plupart des modèles (+0.06-0.07 et +0.02-0.08 m/s par décennie pour SSP5-8.5 et SSP2-4.5, respectivement), sont plutôt monotones à l'instar des températures (Figure 86). Comme le montre l'analyse des normales, GFDL-CM4 se démarque par l'absence d'évolution<sup>37</sup>, et ce tout au long du siècle. Tandis que les modèles du CNRM présentent un renforcement du vent nettement plus marqué pour SSP5-8.5 (+0.6 m/s à la fin du siècle, +0.1-0.2 m/s pour SSP2-4.5), MIROC-ES2L présente des niveaux du même ordre et ce pour les 2 scénarios.

<sup>37</sup> Les tendances sont très faibles : ~0.00 (resp. -0.01) m/s par décennie pour SSP5-8.5 (resp. SSP2-4.5).

### Variation spatiale des précipitations

Le climat guyanais et son évolution future ne sont pas homogènes sur le territoire. Bien que la méthodologie basée sur la descente d'échelle statistique ne permette de produire que des projections ponctuelles dans l'espace, et que le réseau d'observation en Guyane souffre d'une répartition hétérogène (Figure 49), il reste possible d'estimer au moins certaines des variations spatiales des signaux associés au changement climatique au moyen du géo-référencement des projections corrigées. La Figure 87 cartographie l'évolution moyenne annuelle des précipitations sur les 21 stations pluviométriques de Guyane selon les 5 modèles climatiques et les 2 scénarii d'émissions de GES retenus pour la période 2071-2100 (cf. Figure A85 pour 2041-2070). Les cumuls climatologiques étant variables au sein du territoire entre le Nord-Est très arrosé (>10 mm/jour, cf. carte en bas à droite sur la figure<sup>38</sup>) et l'Ouest à la pluviométrie plus modérée (4-7 mm/jour), les écarts entre période future et historique sont représentés relativement à la pluviométrie locale.

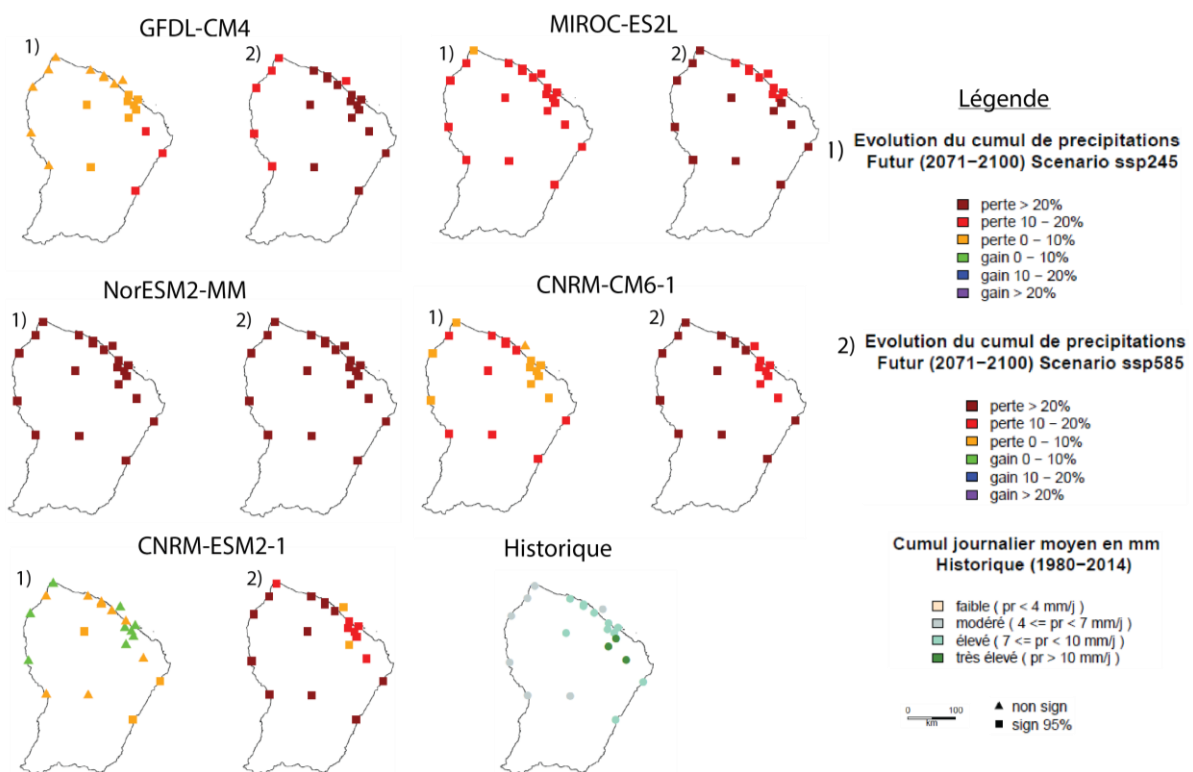


Figure 87 : Écarts relatifs (%) des moyennes annuelles à long terme des taux journaliers des précipitations RR corrigés entre l'historique (1980-2014) et les scénarios SSP2-4.5 et SSP5-8.5 (2071-2100) pour les 5 modèles CMIP6 retenus. Les moyennes historiques (mm/jour) sont également représentées. Les symboles carrés indiquent les stations où les écarts sont significatifs au niveau de confiance de 95 % (test de Student).

<sup>38</sup>Voir aussi Héritier 2011.



Si la diminution significative des cumuls annuels est le signal largement dominant, avec des valeurs dépassant fréquemment les 20 % de baisse pour le scénario SSP5-8.5, tous les modèles sont capables de représenter des variations spatiales significatives dans l'intensité de ce signal (excepté NorESM2-MM). Ces variations ne sont cependant pas cohérentes entre les modèles : GFDL-CM4 et MIROC-ES2L présentent des gradients est-ouest de signes opposés, tandis que les modèles du CNRM projettent une diminution (relative) minimale au Nord-Ouest et autour de Cayenne. Il n'est donc pas possible de conclure concernant la spatialisation de l'assèchement projeté en Guyane. Il reste cependant intéressant de constater que dans certains cas et pour certaines stations, des signaux d'augmentation des précipitations, robustes (GFDL-CM4) ou non (CNRM-ESM2-1) peuvent être mis en évidence. C'est notamment le cas pour la période intermédiaire 2041-2070 et/ou le scénario médian SSP2-4.5, suggérant qu'une augmentation transitoire des pluies reste possible, sans que cela ne remette en question le consensus des modèles en faveur d'une diminution de la pluviométrie annuelle à long terme. À l'échelle saisonnière (Figures A86-A87), l'analyse met en évidence pour la saison sèche des contrastes géographiques un peu plus marqués ainsi qu'un signal clair d'augmentation des précipitations pour les modèles du CNRM sous le scénario SSP2-4.5 (période lointaine 2071-2100), sans pour autant modifier les conclusions de l'analyse en moyenne annuelle.

### Variation spatiale des températures

Les températures minimales journalières sont légèrement plus fraîches à l'intérieur des terres en moyenne annuelle (autour de 22 °C, Figure 88) comparé au littoral (autour de 24 °C), ce qui est dû à l'action de l'océan qui limite le refroidissement nocturne près des côtes (Héritier 2011).

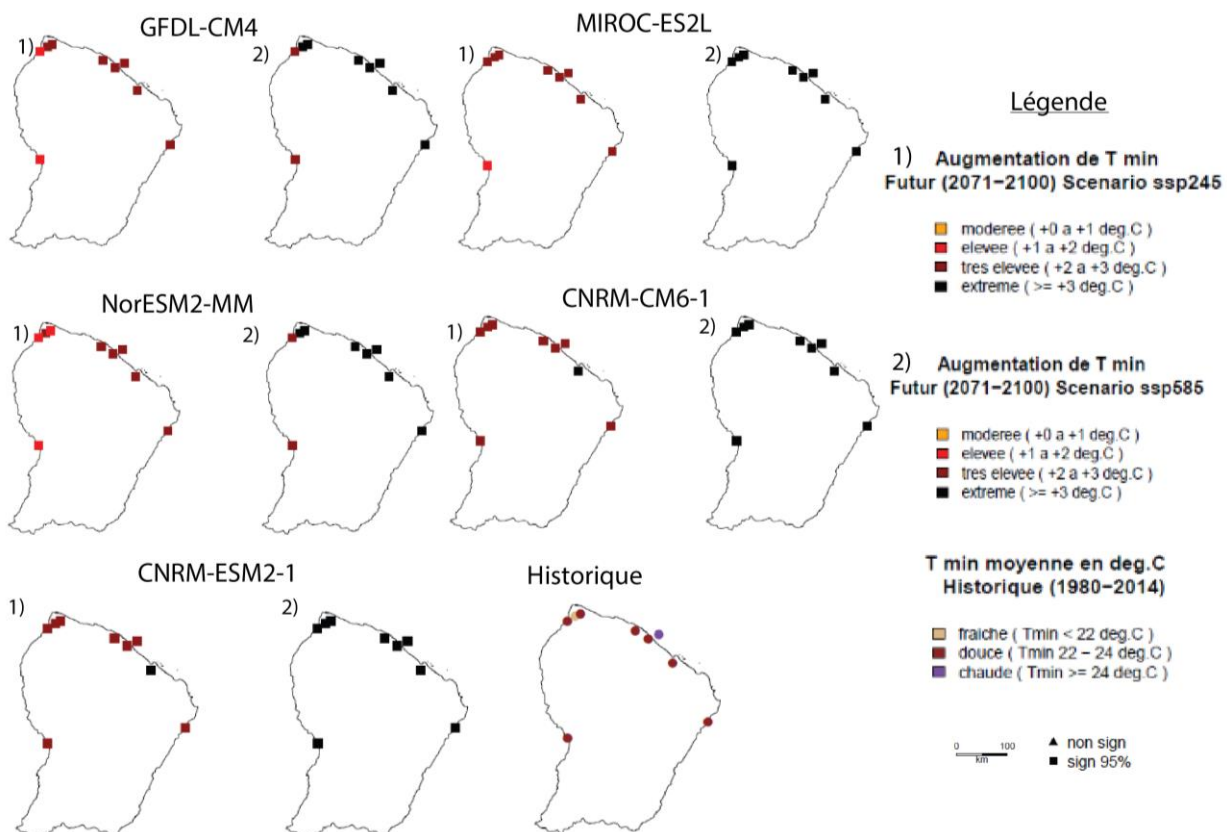


Figure 88 : Écarts des moyennes annuelles à long terme des températures minimales (°C) corrigées entre l'historique (1980-2014) et les scénarios SSP2-4.5 et SSP5-8.5 (2071-2100) pour les 5 modèles CMIP6 retenus. Les moyennes historiques sont également représentées. Les symboles carrés indiquent les stations où les écarts sont significatifs au niveau de confiance de 95 % (test de Student).

À l'inverse, les maximales sont un peu plus chaudes dans les régions continentales (>32 °C, Figure 89) qu'en bord de mer (autour de 31 °C), conséquence là encore de l'effet régulateur de l'océan et de la ventilation par les alizés. Contrairement aux précipitations, certains points de convergence apparaissent au sein des modèles concernant la distribution spatiale du réchauffement. De jour comme de nuit, celui-ci est souvent moins intense à l'Ouest au niveau des stations bordant le fleuve Maroni, notamment lorsque l'on s'éloigne du littoral (Figure 88-Figure 89). C'est plutôt contre-intuitif lorsque l'on sait que le réchauffement global est généralement plus fort sur les continents que les océans (IPCC 2021). Cette question mériterait d'être approfondie dans de futures études. Une certaine variabilité spatiale des températures est également visible le long du littoral, mais parfois sans cohérence apparente, ni consensus au sein des modèles lorsque c'est le cas, excepté une tendance à un moindre réchauffement diurne à Kourou comparé aux autres stations (Figure 89), sans qu'il soit possible d'avancer d'explication à ce stade.

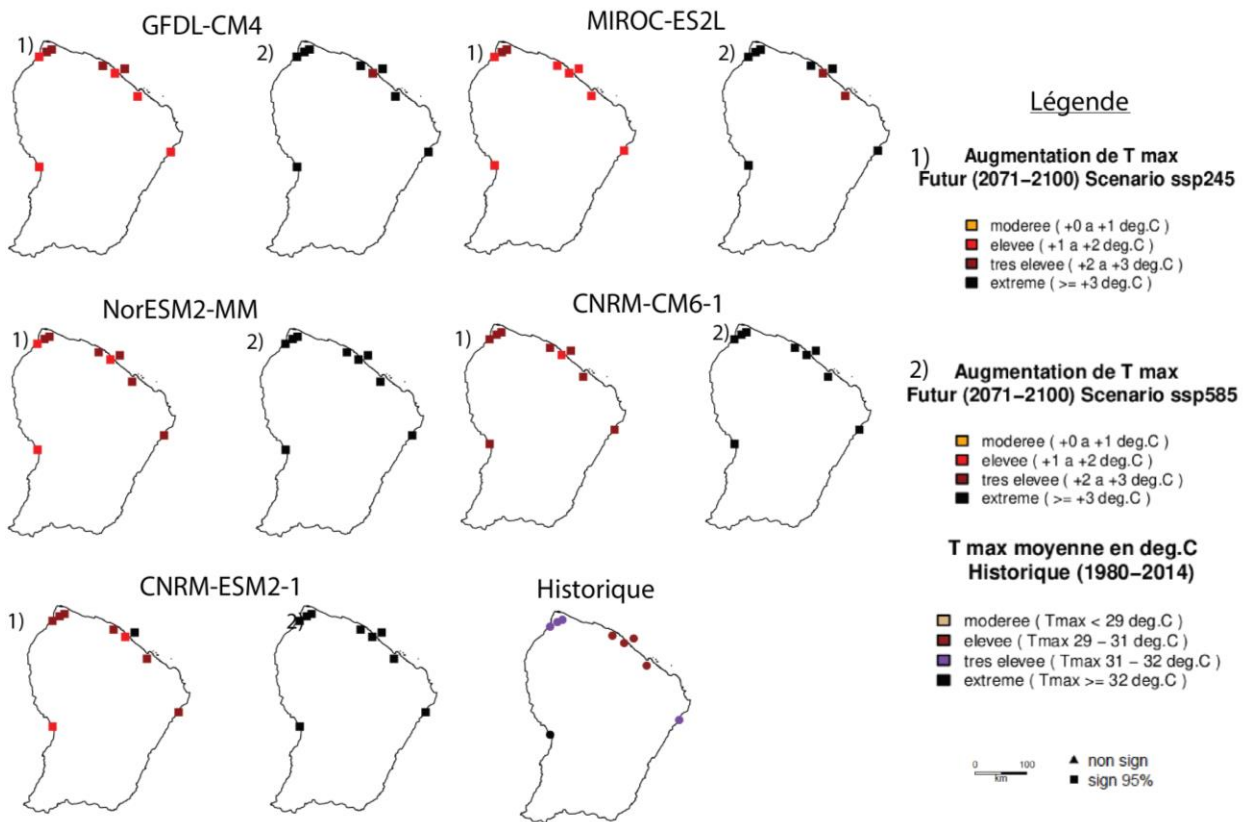


Figure 89 : Écart des moyennes à long terme des températures maximales (°C) corrigées entre l'historique (1980-2014) et les scénarios SSP2-4.5 et SSP5-8.5 (2071-2100) pour les 5 modèles CMIP6 retenus. Les moyennes historiques sont également représentées. Les symboles carrés indiquent les stations où les écarts sont significatifs au niveau de confiance de 95 % (test de Student).

## 5.2.4 Indices climatiques sectoriels

### Eau agriculture et forêt

La Figure 90 représente les moyennes annuelles historiques et futures du nombre mensuel de jours secs et de fortes pluies dans la zone littorale de Guyane selon les 5 modèles CMIP6 et les 2 scénarii d'émissions retenus. Historiquement, les jours secs ont lieu en moyenne un jour sur deux sur le littoral, et les fortes pluies un jour sur 10. Conformément à la diminution généralisée des cumuls moyens projetée au cours du XXI<sup>e</sup> siècle (Figure 84), les modèles s'accordent sur une augmentation de la fréquence des jours secs. La tendance, significativement positive, est de +0.2-0.6 jours/mois par décennie pour SSP5-8.5 et de +0.1-0.4 jours/mois par décennie pour SSP2-4.5). Similairement à la baisse des cumuls, cette hausse concerne l'ensemble du territoire, sans qu'il soit possible de distinguer de contrastes à l'échelle infra-territoriale (Figure 91, A88).

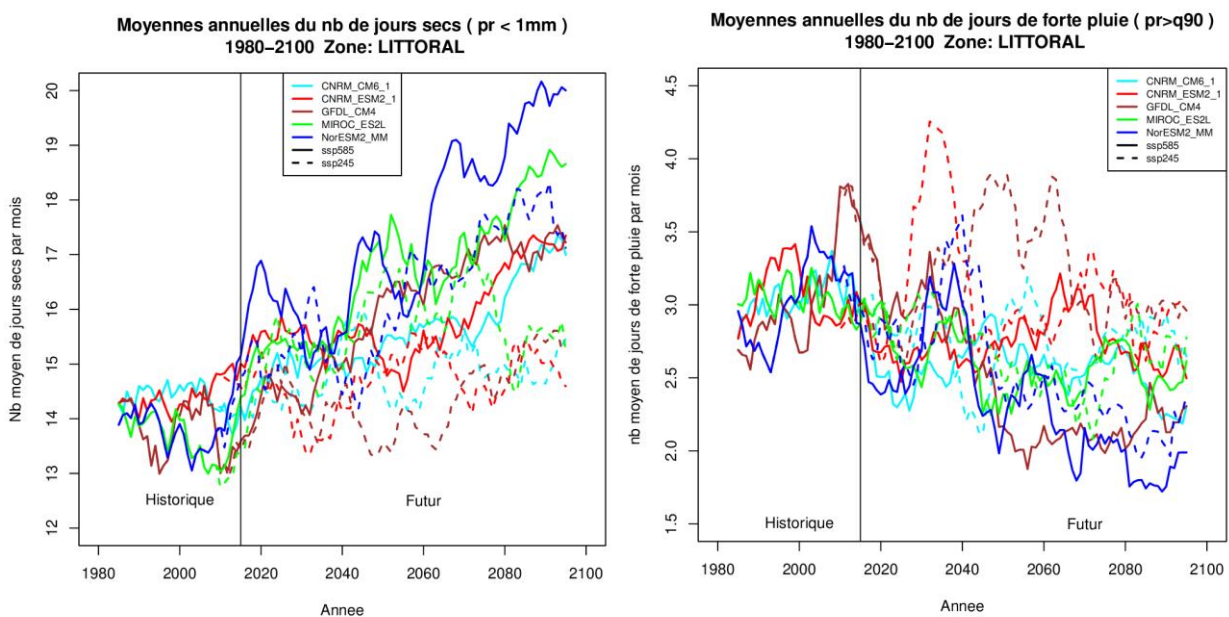


Figure 90 : Moyennes annuelles du nombre mensuel de jours secs (à g.) et de fortes pluies (à d.) historiques et futures corrigées dans la zone littorale pour 5 modèles climatiques et 2 scénarios d'émissions. Afin d'éliminer le bruit de haute fréquence, les séries ont été lissées avec une moyenne mobile de largeur 11 ans après concaténation des périodes historique (1980-2014) et futures (2015-2100), entraînant la perte des données des 5 premières et 5 dernières années.

L'évolution du nombre de jours de fortes pluies est également en accord avec celle des cumuls (Figure 90). La tendance, statistiquement significative et à la baisse en moyenne sur l'année pour la plupart des modèles<sup>39</sup>, est de -0.03-0.12 (resp. -0.03-0.09) jours/mois par décennie pour SSP5-8.5 (resp. SSP2-4.5). En revanche, l'intensité des fortes pluies, située historiquement autour de 40 mm/jour en moyenne sur le littoral, augmente légèrement mais significativement pour la plupart des modèles<sup>40</sup> : +0.25-0.48 (resp. +0.05-0.21) mm/jour par décennie pour SSP5-8.5 (resp. SSP2-4.5) (Figure 92). Ces résultats impliquent que la dynamique d'assèchement mise en évidence précédemment serait associée à une raréfaction à la fois des journées pluvieuses en général et des journées très pluvieuses en particulier.

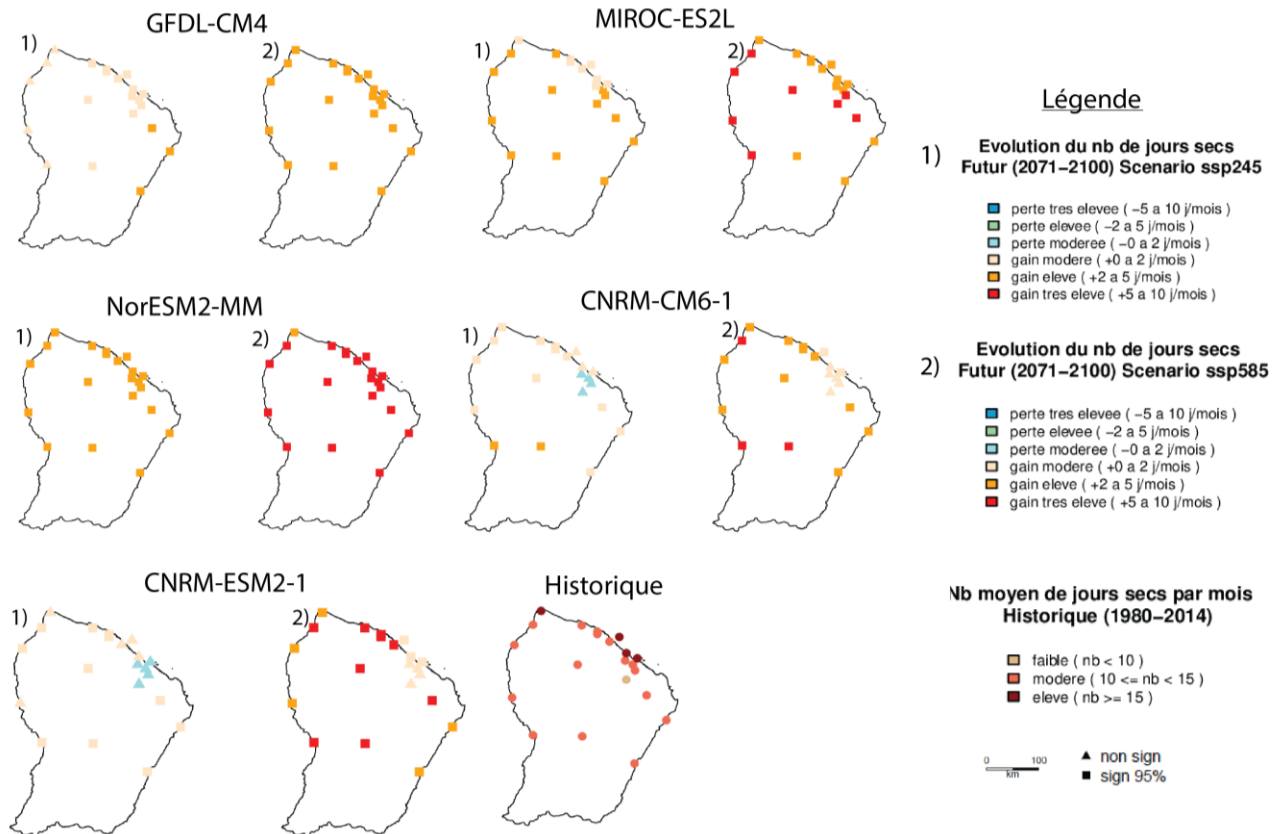


Figure 91 : Écarts des moyennes annuelles à long terme du nombre mensuel de jours secs entre l'historique (1980-2014) et les scénarios SSP2-4.5 et SSP5-8.5 (2071-2100) pour les 5 modèles CMIP6 retenus. Les moyennes historiques sont également représentées. Les symboles carrés indiquent les stations où les écarts sont significatifs au niveau de confiance de 95 % (test de Student).

<sup>39</sup> Pour GFDL-CM4 (+0.01 jours/mois par décennie) et CNRM-ESM2-1 (-0.02 jours/mois par décennie) sous le scénario SSP2-4.5, les tendances ne sont pas significatives.

<sup>40</sup> Les augmentations ne sont pas statistiquement significatives pour MIROC-ES2L sous SSP2-4.5 (+0.03 mm/jour par décennie) et pour NorESM2-MM sous SSP5-8.5 (+0.05 mm/jour par décennie).

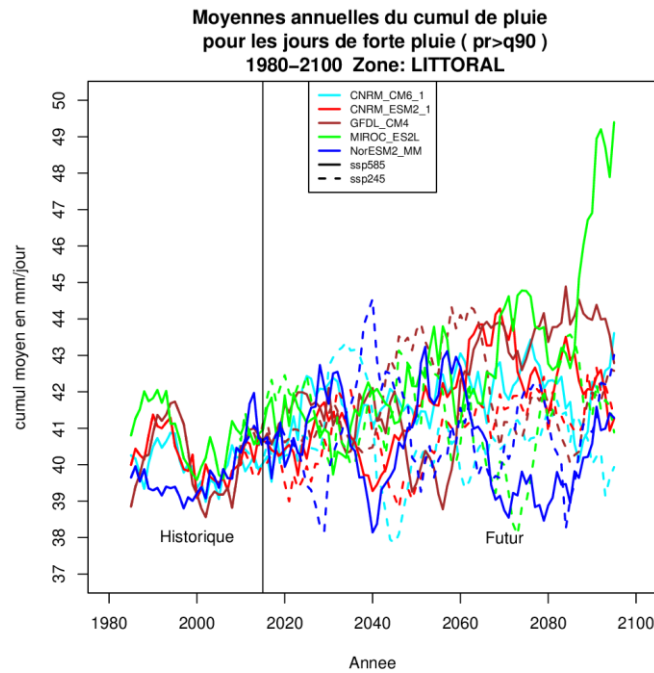


Figure 92 : Moyennes annuelles du cumul moyen des jours de fortes pluies historiques et futures corrigées dans la zone littorale pour 5 modèles climatiques et 2 scénarios d'émissions. Afin d'éliminer le bruit de haute fréquence, les séries ont été lissées avec une moyenne mobile de largeur 11 ans après concaténation des périodes historique (1980-2014) et futures (2015-2100), entraînant la perte des données des 5 premières et 5 dernières années.

### Agriculture et confort thermique

Historiquement, les nuits chaudes ont lieu 1-6 fois par mois en moyenne et correspondent à des températures de l'ordre de 24 °C sur la zone littorale (Figure 93), tandis que les journées chaudes ont lieu 2-5 fois par mois et correspondent à des températures de ~32.5 °C (Figure 94). En accord avec le réchauffement marqué de jour comme de nuit, la fréquence des journées et nuits chaudes augmente significativement :

- +3.2-3.4<sup>41</sup> jours/mois par décennie pour SSP5-8.5 et +2.5-2.9 jours/mois par décennie pour SSP2-4.5 en moyenne annuelle pour les nuits chaudes ;
- +2.1-2.6 jours/mois par décennie pour SSP5-8.5 et +1.1-1.6 jours/mois par décennie pour SSP2-4.5 en moyenne annuelle pour les journées chaudes.

À l'horizon 2100, les nuits chaudes se produiraient presque tous les jours et les journées chaudes 23-28 jours par mois pour le scénario SSP5-8.5. Les nuits chaudes se produiraient 24-28 jours par mois et les journées chaudes 13-18 jours par mois pour SSP2-4.5. Comme pour les températures, les projections du scénario SSP5-8.5 ne commencent à s'écarter de celles de SSP2-4.5 qu'autour de 2040, et plus nettement après 2060.

<sup>41</sup> Compte tenu de l'ajustement linéaire et de la forme des courbes qui tendent asymptotiquement vers une fréquence de 100 %, la pente est sensiblement plus élevée pour les nuits chaudes entre 2020 et 2060 environ.



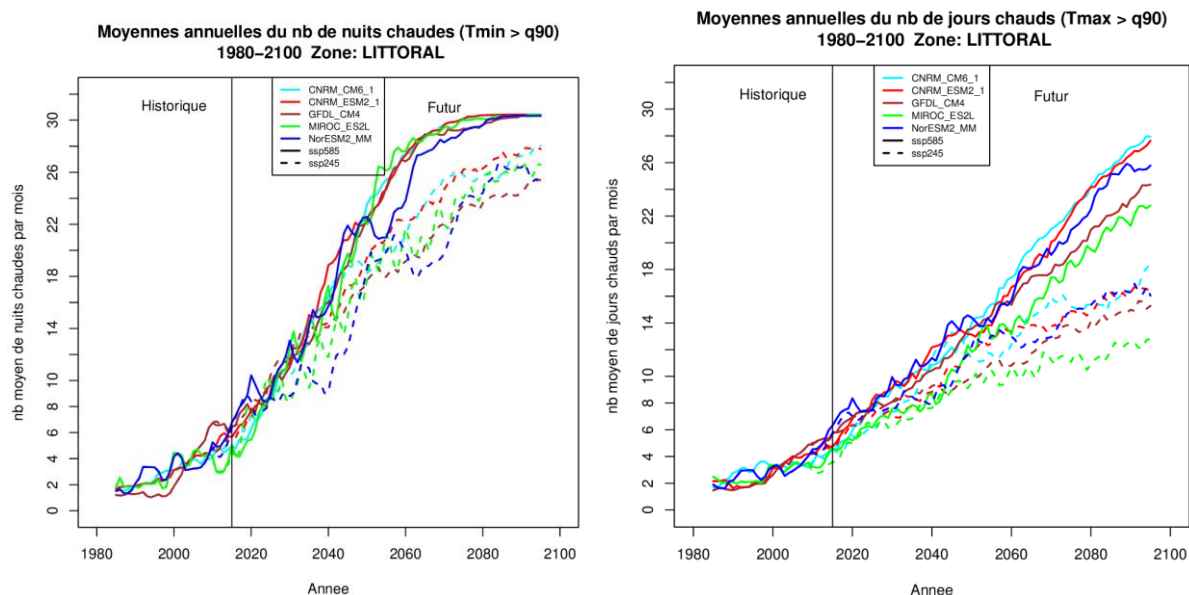


Figure 93 : Moyennes annuelles du nombre mensuel de nuits chaudes (à g.) et de journées chaudes (à d.) historiques et futures corrigées dans la zone littorale pour 5 modèles climatiques et 2 scénarios d'émissions. Afin d'éliminer le bruit de haute fréquence, les séries ont été lissées avec une moyenne mobile de largeur 11 ans après concaténation des périodes historique (1980-2014) et futures (2015-2100), entraînant la perte des données des 5 premières et 5 dernières années.

L'intensité des journées et nuits chaudes augmente également de façon marquée et statistiquement significative (Figure 94) :

- +0.29-0.39 °C par décennie pour SSP5-8.5 et +0.15-0.19 °C par décennie pour SSP2-4.5 pour les nuits chaudes ;
- +0.18-0.31 °C par décennie pour SSP5-8.5 et +0.07-0.13 °C par décennie pour SSP2-4.5 pour les journées chaudes.

Ces valeurs sont cependant sensiblement inférieures à celles qui sont projetées pour les températures minimales et maximales, traduisant un resserrement de la distribution des températures de surface : l'écart entre les températures extrêmes et moyennes se réduirait ainsi malgré l'élévation des températures.

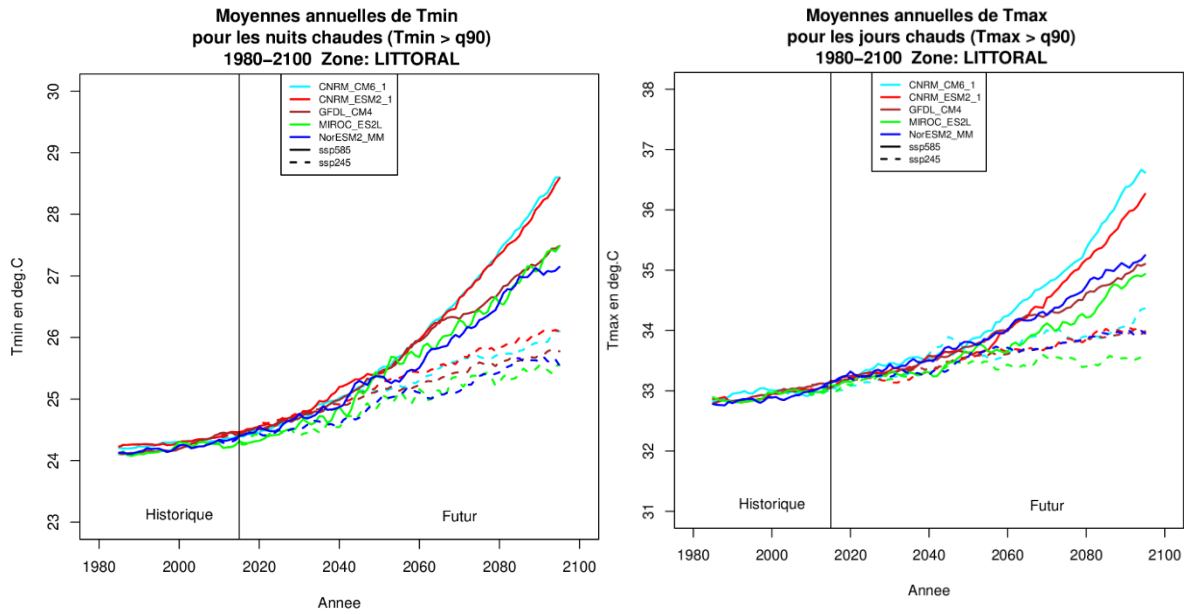


Figure 94 : Moyennes annuelles de la température moyenne lors des nuits chaudes (à g.) et des journées chaudes (à d.) historiques et futures corrigées dans la zone littorale pour 5 modèles climatiques et 2 scénarios d'émissions. Afin d'éliminer le bruit de haute fréquence, les séries ont été lissées avec une moyenne mobile de largeur 11 ans après concaténation des périodes historique (1980-2014) et futures (2015-2100), entraînant la perte des données des 5 premières et 5 dernières années.

Spatialement, on retrouve pour tous les modèles le contraste littoral-intérieur (Figure 95 et Figure 96) déjà repéré sur les cartes d'évolution des températures minimales et maximales (Figure 88 et Figure 89) : le nombre de nuits (resp. journées) chaudes augmente un peu moins (resp. plus) le long du littoral que dans l'intérieur des terres.

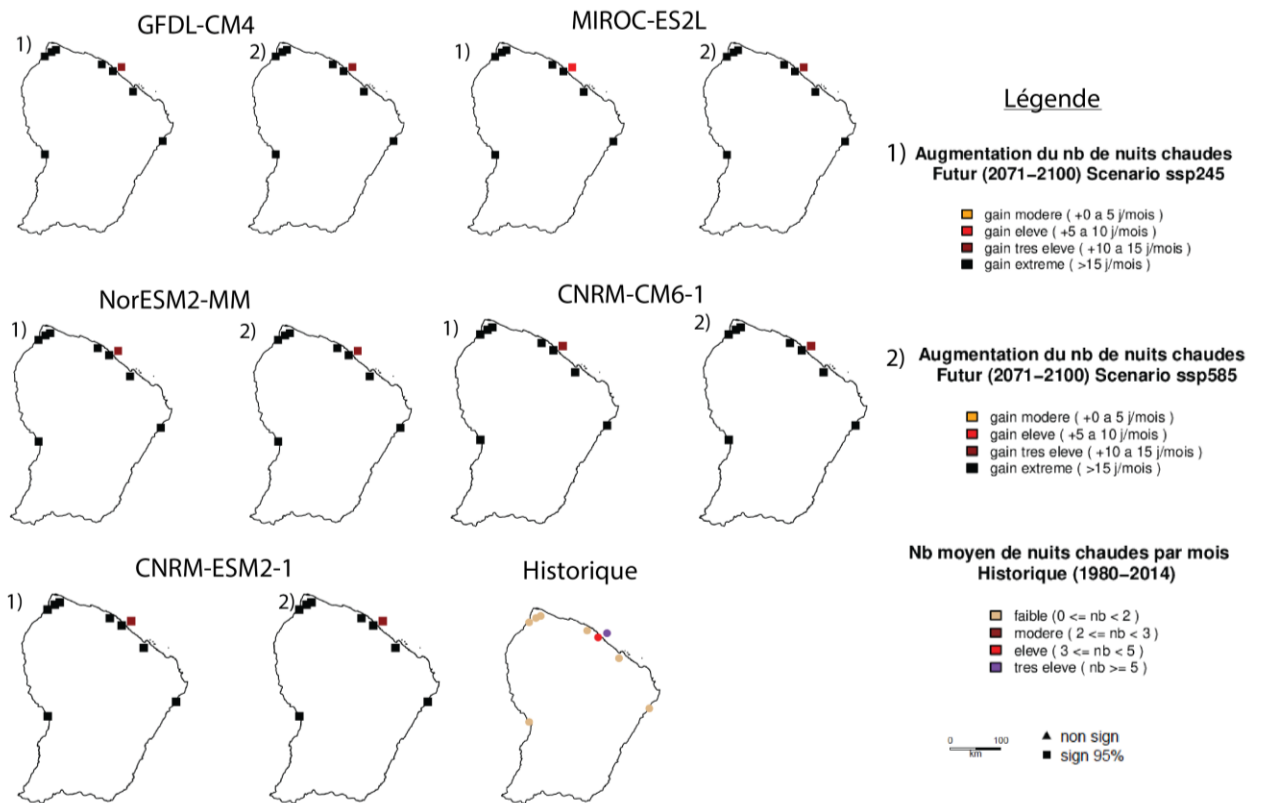


Figure 95 : Écarts des moyennes annuelles à long terme du nombre mensuel de nuits chaudes entre l'historique (1980-2014) et les scenarios SSP2-4.5 et SSP5-8.5 (2071-2100) pour les 5 modèles CMIP6 retenus. Les moyennes historiques sont également représentées. Les symboles carrés indiquent les stations où les écarts sont significatifs au niveau de confiance de 95 % (test de Student).

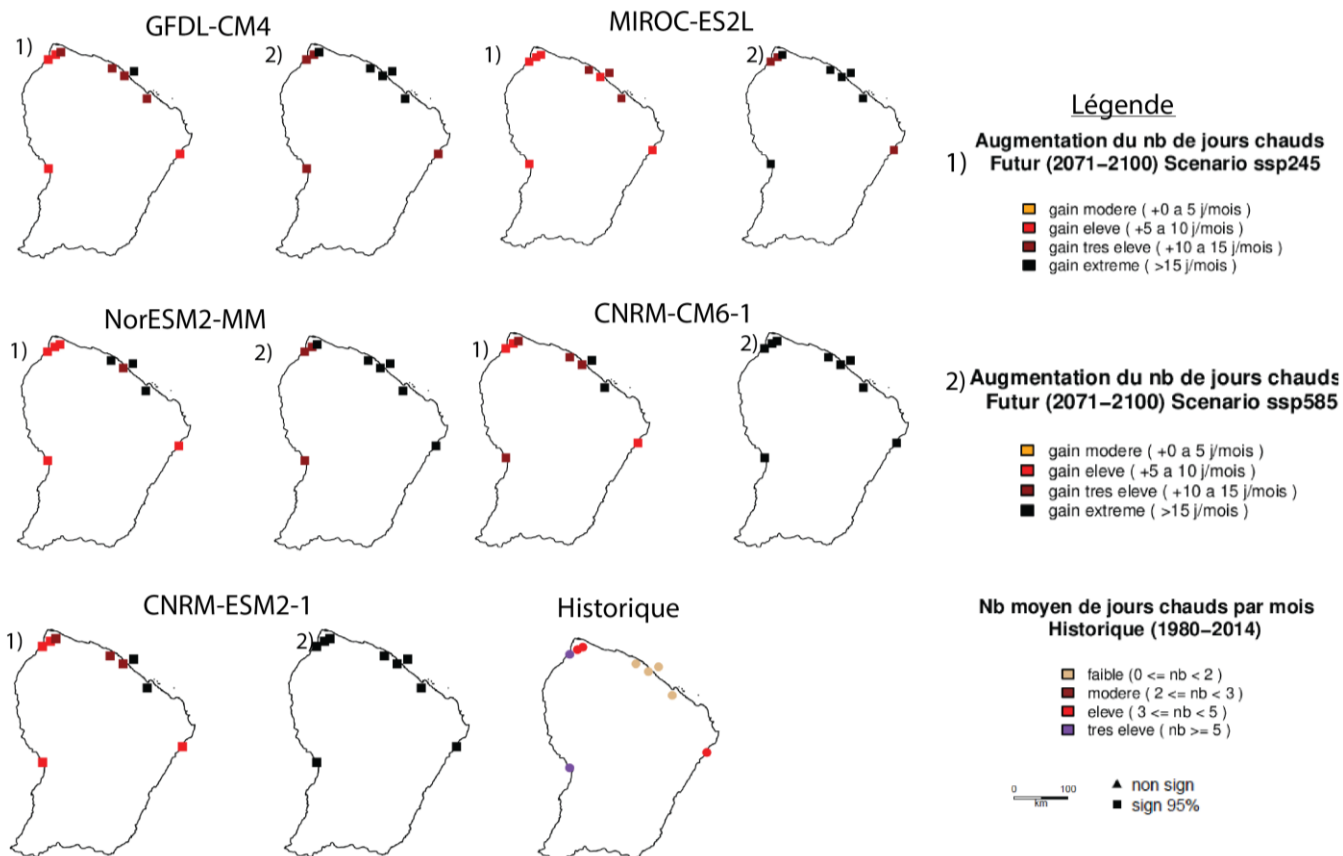


Figure 96 : Écarts des moyennes annuelles à long terme du nombre mensuel de journées chaudes entre l'historique (1980-2014) et les scenarios SSP2-4.5 et SSP5-8.5 (2071-2100) pour les 5 modèles CMIP6 retenus. Les moyennes historiques sont également représentées. Les symboles carrés indiquent les stations où les écarts sont significatifs au niveau de confiance de 95 % (test de Student).

## Énergie

Historiquement sur le littoral de Guyane, la demande énergétique pour la climatisation serait située entre ~600 degrés-jour par an (cf. définition §5.1.6) dans les années 1980 et ~900 degrés-jour par an dans les années 2010 (Figure 97). Pilotés par le réchauffement diurne et nocturne (Figure 82), les besoins en climatisation continuent à augmenter fortement dans les simulations futures :

- +149-194 degrés-jours annuels par décennie pour SSP5-8.5 et +89-108 degrés-jours annuels par décennie pour SSP2-4.5) ;
- à l'horizon 2100, la demande atteint ~2200<sup>42</sup> degrés-jour par an pour le scénario SSP5-8.5 et 1 500-1 800 degrés-jour par an pour SSP2-4.5.

Comme pour les autres indicateurs thermiques, les écarts entre les deux scénarii sont moins marqués à l'horizon 2060, mais prévoient tout de même le doublement de la demande énergétique actuelle consécutive au réchauffement climatique.

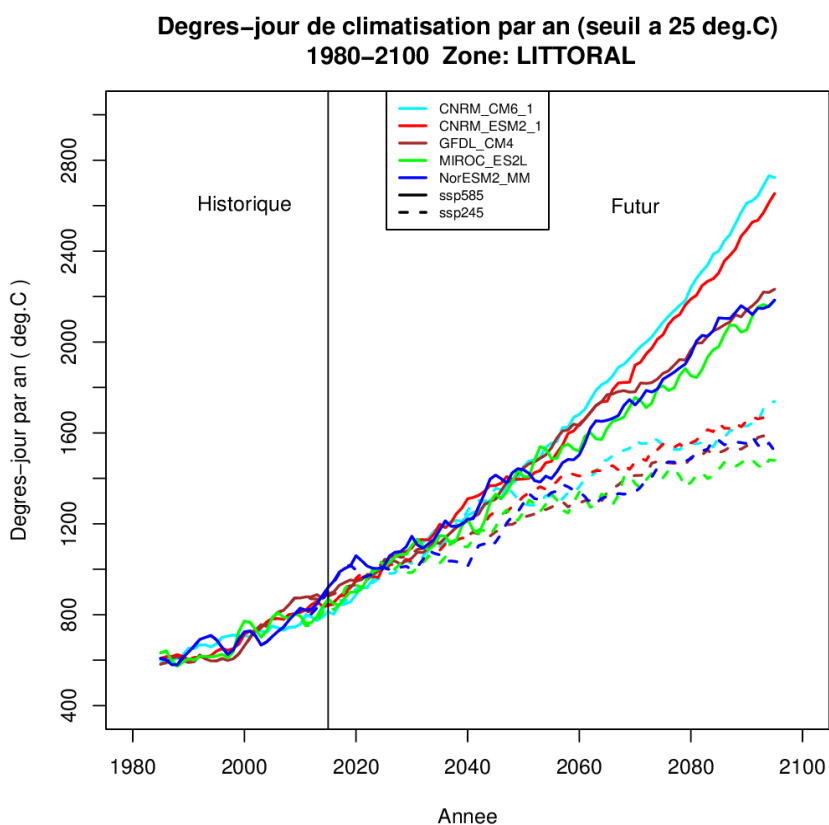


Figure 97 : Moyennes annuelles des degrés-jour annuels de climatisation historiques et futures corrigées dans la zone littorale pour 5 modèles climatiques et 2 scénarios d'émissions. Afin d'éliminer le bruit de haute fréquence, les séries ont été lissées avec une moyenne mobile de largeur 11 ans après concaténation des périodes historique (1980-2014) et futures (2015-2100), entraînant la perte des données des 5 premières et 5 dernières années.

<sup>42</sup> Jusqu'à ~2700 degrés-jour/an si l'on inclut les modèles du CNRM



## 5.2.5 Évolution du climat de vagues

### 5.2.5.1 COWCLIP

La Figure 98 montre un exemple du changement de la moyenne annuelle au large du Plateau des Guyanes entre la période 2081-2099 et 1979-2004 de la hauteur significative ( $H_s$ ), de la période ( $T_m$ ) et de la direction d'incidence moyenne ( $D_m$ ) pour les deux scénarios RCPs. Il est à noter que les combinaisons de modèles de climat et de vagues ne sont pas identiques entre les deux scénarios RCP (Figure 98). Bien que les écarts entre 2081-2099 et 1979-2004 soient très faibles, la moyenne multi-modèles montre des indications globales de diminution de la hauteur significative (de moins de 10 cm) et de la période (de moins de 0,1 s). Ces diminutions sont plus importantes en moyenne pour le RCP8.5 que le RCP4.5. Notons cependant que certains couples de modèles montrent des signes opposés : la robustesse de ces tendances moyennes est donc assez faible. La direction d'incidence moyenne montre aussi une rotation d'un peu moins de  $1^\circ$  dans le sens horaire.

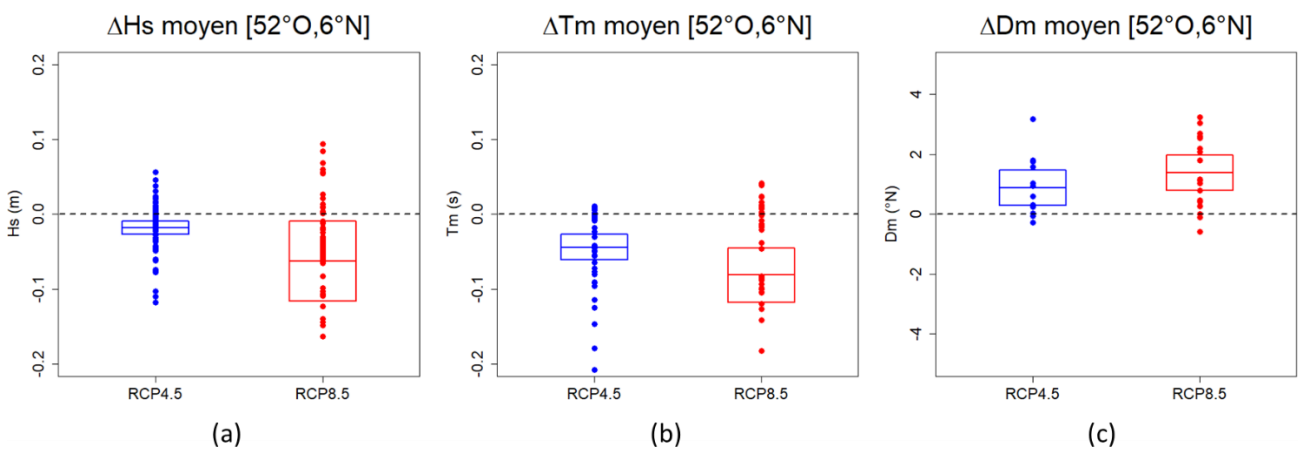


Figure 98 : Projections multi-modèle annuelles et intervalle de confiance à 95 % pour les scénarios RCP 4.5 et RCP 8.5 du changement (a) de la hauteur significative ( $H_s$ ); (b) période moyenne ( $T_m$ ); et (c) direction d'incidence moyenne ( $D_m$ ) des vagues. Chaque point correspond à un couple modèle de vague/modèle de climat.

La Figure 99 décline l'évolution saisonnière de ces anomalies. Le nombre de couples modèles de vagues/modèles de climat est réduit comparé à l'analyse annuelle précédente. Globalement, on retrouve le même type d'anomalie que précédemment avec une faible diminution des  $H_s$  et  $T_m$  et une légère rotation horaire de la direction d'incidence ( $D_m$ ), ce qui est cohérent avec l'analyse des projections effectuée par Morim *et al.* (2019). Ces changements apparaissent plus prononcés durant la saison hivernale (de Décembre à Mars) pour  $H_s$  et  $T_m$ . Pour  $D_m$ , cette saisonnalité des anomalies est moins prononcée. En résumé, bien que les changements projetés par l'ensemble multi-modèles ne soient pas robustes, les projections de COWCLIP donnent une indication qualitative des évolutions future des changements du climat de vagues.

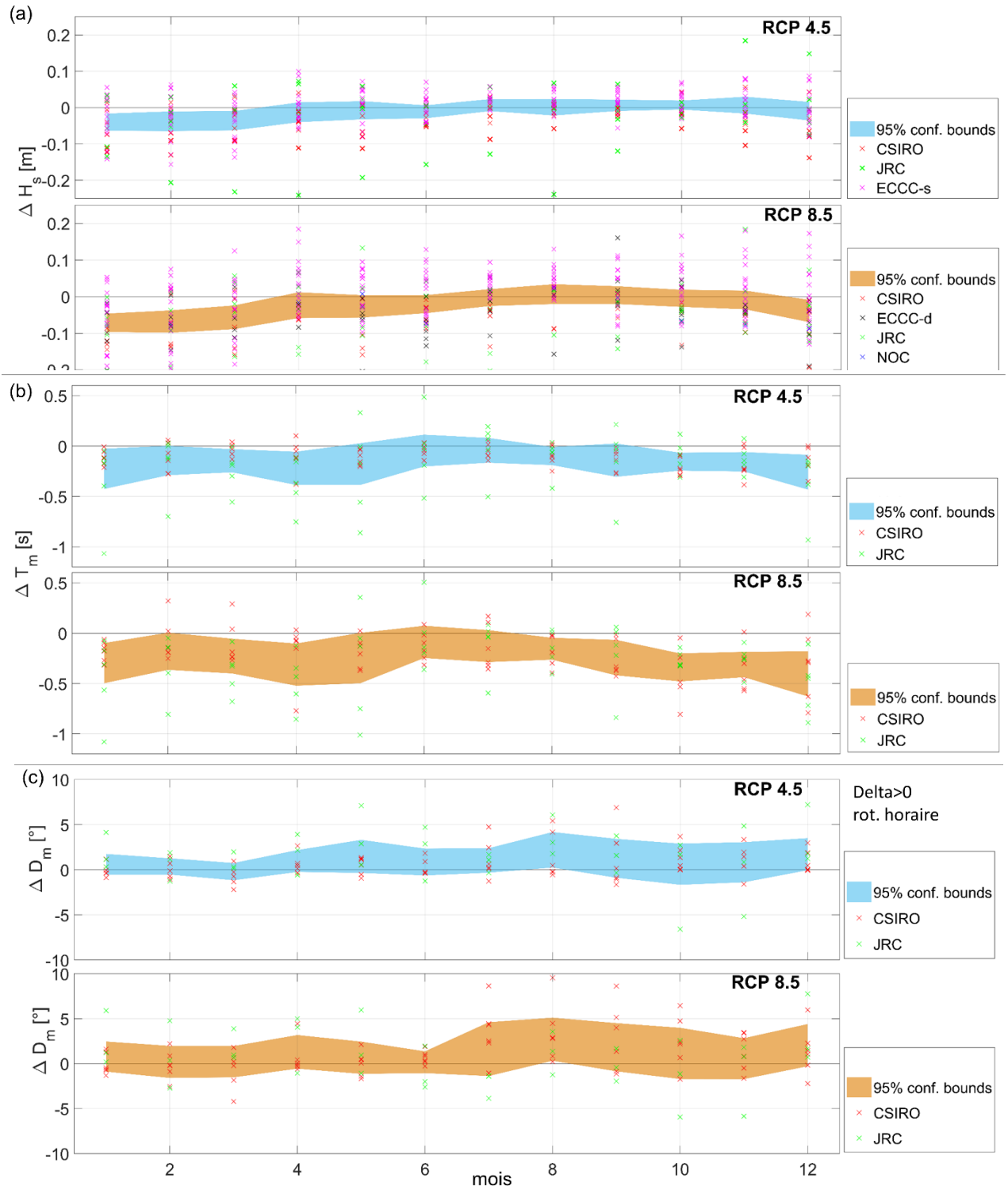


Figure 99 : Projections multi-modèle mensuelles et intervalle de confiance à 95 % pour les scénarios RCP 4.5 et RCP 8.5 du changement (a) de la hauteur significative ( $H_s$ ); période moyenne ( $T_m$ ) (b); et (c) direction d'incidence moyenne ( $D_m$ ) des vagues.

### 5.2.5.2 Modèles ARPEGE-MFWAM

#### Biais du modèle

En saison hivernale, les valeurs de la vitesse du vent atteignent plus de 8 m/s pour les champs moyens et presque 11 m/s pour les extrêmes (Figure 100). On devine la présence de la ZCIT par la diminution de la vitesse du vent à faible altitude en direction du sud, bien que le minimum de vitesse ne soit pas visible sur la carte. Ces résultats sont cohérents avec une ZCIT située au plus proche de l'équateur et dans sa position la plus méridionale à cette époque de l'année. On constate une sous-estimation générale de la vitesse du vent par le modèle ARPEGE-Climat par rapport aux données de la réanalyse ERA5, de l'ordre de 20 à 25 % pour la moyenne. Pour le quantile 95 le biais est plus faible avec de légères surestimations dans la partie nord du domaine et de légères sous-estimations dans la partie sud-est, de moins de 10 % dans les deux cas. Les biais moyens sont donc non négligeables mais ils restent faibles pour les valeurs extrêmes, nous rassurant ainsi quant à leur impact sur l'analyse de l'évolution future de ces vents extrêmes et des vagues associées.

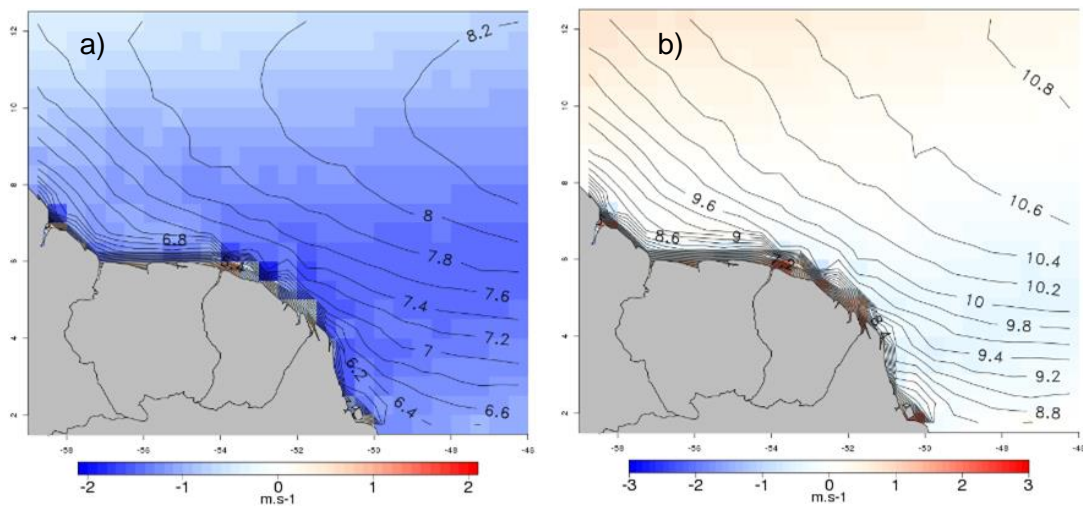


Figure 100 : Différence entre Hist-Obs et ERA5 pour la vitesse de U10 au-dessus de l'océan en saison hivernale avec pour contour le champ de référence de ERA5 (m/s) : a) moyenne et b) quantile 95.

Nous avons ensuite produit des cartes vectorielles comparant le vent à 10 m des deux jeux de données, pour observer en particulier les différences de direction du vent et notamment les biais éventuels concernant la structure de la ZCIT. ERA5 présente une composante méridionale non négligeable par rapport à la composante zonale (alizés d'ENE à NE), alors qu'avec Hist-Obs la part de cette composante diminue grandement (Figure 101)<sup>43</sup>. Le modèle semble donc avoir du mal à représenter parfaitement la circulation atmosphérique associée à la ZCIT dans le domaine étudié en saison hivernale, ce qui pourrait expliquer en partie la sous-estimation importante constatée pour les valeurs moyennes de la vitesse du vent à 10 m.

<sup>43</sup>Attention à l'échelle des flèches : dans le Nord du domaine la flèche rouge (Hist-Obs - ERA5) semble compenser totalement la composante zonale de la flèche noire (ERA5) mais ces deux flèches n'ont pas la même échelle.

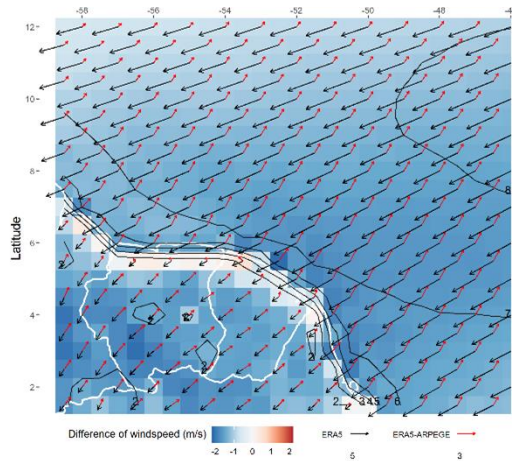


Figure 101 : Différence moyenne de U10 entre Hist-Obs et ERA5 (flèches rouges, fond de carte pour la différence des vitesses) avec le champ de référence ERA5 (flèches noires, contours pour les vitesses).

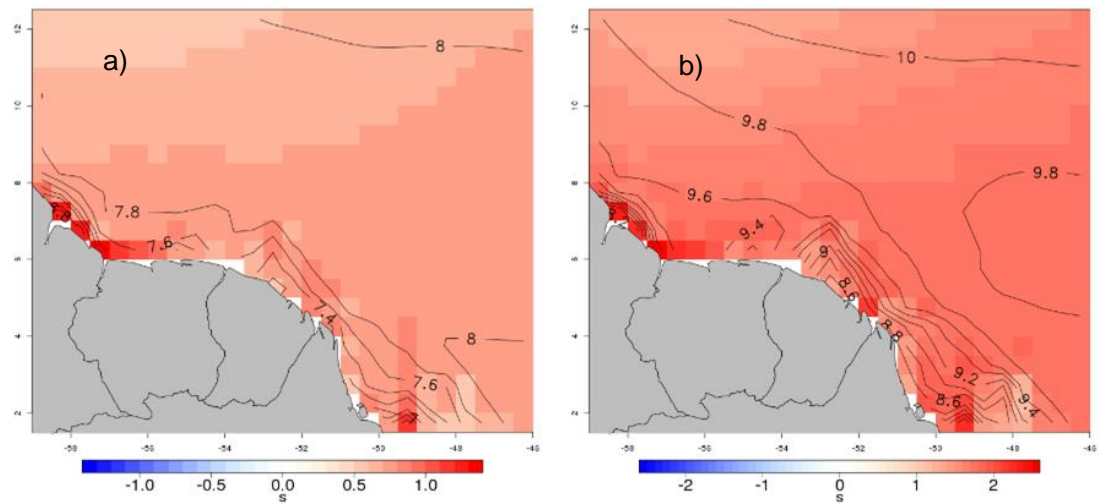


Figure 102 : Différence entre Hist-Obs et ERA5 pour  $T_m$  en saison hivernale avec pour contour le champ de référence de ERA5 : a) moyenne et b) quantile 95.

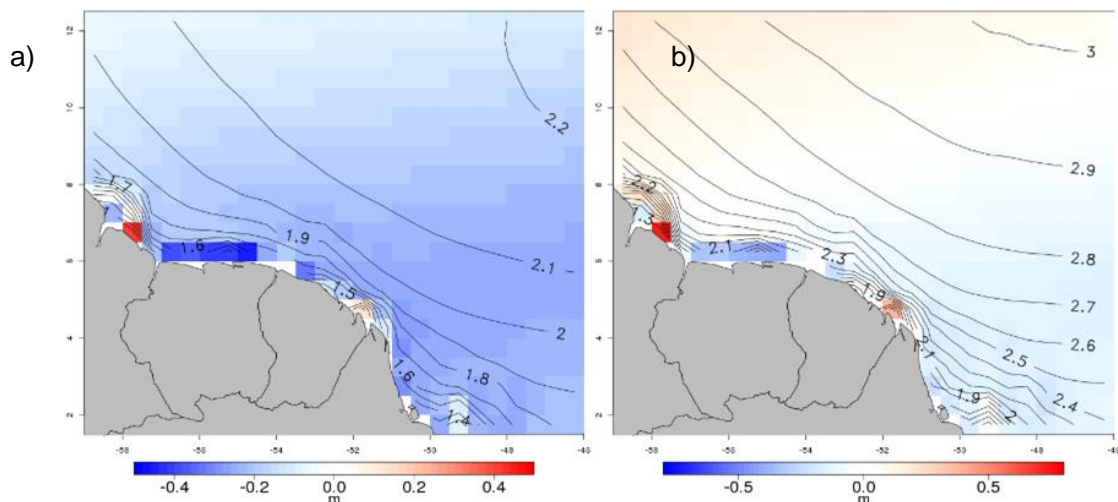


Figure 103 : Différence entre Hist-Obs et ERA5 pour  $H_s$  en saison hivernale avec pour contour le champ de référence de ERA5 : a) moyenne et b) quantile 95.

Une comparaison similaire est réalisée pour les caractéristiques des vagues : période moyenne  $T_m$  (Figure 102) et hauteur significative  $H_s$  (Figure 103). Pour ERA5, les valeurs moyennes de  $H_s$  (resp.  $T_m$ ) atteignent 2,2 m (resp. 8 s) au large, et jusqu'à 3 m (resp. 10 s) pour le quantile 95. Les niveaux sont plus faibles à quelques dizaines de kilomètres de la côte : 1,9 m (resp. 7,6s) pour  $H_s$  (resp.  $T_m$ ) moyen et 2,5 m (resp. 9,2 s) pour le quantile 95. Une surestimation générale de  $T_m$  par le modèle est à souligner : de l'ordre de 5-10 % pour la moyenne et 10-15 % pour le quantile 95 (Figure 102). Pour  $H_s$ , on constate au contraire une sous-estimation de la moyenne de 10% et des extrêmes plutôt bien représentés (quantile 95), avec comme pour le vent, une légère surestimation (5-7 %) dans la partie Nord du domaine et une légère sous-estimation (5 %) dans la partie Sud-Est (Figure 103).

Lorsqu'ESA-CCI est pris comme référence au lieu d'ERA5, on constate une forte sous-estimation de la part du modèle de 20-30 % sur presque tout le domaine, avec quelques points côtiers de biais faibles et de surestimations (mais pas au niveau de la Guyane, Figure 104). Ceux-ci ne doivent cependant pas être pris en compte du fait de l'incertitude d'ESA-CCI (et de MFWAM) dans ces zones. On a donc la même tendance à la sous-estimation que celle déjà vue lors de la comparaison avec ERA5 mais un peu plus accentuée ici, ce qui peut s'expliquer par la sous-estimation par ERA5 des observations directes (Belmadani *et al.* 2021, Hawkins *et al.* 2022).

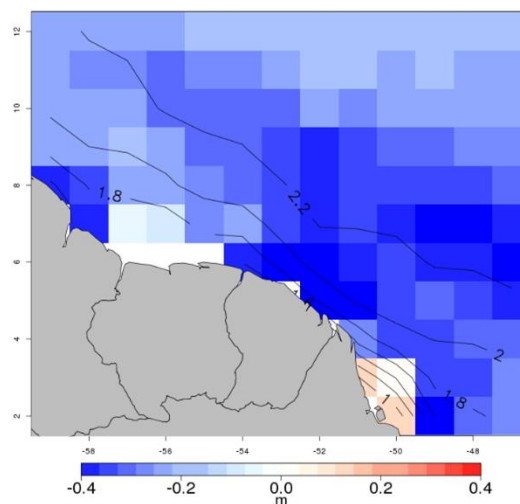


Figure 104 : Différence moyenne entre Hist-Obs et ESA-CCI pour  $H_s$  en saison hivernale avec pour contour le champ de référence de ESA-CCI.



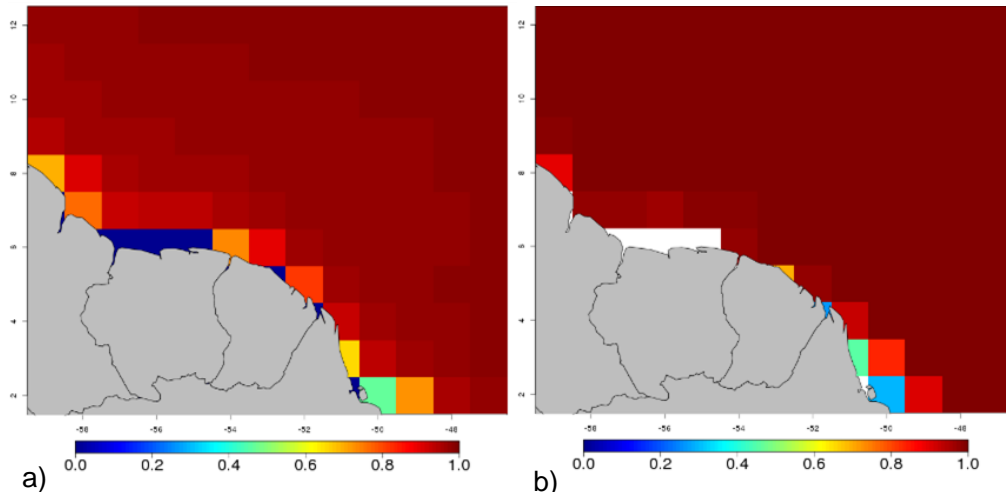


Figure 105 : Probabilité que Hs dépasse 1 m en saison hivernale pour : a) Hist-Obs et b) ESA-CCI.

Concernant les hauteurs modérées ( $H_s > 1$  m), on remarque dans un premier temps que celles-ci chutent très rapidement à l'approche du continent sud-américain (Figure 105). Elles ne seront cependant pas prises en compte dans la suite des analyses compte tenu des nombreux effets côtiers non intégrés dans notre modélisation (notamment ceux liés aux bancs de vases). Au large, les probabilités de dépassement sont assez élevées (très proches ou égales à 1) pour Hist-Obs et ESA-CCI, un résultat attendu étant donné que la valeur seuil de 1 m est assez faible et que les houles de nord accentuent  $H_s$  en saison hivernale (Gratiot *et al.* 2007, Hawkins *et al.* 2022). Par ailleurs, le modèle sous-estime généralement faiblement la probabilité de dépassement du seuil de 1 m (Figure 106).

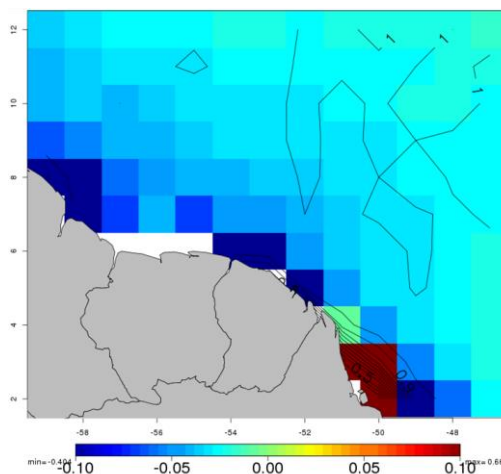


Figure 106 : Quotient (en puissances de deux<sup>44</sup>) des probabilités que Hs dépasse 1 m en saison hivernale, avec pour contour le champ de référence de ESA-CCI.

Avec des seuils plus élevés (jusqu'à 3 m), le modèle continue à sous-estimer les différentes probabilités de dépassement (Figure 107).

<sup>44</sup>N.B. -0.05 correspond à 2 à la puissance -0.05, soit  $\sim 0.966$  cad une sous-estimation de  $\sim 3,4\%$ , de même -0,10 correspond à une sous-estimation d'environ 7,7%.

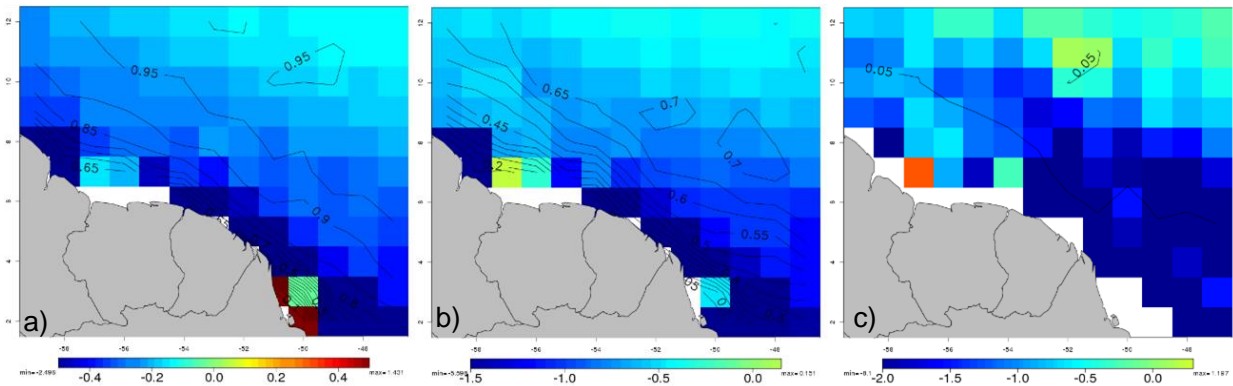


Figure 107 : Quotient (en puissances de deux) des probabilités que  $H_s$  dépasse (a) 1,5 m, (b) 2 m, et (c) 3 m en saison hivernale, avec pour contour le champ de référence de ESA-CCI.

Ceci rejoint les observations faites sur les moyennes (Figure 103a et Figure 104), mais pas celles faites à partir du quantile 95 en comparaison d'ERA5 (Figure 103b), ce qui pourrait à nouveau s'expliquer par un biais négatif de la réanalyse.

Comme détaillé à la section §5.1.7, les houlographes constituent un complément d'information utile dans la mesure où bien que sujets à plusieurs limitations, il s'agit de mesures *in situ*, contrairement à ESA-CCI et ERA5. Pour la période moyenne des vagues, on note une grande similarité entre les 3 bouées 97301, 97302 et 97304 et les données modèle correspondantes pour les centiles 25, 75 et la médiane, avec des différences de l'ordre de quelques pourcents seulement (Figure 108b,d,f,h).

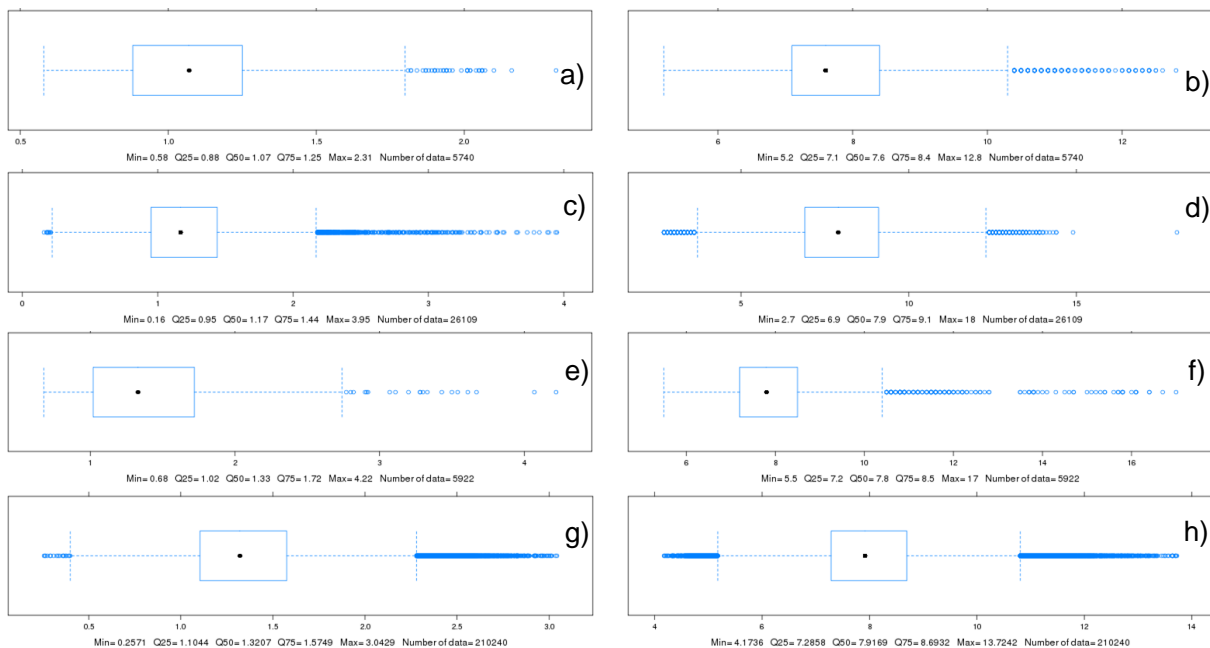


Figure 108 : Représentation en "boîtes à moustache" des données de (a,c,e,g)  $H_s$  et (b,d,f,h)  $T_m$  en saison hivernale pour (a,b) la bouée 97301, (c,d) la bouée 97302, (e,f) la bouée 97304 et pour (g,h) Hist-Obs (52°W ; 5°N).

En revanche, il y a une grande disparité entre les différentes bouées en termes de hauteur significative (Figure 108a,c,e) : la bouée 97301 présente des valeurs significativement plus faibles que 97302 alors que ces deux bouées sont très proches (Figure 50), tandis que 97304 a des valeurs plus élevées. Ces deux observations pourraient s'expliquer pour la première par la différence des périodes d'échantillonnage (2007 vs. 2010-13, Figure 51a) en lien avec la variabilité interannuelle de la houle et/ou la migration des bancs de vase côtiers, et pour la deuxième par le fait que la bouée 97304 est beaucoup plus au large que les deux précédentes (Figure 50) et donc non soumise à l'amortissement de la houle par les bancs de vase. Ainsi, aucun signal clair ne semble ressortir au prime abord de la comparaison du modèle (Figure 108g) avec les données houlographe. Cependant, les bouées 97301 et 97302 sont probablement trop influencées par la dynamique côtière, tandis que la bouée 97304 est la plus proche du point modèle. Il paraît donc judicieux de ne comparer le modèle qu'à cette dernière bouée. On remarque alors que les valeurs des médianes sont égales (à 1 % près), bien que la distribution de la bouée 97304 soit plus resserrée que celle du modèle, le quantile 25 étant surestimé de 10% par notre modèle et le quantile 75 sous-estimé dans les mêmes proportions.

Pour la bouée 97303 située au large de Kourou (Figure 50), les valeurs des quantiles 25, 75 et de la médiane de  $T_m$  sont une nouvelle fois très proches de celles du modèle, avec des différences inférieures à 1 % (Figure 109b,d). Comme pour la bouée 97304, on a de nouveau une distribution des  $H_s$  modèle un peu plus resserrée, avec une surestimation de 10% du quantile 25 et une sous-estimation de 4% pour le quantile 75 (Figure 109a,c). On constate cependant une surestimation de la médiane de 10 % de la part du modèle.

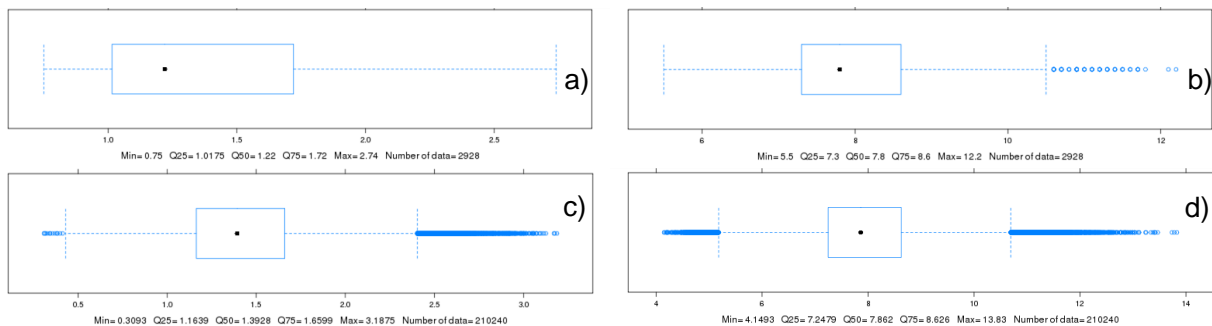


Figure 109 : Représentation en “boîtes à moustache” des données de (a,c)  $H_s$  (m) et (b,d)  $T_m$  (s) en saison hivernale pour (a,b) la bouée 97303, et (c,d) Hist-Obs ( $52,5^{\circ}W$  ;  $5,5^{\circ}N$ ).

Nous nous sommes ensuite intéressés à la direction moyenne des vagues. D’après les bouées, les vagues au large de Cayenne proviennent presque exclusivement du NNE et NE, avec une prédominance de NNE pour la bouée 97302 et de NE pour 97304 (Figure 110a,b). Les vagues sont par ailleurs bien plus hautes pour 97304 que pour 97302. Ainsi, il semblerait à nouveau que de par son positionnement, la bouée 97302 subisse des effets côtiers qui amortissent les vagues mais qui modifient sûrement aussi leur incidence (réfraction bathymétrique). Comparer les données modèle à 97304 seulement paraît donc préférable. Comme pour la bouée, les vagues proviennent principalement du NE dans le modèle (>60 %, Figure 110c). Cependant, la part des vagues venant du NNE est fortement sous-estimée : seulement 20 %, contre 35 % pour 97304.

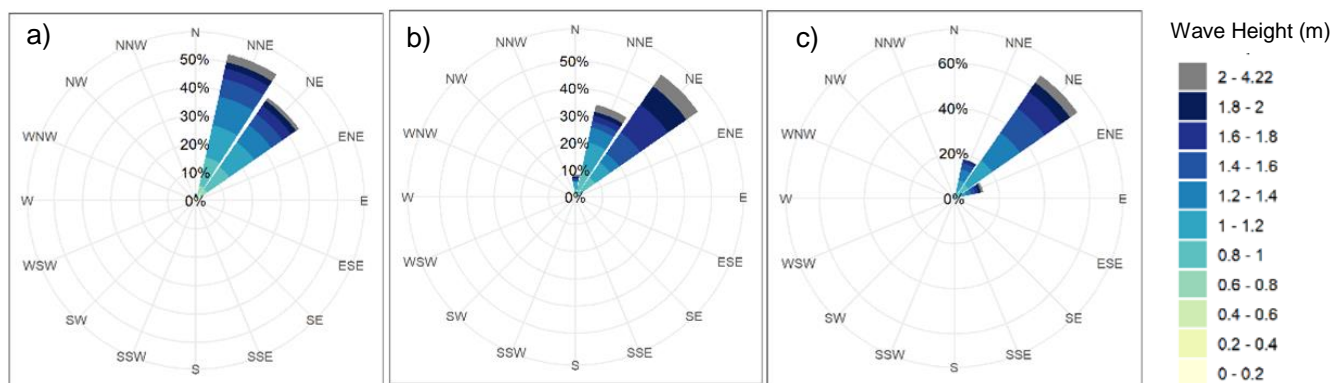


Figure 110 : Roses des vagues en saison hivernale pour les bouées a) 97302, b) 97304 et pour c) Hist-Obs (5°N ; 52°W)

Au large de Kourou, les vagues de NE représentent aussi une part prédominante dans les données du modèle (plus de 60 %, comme au large de Cayenne), les ~40 % restants se divisant presque équitablement entre NNE et ENE (Figure 111b). Pour la bouée 97303 au contraire, et similairement à 97304, près de 35 % des houles proviennent du NNE (Figure 111a). On a donc un décalage vers l'est de l'incidence des vagues au large de la Guyane dans le modèle (rotation horaire).

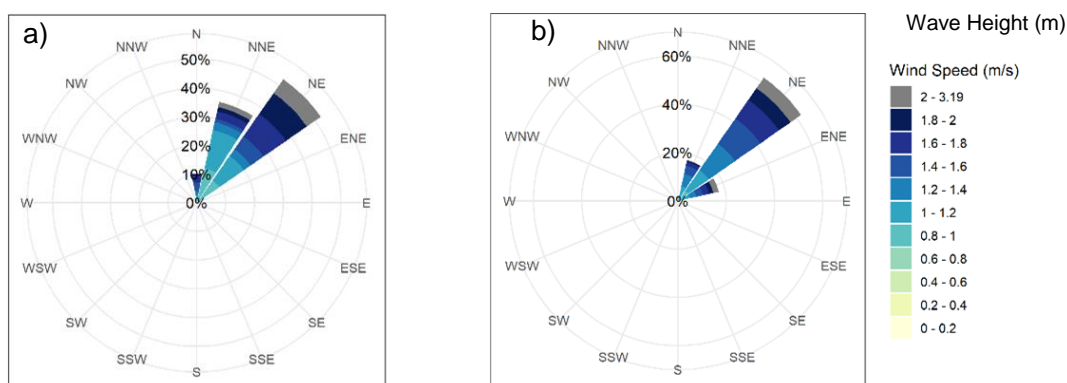


Figure 111 : Roses des vagues en saison hivernale pour a) la bouée 97303 et b) Hist-Obs (5.5°N ; 52.5°W)

En résumé :

- en comparaison d'ERA5, la force du vent d'ARPEGE-Climat est sous-estimée de 20-25 % en moyenne et sa direction est trop Est (rotation horaire), tandis que les valeurs extrêmes sont bien représentées (force du vent) ;
- en conséquence, MFWAM sous-estime en moyenne la hauteur significative des vagues de 10-30 % par rapport à ERA5 et ESA-CCI, bien que les comparaisons avec les houlographes montrent de bonnes performances, et présente des biais négatifs moins marqués pour les valeurs élevées (vis-à-vis d'ERA5 et ESA-CCI) ;
- une rotation horaire des vagues dans MFWAM par rapport aux données des houlographes pourrait également résulter du biais similaire du vent de surface, mais elle est peu marquée ;
- enfin, MFWAM présente de très bonnes performances en termes de période moyenne en comparaison des houlographes, qui restent relativement bonnes en comparaison d'ERA5, y compris pour les valeurs extrêmes (surestimation de 10-15 %).

Malgré ces quelques biais, le modèle affiche globalement de bonnes performances sur la période historique, qui confirment sa pertinence pour évaluer l'évolution future du climat de vagues au moyen de la comparaison des ensembles de simulations Hist-Model (historique) et RCP 8.5 (futur).

### ARPEGE-MFWAM : projections futures

À l'horizon 2080 sous le scénario RCP8.5, le modèle prévoit une diminution statistiquement significative de 3 à 5 % des valeurs moyennes de Hs et Tm en saison hivernale dans l'intégralité du domaine (Figure 112). Cela reste en accord avec les projections multi-modèles sur la période 2080-2099 dont les résultats suggèrent également une diminution de Hs (Morim *et al.*, 2019, cf. Figure 99a).

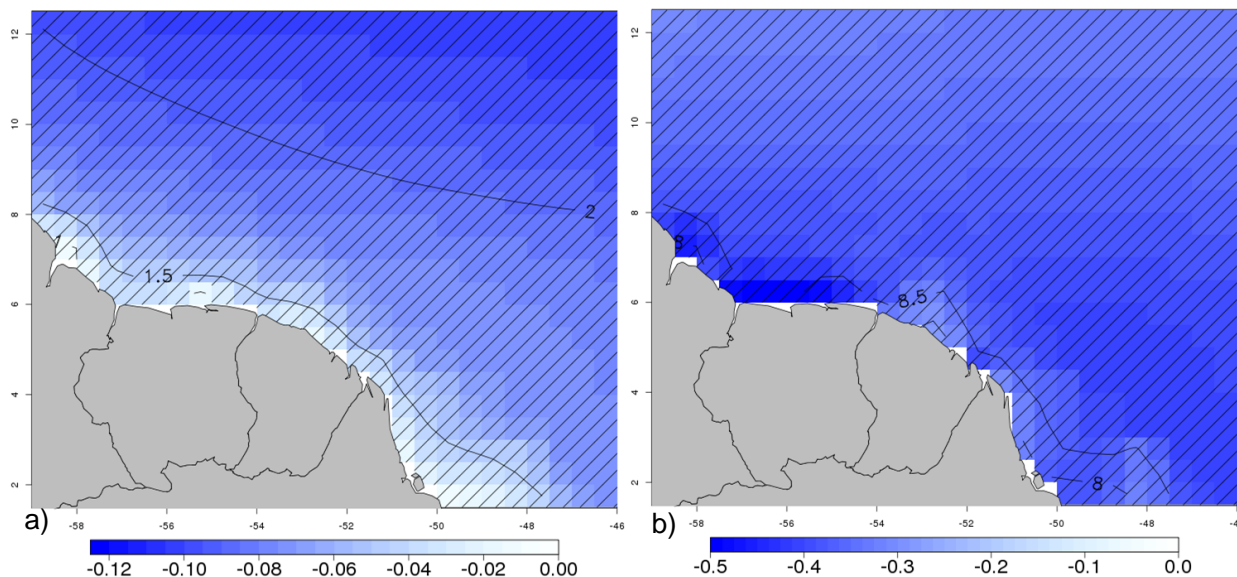


Figure 112 : Évolution moyenne RCP 8.5 (2051-2079) - Hist-Model (1984-2012) en saison hivernale avec pour contour le champ historique Hist-Model : a) Hs (m) et b) Tm (s). Les hachures signalent les zones où les évolutions sont statistiquement significatives au niveau de confiance de 95 %.

En termes de direction moyenne des vagues (Dir), le climat historique de Hist-Model (flèches noires) présente une homogénéité spatiale des incidences médianes des vagues (Figure 113). Sur la grande majorité de la zone étudiée, les vagues proviennent typiquement du NE (en accord avec les comparaisons ponctuelles aux bouées houlographes au large de Kourou et Cayenne), avec des incidences un peu plus NNE au sud-est du domaine et ENE au nord-ouest.



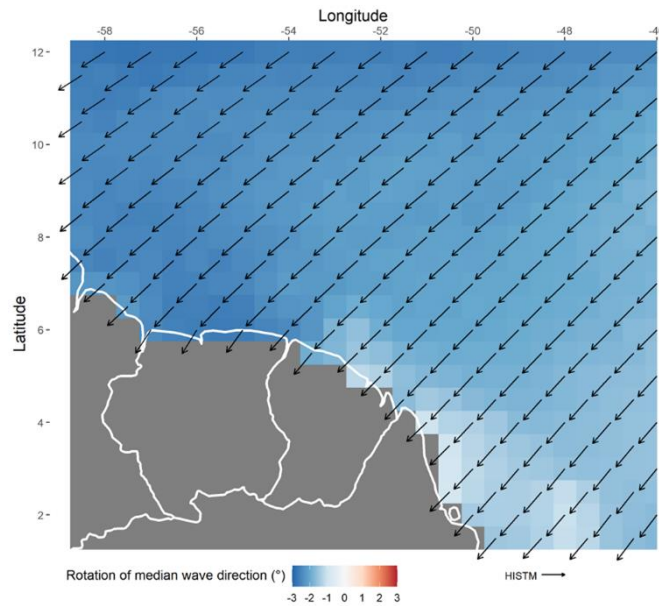


Figure 113 : Évolution RCP 8.5 (2051-2079) – Hist-Model (1984-2012) en saison hivernale de la médiane de Dir avec pour référence le champ de Hist-Model (flèches noires)

Une rotation de l'ordre de 1 à 3° dans le sens horaire est constatée sur l'intégralité de la zone d'étude pour l'expérience RCP 8.5 par rapport à Hist-Model (Figure 113). Cela rentre dans la bande de variabilité des résultats de COWCLIP (Morim *et al.* 2019, leur Figure 3), bien que cette bande n'exclut pas la possibilité de rotation projetée nulle ou faiblement anti-horaire de certains membres de COWCLIP (Figure 99c). Les rotations les plus fortes se situent dans la partie Nord-Ouest du domaine et les plus faibles dans la partie Sud-Est, ce qui accentue légèrement la disparité spatiale de l'incidence des vagues historiques.

Afin de vérifier que la médiane est représentative de l'incidence réelle des vagues, les roses des vagues sont évaluées pour RCP8.5 et Hist-Model avec les données issues de 5 points modèles situés au large des côtes guyanaises (Figure 114). On remarque très clairement un paquet unique de directions centrées sur le NE, validant ainsi notre approche. La rotation dans le sens horaire des vagues est mise en évidence sur tous les points, avec une diminution (resp. augmentation) de la proportion des vagues venant du NNE (resp. NE et ENE) dans RCP8.5. Des classes de directions plus resserrées que la valeur de 22.5° utilisée permettraient d'examiner plus précisément la rotation des distributions, mais n'ont pas pu être appliquées par manque de temps.

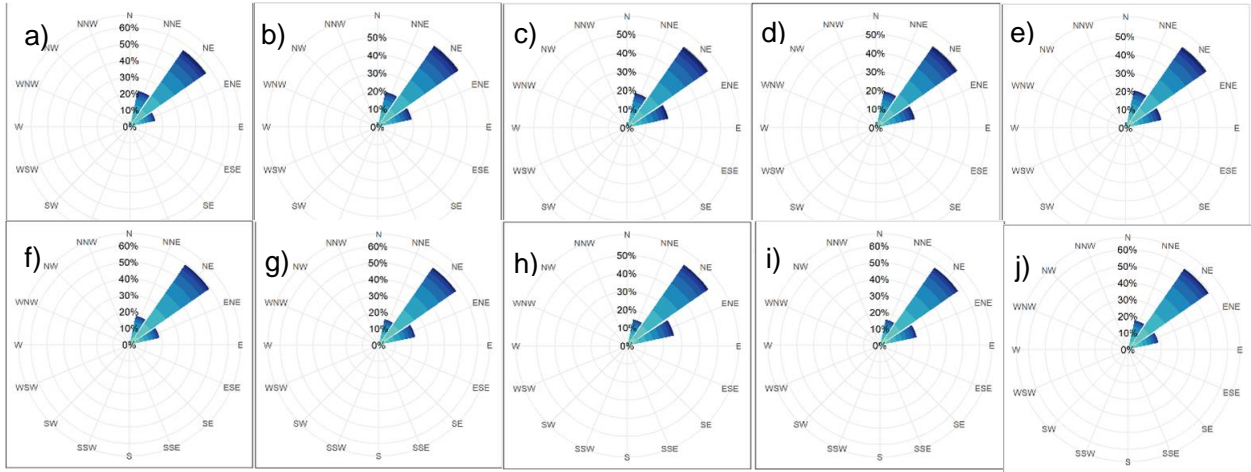


Figure 114 : Roses des vagues pour (a,b,c,d,e) Hist-Model et (f,g,h,i,j) RCP8.5 extraites des points modèles (a,f) 5.5°N/51.5°W, (b,g) 6°N/52°W, (c,h) 6.5°N/52.5°W, (d,i) 6.5°N/53°W et (e,j) 6.5°N/53.5°W.

Une augmentation générale de la vitesse du vent à 10 m de l'ordre de 5 à 10 % est constatée (Figure 115). De prime abord, ceci peut paraître incohérent avec la diminution des périodes moyennes et des hauteurs significatives des vagues (Figure 112). Cependant, en période hivernale les houles arrivant sur les côtes guyanaises proviennent majoritairement de l'Atlantique Nord et sont donc décorrélatées du vent local (Young 1999). De plus, dans la partie Nord du domaine les vecteurs du vent à 10 m de Hist-Model et RCP8.5 sont colinéaires alors que dans la partie Sud Est, il y a une légère augmentation de la composante méridionale induisant une rotation dans le sens trigonométrique et non dans le sens horaire, comme c'est le cas pour les vagues.

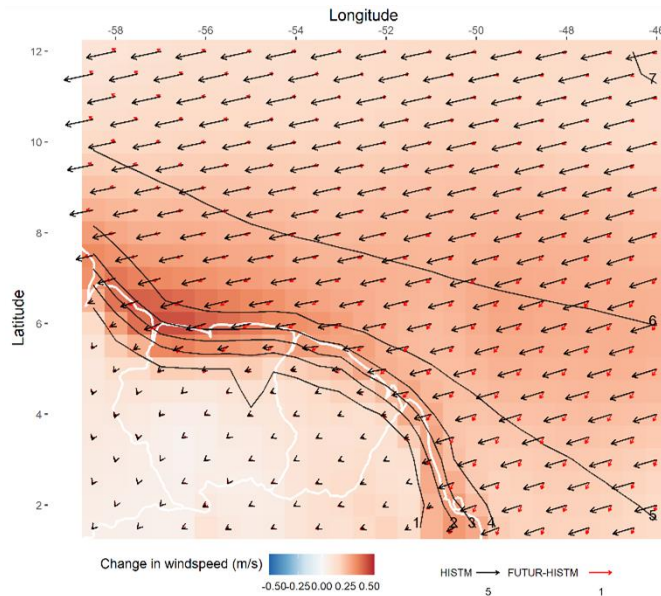


Figure 115 : Évolution moyenne RCP8.5 (2051-2079) – Hist-Model (1984-2012) en saison hivernale de U10 (flèches rouges, fond de carte pour l'évolution des vitesses) avec le champ historique Hist-Model (flèches noires, contours pour les vitesses).

En examinant l'évolution des Hs et Tm à l'échelle de l'Atlantique Nord, on voit bien que les diminutions mises en évidence (Figure 112) ne se limitent pas à la région océanique adjacente à la Guyane mais s'étendent au contraire sur tout le bassin (Figure 116).

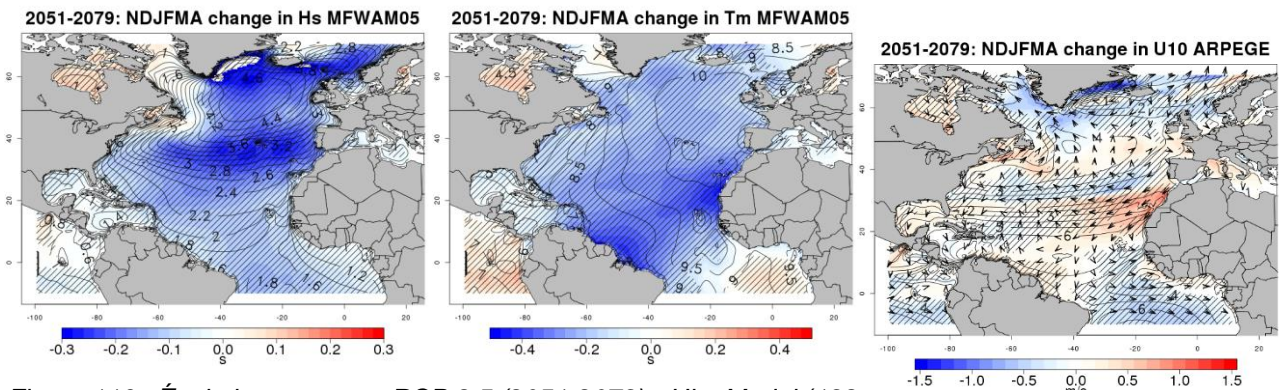


Figure 116 : Évolution moyenne RCP 8.5 (2051-2079) - Hist-Model (1984-2012) en saison hivernale avec pour contour le champ historique Hist-Model à l'échelle de l'Atlantique Nord : (à gauche) Hs (m) et (au milieu) Tm (s). A droite : Évolution moyenne RCP 8.5 (2051-2079) – Hist-Model (1984-2012) en saison hivernale de U10 (flèches noires, fond de carte pour l'évolution des vitesses) avec pour contour le champ historique des vitesses Hist-Model à l'échelle de l'Atlantique Nord. Les hachures signalent les zones où les évolutions de Hs, Tm, vitesse de U10 sont statistiquement significatives au niveau de confiance de 95 %.

Hs diminue le plus fortement au nord de 60°N et autour de 30-40°N, amplifiant ainsi le gradient méridional entre les valeurs élevées des moyennes latitudes et celles plus faibles dans les tropiques. Tm a ses diminutions les plus fortes au sud de 30°N, dont les côtes sud-américaines incluant celles de Guyane. Cette position, en périphérie du signal mis en évidence pour Hs, suggère un lien entre les deux, permis par la propagation des houles vers le sud : si ces houles sont associées à des vagues plus petites à l'avenir, du fait de la dispersion des vagues en eaux profondes, on peut s'attendre à une diminution des périodes de plus en plus marquée à mesure qu'on s'éloigne de la source (l'augmentation de Tm dans le Golfe de Guinée pourrait être la signature de houles de l'Atlantique Sud). À l'inverse, l'évolution de U10 n'est pas uniforme sur le bassin. Le signal d'augmentation au large de la Guyane s'inscrit bien dans un signal de plus grande échelle s'étendant du Nord-Ouest de l'Afrique au Nord de l'Amérique du Sud, suggérant une intensification des alizés de Nord-Est. Il n'explique cependant pas les diminutions de Hs et Tm à grande échelle, qui seraient donc principalement liées à un affaiblissement de la houle. Il est toutefois possible que l'augmentation du vent contribue à moduler ces diminutions : les régions (dont la Guyane) où le vent se renforce semblent correspondre à de plus faibles (resp. fortes) diminutions de Hs (resp. Tm), ce qui serait cohérent avec un renforcement de la mer du vent.

Pour Hs, U10 et E (l'énergie des vagues, cf. §5.1.7), les valeurs moyennes historiques dans la zone étudiée (Figure 54) augmentent progressivement pendant la première partie de la saison (novembre à janvier) et atteignent leurs maxima durant le mois de février (passant de 1.5 à 2.2 m pour Hs, de 4.5 à 7.5 m/s pour U10 et de 25 à 50 m<sup>2</sup> s pour E), puis diminuent de nouveau pour atteindre 1.9 m pour Hs, 7 m/s pour U10 et 30 m<sup>2</sup> s pour E en avril (Figure 117a,c,d). Pour Tm, on constate une forte augmentation au tout début de la saison, passant de 8,6 à 9,2 s en l'espace de quelques jours, suivie d'une diminution plus lente atteignant 8,8 s début mars avant une accélération de cette diminution en fin de saison jusqu'à la valeur de 8,2 s en avril (Figure 117b).

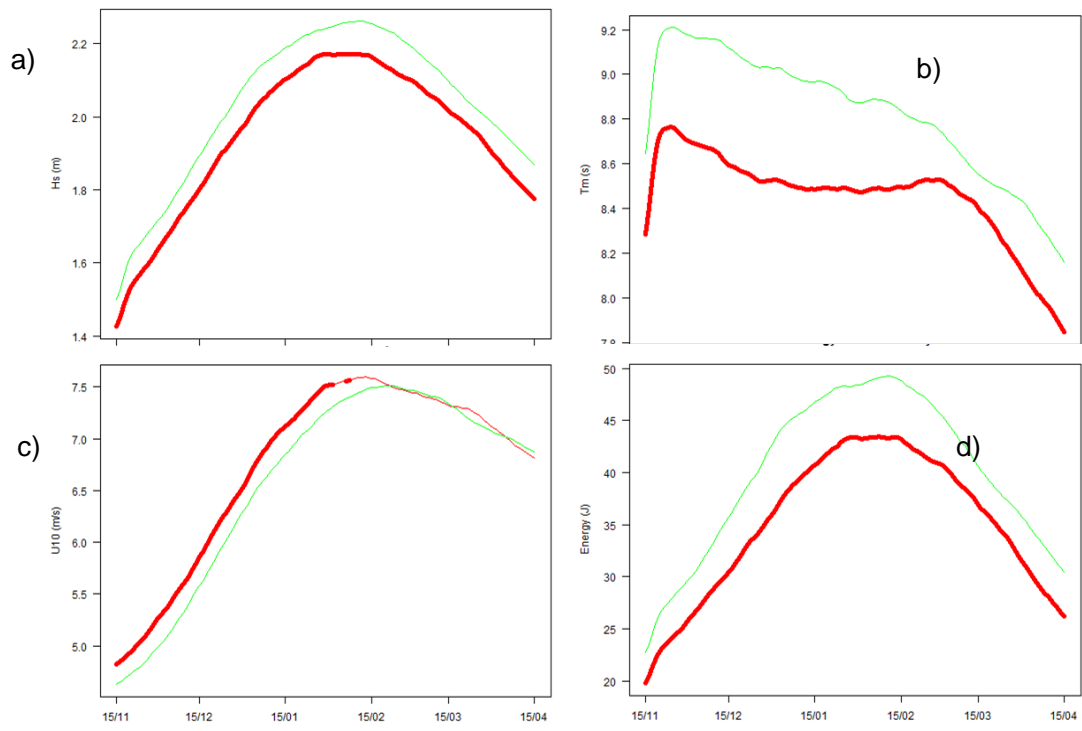


Figure 117 : Comparaison de la saisonnalité (en saison hivernale) pour Hist-Model (courbes vertes) et RCP8.5 (courbes rouges, les traits gras représentant une différence avec Hist-Model significative à 95 %) de : a) Hs, b) Tm, c) U10 et d) E.

Pour Hs et Tm, la diminution statistiquement significative précédemment observée sur les cartographies des évolutions moyennes (Figure 112) a lieu tout au long de la saison hivernale. Pour E, la même tendance de diminution est mise en évidence, alors que pour U10, deux tendances différentes sont relevées. De novembre à janvier, on constate une augmentation significative de la vitesse moyenne de U10, alors que pendant la deuxième partie de la saison hivernale (février à avril), les valeurs de Hist-Model et RCP 8.5 sont très proches et l'évolution associée n'est pas statistiquement significative.

À la lumière de ces résultats, la cartographie de l'évolution de U10 (Figure 115) est répétée en séparant les deux trimestres novembre-décembre-janvier (NDJ) et février-mars-avril (FMA) pour mieux faire ressortir les évolutions futures du vent à l'échelle sub-saisonniers (Figure 118). Comme attendu, une nette différence en termes de vitesses du vent historiques est présente entre les périodes NDJ et FMA, avec des valeurs variant entre 4 et 6 m/s en pleine mer sur le premier trimestre et entre 5 et 8 m/s sur le deuxième trimestre. L'orientation des vecteurs de Hist-Model (flèches noires) est également consistante avec un déplacement de la ZCIT vers le sud en FMA par rapport à NDJ.



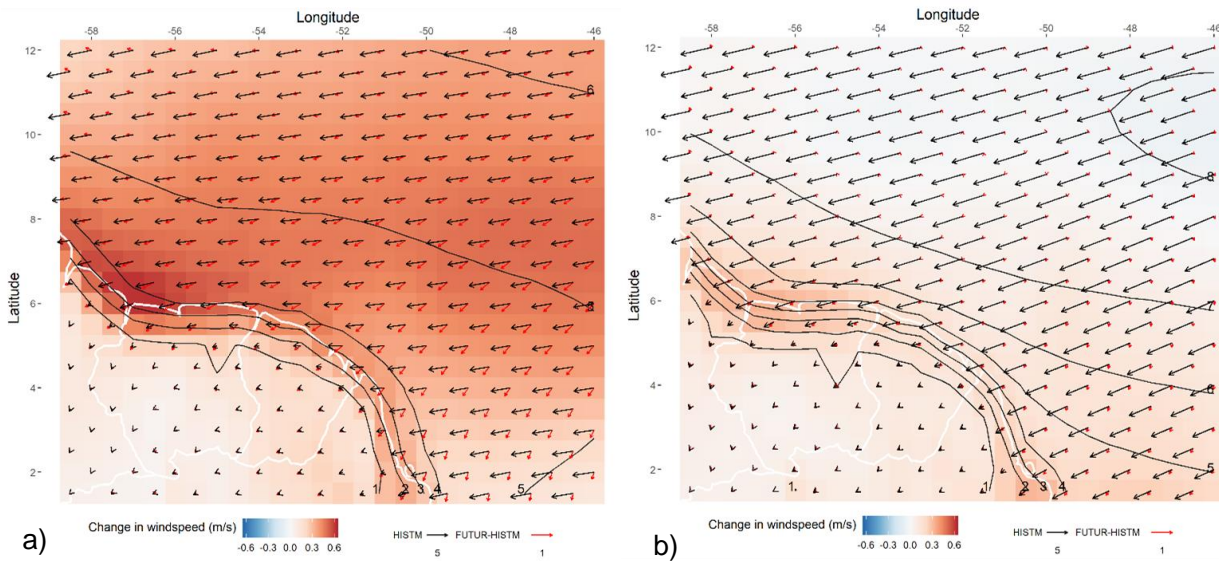


Figure 118 : Évolution moyenne RCP 8.5 (2051-2079) – Hist-Model (1984-2012) pour a) NDJ et b) FMA de U10 (flèches rouges, fond de carte pour l'évolution des vitesses) avec le champ historique Hist-Model (flèches noires, contours pour les vitesses).

Pour le RCP8.5, on constate une augmentation importante de la vitesse du vent sur toute la zone étudiée en NDJ, et une augmentation au contraire très mesurée dans la partie Sud-Est ainsi qu'une légère diminution dans la partie Nord en FMA, toutes deux négligeables en comparaison des évolutions en NDJ<sup>45</sup>. Pour FMA, les rotations projetées des vecteurs de U10 sont également négligeables tandis qu'en NDJ, une rotation notable dans le sens trigonométrique des vecteurs de U10 (augmentation de la part de la composante méridionale) apparaît aux latitudes les plus équatoriales. Les modifications de ces vecteurs sont plus colinéaires plus au nord, avec même une légère rotation horaire dans le Nord-Ouest de la zone d'étude.

Ceci suggère la possibilité d'un déplacement futur de la ZCIT vers le sud durant le trimestre NDJ dans ARPEGE-Climat, une hypothèse dont la confirmation nécessiterait une analyse détaillée et à grande échelle de la dynamique atmosphérique comme celle présentée à la section §5.2.2 pour les modèles du CMIP6. Notons cependant que pendant les mois précédents (JASO), la ZCIT est bien déplacée vers le sud pour les modèles couplés du CNRM (dont le cœur dynamique est proche d'ARPEGE-Climat et de son modèle parent CNRM-CM5) sous le scénario SSP5-8.5 (proche de RCP 8.5), avec un renforcement de U10 au large de la Guyane (Figure 66 et Figure 73), tandis que ces modèles ne présentent pas de déplacement clair de la ZCIT en JFMA ainsi qu'un dipôle augmentation du vent sur le continent/diminution au large (Figure 65 et Figure 72). Ces éléments sont plutôt cohérents avec les évolutions différentes de U10 en NDJ et FMA dans ARPEGE-Climat (Figure 118) et avec notre hypothèse de migration de la ZCIT vers le sud en NDJ.

Pour Hs, les niveaux de retour décennaux historiques varient entre 3 m à quelques dizaines de kilomètres de la côte et plus de 4,2 m dans le Nord du domaine (Figure 119a). Pour Tm, les valeurs dépassent 15 voire 15,5 s au large mais chutent à moins de 13,5 s près de la côte (Figure 119b). Pour E, les contours ressemblent à ceux de Hs (en raison de la dépendance quadratique) et leurs valeurs s'étalent entre 50 et 250 m<sup>2</sup> s (Figure 119c). Pour U10, les niveaux de retour décennaux augmentent aussi en direction du large (Figure 119d). Elles sont un peu plus

<sup>45</sup>N.B. Les vitesses du vent et leurs évolutions restent faibles sur le continent pendant les deux périodes, à l'exception de la bande côtière où elles sont largement pilotées par le vent du large.



importantes sur le trimestre NDJ (jusqu'à 14.5 m/s) que pour FMA (14 m/s dans la partie Nord), bien que ces différences restent assez faibles (Figure 119e,f).

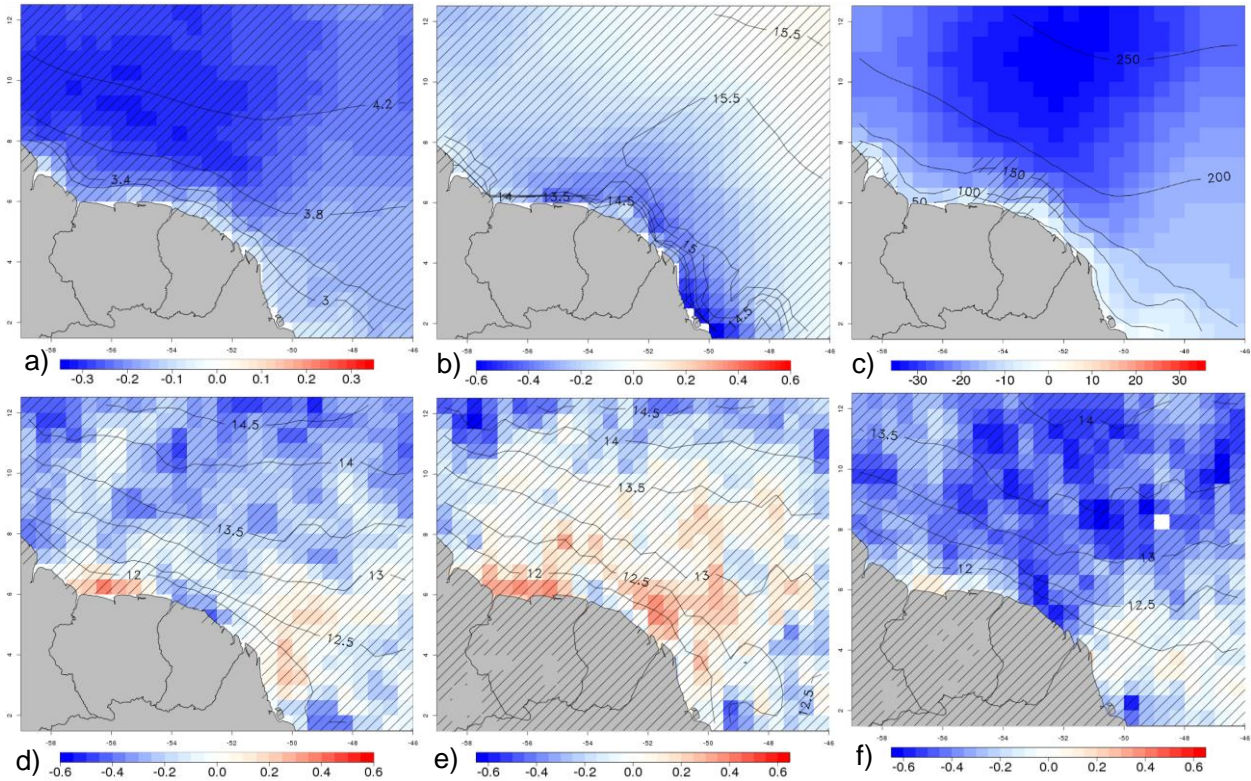


Figure 119 : Évolution RCP8.5 (2051-2079) - Hist-Model (1984-2012) des niveaux de retour décennaux en saison hivernale avec pour contour de référence Hist-Model (les hachures représentent les zones où les évolutions sont statistiquement significatives à 95 %), pour : a) Hs [m], b) Tm [s], c) E [m<sup>2</sup>s], et U10 (m/s) en d) NDJFMA, e) NDJ et f) FMA.

La comparaison avec RCP8.5 présente une diminution générale des hauteurs significatives décennales d'environ 5 %, avec les plus fortes diminutions (7-8 %) situées dans les parties Nord-Ouest et centrale du domaine, et des diminutions plus faibles (3-4 %) dans le quart Sud-Est et le long des côtes (Figure 119a). Pour Tm, on constate de très légères augmentations d'à peine 1-2 % du niveau de retour décennal dans le quart Nord-Est, et surtout des diminutions en s'approchant des terres, avec les valeurs les plus fortes (3-4 %) concentrées du littoral brésilien jusqu'au Suriname en passant par la Guyane (Figure 119b). Pour E, une diminution générale est mise en évidence comme pour Hs, mais celle-ci est d'environ 10 % avec des valeurs maximales atteignant les 15 % dans le centre de la partie Nord de la zone d'étude (Figure 119c), conséquence possible des diminutions conjointes de Hs et Tm. Pour U10, les signaux sont beaucoup moins cohérents spatialement (Figure 119d). La découpe selon les trimestres NDJ et FMA permet cependant de faire apparaître deux tendances distinctes : pour le premier trimestre, des augmentations des niveaux de retour décennaux de 1-5 % sur une large zone centrée au large des côtes guyanaises et des diminutions pouvant atteindre les 5 % aux extrémités de cette zone (Figure 119e) ; pour le second trimestre, une diminution générale de ~5 % au nord de 5°N et peu d'évolution dans la partie Sud-Est (Figure 119f).

Ces résultats sont cependant à nuancer du fait de possibles erreurs dans l'application des tests de significativité statistique. En effet, certaines zones où les évolutions sont faibles apparaissent pourtant comme significatives, notamment pour  $T_m$  et  $U_{10}$ . Un examen approfondi révèle que la fonction utilisée pour ce calcul renvoyait un intervalle de confiance de largeur nulle pour une durée de retour de 10 ans, d'où des résultats « significatifs » sur l'ensemble de la zone étudiée (sauf pour  $E$ ). Des intervalles de confiance de largeur non nulle apparaissent toutefois pour des durées de retour supérieures à 20 ans, suggérant qu'une analyse détaillée et plus robuste des valeurs extrêmes devrait être reproduite pour des durées de retour à 20 ans au moins.  $E$  étant issue d'une combinaison non linéaire de deux autres variables ( $E = H_s^2 * T_m$ ), cela pourrait rendre la distribution GEV moins précise et voir l'intervalle de confiance du niveau de retour s'agrandir plus rapidement.

Il existe une grande similitude entre la saisonnalité des extrêmes historiques de  $H_s$ ,  $U_{10}$  et  $E$  (Figure 120a,c,d), comme pour celle des moyennes (Figure 117a,c,d). En effet, pour ces trois variables, on constate une augmentation graduelle de la probabilité de dépassement des seuils respectifs avant d'atteindre un plateau ( $p=0.11$ ,  $0.11$  et  $0.15$  pour  $H_s$ ,  $U_{10}$  et  $E$ , respectivement) entre début janvier et mi-février, puis une diminution pour retrouver les valeurs initiales en fin de saison hivernale ( $0.01$ ,  $0.01$  et  $0.02$ , respectivement). Pour  $T_m$ , la probabilité que le maximum dépasse 13 s reste chaque jour assez stable à  $\sim 0.08$  du début de la saison jusqu'à mi-février, puis diminue jusqu'à atteindre  $0.03$  en avril (Figure 120b).

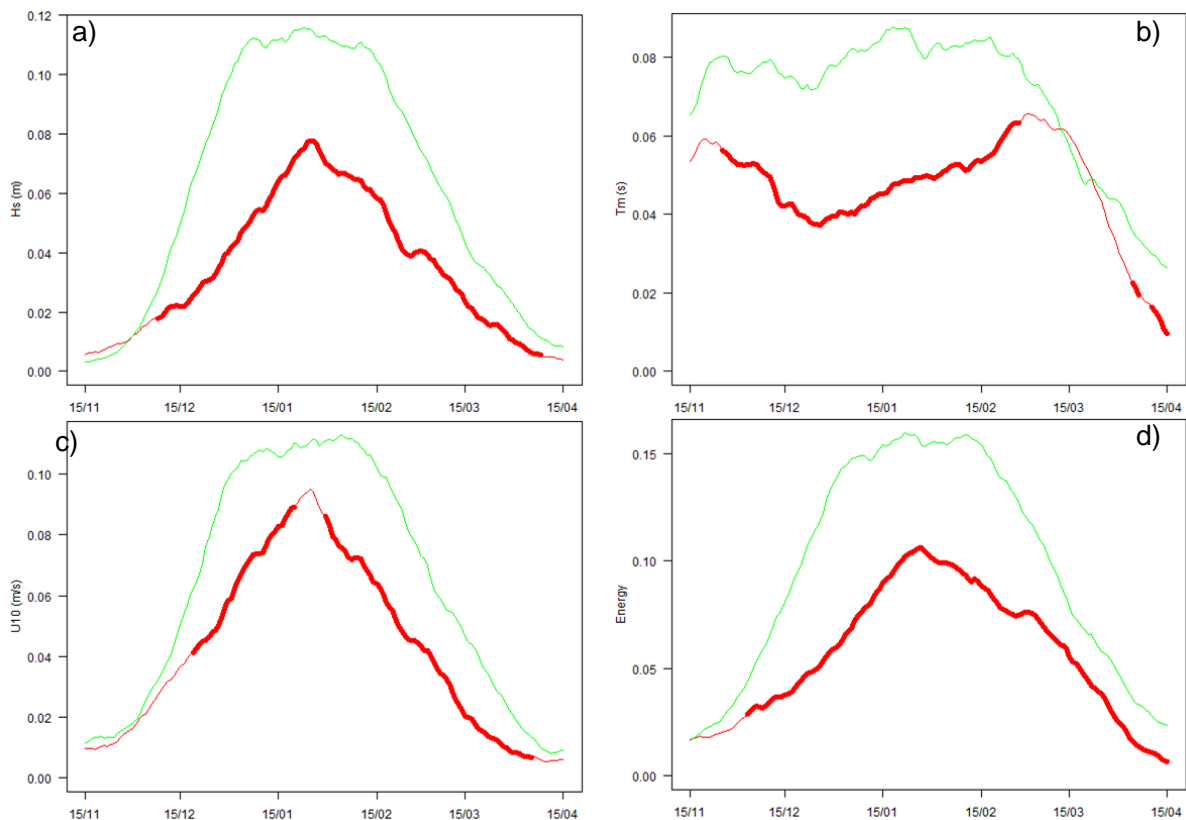


Figure 120 : Comparaison de la saisonnalité (en saison hivernale) pour Hist-Model (courbes vertes) et RCP 8.5 (courbes rouges, les traits gras représentant une différence avec Hist-Model significative à 95 %) de la probabilité journalière que a)  $H_s$  maximale soit supérieure à 3.5 m, b)  $T_m$  maximale soit supérieure à 13 s, c)  $U_{10}$  maximale soit supérieure à 13 m/s et d)  $E$  maximale soit supérieure à 110  $m^2 s$ .

La comparaison avec RCP8.5 fait ressortir des diminutions significatives pour Hs et E sur toute la saison hivernale, avec des probabilités maximales passant de 0.11 à 0.08 (resp. 0.15 à 0.10) pour Hs (resp. E). Pour U10, les valeurs de Hist-Model et RCP 8.5 sont très proches en novembre et début décembre, avec une diminution généralement significative sur le reste de la saison, la probabilité maximale passant de 0.11 à 0.09. Contrairement à Hist-Model, il n'y a pas de plateau pour Hs, U10 et E avec RCP 8.5, avec un pic étroit fin janvier. Pour Tm, la majeure partie des changements a lieu pendant les trois premiers mois et demi, avec une diminution significative du plateau qui passe de  $p=0.08$  pour Hist-Model à  $\sim 0.05$  pour RCP 8.5. Plus précisément, le plateau s'est creusé et les valeurs oscillent entre 0.06 en novembre, 0.04 au nouvel an et de nouveau 0.06 fin février. Peu de changements sont constatés après cette date, malgré une petite baisse significative sur les derniers jours de la saison hivernale avec un minimum passant de 0.03 à 0.01.

En comparant ces résultats avec ceux des niveaux de retour décennaux, on retrouve bien les diminutions constatées pour Hs, Tm et E (Figure 119a,b,c). Ce n'est en revanche pas le cas pour U10, qui présente une diminution de sa probabilité de dépassement de seuil extrême sur les  $\frac{3}{4}$  de la saison hivernale (Figure 118c), mais une augmentation du niveau de retour décennal près des côtes en NDJ (Figure 119e). La saisonnalité du dépassement de seuil ne s'intéresse en réalité qu'à celle des valeurs les plus importantes (car on utilise le maximum spatial, cf. §5.1.7), or celles-ci sont situées pour U10 à la bordure Nord de la zone d'étude, où on constate bien une diminution des niveaux de retour décennaux (Figure 119e). La probabilité de dépassement de seuil doit être calculée pour la valeur moyenne de la zone présentée en Figure 54, et non pour la valeur maximale, afin de faire ressortir les signaux d'augmentation (toutefois non significative) des valeurs extrêmes de U10 en NDJ (Figure A89).

Pour finir, la durée de retour pour RCP 8.5 correspondant aux niveaux de retour décennaux de Hist-Model est évaluée. Les résultats sont cohérents avec l'évolution des niveaux de retour décennaux : les zones qui présentaient une diminution des niveaux de retour pour RCP 8.5 (Figure 119) montrent ici une durée de retour future supérieure à 10 ans (Figure 121) et inversement pour une augmentation des niveaux de retour. Plus précisément, pour :

- Hs (Figure 121a) : sur le littoral guyanais, on passe à minimum 15 ans de durée de retour des événements historiquement décennaux, avec des valeurs dépassant les 25 ans plus au large et jusqu'à 35-40 ans ;
- Tm (Figure 121b) : les durées de retour futures oscillent entre 15 et 20 ans proche de la Guyane ;
- E (Figure 121c) : de l'ordre de 20-25 ans dans une grande zone centrale du domaine.

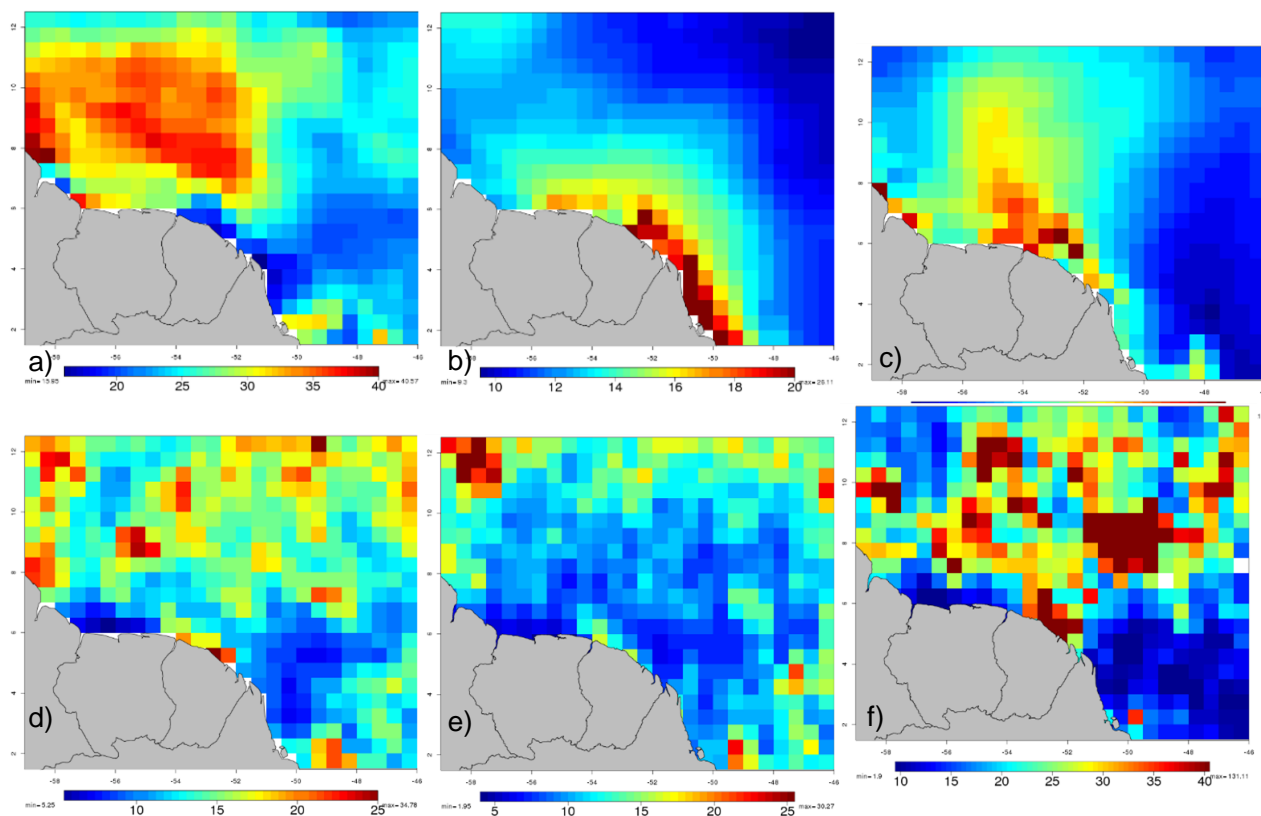


Figure 121 : Durées de retour (années) de RCP8.5 (2051-2079) correspondant aux niveaux de retour décennaux de Hist-Model (1984-2012) en saison hivernale pour : a) Hs, b) Tm, c) E, d) U10 en NDJFMA, e) U10 en NDJ et f) U10 en FMA.

Seul U10 se démarque avec des diminutions de la période de retour : sur NDJFMA, elle est réduite à 8 ans au large de l’embouchure de l’Oyapock et du Nord des côtes brésiliennes, et même à 5 ans au large du Suriname (Figure 121d). Sur NDJ, de faibles diminutions de la durée de retour (~1 an) sont mises en évidence sur une large zone au centre de la zone d’étude, avec des diminutions plus importantes au large du Suriname et des durées de retour ne dépassant pas les 5 ans (Figure 121e). Sur FMA, on constate cette fois-ci de faibles diminutions dans la partie Sud-Est et au large du Suriname (<1 an), et une augmentation marquée plus au Nord avec de nombreuses valeurs dépassent 35 années. Cependant, comme indiqué précédemment, les vagues sont largement décorréées du vent à 10 m dans la zone guyanaise de l’Océan Atlantique et plutôt dominées par les houles distantes, ce qui explique pourquoi la fréquence des états de mer extrêmes diminue alors que celle des vents extrêmes augmente.

## 5.3 DISCUSSIONS

Les études réalisées dans le cadre du projet GuyaClimat ont mis en évidence que certaines tendances se dégagent dans les projections futures pour la Guyane : un fort réchauffement, une diminution significative de la pluviométrie<sup>46</sup>, un renforcement du vent, une intensification des journées et nuits chaudes ainsi que des conditions de sécheresse, une raréfaction des jours de fortes pluies. Ces changements constituent autant de défis pour des secteurs économiques comme l'agriculture et la gestion de la ressource en eau, ou encore l'énergie du fait de la forte progression attendue des besoins en climatisation. La liste n'est pas exhaustive, l'impact de l'évolution de ces paramètres physiques pour les écosystèmes, la forêt amazonienne et la mangrove, ou encore la santé humaine compte tenu d'un risque d'hyperthermie amené à croître restant à déterminer dans le cadre de futures études. Dans le même temps, les projections futures du climat de vagues en saison hivernale au large de la Guyane montrent une diminution significative de l'énergie des vagues en lien avec celle de la hauteur et de la période des vagues et serait liée à la houle issue de l'Atlantique Nord et non de la mer du vent, compte tenu des projections de renforcement des alizés. Ce qui pourrait paraître comme une bonne nouvelle du fait de l'influence des vagues sur les risques littoraux, submersion et érosion en premier lieu, est à nuancer compte tenu de l'élévation inéluctable du niveau de la mer qui devrait au contraire jouer un rôle déterminant dans le renforcement à venir de ces risques pour la population qui se concentre sur la frange littorale à Cayenne, Kourou et ailleurs comme l'ont montrés les résultats d'augmentation du risque de submersions chroniques (§4) dans le contexte d'élévation du niveau de la mer en Guyane (§3). De plus, l'influence des bancs de vase d'origine amazonienne, dont l'interaction avec les vagues et la mangrove pilote largement la dynamique côtière, n'a pas été prise en compte, limitant ainsi la portée de ces résultats pour la bande côtière.

### 5.3.1 Évaluation et sélection des modèles CMIP6

Il est important de rappeler que les résultats concernant l'évolution des paramètres atmosphériques (températures, précipitations, vent) sont largement dépendants de l'approche méthodologique choisie, en particulier la sélection d'une poignée de modèles climatiques dans la base CMIP6 qui en comprend plus de 50. Si notre motivation était d'éliminer la majorité des modèles incapables de représenter correctement la structure, les variations saisonnières et interannuelles de la Zone de Convergence InterTropicale (ZCIT), qui jouent pourtant un rôle clé dans la dynamique du climat guyanais, il n'est pas exclu que notre approche ne nous ait pas toujours permis d'identifier les modèles les plus pertinents en passant à côté de certains biais rédhibitoires. De plus, l'absence de biais prononcés se produit parfois pour de mauvaises raisons, et n'est donc pas un gage de réalisme dans les projections futures, même si la sélection des modèles les moins biaisés reste à ce jour l'approche la plus raisonnable dont nous disposons.

Les travaux récents de Jiang *et al.* (2021) portant sur l'évaluation de la ZCIT, d'ENSO et de ses effets dans la région Atlantique tropical/Nord de l'Amérique du Sud au sein des modèles CMIP6 sont utiles pour discuter les choix réalisés. Les auteurs ont traité les données de 50 modèles CMIP6, dont 38<sup>47</sup> sont communs avec notre étude. Parmi ces derniers, seuls 5 modèles sont considérés par les auteurs comme capables de représenter fidèlement la climatologie (structure et saisonnalité) de la ZCIT : ACCESS-ESM1-5, CESM2-WACCM, MIROC6, NorESM2-LM et NorESM2-MM. De notre côté, nous avons identifié 13 modèles dont la ZCIT climatologique est considérée comme plus réaliste que les autres (Tableau 13), dont 10 font également partie de la

<sup>46</sup> Il est à noter que les travaux Moisan *et al.* (2013) estimaient un réchauffement de moindre amplitude comparé à la présente étude et ne concluaient pas sur une tendance significative de la pluviométrie à l'échelle de la Guyane.

<sup>47</sup> Ce chiffre ne tient pas compte des modèles BCC-ESM1 et MCM-UA-1-0, initialement considérés ici mais éliminés du fait de précipitations trop faibles sur l'océan (cf. 5.2.1).



base traitée par Jiang *et al.* (2021) : ACCESS-ESM1-5, CESM2-WACCM, FGOALS-g3, GFDL-CM4, GISS-E2-1-H, INM-CM4-8, INM-CM5-0, MIROC-ES2L, MIROC6 et NorESM2-MM. Si les deux listes ne coïncident pas, tous les modèles identifiés par Jiang *et al.* (2021) l'ont également été ici (dont NorESM2-MM, finalement retenu pour la descente d'échelle sur la Guyane), sauf NorESM2-LM.

D'après notre analyse, ce modèle représentait bien certaines métriques de la ZCIT (pente, précipitations moyennes, extension zonale) mais pas celle que nous estimons la plus importante : la latitude (Tableau 13). Cependant, des seuils ont été fixés arbitrairement pour nous permettre d'en juger : biais inférieur à  $\pm 1.5^\circ$  et RMSD inférieur à  $4^\circ$ . NorESM2-LM présente un biais de  $-1.785^\circ$  et un RMSD de  $4.72^\circ$ , prenant la 6<sup>e</sup> et la 7<sup>e</sup> places au sein des modèles dépassant l'un ou l'autre de ces seuils, au nombre de 39 et 38, respectivement (Tableau 13). Ainsi, d'après notre évaluation ce modèle se situe autour de la 20<sup>e</sup> place sur 50 au regard de ses performances pour représenter la latitude de la ZCIT, et présente surtout le biais systématique de la ZCIT déplacée au sud de l'équateur en début d'année : jusqu'à près de  $5^\circ\text{S}$  en JFM et FMA (Figure 56, A49). De leur côté, Jiang *et al.* (2021) se sont basés sur la corrélation 2D entre les diagrammes Hovmöller temps-latitude des précipitations saisonnières (moyennées zonalement dans l'Atlantique tropical) issues des modèles CMIP6 d'une part et de CMAP d'autre part, avec un seuil fixé à 0.8 pour identifier les modèles réalistes. Leur analyse fait intervenir les migrations saisonnières nord-sud des pluies climatologiques mais aussi l'intensité des pluies et leur structure méridionale : ce sont ces derniers aspects qui ont dû dominer la corrélation pour NorESM2-LM, car le diagramme correspondant présenté par les auteurs dans le matériel supplémentaire de l'article montre clairement que ce modèle n'est pas exempt du biais en latitude en début d'année. Selon nous, c'est rédhibitoire pour la représentation du climat guyanais.

À l'inverse, 6 des modèles que nous considérons comme réalistes ne le sont pas pour Jiang *et al.* (2021) : FGOALS-g3, GFDL-CM4, GISS-E2-1-H, INM-CM4-8, INM-CM5-0 et MIROC-ES2L. Si ces modèles ne dépassent pas le seuil de corrélation de 0.8, MIROC-ES2L, retenu pour la descente d'échelle sur la Guyane, en est cependant très proche (3<sup>e</sup> meilleur score sur 41 modèles ne dépassant pas le seuil). FGOALS-g3, GFDL-CM4 (3<sup>e</sup> modèle retenu pour la descente d'échelle) et INM-CM5-0 présentent quant à eux des corrélations supérieures à 0.7, et se situent dans la première moitié voire le premier tiers du classement. Seuls GISS-E2-1-H et INM-CM4-8 (qui n'ont pas été retenus pour la descente d'échelle) présentent des valeurs plus faibles autour de 0.60-0.65, avec une dizaine ou douzaine de modèles seulement qui présentent des valeurs inférieures à celles-ci. Ainsi, même s'il existe des différences entre les listes de modèles réalistes pour leur représentation climatologique de la ZCIT élaborées par les deux études, globalement les évaluations réalisées restent plutôt cohérentes, ce qui tend à confirmer la robustesse de notre analyse.

Un autre élément analysé par Jiang *et al.* (2021) est la capacité des modèles à représenter le pic d'ENSO en NDJ, une caractéristique bien plus répandue puisqu'elle concerne 35 des 50 modèles étudiés, dont les 3 modèles retenus pour la descente d'échelle. Par manque de temps, elle n'a pas été évaluée dans notre étude qui s'est centrée sur l'évaluation des téléconnexions dans l'Atlantique tropical. Parmi les 10 modèles concernés par cette dernière (voir plus haut), seuls 3 ne sont pas capables de représenter la saisonnalité du pic d'ENSO d'après Jiang *et al.* (2021) : ACCESS-ESM1-5, GISS-E2-1-H et MIROC6, avec un pic en février, juillet et octobre, respectivement, contre décembre pour les observations HadISST1. Si le pic simulé par ACCESS-ESM1-5 et MIROC6 n'est séparé du pic observé que de 2 mois, qui correspond au déphasage entre les pics des phases El Niño et La Niña (Figure 47), GISS-E2-1-H a plus de mal à représenter la synchronisation saisonnière d'ENSO. L'amplitude du signal, mesurée par la moyenne annuelle des écarts-type des valeurs mensuelles de l'indice ONI, est cependant correctement reproduite par ce dernier modèle, alors qu'ACCESS-ESM1-5 et MIROC6 la sous-estime et la surestime, respectivement. Après notre évaluation des téléconnexions d'ENSO, ACCESS-ESM1-5 est

finalement écarté car il ne reproduisait pas correctement la structure des anomalies de précipitations en JFM, et car ces dernières étaient par ailleurs très faibles en comparaison des observations (Tableau 1). GISS-E2-1-H, qui remplit ces deux critères (à la marge seulement), et MIROC6, biaisé en termes de structure mais présentant des anomalies de précipitations de l'ordre des observations (Tableau 1), sont retenus à l'issue des analyses des simulations historiques dans l'échantillon de 8 modèles soumis à l'analyse des projections à grande échelle (cf. §5.2.2). Qualitativement, la structure des anomalies de précipitations est correcte dans ces deux modèles, même si le signal s'étend trop vers le sud (Figure 62, Figure 63). Ils n'ont finalement pas été retenus pour la descente d'échelle : les données quotidiennes de GISS-E2-1-H n'étaient pas disponibles, et l'inclusion de MIROC6 ne permettait pas d'augmenter le contraste des projections futures dans l'échantillon final.

Au sein de celui-ci, seul NorESM2-MM est considéré par Jiang *et al.* (2021) comme capable de représenter à la fois ENSO (avec un pic en décembre, et toutefois une certaine surestimation des anomalies de TSM) et la climatologie des précipitations (seul modèle avec une corrélation 2D supérieure à 0.9). D'après les auteurs, la représentation des téléconnexions d'ENSO est substantiellement améliorée lorsque seuls de tels modèles (au nombre de 6 dans leur étude) sont pris en compte au lieu de l'ensemble complet. L'originalité de leurs travaux est qu'ils montrent que ces téléconnexions ont lieu toute l'année, contrairement à la notion répandue les restreignant au printemps. Notre exploitation des observations HadISST1 et GPCP corrobore leurs résultats (Figure 60, Figure 61). Pour simplifier l'analyse équivalente appliquée aux modèles CMIP6, nous nous sommes cependant limités au trimestre JFM, un de ceux pour lesquels les anomalies des précipitations sont parmi les plus élevées pendant El Niño/La Niña (cf. §5.2.1). D'après Jiang *et al.* (2021), les anomalies sont d'ailleurs maximisées en DJF et AMJ. À l'avenir, il serait intéressant de s'inspirer de leur approche pour améliorer le processus de sélection des modèles basé sur les téléconnexions d'ENSO.

Dans l'ensemble et considérant les travaux de Jiang *et al.* (2021), les évaluations que nous avons réalisées n'ont pas mis à jour de défaillance majeure, ce qui nous permet de conclure que les 3 modèles retenus pour la descente d'échelle sont satisfaisants. Ils pourraient cependant être complétés par d'autres (ce que nous avons fait dans un sens avec l'inclusion des modèles du CNRM). Dans un premier temps, il serait envisageable de ne pas sélectionner de modèles à l'issue de l'analyse des projections à grande échelle, ce qui permettrait de réaliser la descente d'échelle avec 2 modèles supplémentaires : MIROC6, ainsi que CESM2-WACCM (pour les pluies seulement, cf. §5.2.3). Par la suite, une évaluation d'ENSO et une extension de l'analyse des téléconnexions à toute l'année pourraient permettre d'améliorer la sélection. Une éventuelle disponibilité accrue de données CMIP6 pourrait également permettre d'augmenter la taille de l'échantillon, le cas échéant. L'objectif restant de limiter les analyses territoriales aux seuls modèles considérés comme dynamiquement réalistes dans la région, en s'affranchissant au maximum de toutes contraintes supplémentaires afin d'enrichir les scénarii possibles pour la Guyane.

### 5.3.2 Méthodes et descentes d'échelle

L'approche suivie ici est une méthode statistique (correction Q-Q) qui a largement fait ses preuves, comme dans l'Hexagone ou les Antilles par exemple (Déqué 2007, Cantet *et al.* 2021). Elle présente entre autres l'avantage de la simplicité et de coûts numériques faibles, ce qui n'est pas négligeable lorsqu'il s'agit de traiter les données quotidiennes issues de 15 simulations multi-décennales (5 modèles CMIP6, expériences historique et SSP2-4.5/SSP5-8.5, 1980-2014/2015-2100). Cependant, elle reste tributaire de la disponibilité de séries longues observées, qui reste parcellaire, surtout dans l'intérieur des terres ainsi que pour le vent de surface. Si la population guyanaise est essentiellement concentrée sur le littoral où le réseau de mesures est plus dense,

certaines problématiques requièrent idéalement de disposer de projections moins éparses dans l'intérieur, comme la conservation de la forêt amazonienne et de ses écosystèmes ou encore la gestion de la ressource en eau (qui nécessite des informations à l'échelle des bassins versants). Une densification du réseau de mesures n'étant pas à l'ordre du jour (sans compter qu'il faudrait attendre au moins 30 ans pour disposer de séries longues), les alternatives à ce stade seraient l'utilisation de données satellite appliquées à la correction Q-Q ou la descente d'échelle dynamique reposant sur la modélisation numérique du climat régional.

Si l'estimation des pluies par télédétection a fait ses preuves en Guyane avec une utilisation opérationnelle à Météo-France (Beaufort *et al.* 2019), celle des températures de surface (Wan 2014) est plus délicate pour plusieurs raisons : heures de passage du satellite MODIS ne coïncidant pas avec les températures minimales et maximales journalières, absence de mesures à travers les nuages par le capteur infra-rouge induisant des biais saisonniers et spatiaux, échantillonnage des températures de la canopée et non de la surface dans les zones recouvertes par la forêt... Quant au vent de surface, s'il reste possible de l'estimer au-dessus de l'océan avec des mesures diffusiométriques comme celles des missions QuikSCAT (<https://podaac.jpl.nasa.gov/QuikSCAT>) et ASCAT (Anderson *et al.* 2011), ce n'est à notre connaissance pas le cas au-dessus de la terre, limitant ainsi la portée des corrections corrigées aux seules questions marines. De plus, les archives satellite ont des profondeurs temporelles inférieures à 30 ans, même pour les plus longues : 17 ans pour les précipitations issues de la mission TRMM, 22 ans pour les températures MODIS, 10 ans pour les vents QuikSCAT. Ainsi, si l'utilisation des précipitations télédéteectées pourrait fournir une voie d'amélioration possible pour la descente d'échelle statistique des pluies, les réseaux d'observation au sol continuent à limiter la portée de la descente d'échelle statistique des autres variables atmosphériques en Guyane.

D'un autre côté, la descente d'échelle dynamique reposant sur l'utilisation de modèles climatiques régionaux constitue une piste prometteuse. Ces modèles à aire limitée, qui présentent l'avantage d'une résolution spatiale accrue (maille de ~50 km ou moins) par rapport aux modèles globaux, permettent aussi la représentation explicite des processus dynamiques locaux et de fine échelle, contrairement aux approches statistiques. Ils se nourrissent d'informations aux frontières issues de modèles climatiques globaux comme ceux des CMIP5 et CMIP6. En ce sens, les exercices régionaux CORDEX (Coordinated Regional Climate Downscaling Experiment – Reboita *et al.* 2022) comme CORDEX-Cam pour l'Amérique Centrale ou CORDEX-Sam pour l'Amérique du Sud, dont les domaines incluent la Guyane, fournissent des bases de données multi-modèles qu'il sera intéressant d'exploiter à l'avenir. Par ailleurs, une résolution encore accrue (maille de ~10 km) est possible avec l'utilisation de certains modèles régionaux comme ALADIN-Climat (pour Aire Limitée Adaptation dynamique Développement InterNational – Cantet *et al.* 2014, Nabat *et al.* 2020) développé par un consortium comprenant le CNRM et Météo-France et pour lequel une configuration dédiée pour la région Antilles-Guyane est actuellement à l'étude. Une expérience concluante a d'ailleurs été réalisée récemment avec ce modèle pour le Sud-Ouest de l'Océan Indien et en particulier sur une région ultramarine tropicale, La Réunion (Leroux *et al.* 2021).

Bien qu'un forçage de ce modèle par les modèles du CMIP6 identifiés au cours du projet GuyaClimat soit envisageable, des simulations forcées par un seul modèle (comme CNRM-CM6-1 ou CNRM-ESM2-1 par exemple) constitueraient déjà un complément pertinent à l'exploitation des ensembles CORDEX en permettant l'exploration des effets liés à la haute résolution. À condition de disposer d'un domaine de calcul suffisamment étendu, ALADIN-Climat pourrait aussi permettre de réduire les biais systématiques des modèles CMIP dans leur représentation de la ZCIT grâce à la dynamique propre du modèle régional. De tels développements sont envisagés pour les années à venir afin de poursuivre l'amélioration de la représentation de l'évolution future du climat en Guyane.

### 5.3.3 Indices climatiques, impacts sectoriels et risque d'hyperthermie

Le travail exploratoire entamé dans le cadre de ce projet pourrait être poursuivi. En particulier, la liste des indices climatiques basés sur les données de température et précipitations et appliqués aux secteurs de l'eau et de l'agriculture mériterait d'être complétée. Des indices de durée des événements extrêmes ou des conditions de sécheresse pourraient être inclus, tout comme des indices basés sur le dépassement de seuils sur plusieurs jours consécutifs, ou encore des indices hybrides combinant températures et précipitations afin de mieux caractériser l'évolution d'événements composés (*compound events* en anglais) dont les impacts peuvent être particulièrement sévères (Zscheischler *et al.* 2018, Ridder *et al.* 2020, 2021).

Les indices d'impact pourraient également être étendus à d'autres secteurs. En premier lieu, des indices basés sur les projections du vent de surface, en particulier les conditions de vent fort voire extrême, n'ont pas été inclus faute de temps, même si les projections issues de CMIP6 et d'ARPEGE-Climat pointent vers la possibilité d'un renforcement du vent moyen et des vents décennaux, au moins pendant une partie de l'année. De tels indices liés au vent seraient utiles dans divers domaines comme la sécurité des personnes et des biens (vigilance météorologique pour vent violent), l'énergie éolienne et la demande énergétique en général (complémentarité ou non avec d'autres sources comme le solaire et la biomasse), ou encore la santé humaine et la climatisation. En effet le confort humain dans un bâtiment ventilé ne dépend pas seulement de la température de l'air (cf. degrés-jour de climatisation, §0), mais aussi du taux d'humidité, de la vitesse et de la direction du vent ainsi que du rayonnement.

Cette dernière observation rejoint la notion de risque d'hyperthermie, *cad* de température corporelle trop élevée pour l'organisme, résultant de conditions à la fois chaudes et humides (voire peu ventilées et/ou très ensoleillées). Le métabolisme du corps humain permet en effet d'évacuer l'excès de chaleur grâce à l'évaporation et la sudation. Cependant cette capacité diminue selon l'humidité ambiante : plus l'air est humide, moins ce processus d'évaporation est efficace et plus la température ressentie (ou « température humide ») est élevée. Au-delà d'un seuil théorique de 35 °C de température humide, le corps ne parvient plus à évacuer la chaleur absorbée et l'exposition prolongée à de telles conditions présente un risque pour la santé, y compris léthal. Les résultats d'une étude clinique récente montrent que ce seuil pourrait être bien moins élevé qu'envisagé, autour de 30.5 °C, augmentant ainsi considérablement ce risque déjà accru dans un contexte de changement climatique (Vecellio *et al.* 2022). Zhang *et al.* (2021) ont cartographié l'évolution future du risque d'hyperthermie à l'échelle globale en se basant sur l'analyse de la température humide issue des projections de CMIP5, et mis ainsi en évidence un risque particulièrement prononcé dans les tropiques où sont situés la plupart des territoires ultramarins et la Guyane en premier lieu. Le rapport du GIEC de 2022 et d'autres études récentes basées sur différentes approches sont parvenues sensiblement aux mêmes conclusions (Mora *et al.* 2017, Xu *et al.* 2020, Vargas Zeppetello *et al.* 2022 ; IPCC, 2022).

Il est donc important de définir un indicateur pour la santé rendant compte de ce phénomène. Les projections des modèles CMIP6 incluent des données d'humidité relative de surface, y compris au pas de temps quotidien voire à plus haute fréquence (et/ou des données des maxima et minima journaliers). De plus, 3 stations en Guyane disposent de longues séries horaires et quotidiennes observées depuis 1988, ainsi que des séries concomitantes de températures (Tableau A4) : Cayenne-Matoury (littoral), Maripasoula (Sud) et Saint-Georges (Est). La production de projections corrigées d'humidité avec la méthode Q-Q est donc permise pour ces 3 stations et permettra d'évaluer plus précisément le risque d'hyperthermie pour la Guyane.

En attendant et en première approche, nous avons cherché à évaluer si la combinaison de projections corrigées de température et de connaissances déduites à partir des observations conjointes de température et d'humidité pouvaient fournir une estimation du risque futur.

L'examen des observations historiques horaires montre que température et humidité varient généralement en sens inverse (Figure 122a), en lien avec les cycles diurne (plus chaud et moins humide la journée que la nuit) et saisonnier (plus chaud et moins humide la journée en saison sèche qu'en saison des pluies) et conformément aux connaissances sur le sujet (Héritier 2011, voir aussi <https://meteofrance.gf/fr/actualites/des-temperatures-encore-supportables-en-guyane>). Le calcul à partir des valeurs de température et d'humidité de l'indice de chaleur ressentie de la NOAA (ou *heat index* HI, Rothfus 1990), similaire à la température humide mais différant par ses valeurs et sa nature paramétrique<sup>48</sup>, permet d'attribuer à chacun des jours d'une période historique de 34 ans les conditions les plus sévères rencontrées au cours des 24 heures écoulées. Ces conditions sont données à titre purement indicatif car les températures ressenties sont variables d'un individu à l'autre, et d'une population à l'autre en fonction du climat local : la population guyanaise est certainement plus habituée aux conditions chaudes et humides que la plupart des résidents américains pour qui la classification de la NOAA est conçue. Ainsi, pour les 3 stations de Guyane, des conditions de « vigilance extrême » ont lieu 81-91 % du temps, pendant la période 1988-2021, suivies de conditions de « vigilance » (6-17 % du temps). Les conditions de « danger » sont nettement plus rares, de l'ordre de 2.5-9.0 jours par an en moyenne selon la station (4.4 à Saint-Georges, Figure 122a). Les conditions de « danger extrême » sont extrêmement rares : elles ont eu lieu seulement 4 fois à Maripasoula en 34 ans, 2 fois à Saint-Georges et jamais à Cayenne-Matoury<sup>49</sup>. Au premier ordre, c'est la température plutôt que l'humidité qui contrôle la chaleur ressentie : même si le nuage de points a tendance à s'aligner avec les contours de HI à cause de la relation inverse entre température et humidité, les conditions dangereuses ont typiquement lieu pour des températures élevées et des valeurs d'humidité faibles à modérées.

---

<sup>48</sup>La température humide, ou température du thermomètre mouillé, est une variable physique.

<sup>49</sup> Cette station du littoral bénéficie en effet d'une brise rafraîchissante, contrairement aux deux autres situées à l'intérieur des terres



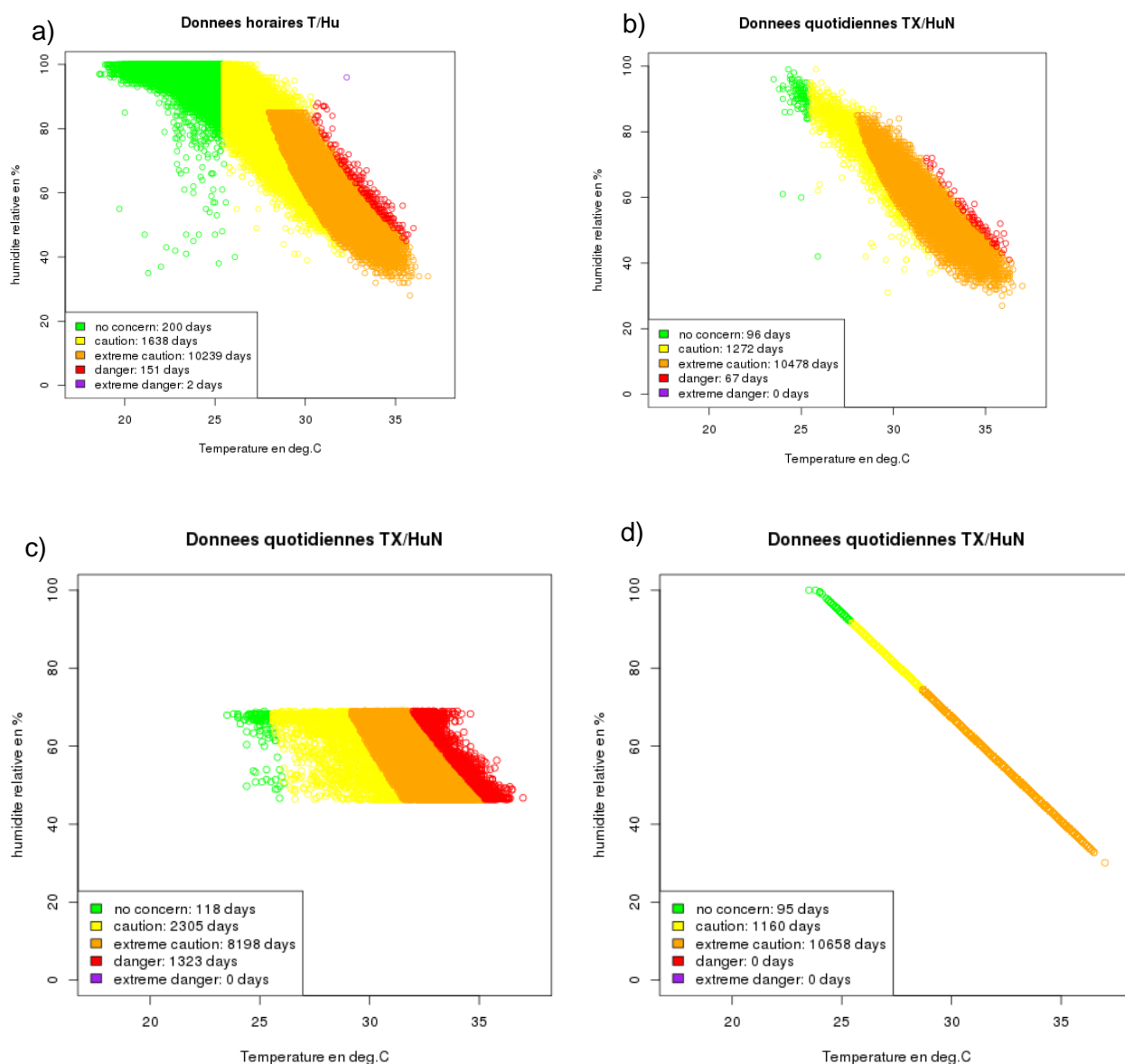


Figure 122 : Diagrammes de dispersion température-humidité à Saint-Georges, obtenus à partir d'observations a) horaires et b) quotidiennes (température maximale et humidité minimale) sur la période 1988-2021. Les données quotidiennes d'humidité minimale sont remplacées c) par leurs normales journalières et d) par des données reconstruites à partir d'un modèle de régression linéaire des températures maximales déduit du diagramme b. Les couleurs correspondent à l'indice de chaleur ressentie HI de la NOAA (Rothfus 1990), avec le décompte du nombre de jours concernés par des conditions sans préoccupation particulière (vert,  $HI < 26.7\text{ °C}$ ), de vigilance (jaune,  $26.7\text{ °C} \leq HI < 32.8\text{ °C}$ ), de vigilance extrême (orange,  $32.8\text{ °C} \leq HI < 40\text{ °C}$ ), de danger (rouge,  $40\text{ °C} \leq HI < 51.7\text{ °C}$ ) et de danger extrême (violet,  $HI \geq 51.7\text{ °C}$ ).

Les projections corrigées ayant une fréquence journalière, que ce soit pour la température (déjà disponible) ou l'humidité (en projet), cette analyse doit être répétée avec des données quotidiennes. Compte tenu de la relation inverse entre les deux variables au cours de la journée, nous avons testé 3 paires de données : température et humidité moyennes (sur 24 heures), température minimale et humidité maximale (nuit), température maximale et humidité minimale (journée). C'est cette dernière paire qui a permis de reproduire au mieux les résultats déduits des données horaires, à la fois en termes de structure générale du nuage de points et de décompte des jours en fonction des conditions ressenties, même si les conditions de « danger » sont jusqu'à 3 fois moins fréquentes qu'avec les données horaires et que les conditions de « danger extrême » n'ont pas pu être reproduites (Figure 122b).

Même si les données quotidiennes d'humidité observée sont disponibles, nous avons ensuite tenté de déterminer si l'on pouvait retrouver les statistiques des conditions de chaleur ressentie avec les seules données de température, car c'est tout ce dont nous disposons actuellement pour le climat futur. Lorsque des normales journalières lisses (obtenues par interpolation linéaire des normales mensuelles) d'humidité sont utilisées à la place des données journalières, le nuage de points est déformé et les conditions de danger sont très largement surestimées (Figure 122c). En effet, lorsque la température est élevée, typiquement au-dessus des normales, l'humidité est généralement plus faible que la normale, maintenant ainsi des conditions supportables de chaleur ressentie. Le remplacement des observations par les normales a ainsi pour effet d'aligner le nuage sur l'axe des abscisses en limitant les variations d'humidité (diurne) entre 45 et 70 % environ, et de surestimer l'humidité et donc la chaleur ressentie lors des journées chaudes. Si l'application d'un modèle de régression linéaire pour prédire les valeurs d'humidité à partir de celles de température permet de représenter raisonnablement bien l'occurrence des conditions de chaleur ressentie les plus courantes, l'approximation du nuage de points par une simple droite ne permet pas l'obtention de valeurs d'humidité suffisantes pour entrer dans la zone « dangereuse » lorsque les températures sont élevées (Figure 122d). L'application supplémentaire de bruit pour générer une dispersion autour de la droite ne serait vraisemblablement pas satisfaisante car cette dispersion n'est pas homogène le long du nuage de points (Figure 122b). À moins d'utiliser des modèles statistiques plus avancés basés sur un apprentissage des données observées, sans garantie de résultat, nous concluons qu'il n'est pas raisonnable d'évaluer le risque futur d'hyperthermie sans projections d'humidité obtenues à partir de modèles dynamiques de climat. Avec l'élévation marquée des températures projetées, on peut s'interroger sur la façon dont évoluera le nuage de points observé (Figure 122a,b) : l'humidité va-t-elle simplement décroître en proportion, prolongeant ainsi le nuage actuel ? Ou se maintiendra-t-elle proche des valeurs actuelles, provoquant ainsi la translation du nuage dans la zone dangereuse ? Les études globales (Mora *et al.* 2017, Xu *et al.* 2020, Zhang *et al.* 2021, Vargas Zeppetello *et al.* 2022) suggèrent que ce dernier scénario est plus probable. Si nos projections d'élévation marquée des températures et d'assèchement comparativement plus modéré (dans le sens d'une diminution de la pluviométrie), ainsi que des tendances statistiquement significatives de légère diminution de l'humidité observée à long terme sur les 3 stations (non montrées ici) vont également dans ce sens, il faudra attendre la disponibilité des projections territoriales d'humidité avant de pouvoir conclure.

#### 5.3.4 Projections futures du climat de vagues

La large cohérence des résultats obtenus d'une part pour les vagues à partir de COWCLIP et MFWAM, et d'autre part pour le vent sur l'océan à partir de CMIP6 et ARPEGE-Climat, nous permet d'établir les projections futures présentées ici avec confiance. Il n'en reste pas moins que diverses voies d'amélioration peuvent être envisagées pour de futures études. Une piste prometteuse concerne la correction des projections futures obtenues avec MFWAM, avec une méthode de type quantile-quantile par exemple. Après les travaux pionniers du BRGM et de

Météo-France (Charles *et al.* 2012), cette approche a récemment bénéficié d'un regain d'intérêt car non seulement elle permet de débiaiser les simulations historiques, mais elle a aussi une influence sur les projections futures et pourrait contribuer à réduire les incertitudes associées, y compris pour les extrêmes (Lemos *et al.* 2020a, 2020b, Meucci *et al.* 2020, Lobeto *et al.* 2021, Toimil *et al.* 2021). Comme pour la correction Q-Q des variables atmosphériques, un pré-requis est de disposer d'une référence historique robuste sur une période suffisamment longue. Les données de référence utilisées ici pour la validation des simulations historiques réalisées avec MFWAM ne remplissent pas forcément toutes les conditions : ERA5 présente certains biais dont une sous-estimation des hauteurs de vague, ESA-CCI ne permet l'estimation que des hauteurs, les houlographes CANDHIS n'ont pas la profondeur temporelle nécessaire et souffrent de manques dans les données. L'alternative serait d'utiliser une simulation de référence ayant été extensivement validée, comme le *hindcast* GOW2 (Perez *et al.* 2017) utilisé par Lemos *et al.* (2020a) pour la correction de biais de leurs projections du climat de vagues.

D'autres améliorations sont envisageables à l'avenir. L'analyse des biais du modèle MFWAM pourrait être complétée pour la direction des vagues avec les données ERA5, et ainsi permettre une comparaison avec des données s'étalant sur une période plus longue que celles des bouées. Il serait également intéressant d'approfondir l'analyse GEV en considérant des périodes de retour plus longues : 20, 50 ou 100 ans par exemple. Ceci aurait le double avantage de mettre en pratique la méthode d'évaluation de la significativité statistique des évolutions futures, qui présente des limitations pour une période de retour de 10 ans (cf. §0), et d'étudier l'évolution des extrêmes selon leur rareté. Il pourrait aussi être intéressant d'évaluer la représentation de la ZCIT dans ARPEGE-Climat afin de clarifier son influence sur les biais mis en évidence pour le vent de surface. Enfin, l'utilisation des modèles CMIP6 pour le forçage de MFWAM avec les scénarii (SSP2-4.5 et SSP5-8.5) et l'horizon temporel (2015-2100) considérés pour l'évolution des variables atmosphériques permettrait d'homogénéiser les approches entre les projections pour les vagues et l'atmosphère. De la même manière, il sera utile d'examiner les projections de vagues d'un futur exercice COWCLIP utilisant des modèles de vagues alimentés par les projections du CMIP6 (au lieu du CMIP5 comme c'est le cas actuellement).



## 6. Conclusion

Le changement climatique est un phénomène global causé par les émissions de gaz à effet de serre des activités humaines. Les résultats des travaux du GIEC mettent en évidence les conséquences à l'échelle globale mais également régionale. Afin d'appuyer les gestionnaires et les acteurs locaux, il est nécessaire d'affiner les projections à l'échelle du territoire. La présente étude GuyaClimat s'est ainsi appuyée sur (i) des relevés de terrain, (ii) une large gamme de méthodes dynamiques et statistiques, (iii) des jeux de données d'observations et (iv) des ensembles de simulations climatique futures et des scénarios climatiques utilisés par le GIEC pour mieux comprendre et quantifier les impacts du changement climatique à l'échelle du territoire Guyanais au XXI<sup>ème</sup> siècle. Plus spécifiquement, les changements ont été quantifiés sur des paramètres physiques (*i.e.* niveau de la mer, température, précipitations, vent, vagues) et les impacts qui en découlent : *c-à-d* les zones basses potentiellement exposées aux submersions chroniques en milieu urbain et des indices sectoriels (*p.ex.* jours secs, fortes pluies, degrés-jours de climatisation, etc).

L'étude GuyaClimat a consacré un pan important de l'analyse à la validation des méthodes employées mais également à la validation des performances des modèles climatiques utilisés en comparant les jeux de données observationnels avec les simulations historiques. Cette étape de validation a eu pour objectif principal d'augmenter la confiance dans la robustesse des projections futures qui ont été réalisées. Nous avons ainsi pu valider nos méthodes et jeux de données pour la réalisation de projections du niveau de la mer, projections des zones basses potentiellement exposées aux submersions chroniques et projections de paramètres météorologiques.

Les projections du niveau marin relatif à l'échelle de la Guyane (par rapport à la période 1986-2005) donnent les résultats suivant :

- à l'horizon temporel 2050, la médiane de la remontée du niveau marin est de 0.24 m (likely range [0.18 ; 0.31] m) pour le scénario climatique RCP2.6 (scénario optimiste) et de 0.28 m (likely range [0.21 ; 0.36] m) pour le scénario RCP8.5 (scénario pessimiste) ;
- à l'horizon temporel 2100, la remontée du niveau marin est de 0.46 m (likely range [0.29 ; 0.64] m) pour le scénario RCP2.6 et de 0.84 m (likely range [0.59 ; 1.17] m) pour le scénario RCP8.5 ;
- nos projections n'excluent pas la possibilité d'une élévation de plus de 2 m à la fin du XXI<sup>ème</sup> siècle (scénario high-end).

L'impact de la remontée du niveau marin sur les submersions chroniques (se produisant à marée haute par temps calme) est caractérisé en ramenant les projections de remontée de niveau moyen dans le référentiel NGG77 et en y superposant les niveaux d'eau maxima journaliers liés à la marée. Le croisement de ces valeurs de niveau avec un modèle numérique de terrain (MNT) permet de cartographier les zones basses pouvant être touchées par les submersions chroniques. Les cartes ont été réalisées sur 3 secteurs : Cayenne, Kourou et Mana. Les calculs de la superficie des zones sous le maximum du niveau d'eau journalier au moins 1jour/an, ont montré tout d'abord que Mana apparait comme le site présentant la plus grande superficie de zones basses potentiellement exposées aux submersions chroniques actuellement (référence en 2020). Au cours du XXI<sup>ème</sup> siècle, nos projections révèlent cependant que, relativement à la situation actuelle, la superficie de zone basse augmente plus à Cayenne et Kourou qu'à Mana. En particulier, si le changement climatique emprunte une trajectoire de réchauffement intermédiaire (RCP4.5) et que les mouvements verticaux du sol restent stables, la superficie des ZB<sub>MJ</sub> augmentera de 50 % à Cayenne et Kourou entre 2020 et 2100. Si en revanche le



réchauffement est important (RCP8.5) et qu'une subsidence locale est observée, alors cela pourrait se traduire en une augmentation de 100 % des superficies des ZB<sub>MJ</sub> à Cayenne et Kourou à l'horizon 2100.

Nos méthodes de caractérisation et cartographie des ZB<sub>MJ</sub> présentent certes des limites mais constituent un premier outil d'aide à la décision auprès des gestionnaires, et peuvent être dupliquées sur d'autres secteurs non pris en compte dans le cadre de cette étude. Pour une caractérisation plus fine, des acquisitions de terrains supplémentaires et des outils de modélisation hydrodynamique peuvent être déployés.

Après identification d'un échantillon de modèles climatiques qui ont démontrés leur aptitude à simuler la variabilité synoptique qui joue un rôle prépondérant sur le climat du territoire guyanais (caractéristiques de la ZCIT, ENSO, ...), des projections de paramètres météorologiques et indices climatiques sectoriels ont été réalisées. Ces projections ont été réalisées après correction de biais et descente d'échelle statistique des modèles vers les stations météorologiques ponctuelles localisées sur le territoire. Des projections de changement du climat de vague ont aussi été réalisées.

Les résultats (en moyennes annuelles) ont mis en évidence :

- une forte augmentation des températures minimales à l'horizon 2100 de 4-4.5 °C (resp. 2.5-3 °C) et des maximales de 3.5-4 °C (resp. 1.5-2 °C) pour SSP5-8.5/scénario fort (resp. SSP2-4.5/scénario intermédiaire) par rapport à l'historique ;
- une tendance à la baisse significative des précipitations de -0.09-0.32 (resp. -0.03-0.24) mm/jour par décennie pour le scénario SSP5-8.5 (resp. SSP2-4.5) ;
- une tendance à l'augmentation de la force du vent significative de moins de 0.1 m/s par décennies ;
- une diminution de la hauteur significative, de la période et de l'énergie des vagues, ainsi qu'une rotation horaire faible (de l'ordre de 1°) de leur direction d'incidence.

Des variations saisonnières et spatiales à l'échelle du territoire ont aussi été décelées et quantifiées.

Ces changements des paramètres météorologiques se traduisent par les impacts sectoriels suivant : une intensification des journées et nuits chaudes ainsi que des conditions de sécheresse, une raréfaction des jours de fortes pluies et une augmentation très forte des degrés-jour de climatisation.

L'ensemble de ces éléments représente des défis majeurs pour les secteurs économiques comme l'agriculture et la gestion de la ressource en eau, ou encore l'énergie du fait de la forte progression attendue des besoins en climatisation. La liste n'est pas exhaustive, l'impact de l'évolution de ces paramètres physiques pour les écosystèmes, la forêt amazonienne, la migration des bancs de vase et la morphologie côtière, ou encore la santé humaine compte tenu d'un risque d'hyperthermie amené à croître, restent à être déterminés dans le cadre de futures études. Le rapport du GIEC de 2022 sur les impacts, la vulnérabilité et l'adaptation, et notamment son chapitre portant sur l'Amérique du Sud, peut aider à identifier les risques sectoriels clés et des actions d'adaptation possibles (IPCC, 2022).

Afin de répondre au mieux aux conséquences du changement climatique sur le territoire guyanais, il est nécessaire que les acteurs locaux s'approprient les résultats de cette étude. Pour assurer une bonne compréhension et assimilation des résultats, un plan de communication devra être mis en place pour les élus locaux mais également pour le grand public. Ce travail nécessitera des échanges entre les différents partenaires pour décider du format le plus approprié de cette communication.

Les résultats de l'étude permettront également aux acteurs publics d'initier ou réévaluer des plans de gestion, d'aménagement ou de risques dans lesquelles les effets du changement climatique doivent être pris en compte à l'échelle de la Guyane.



## 7. Références

- Abascal Zorrilla, N.**, (2019). Dynamics of the Amazonian mud bank system through spatial observation and hydro-sedimentary modeling: application to the coastal domain of French Guiana. Université de Guyane.
- Adler, R.F., Sapiano, M.R.P., Huffman, G.J., Wang J.J., Guojun G., Bolvin D., Chiu L., Schneider U., Becker A., Nelkin E., Xie P., Ferraro R. and Shin D.B.**, (2018) : The Global Precipitation Climatology Project (GPCP) monthly analysis (new version 2.3) and a review of 2017 global precipitation. *Atmos* **9**, 138. <https://doi.org/10.3390/atmos904013>
- Anderson, C., Figa, J., Bonekamp, H., Wilson, J.J.W., Verspeek, J., Stoffelen, A. & Portabella, M.**, (2011): Validation of backscatter measurements from the Advanced Scatterometer on MetOp-A. *J Atmos Ocean Tech* **29**(1), 77–88. <https://doi.org/10.1175/JTECH-D-11-00020.1>
- Angeles, M.E., González, J.E. & Ramírez, N.**, (2018): Impacts of climate change on building energy demands in the intra-Americas region. *Theor Appl Climatol* **133**, 59–72. <https://doi.org/10.1007/s00704-017-2175-9>
- Ardhuin, F., Rogers, E., Babanin, A.V., Filipot J-F., Magne R., Aaron R., van der Westhuysen A., Queffeulou P., Lefevre J-M., Aouf L., Collard F.** (2010) : Semiempirical dissipation source functions for ocean waves. Part I: definition, calibration, and validation. *J Phys Oceanogr* **40**(9):1917–1941. <https://doi.org/10.1175/2010JPO4324.1>
- Bamber, J.L.; Oppenheimer, M.; Kopp, R.E.; Aspinall, W.P.; Cooke, R.M.** (2019): Ice sheet contributions to future sea-level rise from structured expert judgment. *Proc. Natl. Acad. Sci. US*, 116, 11195.
- Beaufort, A., Gibier, F. & Palany, P.**, (2019) : Assessment and correction of three satellite rainfall estimate products for improving flood prevention in French Guiana. *Int J Remote Sens* **40**(1):171–196. <https://doi.org/10.1080/01431161.2018.1511934>
- Belmadani, A., Dalphiné, A., Chauvin, F., Pilon, R. & Palany, P.**, (2021): Projected future changes in tropical cyclone-related wave climate in the North Atlantic. *Clim Dyn* **56**, 3687–3708. <https://doi.org/10.1007/s00382-021-05664-5>
- Benjamini, Y. & Hochberg, Y.**, (1995): Controlling the false discovery rate: A practical and powerful approach to multiple testing. *J Roy Stat Soc Meth B* **57**, 289–300. <https://doi.org/10.1111/j.2517-6161.1995.tb02031.x>
- Blewitt G., C. Kreemer, W.C. Hammond, J. Gazeaux** (2016). MIDAS robust trend estimator for accurate GPS station velocities without step detection. *Journal of Geophysical Research*, 121, 2054-2068, doi:10.1002/2015JB012552.
- BRLIngénierie** (2018). Schéma directeur de gestion des eaux pluviales de la CACL – Diagnostic de la vanne-écluse Laussat. 110p.
- Brown, J.R., Moise, A.F. & Colman, R.A.**, (2013): The South Pacific Convergence Zone in CMIP5 simulations of historical and future climate. *Clim Dyn* **41**, 2179–2197. <https://doi.org/10.1007/s00382-012-1591-x>
- Bulthuis, K., Arnst, M., Sun, S., and Pattyn, F.** (2019): Uncertainty quantification of the multi-centennial response of the Antarctic ice sheet to climate change, *The Cryosphere*, 13, 1349–1380, <https://doi.org/10.5194/tc-13-1349-2019>.
- Cantet, P., Déqué, M., Palany, P. & Maridet, J.-L.**, (2014): The importance of using a high-resolution model to study the climate change on small islands: The Lesser Antilles case. *Tellus A Dyn Meteorol Oceanogr* **66**(1), 24065. <https://doi.org/10.3402/tellusa.v66.24065>

- Cantet, P., Belmadani, A., Chauvin, F. & Palany, P.,** (2021): Projections of tropical cyclone rainfall over land with an Eulerian approach: Case study of three islands in the West Indies. *Int J Climatol* **41** (Suppl. 1), E1164–E1179. <https://doi.org/10.1002/joc.6760>
- Caron, L. et al.** (2018): GIA model statistics for GRACE hydrology, cryosphere, and ocean science. *Geophys. Res. Lett.* **45**, 2203–2212.
- Charles, E., Idier, D., Delecluse, P., Déqué, M. & Le Cozannet, G.,** (2012): Climate change impact on waves in the Bay of Biscay, France. *Ocean Dyn* **62**, 831–848. <https://doi.org/10.1007/s10236-012-0534-8>
- Chauvin, F., Pilon, R., Palany, P. & Belmadani, A.,** (2020): Future changes in Atlantic hurricanes with the rotated-stretched ARPEGE-Climat at very high resolution. *Clim Dyn* **54**, 947–972. <https://doi.org/10.1007/s00382-019-05040-4>
- Church, J.A., P.U. Clark, A. Cazenave, J.M. Gregory, S. Jevrejeva, A. Levermann, M.A. Merrifield, G.A. Milne, R.S., Nerem, P.D. Nunn, A.J. Payne, W.T. Pfeffer, D. Stammer & A.S. Unnikrishnan** (2013): Sea Level Change. In: *Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [Stocker, T.F., D. Qin, G. K. Plattner, M. Tignor, S.K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex and P.M. Midgley (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.
- Cooley, S., D. Schoeman, L. Bopp, P. Boyd, S. Donner, D.Y. Ghebrehiwet, S.-I. Ito, W. Kiessling, P. Martinetto, E. Ojea, M.-F. Racault, B. Rost, & M. Skern-Mauritzen,** (2022): Oceans and Coastal Ecosystems and Their Services. In: *Climate Change 2022: Impacts, Adaptation and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [H.-O. Pörtner, D.C. Roberts, M. Tignor, E.S. Poloczanska, K. Mintenbeck, A. Alegría, M. Craig, S. Langsdorf, S. Löschke, V. Möller, A. Okem, B. Rama (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, UK and New York, NY, USA, pp. 379–550, doi:10.1017/9781009325844.005.
- DeConto, R.M.; Pollard D.** (2016): Contribution of Antarctica to past and future sea-level rise. *Nature*, **531**, 591–597.
- Deng Z., Gendt G., Schöne T.** (2015): Status of the IGS-TIGA Tide Gauge Data Reprocessing at GFZ. In: Rizos C., Willis P. (eds) *IAG 150 Years. International Association of Geodesy Symposia*, vol 143. Springer, Cham [https://link.springer.com/chapter/10.1007%2F1345\\_2015\\_156](https://link.springer.com/chapter/10.1007%2F1345_2015_156)
- Déqué, M.,** (2007) : Frequency of precipitation and temperature extremes over France in an anthropogenic scenario: Model results and statistical correction according to observed values. *Glob Planet Chang* **57**, 16–26. <https://doi.org/10.1016/j.gloplacha.2006.11.030>
- Dodet, G., Piolle, J.F., Quilfen, Y., Abdalla S., Accensi M., Arduin F., Ash E., Bidlot J-R, Gommenginger C., Marechal G., Passaro M., Quartly G., Stopa J., Timmermans B., Young I., Cipollini P., and Donlon C.** (2020): The Sea State CCI dataset v1: Towards a sea state climate data record based on satellite observations. *Earth Sys Sci Data* **12**, 1929–1951. <https://doi.org/10.5194/essd-12-1929-2020>
- Döll, P., H. Müller Schmied, C. Schuh, F. T. Portmann, and A. Eicker** (2014): Global-scale assessment of groundwater depletion and related groundwater abstractions: Combining hydrological modeling with information from well observations and GRACE satellites. *Water Resour. Res.*, **50**, 5698–5720, doi:10.1002/2014WR015595.



**Edwards, T. L., Brandon, M. A., Durand, G., Edwards, N.R., Golledge, N. R., Holden, P. B., Nias, I. J., Payne, A. J., Ritz, C., and Wernecke, A.** (2019) : Revisiting Antarctic ice loss due to marine ice-cliff instability, *Nature*, 566, 58–64, <https://doi.org/10.1038/s41586-019-0901-4>.

**Edwards, T.L., Nowicki, S., Marzeion, B. et al.** (2021): Projected land ice contributions to twenty-first-century sea level rise. *Nature* 593, 74–82. <https://doi.org/10.1038/s41586-021-03302-y>

**Eyring, V., Bony, S., Meehl, G.A. et al.** (2016): Overview of the Coupled Model Intercomparison Project Phase 6 (CMIP6) experimental design and organization. *Geosci Model Dev* 9, 1937–1958. <https://doi.org/10.5194/gmd-9-1937-2016>.

**Frederikse, T., Landerer, F. W., and Caron, L.** (2019): The imprints of contemporary mass redistribution on local sea level and vertical land motion observations, *Solid Earth*, 10, 1971–1987, <https://doi.org/10.5194/se-10-1971-2019>.

**Frederikse, T., Landerer, F., Caron, L. et al.** (2020) :The causes of sea-level rise since 1900. *Nature* 584, 393–397, <https://doi.org/10.1038/s41586-020-2591-3>

**García-Serrano, J., Cassou, C., Douville, H., Giannini, A. & Doblas-Reyes, F.J.,** (2017) : Revisiting the ENSO teleconnection to the tropical North Atlantic. *J Clim* 30(17), 6945–6957. <https://doi.org/10.1175/JCLI-D-16-0641.1>

**Golledge, N.R.; Kowalewski, D.E.; Naish, T.R.; Levy, R.H.; Fogwill, C.J.; Gasson, E.G.W.** (2015): The multi-millennial Antarctic commitment to future sea-level rise. *Nature*, 526, 421.

**Golledge, N. R. et al.** (2019): Global environmental consequences of twenty-first-century ice-sheet melt. *Nature* 566, 65–72

**Gratiot, N., Gardel, A. & Anthony, E.,** (2007) : Trade wind waves and mud dynamics on the French Guiana coast, South America: Input from ERA 40 wave data and field investigations. *Mar Geol* 236(1-2), 15–26. <https://doi.org/10.1016/j.margeo.2006.09.013>

**Gravelle, M., Wöppelmann, G., Gobron, K., Altamimi, Z., Guichard, M., Herring, T., and Rebischung, P.** (2022): The ULR-repro3 GPS data reanalysis and its estimates of vertical land motion at tide gauges for sea level science, *Earth Syst. Sci. Data Discuss.* [preprint], <https://doi.org/10.5194/essd-2022-235>, in review.

**Guo, L. C., van der Wegen, M., Jay, D. A., Matte, P., Wang, Z. B., Roelvink, J. A., He, Q.** (2015): River-tide dynamics: Exploration of nonstationary and nonlinear tidal behavior in the Yangtze River estuary. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 120, 3499–3521. <https://doi.org/10.1002/2014JC010491>

**Guo, L., Zhu, C., Wu, X., Wan, Y., Jay, D. A., Townend, I., Wang, Z.B., Heet, Q.** (2020): Strong inland propagation of low-frequency long waves in river estuaries. *Geophysical Research Letters*, 47, e2020GL089112. <https://doi.org/10.1029/2020GL089112>

**Gupta, S. A., N. C. Jourdain, J. N. Brown, and D. Monselesan,** (2013): Climate Drift in the CMIP5 models. *J. Climate*, 26, 8597–8615, doi:10.1175/JCLI-D-12-00521.1.

**Hausfather Z., G. P. Peters** (2020): RCP8.5 is a problematic scenario for near-term emissions. *Proc. Natl. Acad. Sci. U.S.A.* 117, 27791–27792.

**Hausfather, Z., Marvel, K., Schmidt, A., Nielsen-Gammon, J.W. & Zelinka, M.,** (2022) : Climate simulations : Recognize the ‘hot model’ problem. *Nature* 605, 26–29. <https://doi.org/10.1038/d41586-022-01192-2>

- Hawkins, T., Gouirand, I., Allen, T. & Belmadani, A.,** (2022): Atmospheric drivers of oceanic north swells in the Eastern Caribbean. *J Mar Sci Eng* **10**(2), 183. <https://doi.org/10.3390/jmse10020183>
- Heflin, M., Donnellan, A., Parker, J., Lyzenga, G., Moore, A., Ludwig, L. G., et al.** (2020). Automated estimation and tools to extract positions, velocities, breaks, and seasonal terms from daily GNSS measurements: illuminating nonlinear Salton Trough deformation. *Earth and Space Science*, *7*, e2019EA000644. <https://doi.org/10.1029/2019EA000644>
- Hemer, M., Wang, X., Webb, A. & COWCLIP contributors,** (2018) : Report of the 2018 meeting for the WCRP-JCOMM Coordinated Global Wave Climate Projections (COWCLIP), WMO 2018.
- Héritier, P.,** (2011) : Le climat guyanais : Petit atlas climatique de la Guyane française. Météo-France, ISBN 978-2-11-128228-5, 57 pp.
- Hersbach, H., Bell, B., Berrisford, P. et al,** 2020: The ERA5 global reanalysis. *Q J R Meteorol Soc* **146**, 1999–2049. <https://doi.org/10.1002/qj.3803>
- Hinkel, J.; Church, J.A.; Gregory, J.M.; Lambert, E.; Le Cozannet, G.; Lowe, J.; McInnes, K.L.; Nicholls, R.J.; van der Pol, T.D.; van de Wal, R.** (2019): Meeting User Needs for Sea Level Rise Information: A Decision Analysis Perspective. *Earths Future*, *7*, 320–337.
- Hounsou-Gbo, A., Servain, J., das Chagas Vasconcelos Junior, F., Martins, E.S.P.R. & Araújo, M.,** (2020) : Summer and winter Atlantic Niño: Connections with ENSO and implications. *Clim Dyn* **55**, 2939–2956. <https://doi.org/10.1007/s00382-020-05424-x>
- IPCC,** (2000): Special Report on Emissions Scenarios [Nakicenovic, N. & Swart, R. (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom, 570 pp.
- IPCC** (2013): *Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [Stocker, T.F., D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S.K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex and P.M. Midgley (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 1535 pp.
- IPCC** (2019): IPCC Special Report on the Ocean and Cryosphere in a Changing Climate; Pörtner, H.-O., Roberts, D.C., Masson-Delmotte, V., Zhai, P., Tignor, M., Poloczanska, E., Mintenbeck, K., Nicolai, M., Okem, A., Petzold, J., et al., Eds.; IPCC: Geneva, Switzerland.
- IPCC,** (2021): *Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [Masson-Delmotte, V., Zhai, P., Pirani, A. et al (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, in press. <https://doi.org/10.1017/9781009157896>
- IPCC,** 2022: *Climate Change 2022: Impacts, Adaptation, and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [H.-O. Pörtner, D.C. Roberts, M. Tignor, E.S. Poloczanska, K. Mintenbeck, A. Alegría, M. Craig, S. Langsdorf, S. Löschke, V. Möller, A. Okem, B. Rama (eds.)]. Cambridge University Press. Cambridge University Press, Cambridge, UK and New York, NY, USA, 3056 pp., doi:10.1017/9781009325844.
- Jiang, F., Zhang, W., Jin, F.-F. & Stuecker, M.F.,** (2021): Meridional migration of ENSO impact on tropical Atlantic precipitation controlled by the seasonal cycle. *Geophys Res Lett* **48**, e2021GL096365. <https://doi.org/10.1029/2021GL096365>
- Joughin, I.; Smith, B.E.; Medley, B.** (2014): Marine Ice Sheet Collapse Potentially Under Way for the Thwaites Glacier Basin, West Antarctica. *Science*, **344**, 735.

- Kopp, R.E., Hay, C.C., Little, C.M. et al.** (2015) : Geographic Variability of Sea-Level Change. *Curr Clim Change Rep* 1, 192–204, <https://doi.org/10.1007/s40641-015-0015-5>
- Kopp, R.E., R.M. DeConto, D.A. Bader, C.C. Hay, R.M. Horton, S. Kulp, M. Oppenheimer, D. Pollard, and B.H. Strauss** (2017) : Evolving understanding of Antarctic ice-sheet physics and ambiguity in probabilistic sea-level projections. *Earth's Future*, 5, no. 12, 1217-1233, doi:10.1002/2017EF000663
- Le Cozannet, G., Idier, D., de Michele, M., Legendre, Y., Moisan, M., Pedreros, R., Thiéblemont, R., Spada, G., Raucoules, D., and de la Torre, Y.** (2021): Timescales of emergence of chronic flooding in the major economic center of Guadeloupe, Nat. Hazards Earth Syst. Sci., 21, 703–722, <https://doi.org/10.5194/nhess-21-703-2021>.
- Lemos, G., Menendez, M., Semedo, A., Camus, P., Hemer, M., Dobrynin, M. & Miranda, P.M.A.**, (2020a): On the need of bias correction methods for wave climate projections. *Glob Planet Chang* 186. <https://doi.org/10.1016/j.gloplacha.2019.103109>
- Lemos, G., Semedo, A., Dobrynin, M., Menendez, M. & Miranda, P.M.A.**, (2020b): Bias-corrected CMIP5-derived single-forcing future wind-wave climate projections toward the end of the twenty-first century. *J Appl Meteorol Climatol* 59(9), 1393-1414. <https://doi.org/10.1175/JAMC-D-19-0297.1>
- Leroux, M.D., Bonnardot, F., Kotomangazafy, S., Veerabadren, P., Ridhoine, A.O., Somot, S., Alias, A. & Chauvin, F.**, (2021): Regional climate projections and associated climate services in the southwest Indian ocean basin. EGU General Assembly 2021, online, 19–30 Apr 2021, EGU21-7029. <https://doi.org/10.5194/egusphere-egu21-7029>
- Levermann, A., Winkelmann, R., Nowicki, S., Fastook, J. L., Frieler, K., Greve, R., Hellmer, H. H., Martin, M. A., Meinshausen, M., Mengel, M., Payne, A. J., Pollard, D., Sato, T., Timmermann, R., Wang, W. L., and Bindschadler, R. A.** (2014) : Projecting Antarctic ice discharge using response functions from SeaRISE ice-sheet models, *Earth Syst. Dynam.*, 5, 271–293, <https://doi.org/10.5194/esd-5-271-2014>.
- Lobeto, H., Menendez, M. & Losada, I.J.**, (2021): Future behavior of wind wave extremes due to climate change. *Sci Rep* 11, 7869. <https://doi.org/10.1038/s41598-021-86524-4>
- Lyard, F. H., Allain, D. J., Cancet, M., Carrère, L., and Picot, N.**: FES2014 global ocean tide atlas: design and performance, *Ocean Sci.*, 17, 615–649, <https://doi.org/10.5194/os-17-615-2021>, 2021.
- Marzeion, B.; Jarosch, A.H.; Hofer, M.** (2012): Past and future sea-level change from the surface mass balance of glaciers. *Cryosphere*, 6, 1295–1322.
- Marzeion, B., Leclercq, P. W., Cogley, J. G., and Jarosch, A. H.** (2015): Brief Communication: Global reconstructions of glacier mass change during the 20th century are consistent, *The Cryosphere*, 9, 2399–2404, <https://doi.org/10.5194/tc-9-2399-2015>.
- Marzeion, B. et al.** (2020): Partitioning the uncertainty of ensemble projections of global glacier mass change. *Earths Future* <https://doi.org/10.1029/2019EF001470>.
- Mazotti S, Aline Déprez, Eric Henrion, Christine Masson, Frédéric Masson, et al.** (2020): Comparative analysis of synthetic GNSS time series - Bias and precision of velocity estimations. [Research Report] RESIF. 2020. fahal-02460380
- Menier D., Ballèvre M.**, (2005). Quand Groix n'était pas une île. *Revue Pen ar bed*, Sept./Déc.190/191, 22-27
- Merrifield, G.A. Milne, R.S. Nerem, P.D. Nunn, A.J. Payne, W.T. Pfeffer, D. Stammer and A.S. Unnikrishnan**, (2013). Sea Level Change. In: *Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [Stocker, T.F., D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S.K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex and P.M. Midgley (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.

- Mertz, F. & Legeais, J.F.** (2020) : Product User Guide and Specification, Sea Level v1.2, D3.SL.1-v1.2\_PUGS\_of\_v1DT2018\_SeaLevel\_products\_v2.4, DOI: 10.24381/cds.4c328c78.
- Meucci, A., Young, I.R., Hemer, M., Kirezci, E. & Ranasinghe, R.,** (2020) : Projected 21st century changes in extreme wind-wave events. *Sci Adv* **6**(24), eaaz7295. <https://doi.org/10.1126/sciadv.aaz7295>
- Meysignac, B., Fettweis, X., Chevrier, R., & Spada, G.** (2017): Regional Sea Level Changes for the Twentieth and the Twenty-First Centuries Induced by the Regional Variability in Greenland Ice Sheet Surface Mass Loss, *Journal of Climate*, 30(6), 2011-2028.
- Meysignac, B., Slangen, A.A., Melet, A., Church, J.A., Fettweis, X., Marzeion, B., Agosta, C., Ligtenberg, S.R.M., Spada, G., Richter, K. and Palmer, M.D.,** (2017b). Evaluating model simulations of twentieth-century sea-level rise. Part II: regional sea-level changes. *Journal of Climate*, 30(21), pp.8565-8593
- Moftakhari, H.R., et al.,** (2015): Increased nuisance flooding along the coasts of the United States due to sea level rise: past and future. *Geophys. Res. Lett.*, 42(22), 9846–9852, doi:10.1002/2015GL066072.
- Moisan, M., Habchi-Hanriot, N., Collard, F.X. & Fontaine, M.,** (2013) : Le changement climatique en Guyane : Conséquences potentielles et pistes de réflexion pour l'adaptation régionale. BRGM/RP 61740-FR, 112p.
- Mora, C., Dousset, B., Caldwell, I. R. et al.,** (2017) : Global risk of deadly heat. *Nat Clim Change* **7**, 501–507. <https://doi.org/10.1038/nclimate3322>
- Morim, J., Hemer, M., Wang, X.L. et al,** (2019): Robustness and uncertainties in global multivariate wind-wave climate projections. *Nat Clim Change* **9**, 711–718. <https://doi.org/10.1038/s41558-019-0542-5>
- Nabat, P., Somot, S., Cassou, C., Mallet, M., Michou, M., Bouniol, D., Decharme, B., Drugé, T., Roehrig, R. & Saint-Martin, D.,** (2020): Modulation of radiative aerosols effects by atmospheric circulation over the Euro-Mediterranean region. *Atmos Chem Phys* **20**, 8315–8349. <https://doi.org/10.5194/acp-20-8315-2020>
- Nowicki, S., Goelzer, H., Seroussi, H., et al.** (2020): Experimental protocol for sea level projections from ISMIP6 stand-alone ice sheet models, *The Cryosphere*, 14, 2331–2368, <https://doi.org/10.5194/tc-14-2331-2020>.
- Nurmohamed, R., Naipal, S. & Becker, C.,** (2007) : Rainfall variability in Suriname and its relationship with the tropical Pacific ENSO SST anomalies and the Atlantic SST anomalies. *Int J Climatol* **27**, 249–256. <https://doi.org/10.1002/joc.1374>
- Oppenheimer, M. et al.** (2019): Sea Level Rise and Implications for Low-Lying Islands, Coasts and Communities. In IPCC Special Report on the Ocean and Cryosphere in a Changing Climate (eds Pörtner, H.-O. et al.) (IPCC, 2019).
- Osinski, R., Dalphiné, A., Aouf, L. & Palany, P.,** (2018) : Estimation of the hundred year return level of the significant wave height for the French Guiana coast. *Braz J Oceanogr* **66**(4), 325–334. <https://doi.org/10.1590/S1679-87592018017906604>
- Papazzoni, M.,** (2021) : Régionalisation de la prévision saisonnière en DIRAG : Études et production. Rapport interne, *Météo-France Direction Interrégionale Antilles-Guyane*, 64 pp.
- Park, W. & Latif, M.,** (2020) : Resolution dependence of CO<sub>2</sub>-induced Tropical Atlantic sector climate changes. *Npj Clim Atmos Sci* **3**, 36. <https://doi.org/10.1038/s41612-020-00139-6>
- Plaziat J.C., Augustinus G.E.F.** (2004). Evolution of progradation/erosion along the French Guiana mangrove coast: a comparaison of mapped shorelines since the 18th century with Holocene data. *Marine Geology* **208**, 127-143.
- Perez, J., Menendez, M., Losada, I.J.,** (2017): GOW2: A global wave hindcast for coastal applications. *Coastal Eng* **124**, 1–11. <https://doi.org/10.1016/j.coastaleng.2017.03.005>

- Piolle, J.F., Dodet, G. & Ash, E.,** (2020): ESA Sea State Climate Change Initiative: Product user guide.  
[http://dap.ceda.ac.uk/thredds/fileServer/neodc/esacci/sea\\_state/docs/v1.1/Sea\\_State\\_cci\\_PUG\\_v1.0-signed.pdf](http://dap.ceda.ac.uk/thredds/fileServer/neodc/esacci/sea_state/docs/v1.1/Sea_State_cci_PUG_v1.0-signed.pdf). Accédé le 21 mars 2020.
- Rasmusson, E.M. & Carpenter, T.H.,** (1982) : Variations in tropical sea surface temperature and surface wind fields associated with the Southern Oscillation/El Niño. *Mon Wea Rev* 110(5), 354–384. [https://doi.org/10.1175/1520-0493\(1982\)110<0354:VITSST>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0493(1982)110<0354:VITSST>2.0.CO;2)
- Rayner, N.A., Parker, D.E., Horton, E.B., Folland, C.K., Alexander, L.V., Rowell, D.P., Kent, E.C. & Kaplan, A.,** (2003) : Global analyses of sea surface temperature, sea ice, and night marine air temperature since the late nineteenth century. *J Geophys Res* 108, 4407. <https://doi.org/10.1029/2002JD002670>
- Reboita, M.S., Kuki, C.A.C., Marrafon, V.H. et al.,** (2022): South America climate change revealed through climate indices projected by GCMs and Eta-RCM ensembles. *Clim Dyn* 58, 459–485. <https://doi.org/10.1007/s00382-021-05918-2>
- Riahi, K., Van Vuuren, D. P., Kriegler, E., Edmonds, J., O’Neill, B. C., Fujimori, S., ... Tavoni, M.** (2017). The Shared Socioeconomic Pathways and their energy, land use, and greenhouse gas emissions implications: An overview. *Global Environmental Change*, 42, 153-168. doi:10.1016/j.gloenvcha.2016.05.009
- Richter, I. & Tokinaga, H.,** (2020): An overview of the performance of CMIP6 models in the tropical Atlantic: Mean state, variability, and remote impacts. *Clim Dyn* 55(9), 2579–2601. <https://doi.org/10.1007/s00382-020-05409-w>
- Ridder, N.N., Pitman, A.J., Westra, S. et al.,** (2020): Global hotspots for the occurrence of compound events. *Nat Commun* 11, 5956. <https://doi.org/10.1038/s41467-020-19639-3>
- Ridder, N.N., Pitman, A.J. & Ukkola, A.M.,** 2021: Do CMIP6 climate models simulate global or regional compound events skillfully? *Geophys Res Lett* 48, e2020GL091152. <https://doi.org/10.1029/2020GL091152>
- Rignot, E., Mouginot, J., Morlighem, M., Seroussi, H., and Scheuchl, B.** (2014): Widespread, rapid grounding line retreat of Pine Island, Thwaites, Smith, and Kohler glaciers, West Antarctica, from 1992 to 2011, *Geophys. Res. Lett.*, 41, 3502–3509, <https://doi.org/10.1002/2014GL060140>.
- Ritchie J., H. Dowlatabadi** (2017): Why do climate change scenarios return to coal? *Energy*, 140, pp. 1276-1291
- Ritz, C.; Edwards, T.L.; Durand, G.; Payne, A.J.; Peyaud, V.; Hindmarsh, R.C.A.** (2015): Potential sea-level rise from Antarctic ice-sheet instability constrained by observations. *Nature*, 528, 115.
- Rothfus, L.P.,** (1990): The heat index equation (or, more than you ever wanted to know about heat index). Tech. Attachment, SR/SSD 90-23, NWS S. Reg. Headquarters, Forth Worth, TX. [https://www.weather.gov/media/ffc/ta\\_htindx.PDF](https://www.weather.gov/media/ffc/ta_htindx.PDF)
- Selbonne, S., Rochette, R., Guindé, L., Ladislav, K., Decourcelle, C., Belmadani, A. & Blazy, J.M.:** *Ex ante* assessment of the potential impacts of climate change on the agriculture of a small tropical region in the Caribbean. *In prep.*
- SHOM** (2020) Références Altimétriques Maritimes – édition 2020, ISBN 978-2-11-139498-8.
- Slangen, A.B.A., Katsman, C.A., van de Wal, R.S.W. et al.** *Clim Dyn* (2012) 38: 1191. <https://doi.org/10.1007/s00382-011-1057-6>
- Slangen, A. B. A., Carson, M., Katsman, C. A., van de Wal, R. S. W., Kohl, A., Vermeersen, L. L. A., and Stammer, D.** (2014): Projecting twenty-first century regional sea-level changes, *Clim. Change*, 124, 317–332, <https://doi.org/10.1007/s10584-014-1080-9>.
- Slangen, A. B. A., Church, J. A., Zhang, X. & Monselesan, S. P.** (2015): The sea level response to external forcings in historical simulations of CMIP5 climate models. *J. Clim.* 28, 8521–8539.



**Slangen, A. B. A., Meyssignac, B., Agosta, C., Champollion, N., Church, J. A., Fettweis, X., Ligtenberg, S. R. M., Marzeion, B., Melet, A., Palmer, M. D., Richter, K., Roberts, C. D., & Spada, G.** (2017). Evaluating Model Simulations of Twentieth-Century Sea Level Rise. Part I: Global Mean Sea Level Change, *Journal of Climate*, 30(21), 8539–8563. Retrieved Sep 15, 2022, from <https://journals.ametsoc.org/view/journals/clim/30/21/jcli-d-17-01110.1.xml>

**Spada, G. and Melini, D.** (2019) : SELEN4 (SELEN version 4.0): a Fortran program for solving the gravitationally and topographically self-consistent sea-level equation in glacial isostatic adjustment modeling, *Geosci. Model Dev.*, 12, 5055–5075, <https://doi.org/10.5194/gmd-12-5055-2019>.

**Sweet, W. V. and Park, J.** (2014): From the extreme to the mean: Acceleration and tipping points of coastal inundation from sea level rise, *Earths Future*, 2, 579–600, <https://doi.org/10.1002/2014ef000272>

**Taylor, K.E., Stouffer, J.R., and Meehl, G.A.,** (2012) An overview of CMIP5 and experiment design, *Bull. Am. Meteorol. Society*, 2012, vol. 93, iss. 4, pp. 485..

**Taylor, M.A., Clarke, L.A., Centella, A., Bezanilla, A., Stephenson, T.S., Jones, J.J., Campbell, J.D., Vichot, A. & Charlery, J.,** (2018) : Future Caribbean climates in a world of rising temperatures : The 1.5 vs 2.0 dilemma. *J Clim* 31, 2907–2926. <https://doi.org/10.1175/JCLI-D-17-0074.1>

**Thiéblemont, R.; Le Cozannet, G.; Toimil, A.; Meyssignac, B.; Losada, I.J.** (2019): Likely and High-End Impacts of Regional Sea-Level Rise on the Shoreline Change of European Sandy Coasts Under a High Greenhouse Gas Emissions Scenario. *Water*, 11, 2607. <https://doi.org/10.3390/w1112260>

**Timmermans, B.W., Gommenginger, C.P., Dodet, G. & Bidlot, J.R.,** (2020): Global wave height trends and variability from new multimission satellite altimeter products, reanalyses, and wave buoys. *Geophys Res Lett* 47, e2019GL086880. <https://doi.org/10.1029/2019GL086880>

**Toimil, A., Camus, P., Losada, I.J. & Alvarez-Cuesta, M.,** (2021) : Visualising the uncertainty cascade in multi-ensemble probabilistic coastal erosion projections. *Front Mar Sci* 8, 683535. <https://doi.org/10.3389/fmars.2021.683535>

**Tokinaga, H. & Xie, S.P.,** (2011): Weakening of the equatorial Atlantic cold tongue over the past six decades. *Nat Geosci* 4, 222–226. <https://doi.org/10.1038/ngeo1078>

**Turenne J.F** (1977). Modes d'humification et différenciation podzolique. Thèse de doctorat d'état (1975), Université de Nancy, Mémoire ORSTOM, 84, 173 pages.

**Vaughan, D.G.** (2008) : West Antarctic Ice Sheet collapse – the fall and rise of a paradigm. *Climatic Change* 91, 65–79. <https://doi.org/10.1007/s10584-008-9448-3>

**Vecellio, D.J., Wolf, S.T., Cottle, R.M. & Kenney, W.L.,** (2022) : Evaluating the 35°C wet-bulb temperature adaptability threshold for young, healthy subjects (PSU HEAT Project). *J Appl Physiol* 132, 340–345. <https://doi.org/10.1152/jappphysiol.00738.2021>

**von Schuckmann, K., A. Cazenave, D. Chambers, J. Hansen, S. Josey, Y. Kosaka, N. Loeb, P.-P. Mathieu, B. Meyssignac, M. Palmer, K. Trenberth, M. Wild** (2016): An imperative to monitor Earth's energy imbalance, *Nature Climate Change* 6, 138–144, doi:10.1038/nclimate2876

**Wada, Y.; van Beek, L.P.H.; Weiland, F.C.S.; Chao, B.F.; Wu, Y.H.; Bierkens, M.F.P.** (2012) : Past and future contribution of global groundwater depletion to sea-level rise. *Geophys. Res. Lett.* 2012, 39.

**Wada, Y., M.-H. Lo, P. J.-F. Yeh, J. T. Reager, J. S. Famiglietti, R.-J. Wu, and Y.-H. Tseng** (2016), : Fate of water pumped from underground and contributions to sea-level rise. *Nat. Climate Change*, 6, 777–780, doi:10.1038/nclimate3001.

- WAMDI Group**, (1988) : The WAM model: A third-generation ocean wave prediction model. *J Phys Oceanogr* 18, 1775–1810. [https://doi.org/10.1175/1520-0485\(1988\)018<1775:TWMTGO>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0485(1988)018<1775:TWMTGO>2.0.CO;2)
- Wan, Z.**, (2014) : New refinements and validation of the Collection-6 MODIS land-surface temperature/emissivity products. *Remote Sens Environ* 140, 36-45. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2013.08.027>
- Wang, X.L., Feng Y. & Swail, V.R.**, (2014): Changes in global ocean wave heights as projected using multimodel CMIP5 simulations. *Geophys Res Lett* 41, 1026–1034. <https://doi.org/10.1002/2013GL058650>
- Wilks, D.S.**, (2016) : “The stippling shows statistically significant grid points” : How research results are routinely overstated and overinterpreted, and what to do about it. *Bull Amer Meteorol Soc* 97(12), 2263–2273. <https://doi.org/10.1175/BAMS-D-15-00267.1>
- Wöppelmann G. & M. Marcos** (2016). [Vertical land motion as a key to understanding sea level change and variability](#). *Reviews of Geophysics*, 54, doi:10.1002/2015RG000502.
- Xie, P. & Arkin, P.A.**, (1996): Analyses of global monthly precipitation using gauge observations, satellite estimates, and numerical model predictions. *J Clim* 9(4), 840–858. [https://doi.org/10.1175/1520-0442\(1996\)009](https://doi.org/10.1175/1520-0442(1996)009)
- Xu, C., Kohler, T.A., Lenton, T.M., Svenning, J.-C. & Scheffer, M.**, (2020) : Future of the human climate niche. *Proc Nat Acad Sci* 117(21), 11350–11355. <https://doi.org/10.1073/pnas.1910114117>
- Young, I.R.**, (1999) : Seasonal variability of the global ocean wind and wave climate. *Int J Climatol* 19, 931–950. [https://doi.org/10.1002/\(SICI\)1097-0088\(199907\)19:9<931::AID-JOC412>3.0.CO;2-O](https://doi.org/10.1002/(SICI)1097-0088(199907)19:9<931::AID-JOC412>3.0.CO;2-O)
- Vargas Zeppetello, L.R., Raftery, A.E. & Battisti, D.S.**, (2022): Probabilistic projections of increased heat stress driven by climate change. *Commun Earth Environ* 3, 183. <https://doi.org/10.1038/s43247-022-00524-4>
- Zelinka, M. D., Myers, T. A., McCoy, D. T., Po-Chedley, S., Caldwell, P. M., Ceppi, P., et al.** (2020). Causes of higher climate sensitivity in CMIP6 models. *Geophysical Research Letters*, 47, e2019GL085782. <https://doi.org/10.1029/2019GL085782>
- Zhang, Y., Held, I. & Fueglistaler, S.**, (2021): Projections of tropical heat stress constrained by atmospheric dynamics. *Nat Geosci* 14, 133–137. <https://doi.org/10.1038/s41561-021-00695-3>
- Zscheischler, J., Westra, S., van den Hurk, B.J.J.M. et al.**, (2018): Future climate risk from compound events. *Nat Clim Change* 8, 469–477. <https://doi.org/10.1038/s41558-018-0156-3>

## **Annexes I : relatives aux chapitres 2, 3 et 4**

## **Annexe 1 (A1)**

### ***Comparaison des données FES2014 et SHOM***

La *Figure 123* ci-dessous illustre la qualité des données FES2014 par rapport aux données de marée prédite SHOM, qui sont ici considérées comme données de référence. A noter que les données FES2014 sont initialement des amplitudes et phase de (34) composantes de marée. A partir de cette base de données on peut prédire les niveaux de marée (par rapport au niveau moyen). Concernant les données SHOM, elles sont fournies par rapport au Zéro Hydrographiques. Ces données sont comparées pour un cycle nodal (18.6 ans). Pour pouvoir comparer les données, nous avons retiré la valeurs moyennes des niveaux de marée prédite SHOM sur ce même cycle nodal (18.6 ans). L'écart le plus fort est observé pour la Pointe des Hattes.

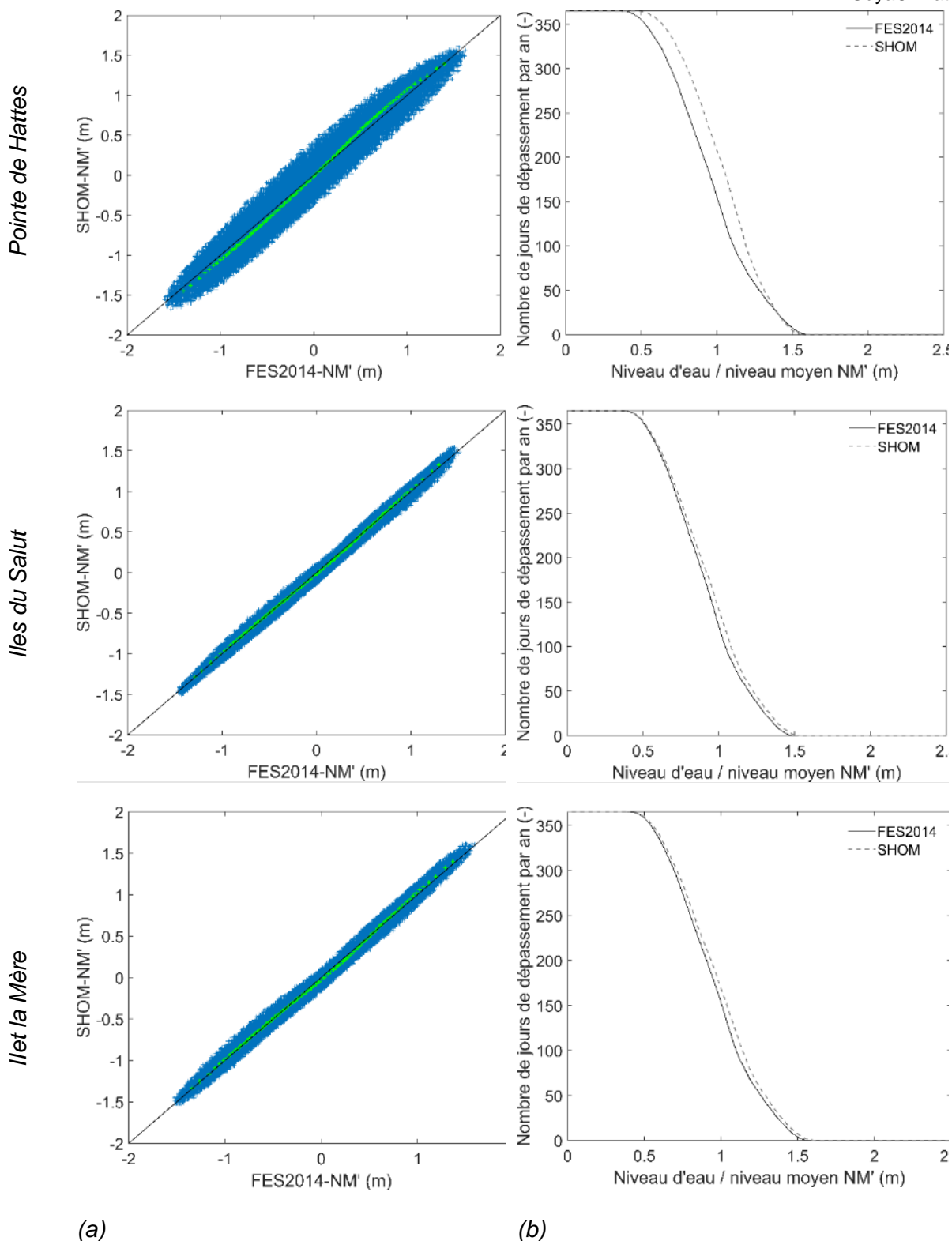


Figure 123 : Comparaison des prédictions de marées issues de FES2014 et du SHOM (prédictions SHOM réalisée en Avril 2022) pour la Pointe des Hattes, les Iles du Salut et Ilet La Mère. (a) scatter plots des niveaux d'eau horaires (bleu) et quantiles (vert), (b) courbes cumulées de dépassements de niveau d'eau en considérant les maximaux journaliers uniquement.

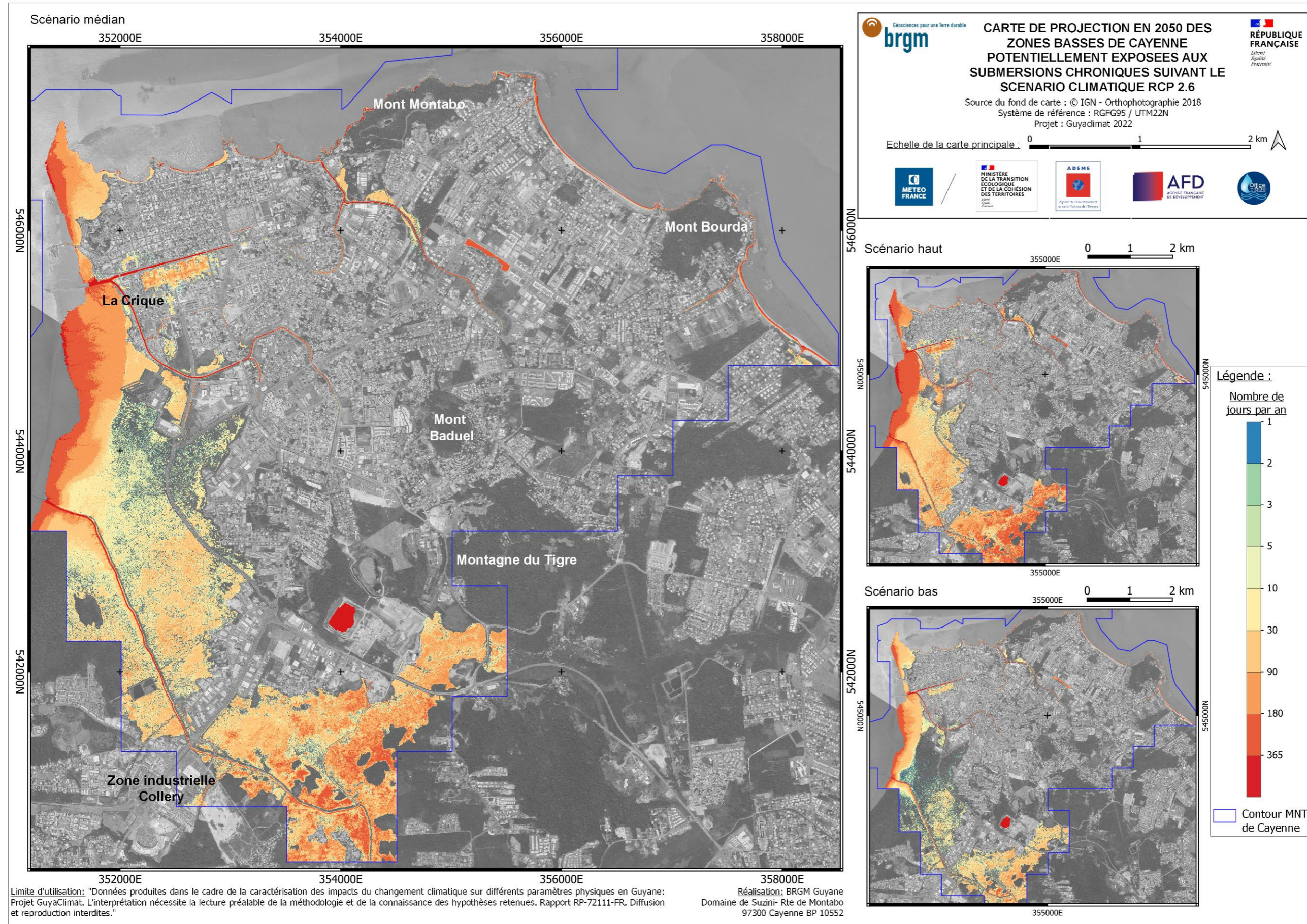


## **Annexe 2 (A2)**

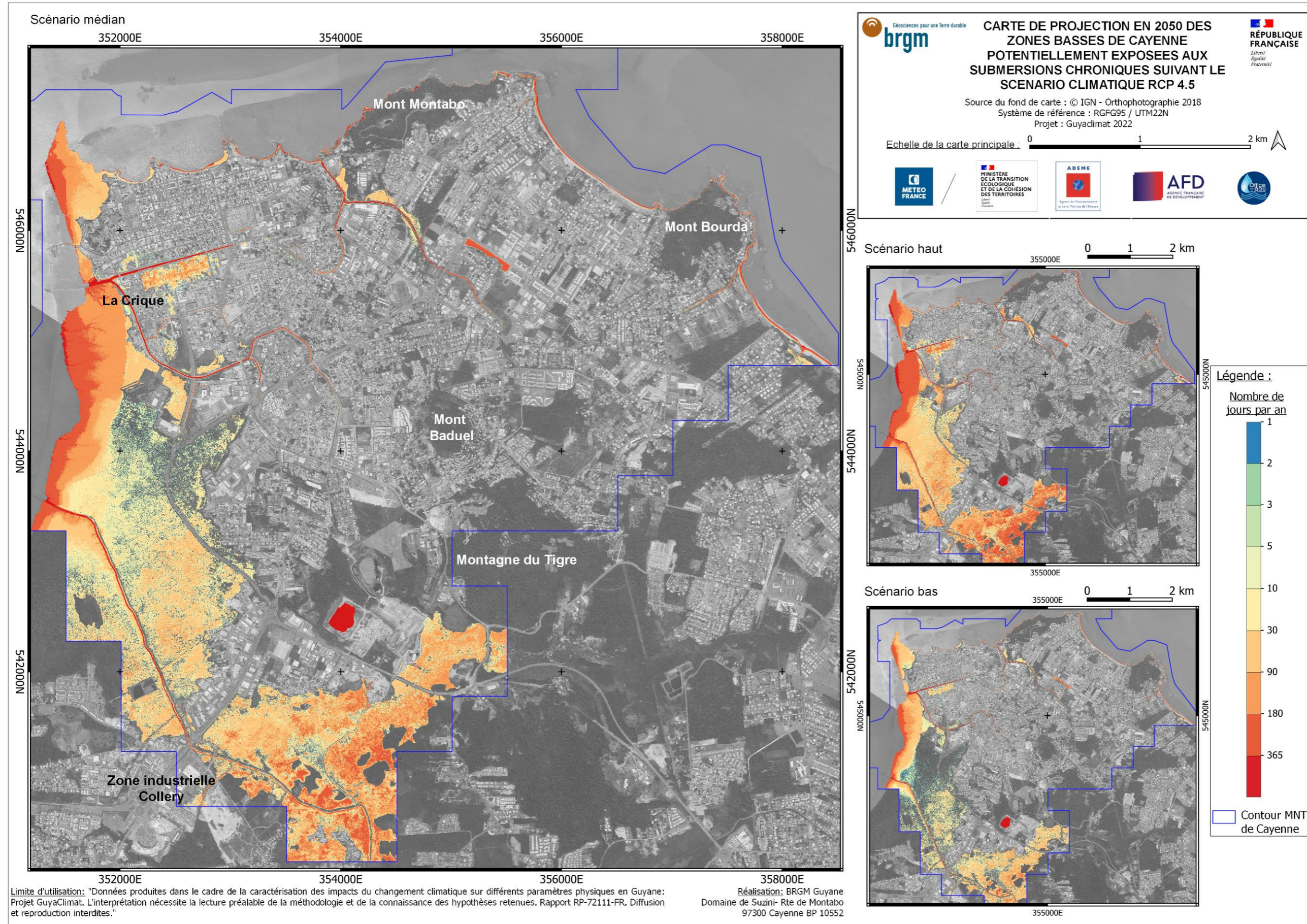
### **CAYENNE : Cartes des projections à 2050 des zones basses potentiellement exposées aux submersions chroniques pour les trois scénarios RCP2.6, RCP4.5 et RCP8.5**



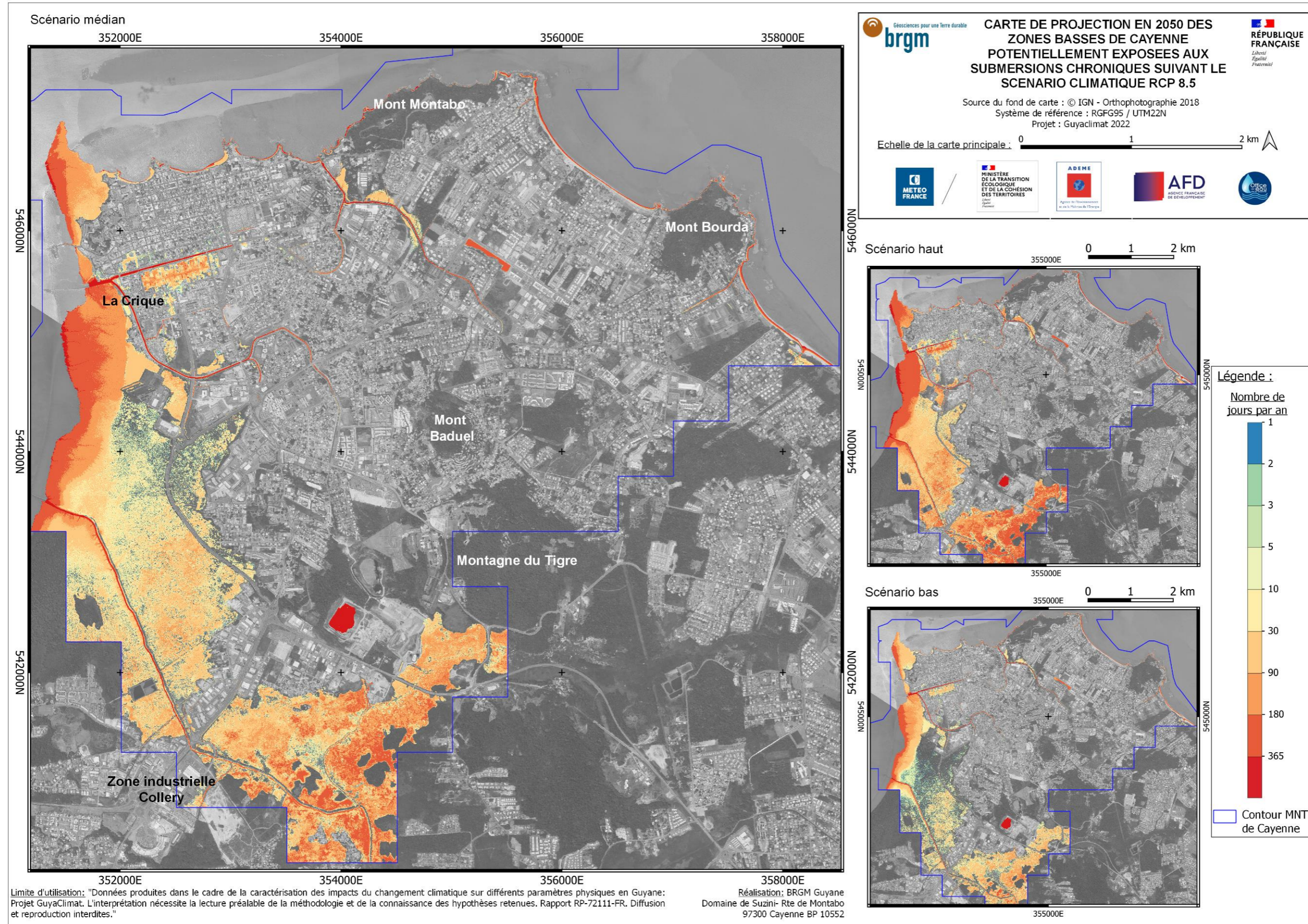














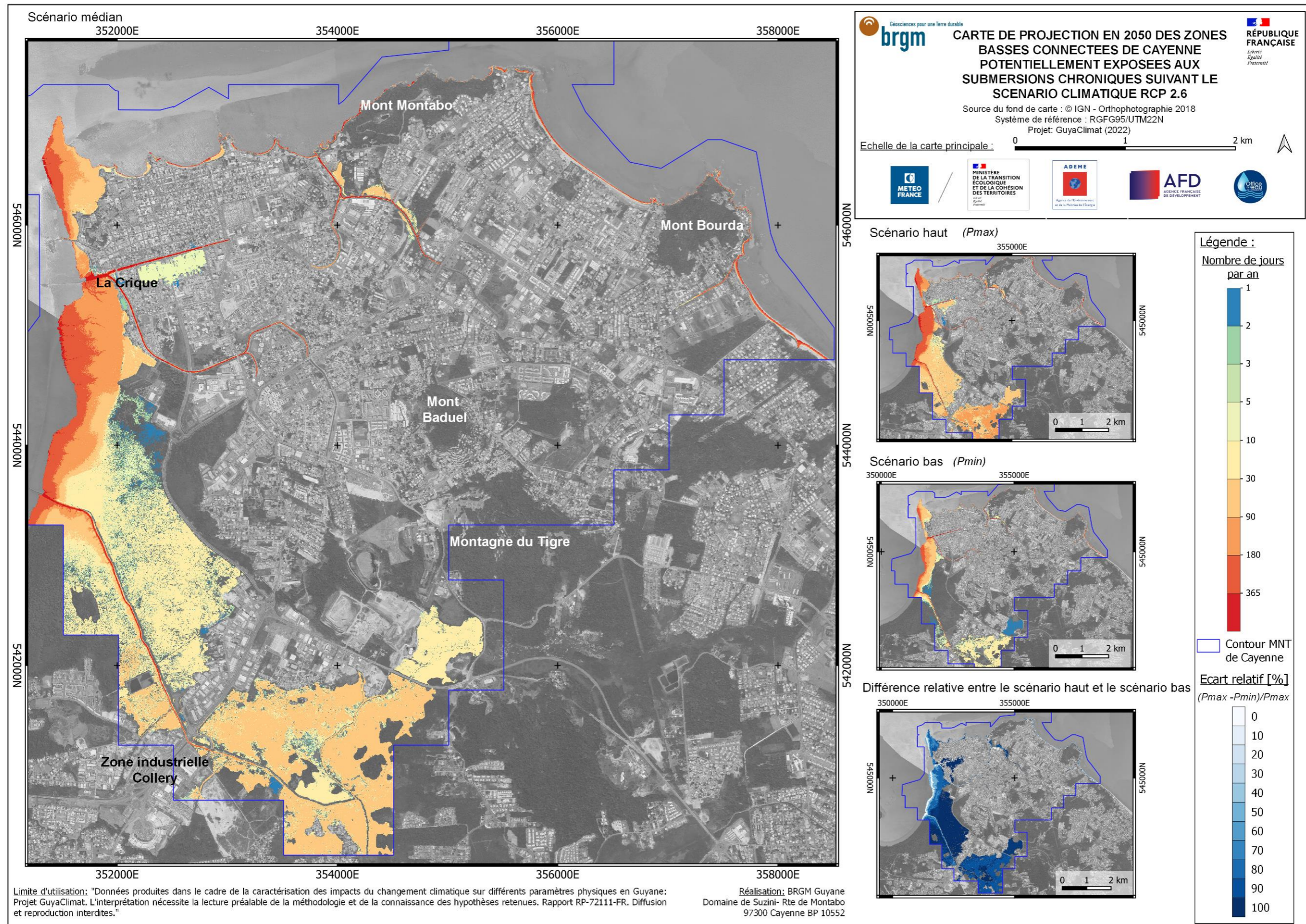


## **Annexe 3 (A3)**

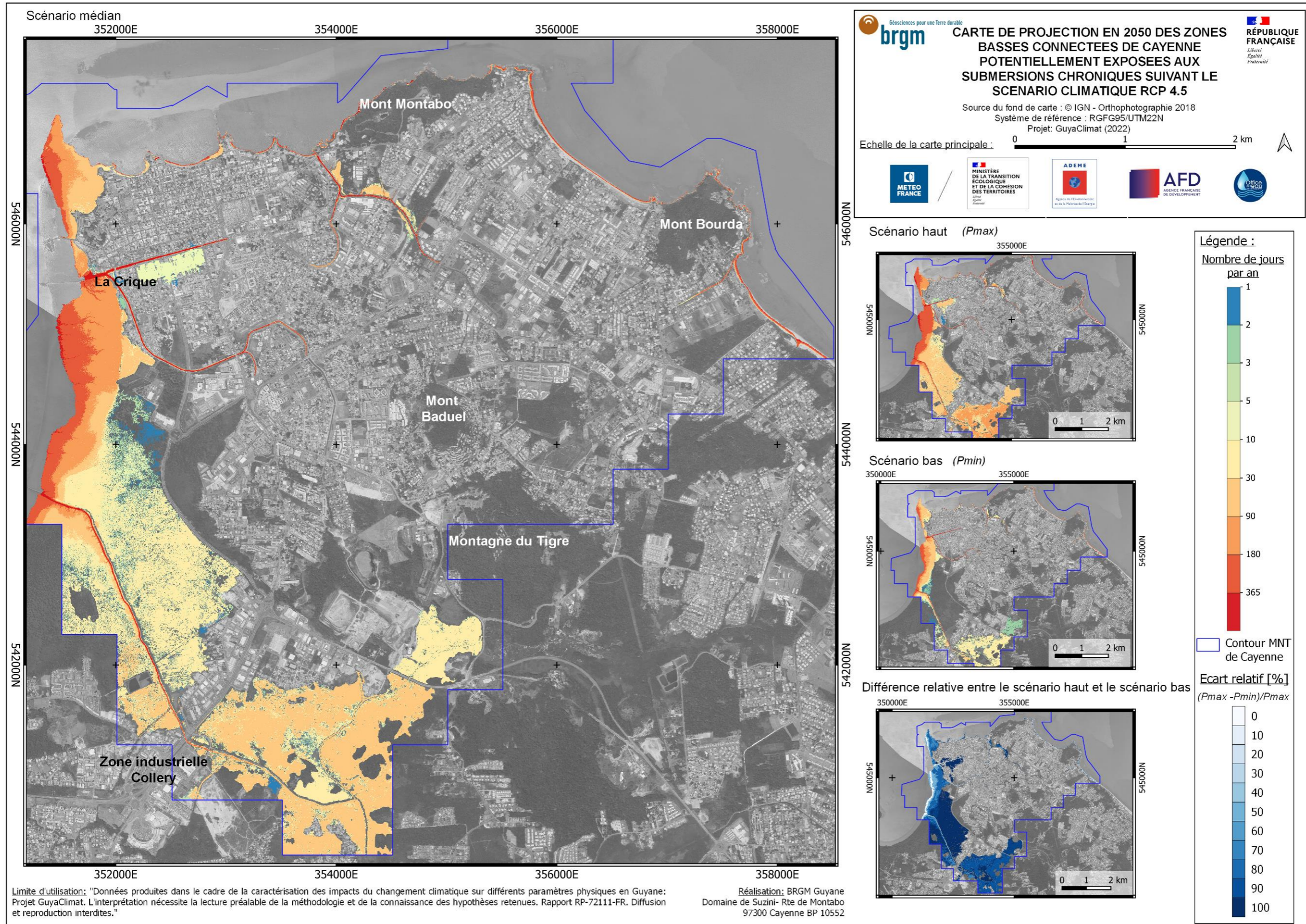
### **CAYENNE : Cartes des projections à 2050 des zones basses connectées potentiellement exposées aux submersions chroniques pour les trois scénarios RCP2.6, RCP4.5 et RCP8.5**



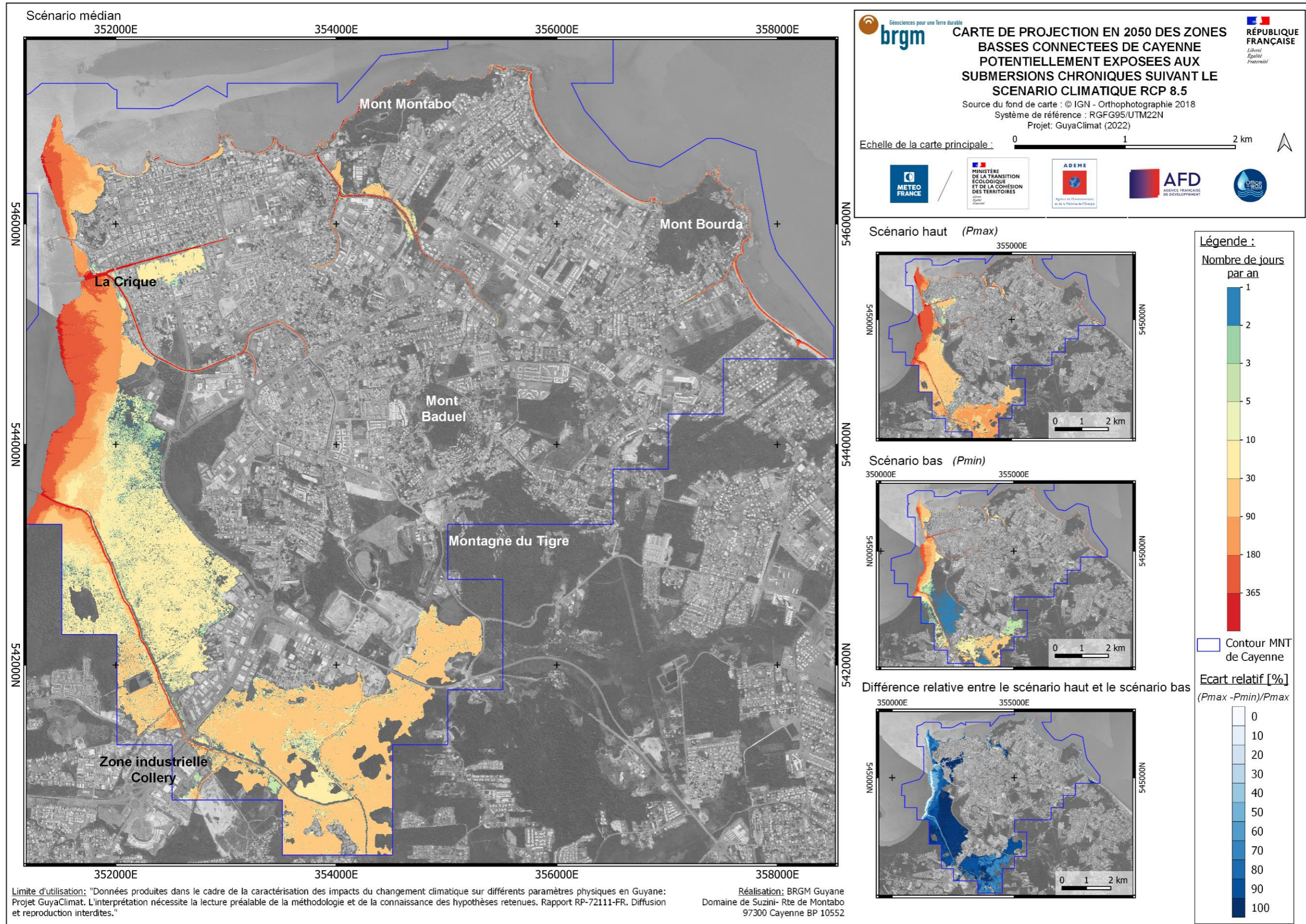














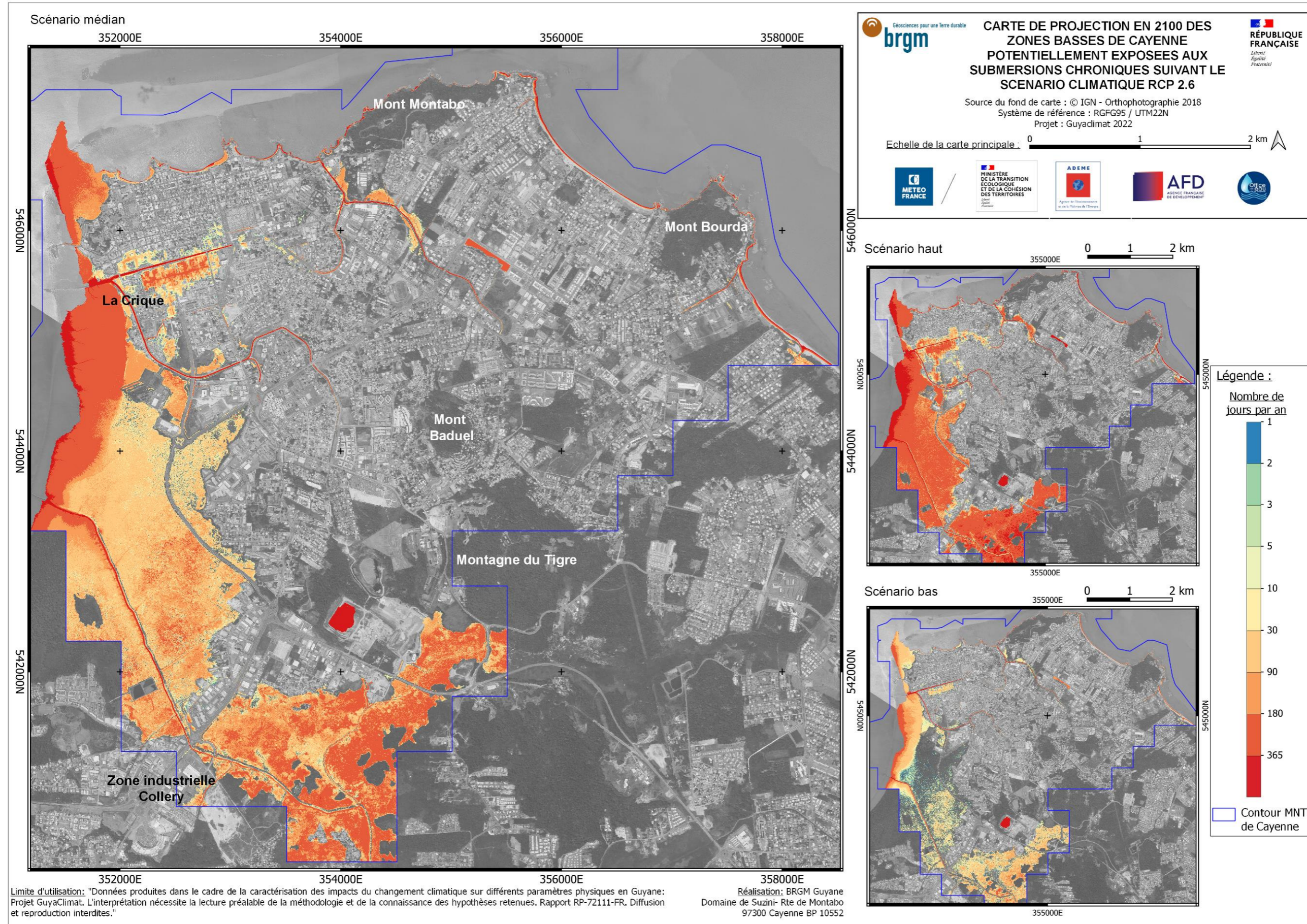


## **Annexe 4 (A4)**

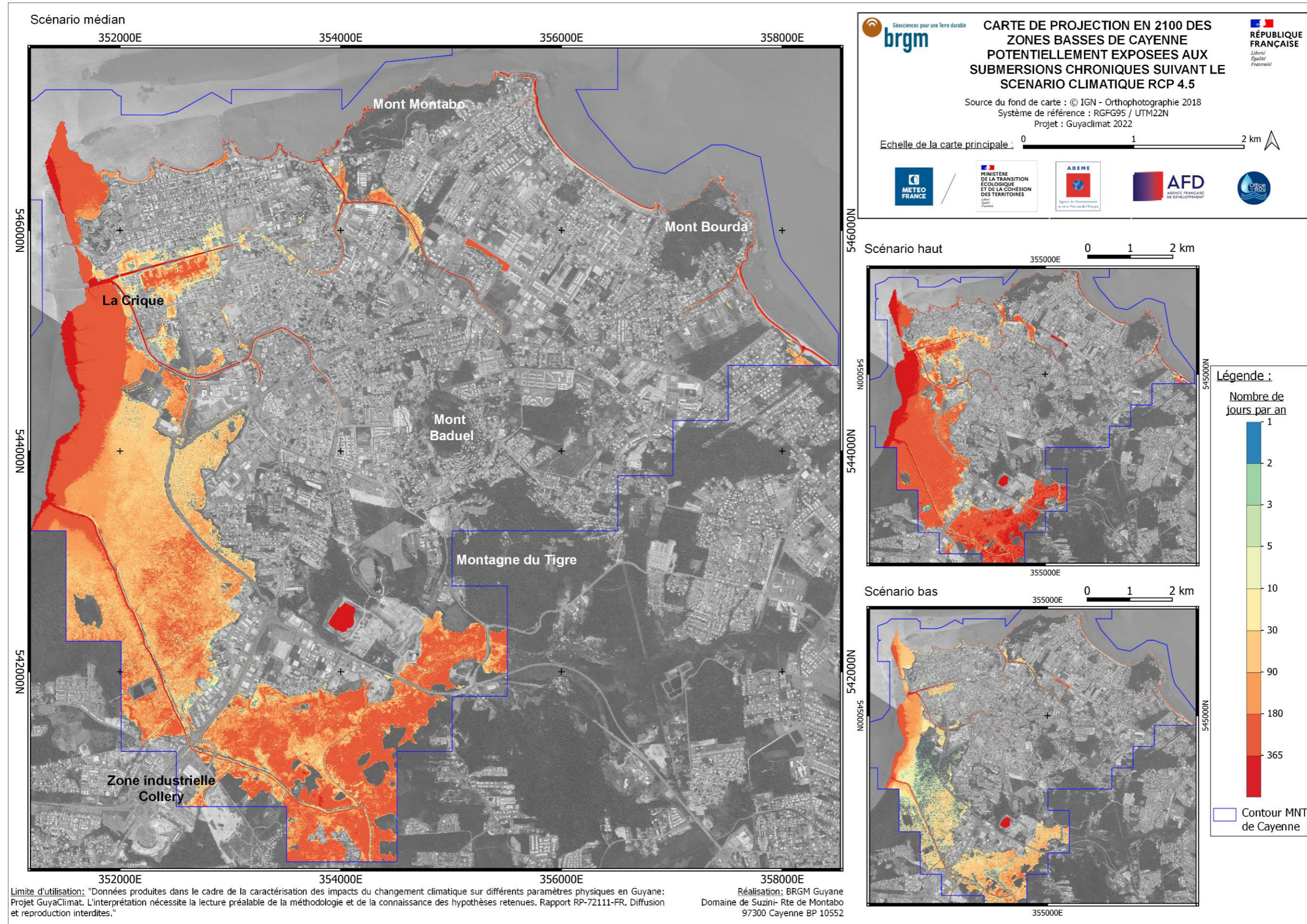
### **CAYENNE : Cartes des projections à 2100 des zones basses potentiellement exposées aux submersions chroniques pour les trois scénarios RCP2.6, RCP4.5 et RCP8.5**



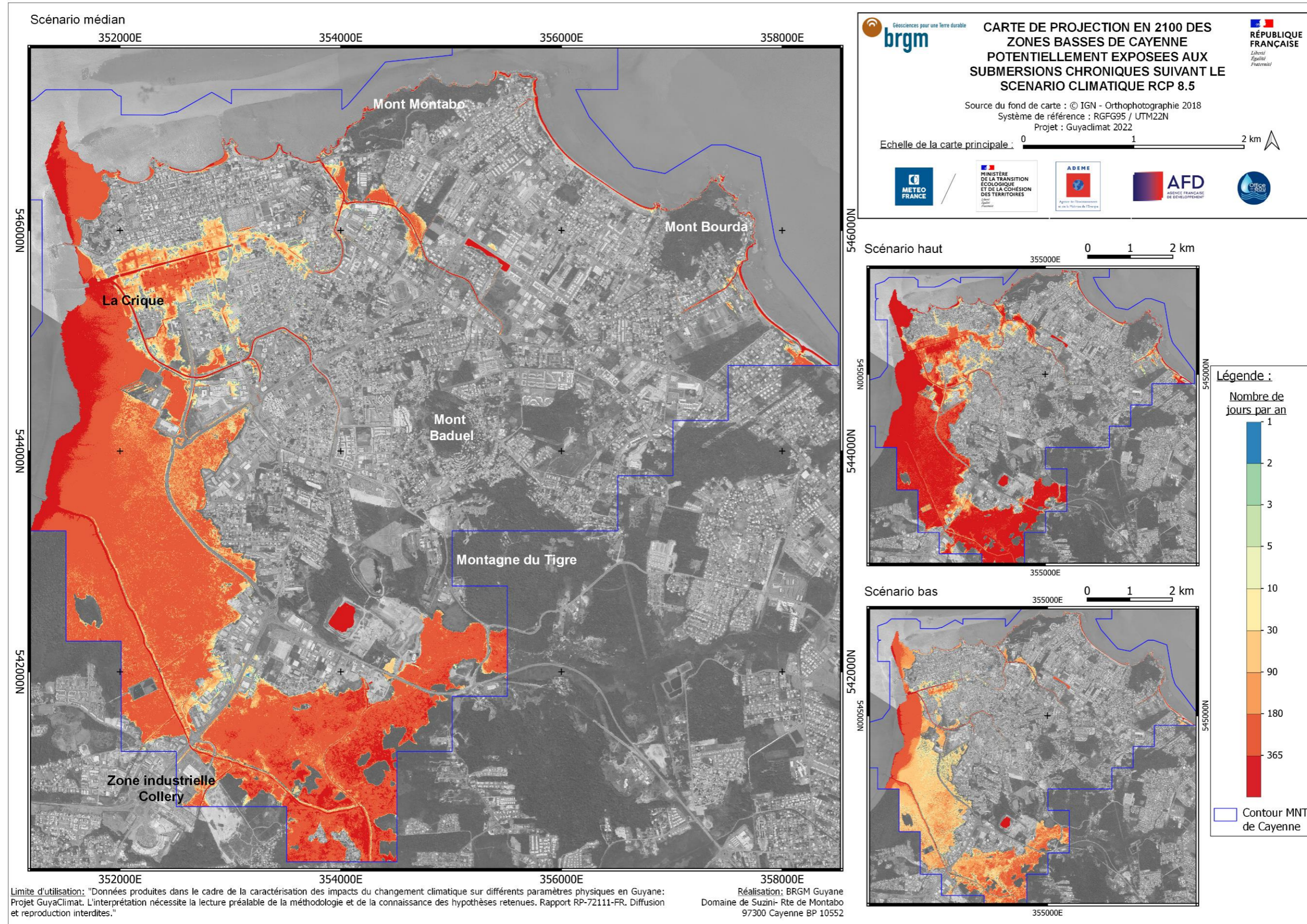
















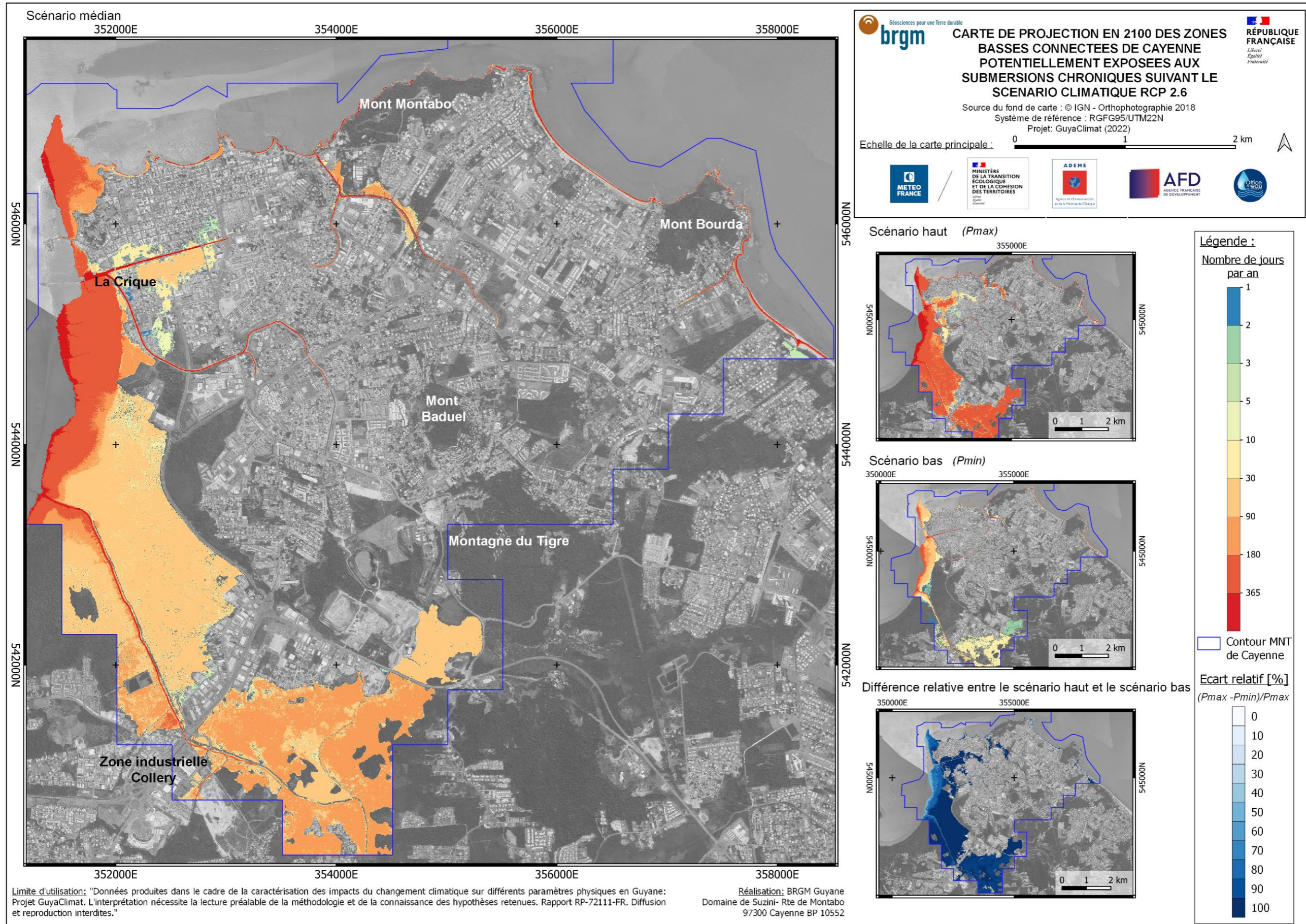


## **Annexe 5 (A5)**

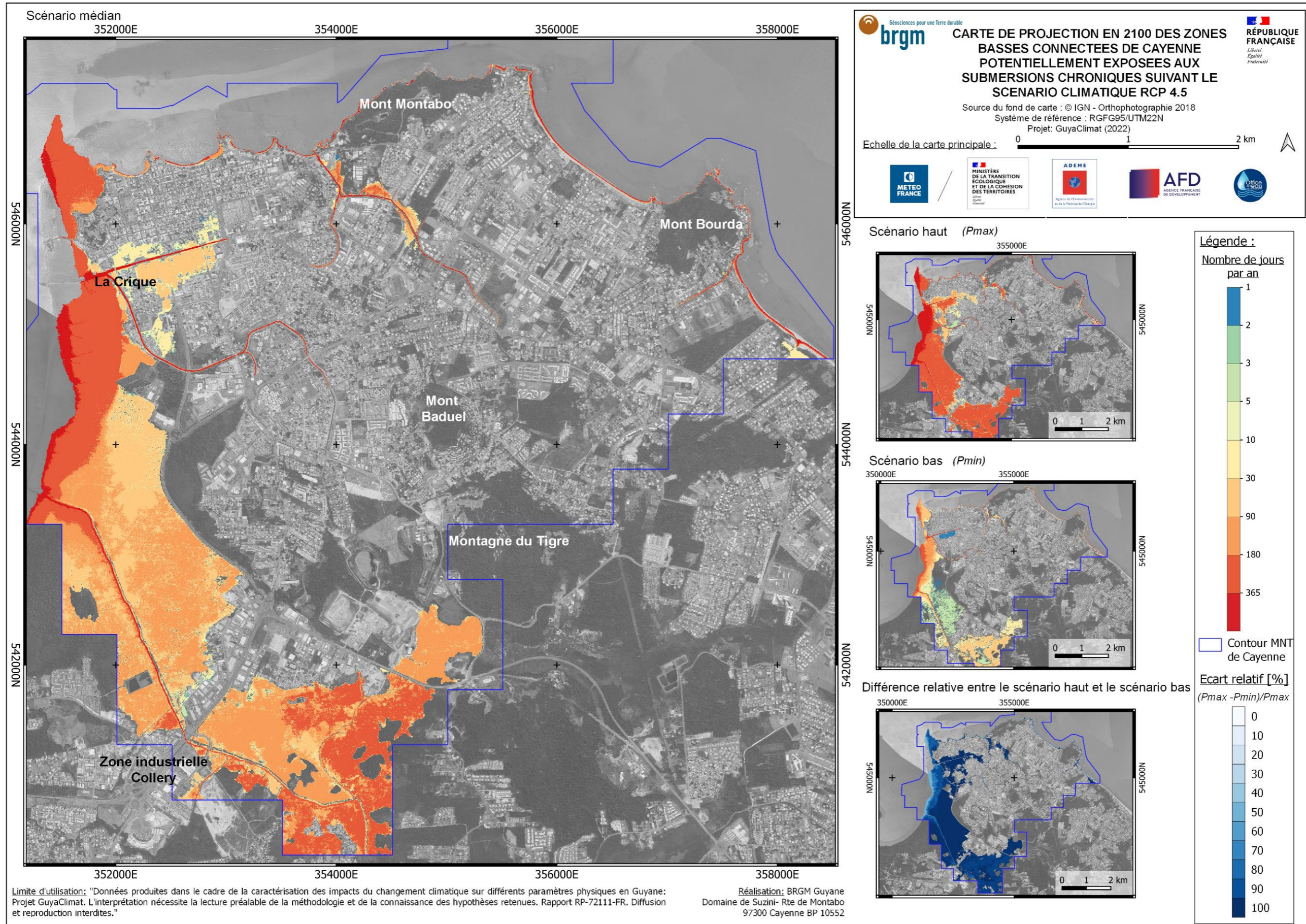
### **CAYENNE : Cartes des projections à 2100 des zones basses connectées potentiellement exposées aux submersions chroniques pour les trois scénarios RCP2.6, RCP4.5 et RCP8.5**



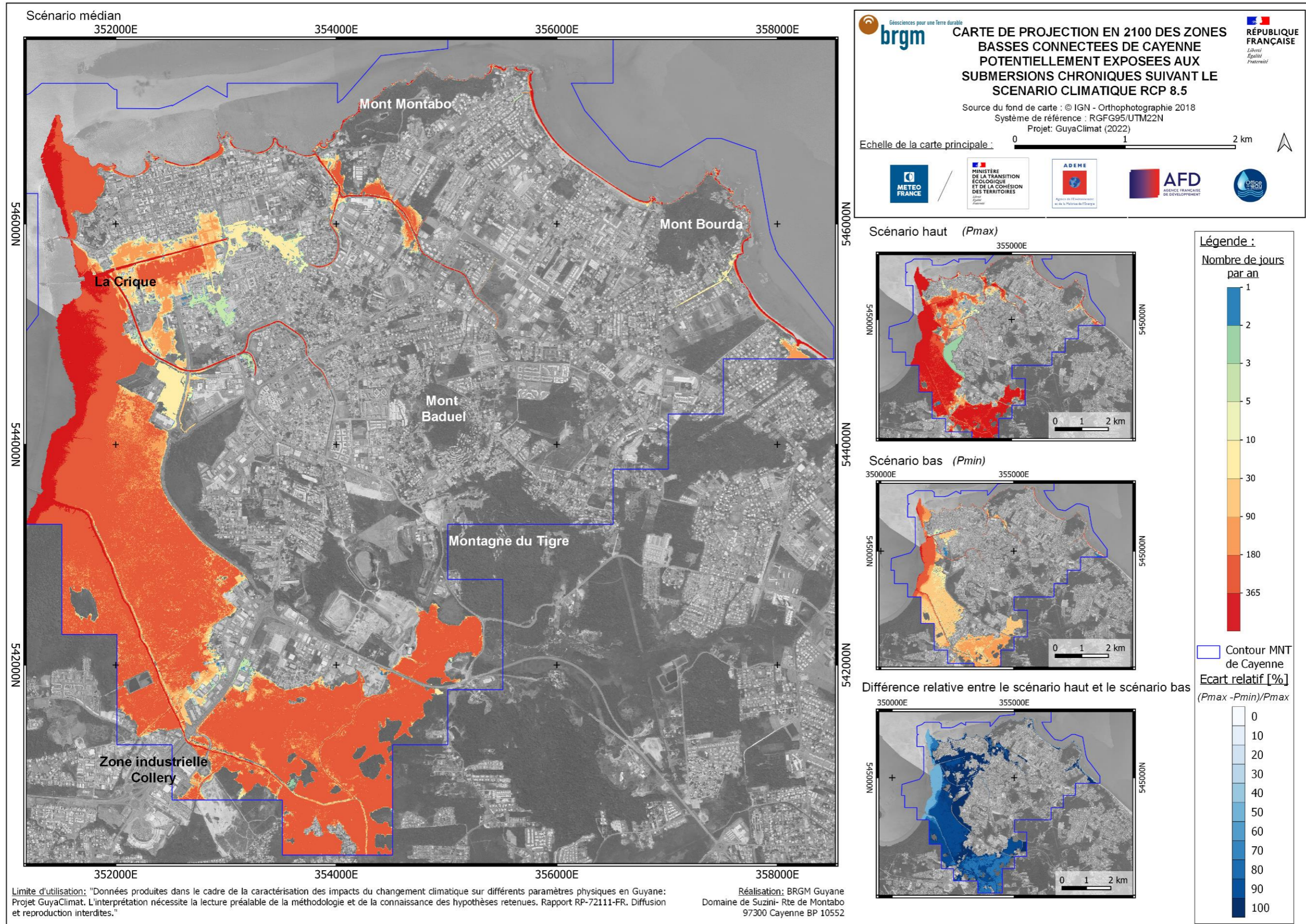














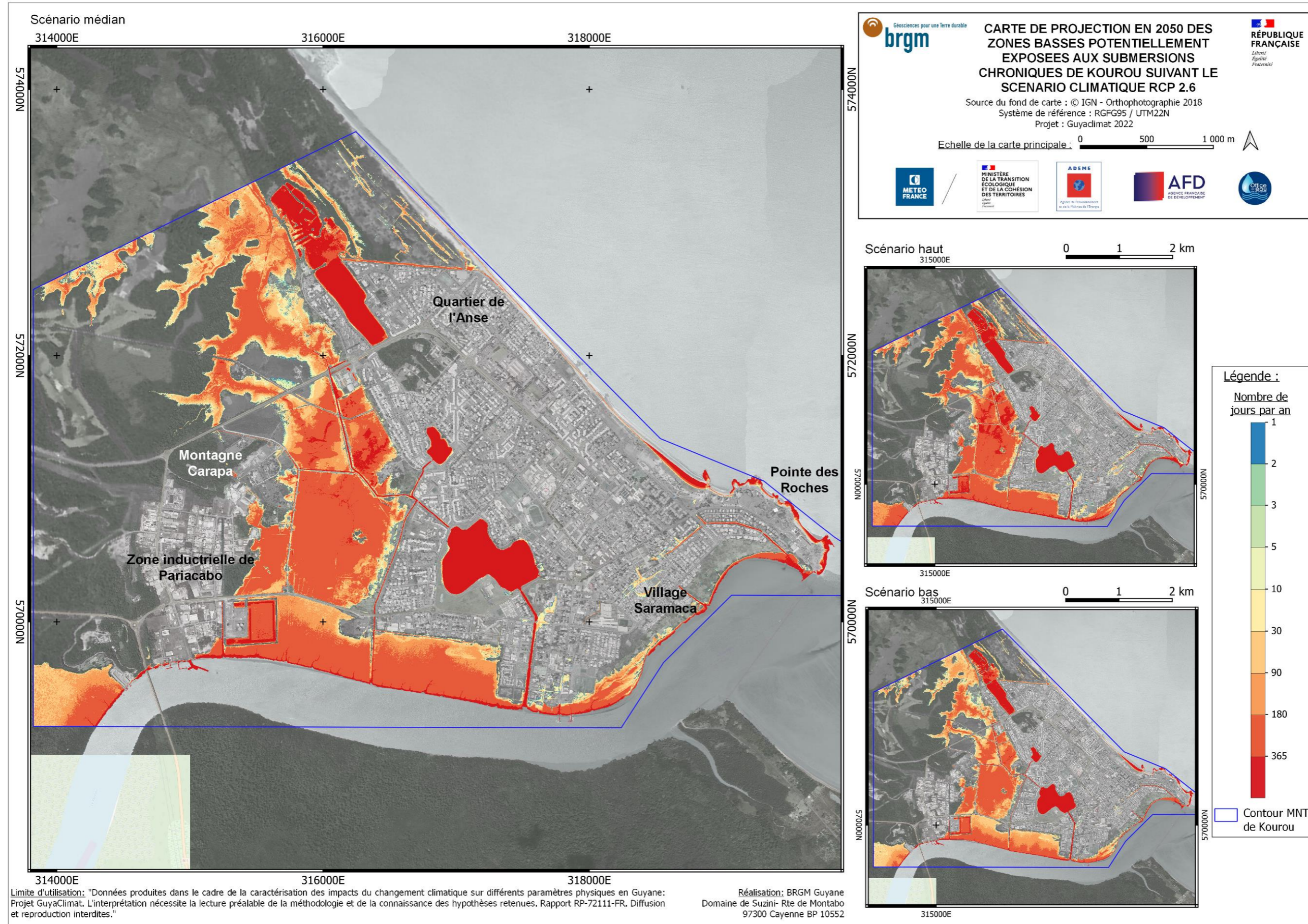


## **Annexe 6 (A6)**

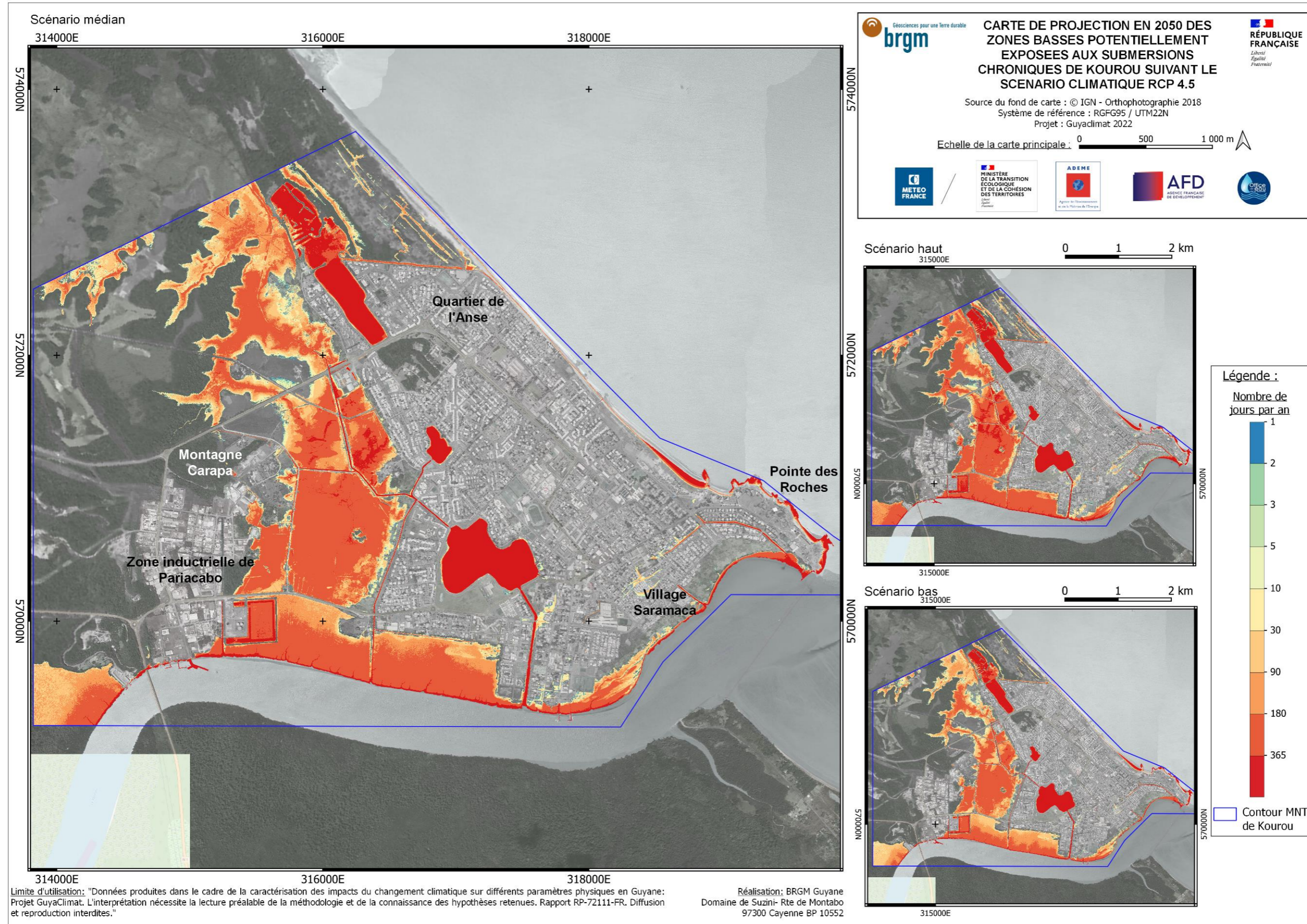
### **KOUROU : Cartes des projections à 2050 des zones basses potentiellement exposées aux submersions chroniques pour les trois scénarios RCP2.6, RCP4.5 et RCP8.5**



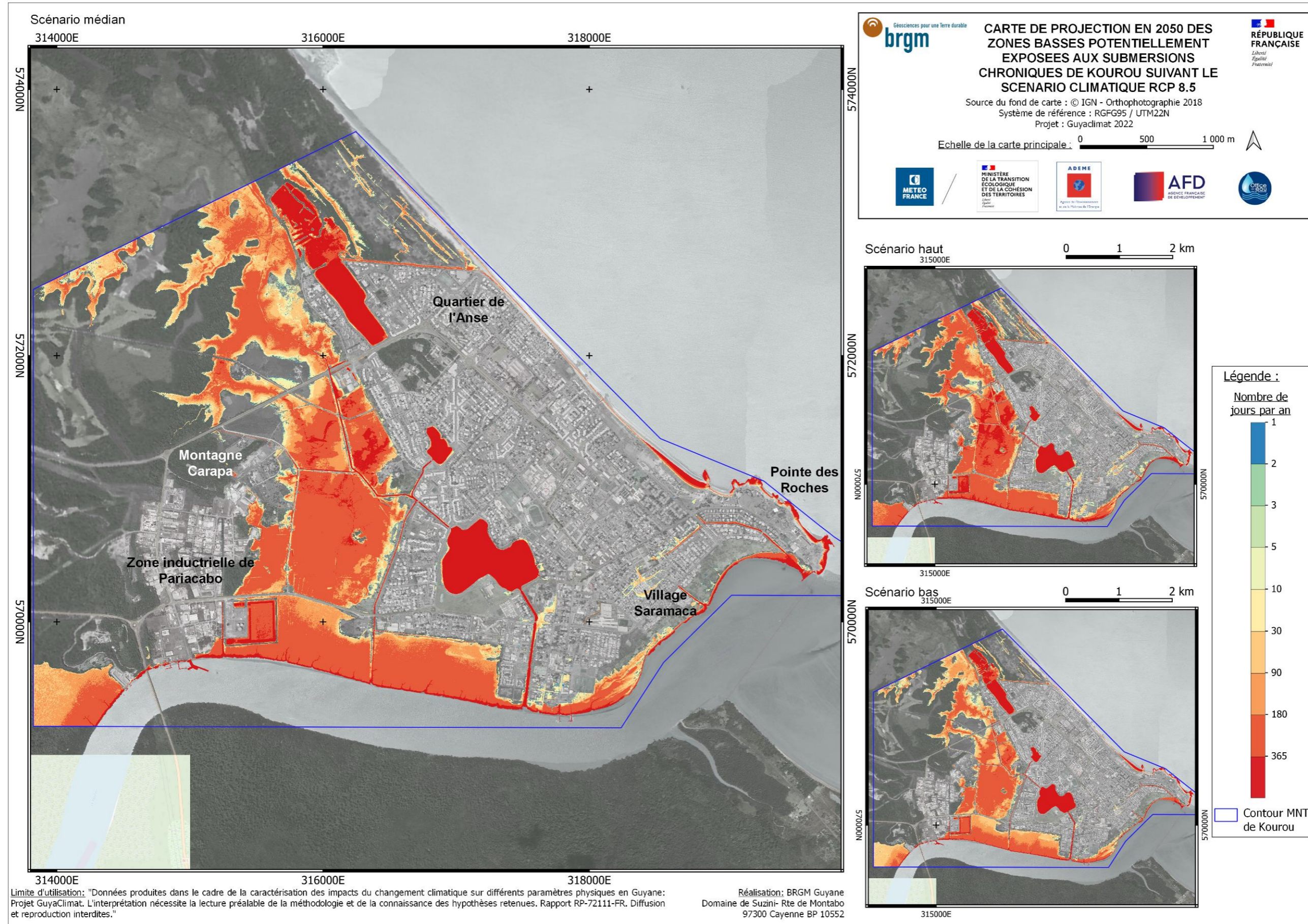
















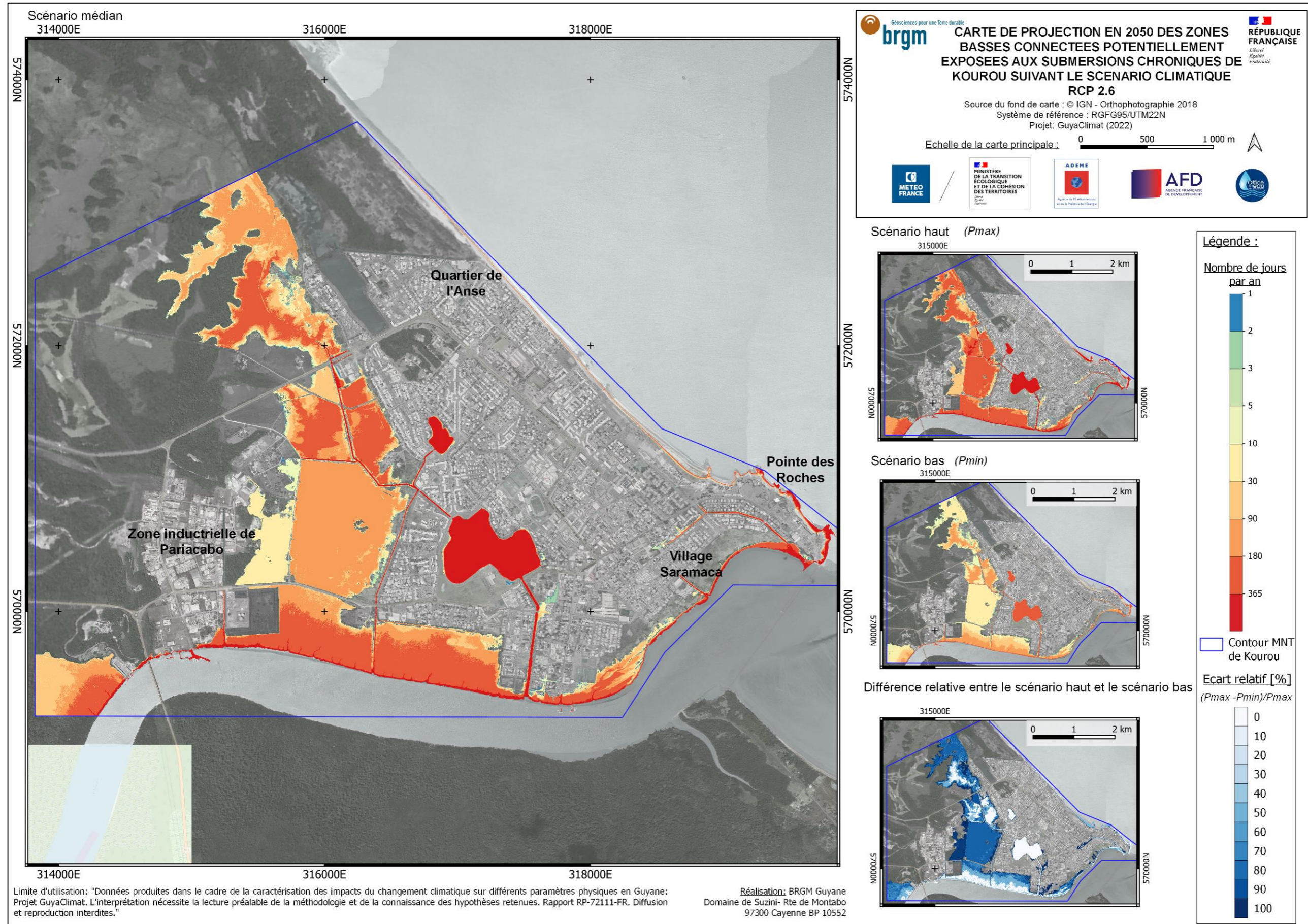


## **Annexe 7 (A7)**

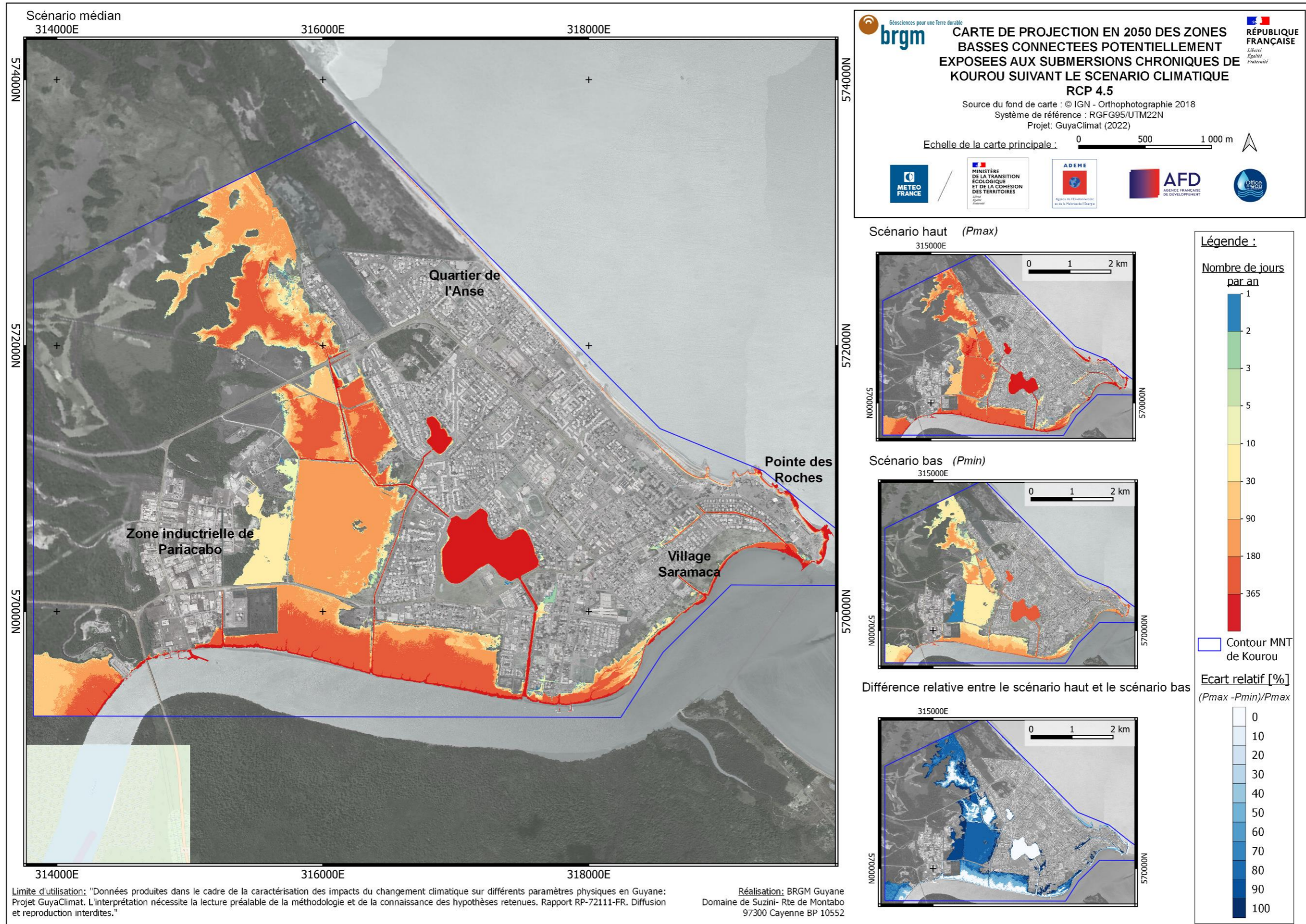
### **KOUROU : Cartes des projections à 2050 des zones basses connectées potentiellement exposées aux submersions chroniques pour les trois scénarios RCP2.6, RCP4.5 et RCP8.5**



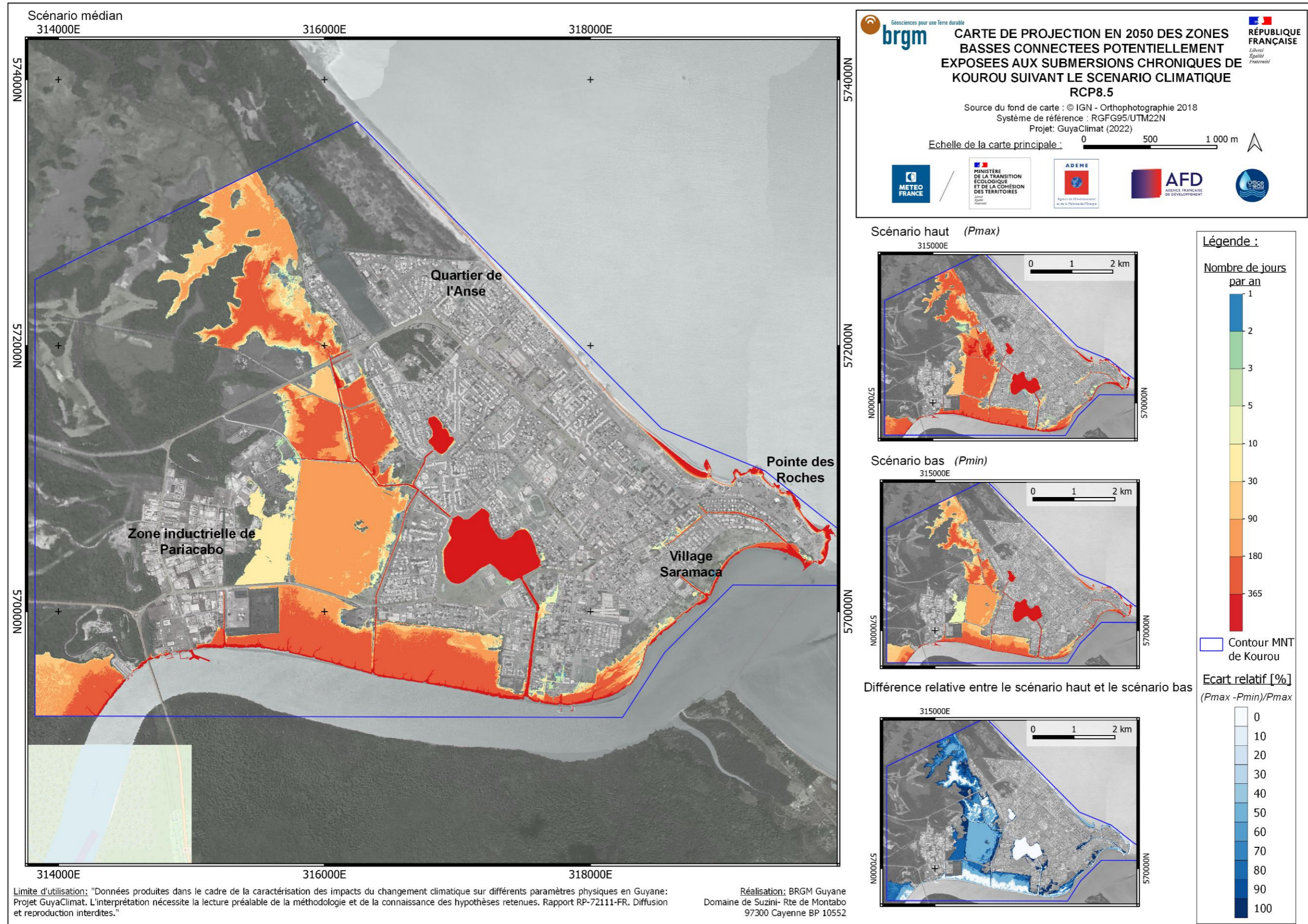














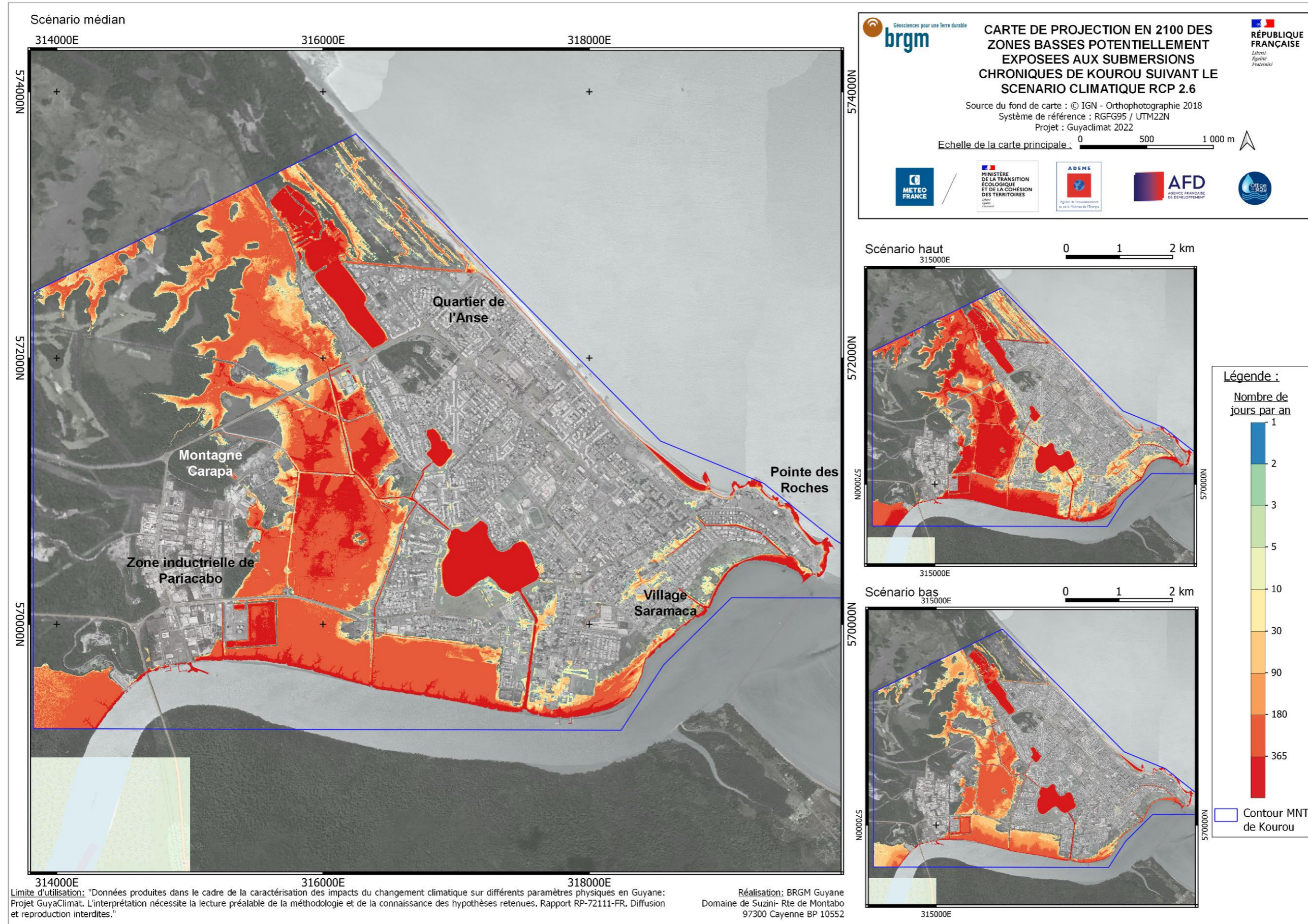


## **Annexe 8 (A8)**

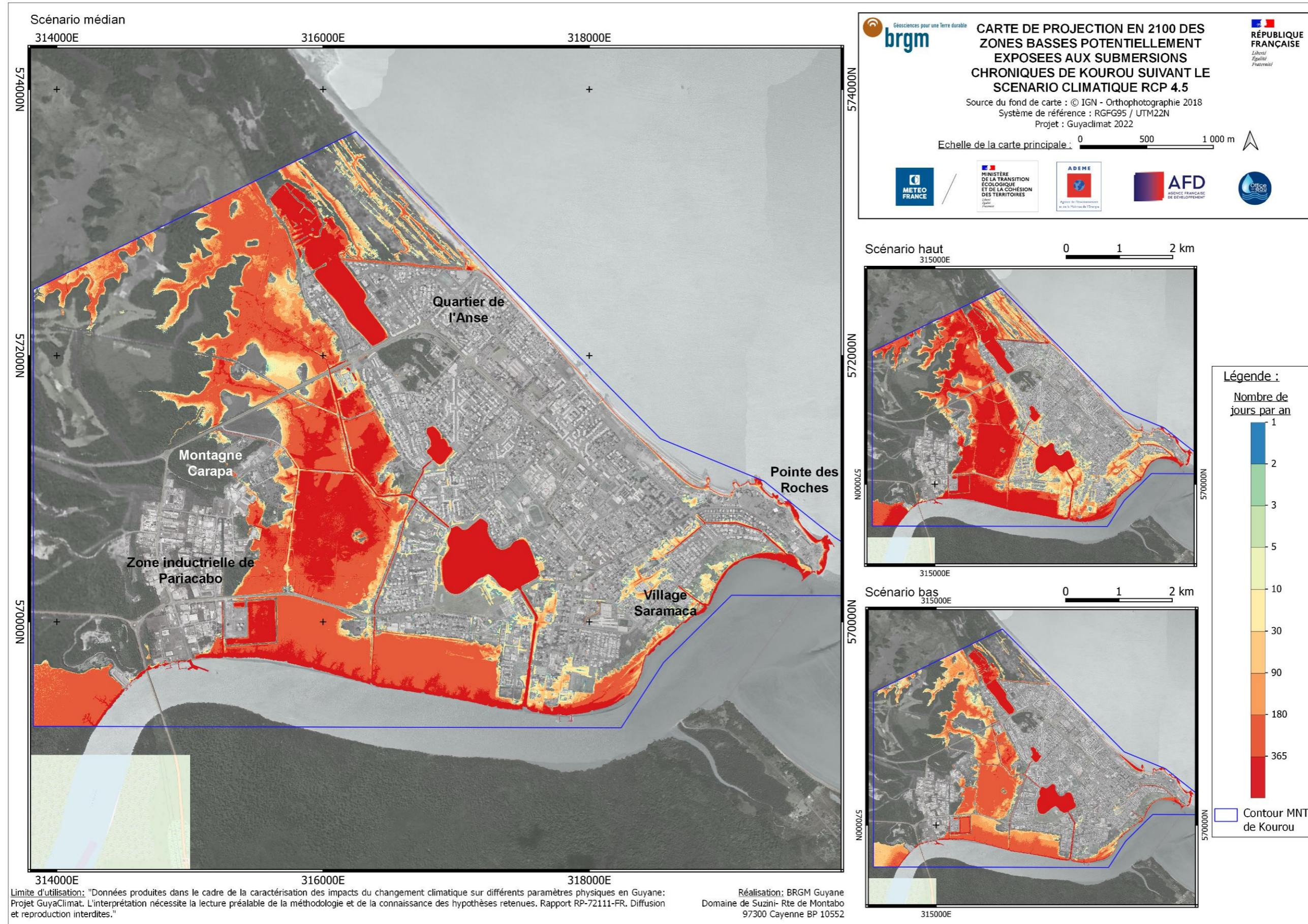
### **KOUROU : Cartes des projections à 2100 des zones basses potentiellement exposées aux submersions chroniques pour les trois scénarios RCP2.6, RCP4.5 et RCP8.5**



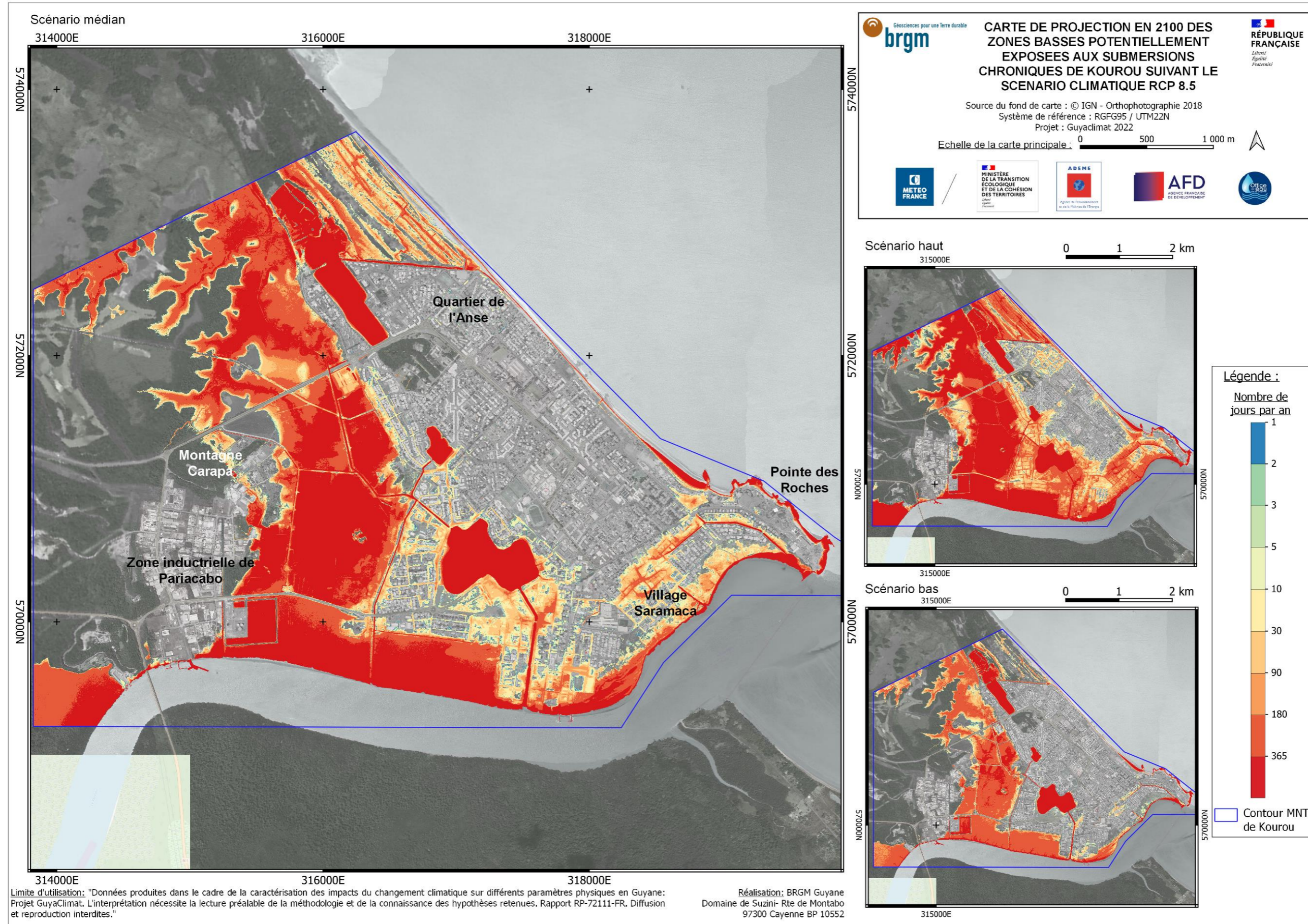
















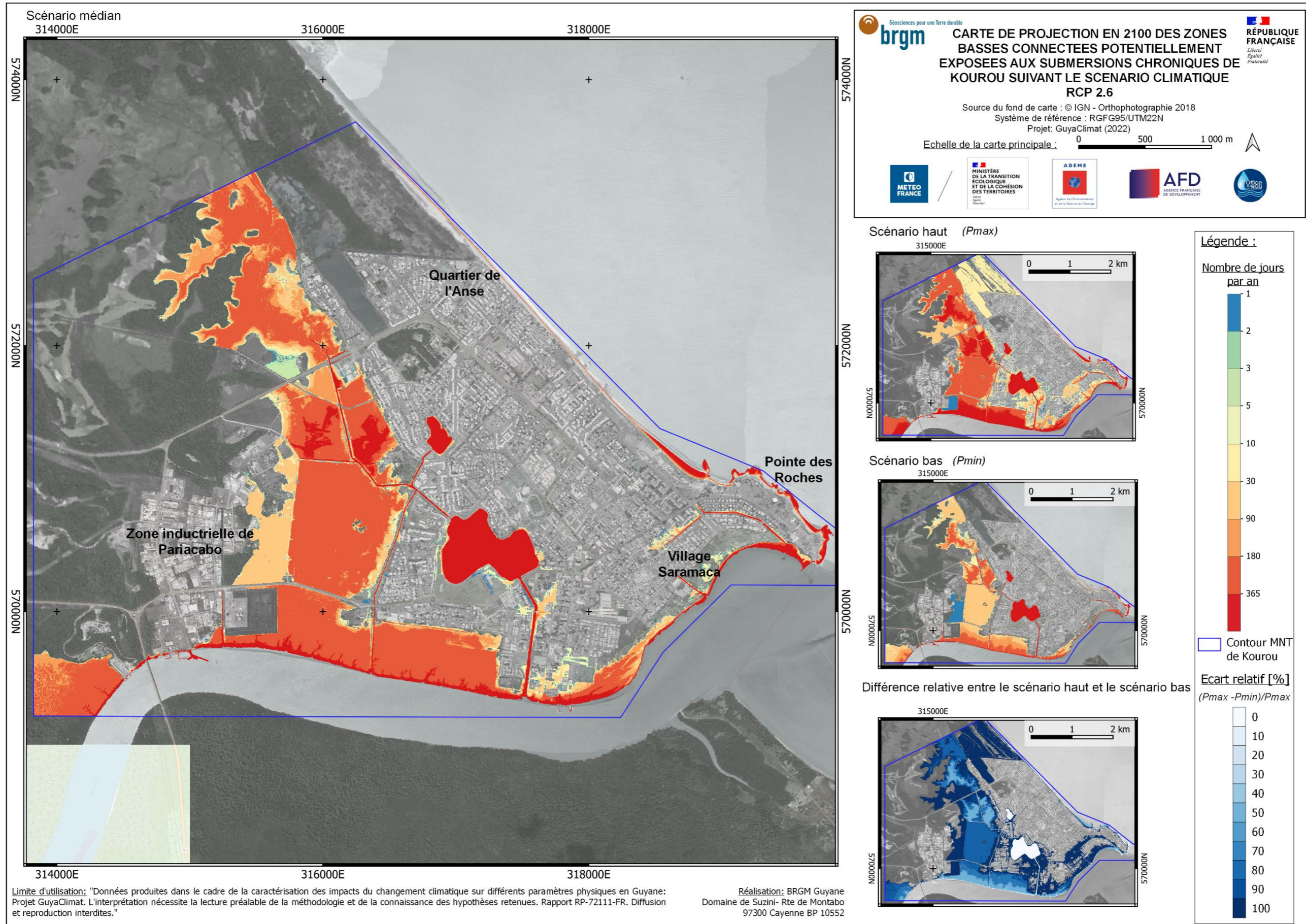


## **Annexe 9 (A9)**

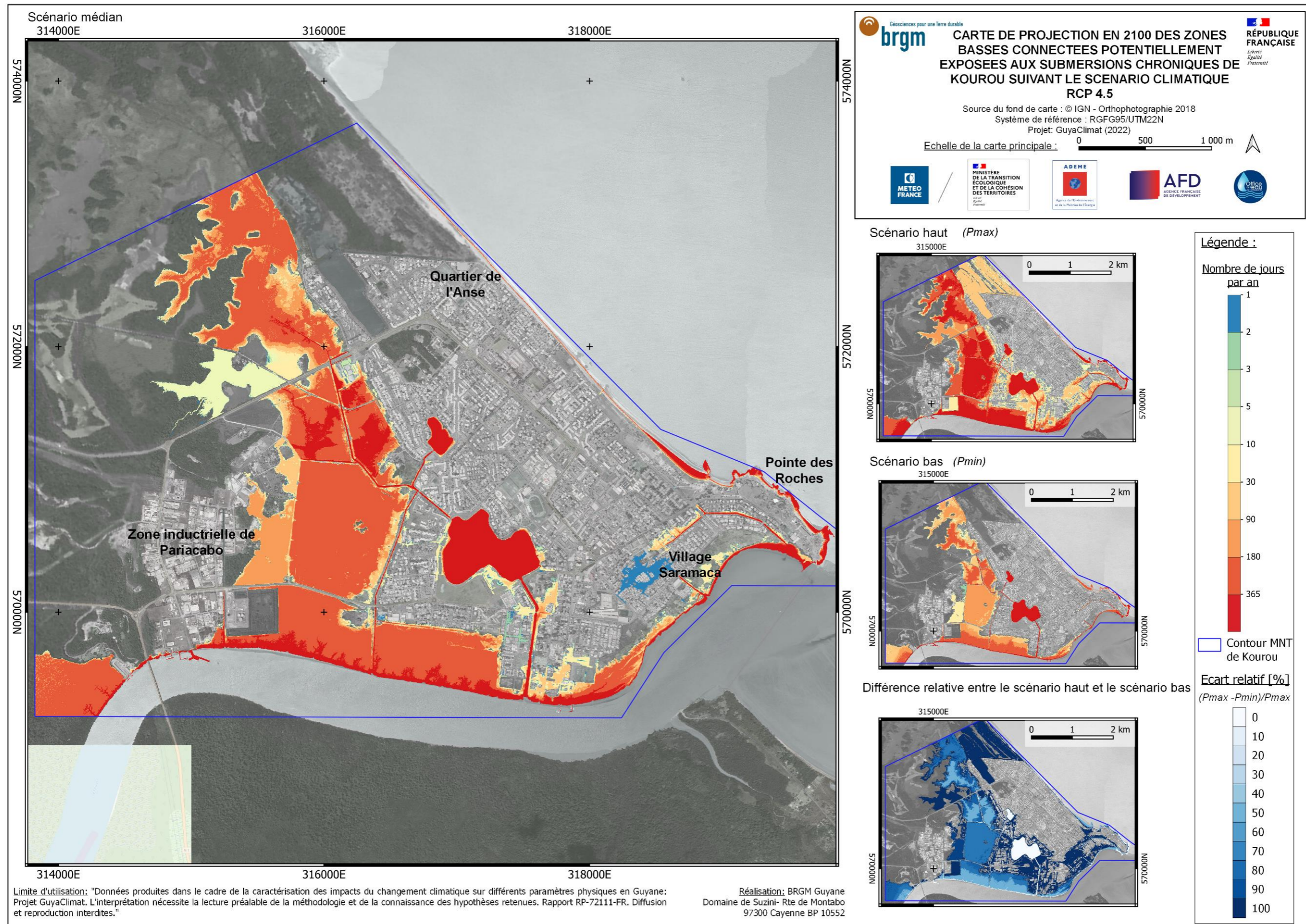
### **KOUROU : Cartes des projections à 2100 des zones basses connectées potentiellement exposées aux submersions chroniques pour les trois scénarios RCP2.6, RCP4.5 et RCP8.5**



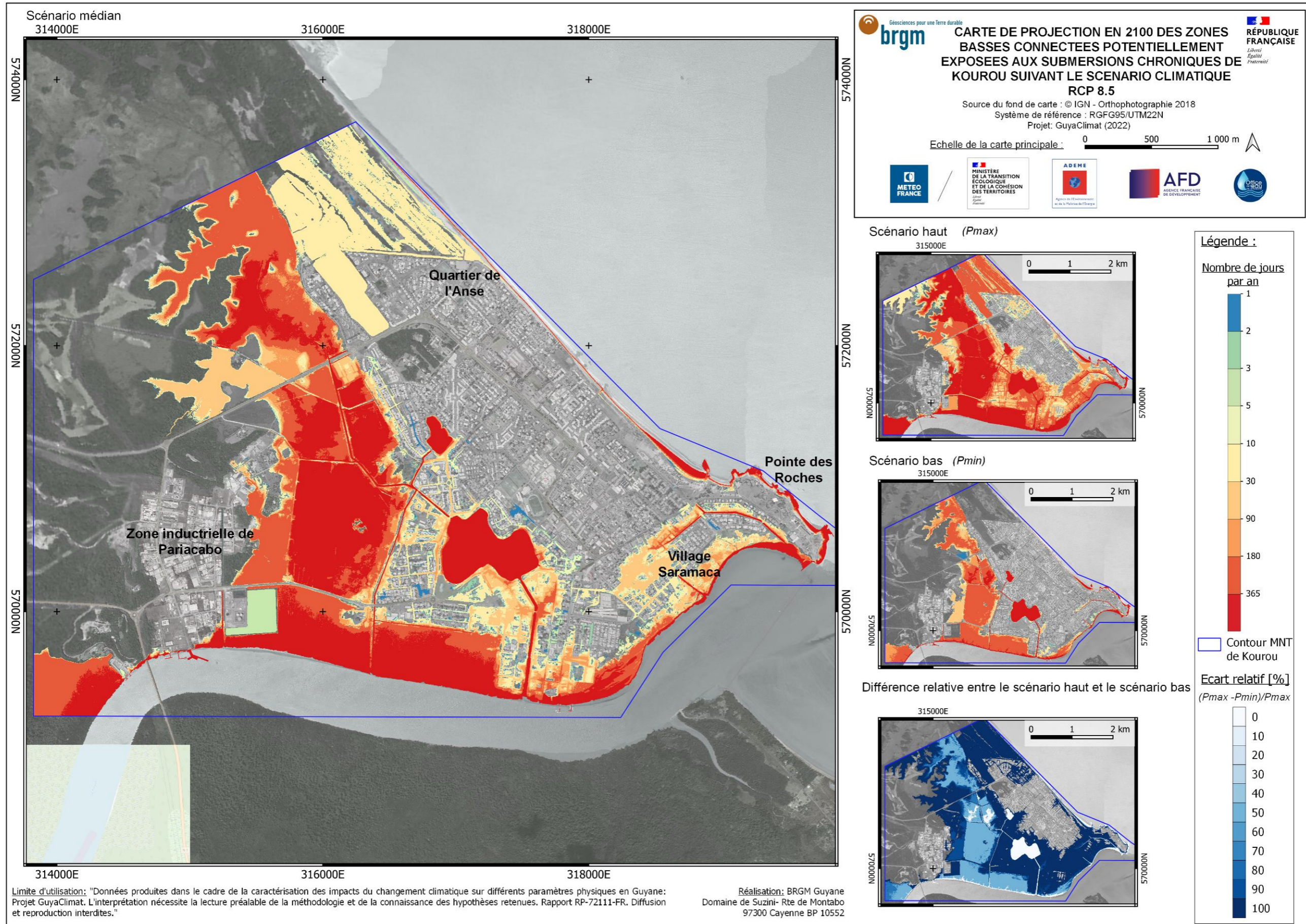
















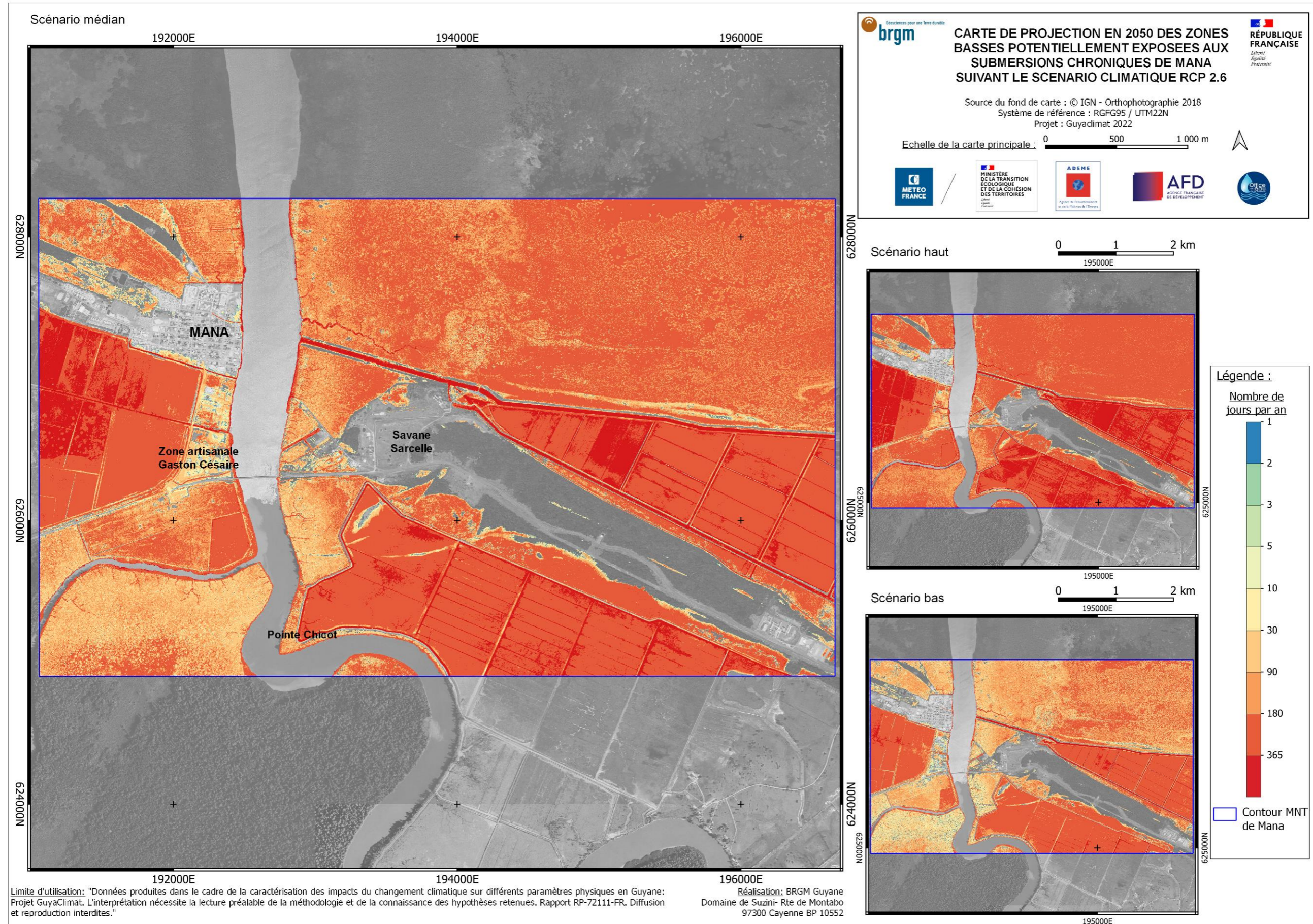


## **Annexe 10 (A10)**

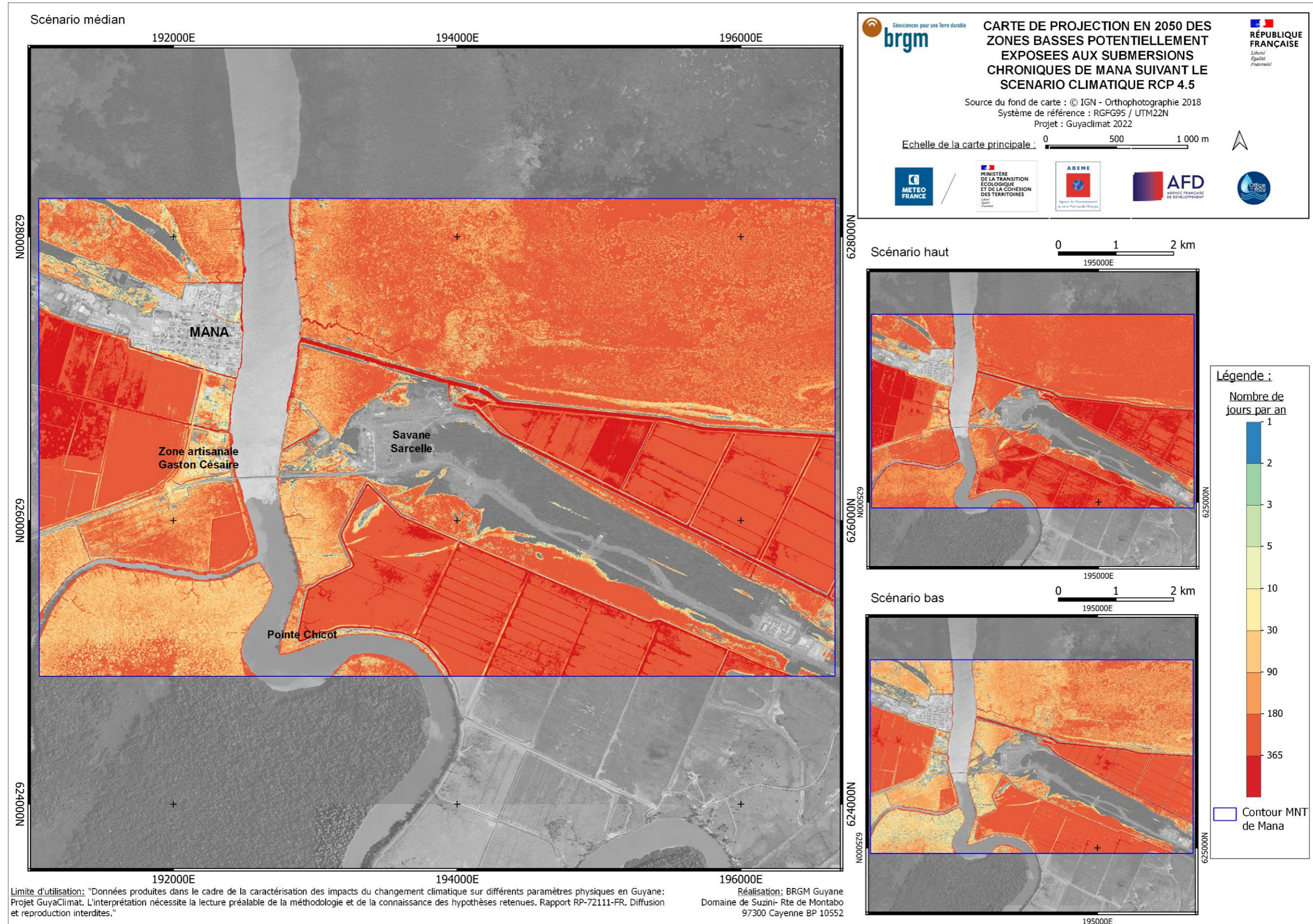
**MANA : Cartes des projections à 2050 des zones basses potentiellement exposées aux submersions chroniques pour les trois scénarios RCP2.6, RCP4.5 et RCP8.5**



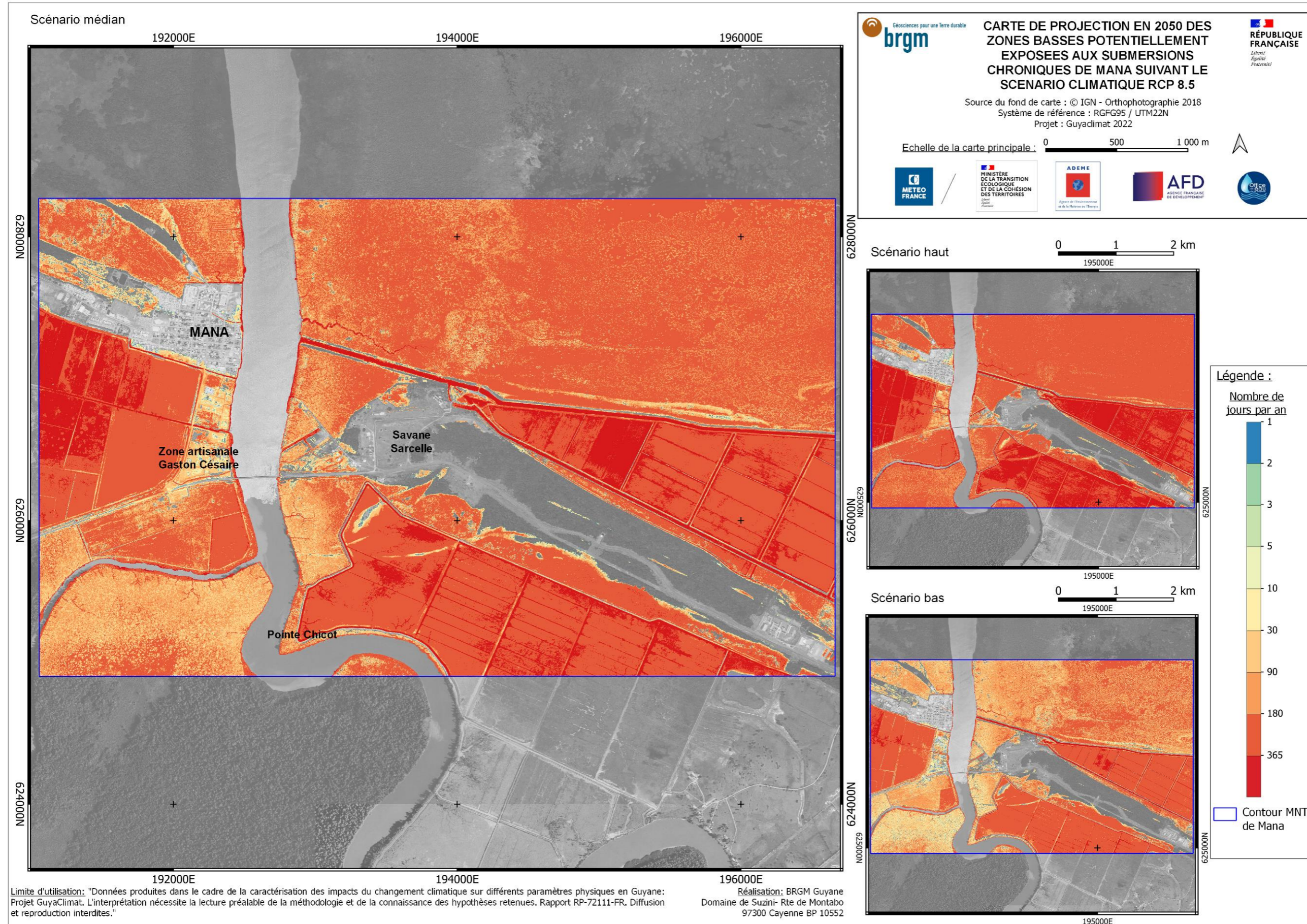


















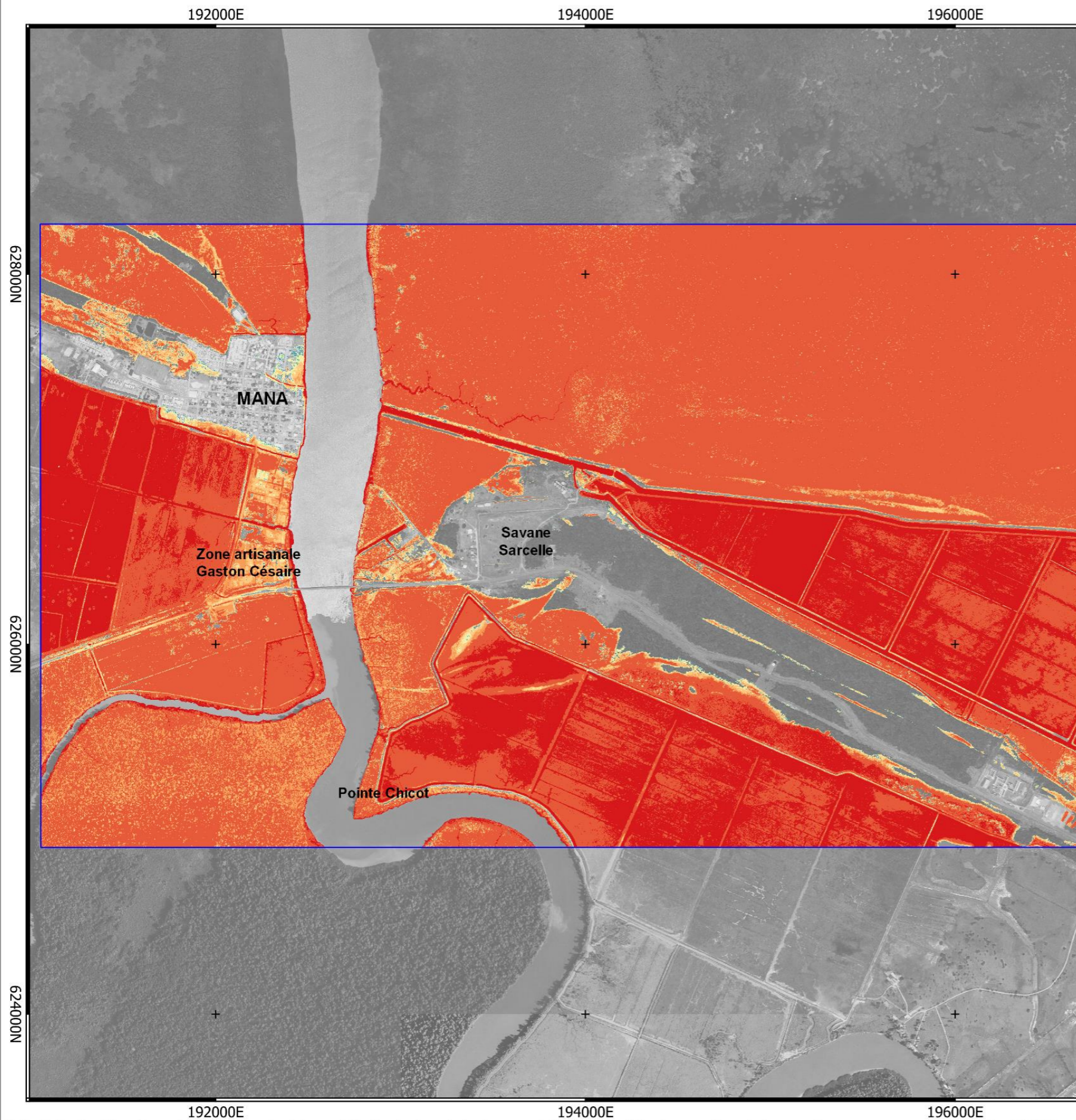
## **Annexe 11 (A11)**

**MANA : Cartes des projections à 2100 des zones basses potentiellement exposées aux submersions chroniques pour les trois scénarios RCP2.6, RCP4.5 et RCP8.5**





Scénario médian



**brgm** Géosciences pour une Terre durable

**REPUBLIQUE FRANÇAISE**  
Liberté  
Égalité  
Fraternité

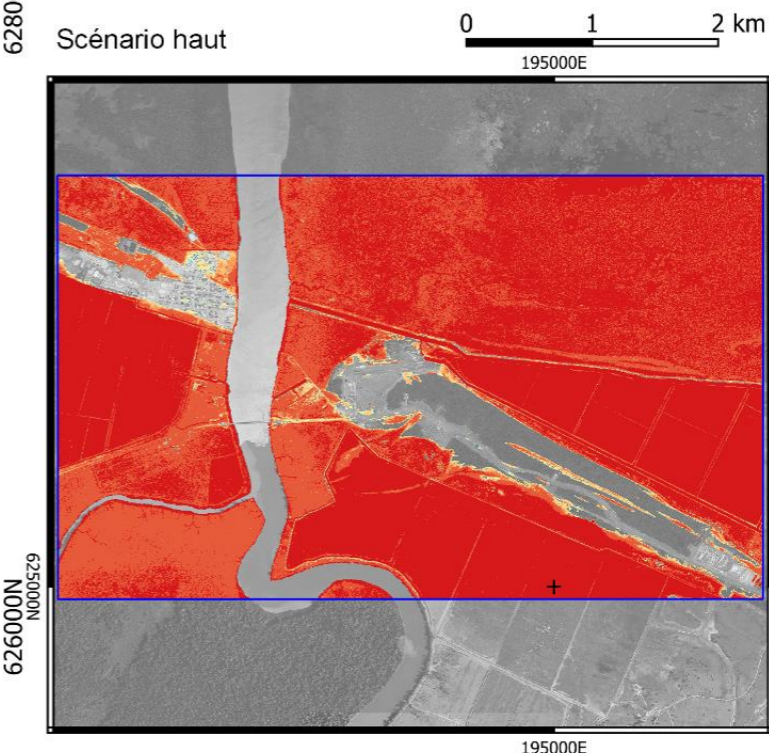
**CARTE DE PROJECTION EN 2100 DES ZONES BASSES POTENTIELLEMENT EXPOSEES AUX SUBMERSIONS CHRONIQUES DE MANA SUIVANT LE SCENARIO CLIMATIQUE RCP 2.6**

Source du fond de carte : © IGN - Orthophotographie 2018  
Système de référence : RGFG95 / UTM22N  
Projet : GuyaClimat 2022

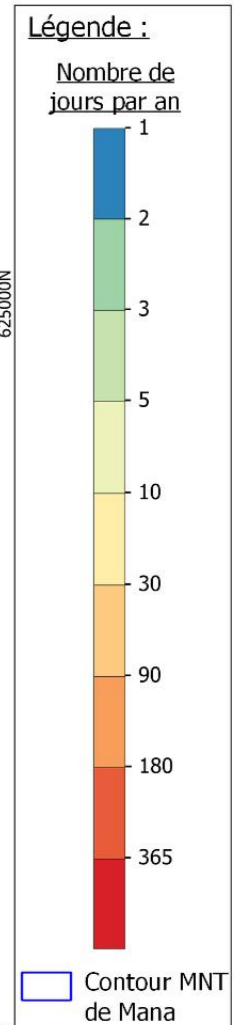
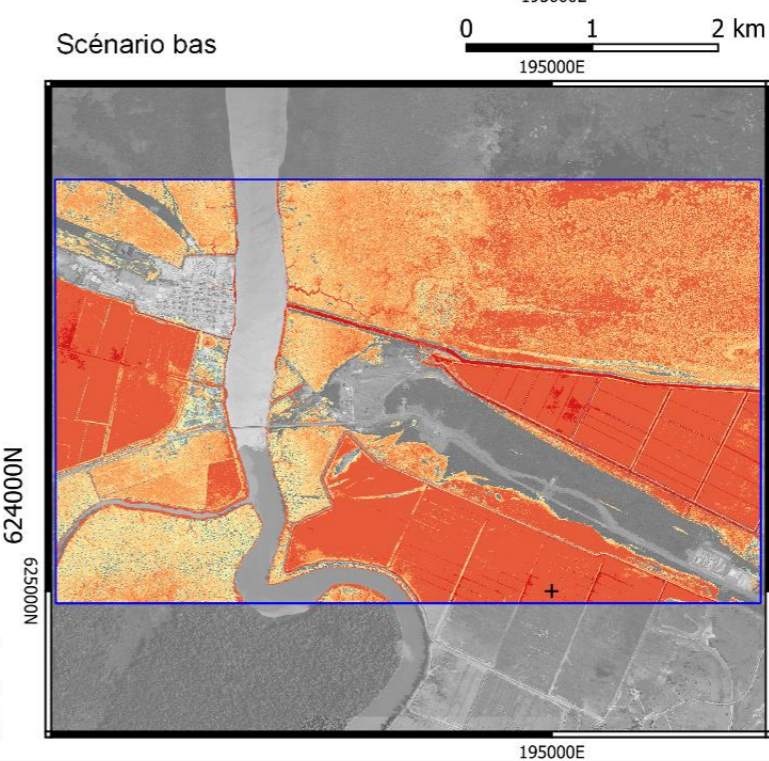
Echelle de la carte principale : 0 500 1 000 m

METEO FRANCE | MINISTÈRE DE LA TRANSITION ÉCOLOGIQUE ET DE LA COHÉSION DES TERRITOIRES | ADEME | AFD | Office de l'eau

Scénario haut



Scénario bas

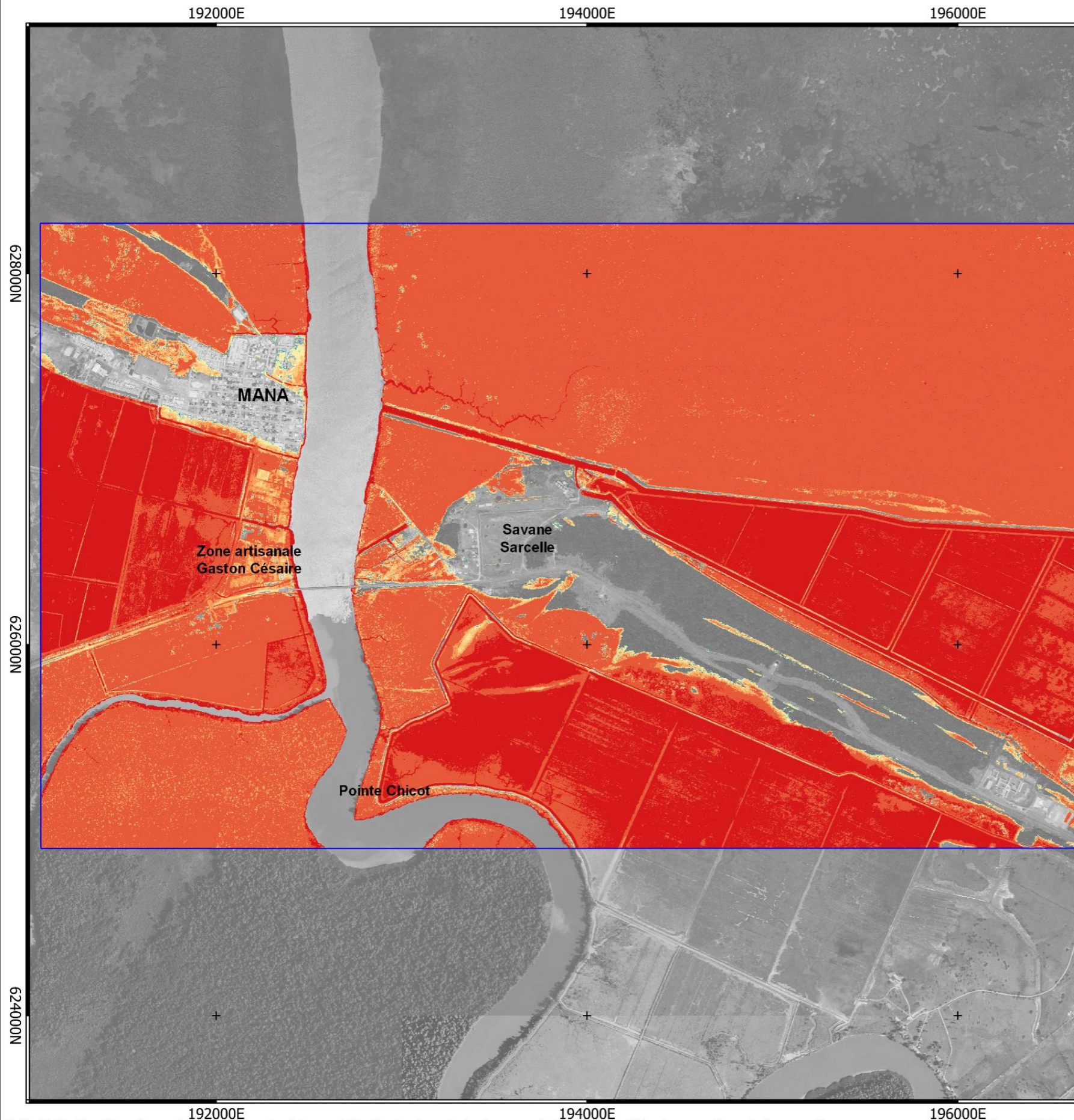


Limite d'utilisation: "Données produites dans le cadre de la caractérisation des impacts du changement climatique sur différents paramètres physiques en Guyane: Projet GuyaClimat. L'interprétation nécessite la lecture préalable de la méthodologie et de la connaissance des hypothèses retenues. Rapport RP-72111-FR. Diffusion et reproduction interdites."

Réalisation: BRGM Guyane  
Domaine de Suzini- Rte de Montabo  
97300 Cayenne BP 10552



Scénario médian



**brgm** Géosciences pour une Terre durable

**REPUBLICQUE FRANÇAISE**  
Liberté  
Égalité  
Fraternité

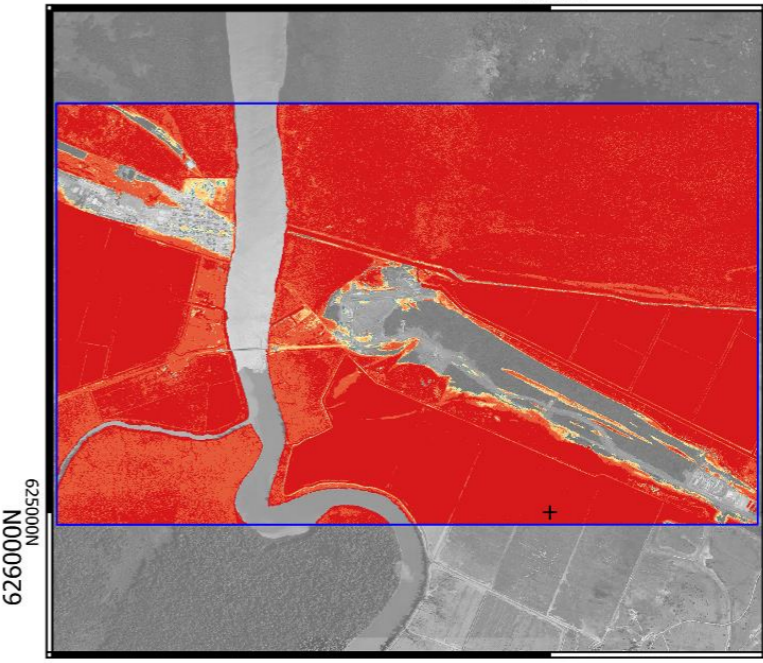
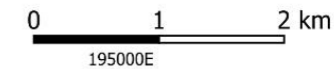
**CARTE DE PROJECTION EN 2100 DES ZONES BASSES POTENTIELLEMENT EXPOSEES AUX SUBMERSIONS CHRONIQUES DE MANA SUIVANT LE SCENARIO CLIMATIQUE RCP 4.5**

Source du fond de carte : © IGN - Orthophotographie 2018  
Système de référence : RGF95 / UTM22N  
Projet : Guyaclimat 2022

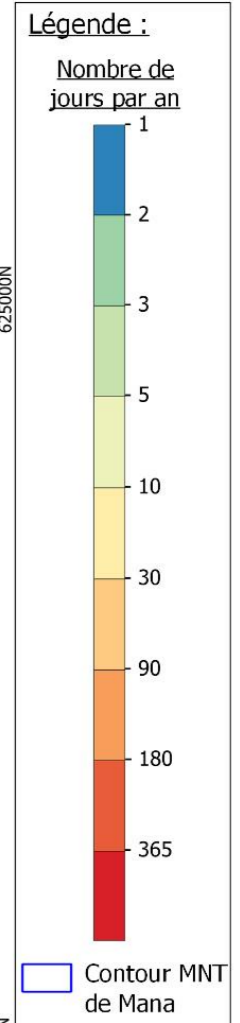
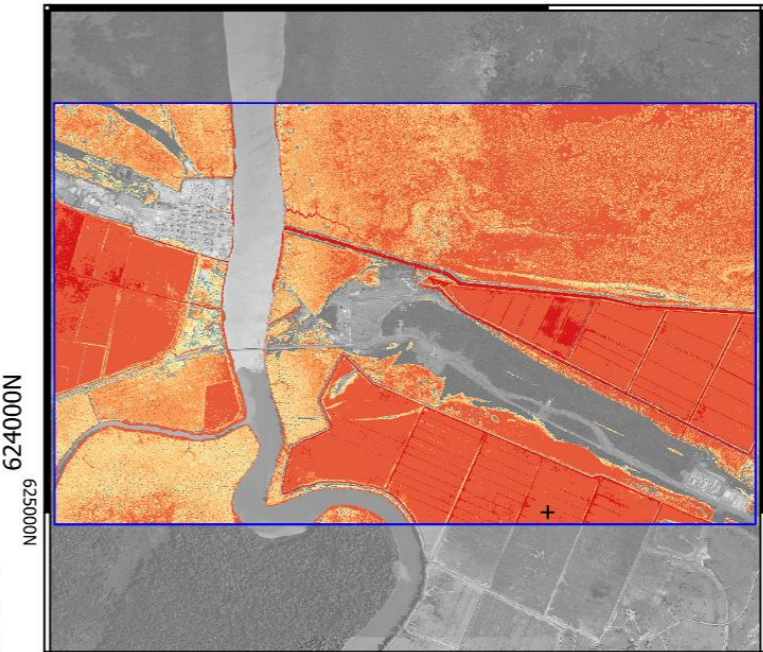
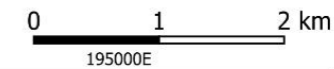
Echelle de la carte principale : 0 500 1 000 m

METEO FRANCE / MINISTÈRE DE LA TRANSITION ÉCOLOGIQUE ET DE LA COHÉSION DES TERRITOIRES / ADEME / AFD / Office Eau

Scénario haut



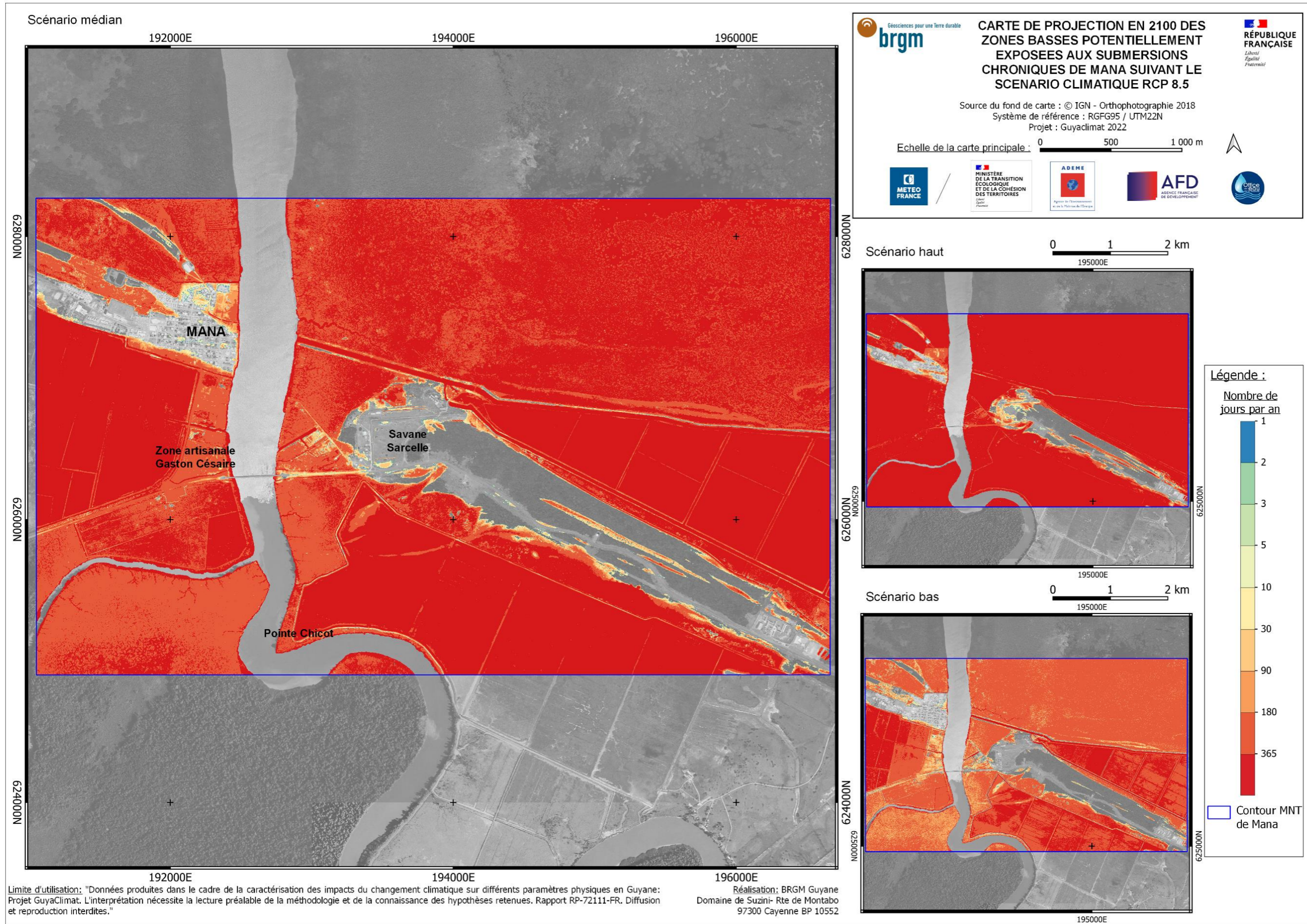
Scénario bas



Limite d'utilisation: "Données produites dans le cadre de la caractérisation des impacts du changement climatique sur différents paramètres physiques en Guyane: Projet GuyaClimat. L'interprétation nécessite la lecture préalable de la méthodologie et de la connaissance des hypothèses retenues. Rapport RP-72111-FR. Diffusion et reproduction interdites."

Réalisation: BRGM Guyane  
Domaine de Suzini- Rte de Montabo  
97300 Cayenne BP 10552











## **Annexes II : relatives au chapitre 5**

Modèle	Période Historique	Période Future SSP	Résolution horizontale (km)
ACCESS-CM2	1980-2014	2015-2100	250
ACCESS-ESM1-5	1980-2014	2015-2100	250
AWI-CM-1-1-MR	1980-2014	2015-2100	100
AWI-ESM-1-1-LR	1980-2014	2015-2100	250
BCC-CSM2-MR	1980-2014	2015-2100	100
BCC-ESM1	1980-2014	2015-2100	250
CAMS-CSM1-0	1980-2014	2015-2100	100
CanESM5	1980-2014	2015-2100	500
CESM2-FV2	1980-2014	2015-2100	250
CESM2-WACCM	1980-2014	2015-2100	100
CESM2-WACCM-FV2	1980-2014	2015-2100	250
CIESM	1980-2014	2015-2100	100
CMCC-CM2-HR4	1980-2014	2015-2100	100
CMCC-CM2-SR5	1980-2014	2015-2100	100
CMCC-ESM2	1980-2014	2015-2100	100
CNRM-CM6-1	1980-2014	2015-2100	250
CNRM-ESM2-1	1980-2014	2015-2100	250
E3SM-1-0	1980-2014	2015-2100	100
E3SM-1-1-ECA	1980-2014	2015-2100	100
EC-Earth3	1980-2014	2015-2100	100
EC-Earth3-AerChem	1980-2014	2015-2100	100
EC-Earth3-CC	1980-2014	2015-2100	100
EC-Earth3-Veg	1980-2014	2015-2100	100
EC-Earth3-Veg-LR	1980-2014	2015-2100	250
FGOALS-f3-L	1980-2014	2015-2100	100
FGOALS-g3	1980-2016	2017-2100	250
FIO-ESM-2-0	1980-2014	2015-2100	100
GFDL-CM4	1980-2014	2015-2100	100
GFDL-ESM4	1980-2014	2015-2100	100
GISS-E2-1-G	1980-2014	2015-2100	250
GISS-E2-1-H	1980-2014	2015-2100	250
HadGEM3-GC31-LL	1980-2014	2015-2100	250
IITM-ESM	1980-2014	2015-2100	250
INM-CM4-8	1980-2014	2015-2100	100
INM-CM5-0	1980-2014	2015-2100	100
IPSL-CM5A2-INCA	1980-2014	2015-2100	500
IPSL-CM6A-LR	1980-2014	2015-2100	250
IPSL-CM6A-LR-INCA	1980-2014	2015-2100	250
KACE-1-0-G	1980-2014	2015-2100	250
MCM-UA-1-0	1980-2014	2015-2100	250
MIROC-ES2L	1980-2014	2015-2100	500
MIROC6	1980-2014	2015-2100	250
MPI-ESM-1-2-HAM	1980-2014	2015-2100	250
MPI-ESM1-2-HR	1980-2014	2015-2100	100
MPI-ESM1-2-LR	1980-2014	2015-2100	250
MRI-ESM2-0	1980-2014	2015-2100	100
NESM3	1980-2014	2015-2100	250
NorCPM1	1980-2014	2015-2100	250
NorESM2-LM	1980-2014	2015-2100	250
NorESM2-MM	1980-2014	2015-2100	100
TaiESM1	1980-2014	2015-2100	100
UKESM1-0-LL	1980-2014	2015-2100	250

**Tableau A1.** Modèles CMIP6 considérés. Les périodes historiques et futures sont communes à tous les modèles sauf FGOALS-g3.

Jeu de Données	Type	Variable	Résolution horizontale (km)
CMAP	Analyse	RR	250
GPCP	Analyse	RR	250
ERA5	Réanalyse	RR	25
HadISST	Analyse	TSM	100

**Tableau A2.** Références grillées utilisées. RR : taux de précipitations (mm/jour). TSM : température de surface de la mer (°C).



Identifiant	Nom	Longitude	Latitude	Zone Climatique	Période Considérée	Manques (%)	SQR	Période SQR
97360003	Apatou	54,340 °W	5,152 °N	Ouest	1980-2014	0,2	N	-
97361001	Awala-Yalimapo	53,892 °W	5,725 °N	Littoral	1980-2014	1,2	N	-
97310006	Cacao	52,471 °W	4,574 °N	Littoral	1980-2014	0,2	N	-
97356001	Camopi SAPC	52,338 °W	3,171 °N	Est	1980-2014	0,0	N	-
97307001	Cayenne-Matoury	52,365 °W	4,822 °N	Littoral	1980-2014	0,0	Y	1980-2014
97302005	Cayenne-Suzini	52,290 °W	4,930 °N	Littoral	1980-2014	0,0	N	-
97357001	Grand Santi SAPC	54,375 °W	4,270 °N	Ouest	1980-2014	0,2	N	-
97304001	Île Royale	52,583 °W	5,283 °N	Littoral	1980-2014	0,7	N	-
97303001	Iracoubo	53,212 °W	5,480 °N	Littoral	1980-2014	0,0	N	-
97304003	Kourou CSG	52,748 °W	5,209 °N	Littoral	1980-2014	0,0	Y	1980-2014
97353001	Maripasoula	54,028 °W	3,640 °N	Sud	1980-2014	0,0	N	-
97313001	Montsinery	52,492 °W	4,891 °N	Littoral	1980-2014	0,0	N	-
97301001	Regina	52,131 °W	4,314 °N	Est	1980-2014	0,0	N	-
97310004	Roura	52,324 °W	4,727 °N	Littoral	1980-2014	0,0	N	-
97358001	Saint Élie	53,288 °W	4,825 °N	Ouest	1980-2014	2,4	N	-
97308001	Saint Georges	51,805 °W	3,891 °N	Est	1980-2014	0,0	N	-
97311001	Saint Laurent	54,032 °W	5,486 °N	Ouest	1980-2014	0,2	N	-
97352001	Saul SAPC	53,208 °W	3,624 °N	Sud	1980-2014	1,9	N	-
97312006	Savane Combi	52,953 °W	5,335 °N	Littoral	1980-2014	1,2	N	-
97312002	Sinnamary	52,952 °W	5,374 °N	Littoral	1980-2014	0,0	N	-
97305001	Tonate	52,474 °W	5,015 °N	Littoral	1980-2014	0,0	N	-

**Tableau A3.** Stations météorologiques de Guyane considérées pour les données quotidiennes de RR. SQR fait référence à série quotidienne de référence, correspondant au plus haut standard de qualité. Les pourcentages de manque sont calculés relativement à la période de correction (1980-2014).

Identifiant	Nom	Longitude	Latitude	Zone Climatique	Période Considérée	Manques (%)	SQR	Période SQR
97307001	Cayenne-Matoury	52,365 °W	4,822 °N	Littoral	1980-2014	0,0	Y	1992-2014
97311005	Charvein	53,906 °W	5,567 °N	Littoral	1980-2014	0,0	N	-
97304001	Île Royale	52,583 °W	5,283 °N	Littoral	1980-2014	3,0	N	-
97306004	Javouhey	53,819 °W	5,608 °N	Littoral	1980-2014	5,5	N	-
97304003	Kourou CSG	52,748 °W	5,209 °N	Littoral	1980-2014	0,0	Y	2001-2014
97353001	Maripasoula	54,028 °W	3,640 °N	Sud	1980-2014	0,8	Y	1980-2014
97308001	Saint Georges	51,805 °W	3,891 °N	Est	1980-2014	0,0	Y	1984-2014
97311001	Saint Laurent	54,032 °W	5,486 °N	Ouest	1980-2014	0,2	Y	2005-2014
97312006	Savane Combi	52,953 °W	5,335 °N	Littoral	1980-2014	4,8	N	-

**Tableau A4.** Idem Tableau A3, excepté pour les données quotidiennes de tasmin et tasmx. Toutes les séries démarrent au 01/01/1980, sauf Savane Combi (01/05/1980), et terminent le 31 décembre. Les périodes SQR indiquées sont celles pour lesquelles à la fois tasmin et tasmx sont SQR.

Identifiant	Nom	Longitude	Latitude	Zone Climatique	Période Considérée	Manques (%)	SQR	Période SQR
97307001	Cayenne-Matoury	52,365 °W	4,822 °N	Littoral	1980-2014	17,8	N	-
97304003	Kourou CSG	52,748 °W	5,209 °N	Littoral	1988-2014	22,9	N	-
97353001	Maripasoula	54,028 °W	3,640 °N	Sud	1987-2014	38,8	N	-
97308001	Saint Georges	51,805 °W	3,891 °N	Est	1987-2014	26,3	N	-
97311001	Saint Laurent	54,032 °W	5,486 °N	Ouest	1987-2014	43,3	N	-

**Tableau A5.** Idem Tableau A3, excepté pour les données quotidiennes de uas et vas. Les séries démarrent au 1<sup>er</sup> janvier (Cayenne-Matoury, Kourou CSG) ou au 1<sup>er</sup> avril (Maripasoula, Saint-Georges, Saint-Laurent). Les données SQR n'existent pas pour le vent de surface.



Modèle ou Jeu de Données	DJF	JFM	FMA	MAM	AMJ	MJJ	JJA	JAS	ASO	SON	OND	NDJ
ACCESS-CM2											X	X
ACCESS-ESM1-5											X	X
AWI-CM-1-1-MR											X	X
AWI-ESM-1-1-LR											X	X
BCC-CSM2-MR											X	X
BCC-ESM1											X	X
CAMS-CSM1-0											X	X
CanESM5											X	X
CESM2-FV2											X	X
CESM2-WACCM	X										X	X
CESM2-WACCM-FV2											X	X
CIesm	X	X	X	X							X	X
CMCC-CM2-HR4											X	X
CMCC-CM2-SR5	X										X	X
CMCC-ESM2											X	X
CNRM-CM6-1											X	X
CNRM-ESM2-1											X	X
E3SM-1-0											X	X
E3SM-1-1-ECA											X	X
EC-Earth3											X	X
EC-Earth3-AerChem											X	X
EC-Earth3-CC											X	X
EC-Earth3-Veg											X	X
EC-Earth3-Veg-LR											X	X
FGOALS-f3-L		X									X	X
FGOALS-g3	X	X									X	X
FIO-ESM-2-0											X	X
GFDL-CM4											X	X
GFDL-ESM4											X	X
GISS-E2-1-G	X										X	X
GISS-E2-1-H	X	X	X	X	X						X	X
HadGEM3-GC31-LL											X	X
IITM-ESM	X										X	X
INM-CM4-8	X	X	X	X	X						X	X
INM-CM5-0	X	X	X	X	X						X	X
IPSL-CM5A2-INCA											X	X
IPSL-CM6A-LR	X										X	X
IPSL-CM6A-LR-INCA	X										X	X
KACE-1-0-G											X	X
MCM-UA-1-0											X	X
MIROC-ES2L			X	X	X						X	X
MIROC6		X	X								X	X
MPI-ESM-1-2-HAM											X	X
MPI-ESM1-2-HR											X	X
MPI-ESM1-2-LR											X	X
MRI-ESM2-0											X	X
NESM3										X	X	
NorCPM1											X	X
NorESM2-LM	X										X	X
NorESM2-MM	X	X	X								X	X
TaiESM1											X	X
UKESM1-0-LL											X	X
CMAP											X	X
GPCP											X	X
ERA5											X	X

**Tableau A6.** Trimestres glissants de l'année (x) concernés par réduction de la boîte ZCIT pour chacun des 52 modèles CMIP6 et des 3 jeux de données de référence.

Modèle	El Niño	La Niña	Moyenne ENSO
ACCESS-ESM1-5	0.348	0.632	0.490
CESM2-WACCM	0.610	0.825	0.718
CIESM	0.756	0.651	0.704
FGOALS-f3-L	0.586	0.372	0.479
FGOALS-g3	0.320	0.156	0.238
FIO-ESM-2-0	0.674	0.087	0.380
GFDL-CM4	0.420	0.683	0.552
GISS-E2-1-H	0.547	0.522	0.534
INM-CM4-8	0.147	0.220	0.183
INM-CM5-0	0.139	-0.061	0.039
MIROC-ES2L	0.588	0.612	0.600
MIROC6	0.403	0.354	0.378
NorESM2-MM	0.777	0.797	0.787

**Tableau A7.** Coefficients de corrélation spatiale des anomalies composites des précipitations en JFM lors des événements El Niño et La Niña avec GPCP (période 1980-2014), pour les 13 modèles CMIP6 pré-sélectionnés dans le Tableau 13.

Modèle ou Jeu de Données	Normales (mm/jour)	El Niño (mm/jour)	Anomalie El Niño (mm/jour)	La Niña (mm/jour)	Anomalie La Niña (mm/jour)	Anomalie La Niña - El Niño (% GPCP)
ACCESS-ESM1-5	9,27	9,16	-0,11	9,38	0,11	14,1
CESM2-WACCM	10,81	10,13	-0,68	11,18	0,37	67,3
CIESM	9,53	8,92	-0,61	10,26	0,73	85,9
FGOALS-f3-L	6,78	6,00	-0,78	7,91	1,13	122,4
FGOALS-g3	7,95	7,49	-0,46	8,11	0,16	39,7
FIO-ESM-2-0	9,18	9,42	0,24	9,33	0,15	-5,8
GFDL-CM4	10,35	9,82	-0,53	11,17	0,82	86,5
GISS-E2-1-H	6,80	6,61	-0,19	7,42	0,62	51,9
INM-CM4-8	7,31	7,32	0,01	6,92	-0,39	-25,6
INM-CM5-0	7,11	6,81	-0,30	7,02	-0,09	13,5
MIROC-ES2L	7,49	6,41	-1,08	8,83	1,34	155,1
MIROC6	7,99	6,75	-1,24	8,78	0,79	130,1
NorESM2-MM	7,88	7,05	-0,83	8,79	0,91	111,5
CMAP	8,90	7,54	-1,36	9,39	0,49	118,6
GPCP	8,52	7,77	-0,75	9,33	0,81	100,0

**Tableau A8.** Calcul de la différence des anomalies La Niña - El Niño en JFM (en termes de précipitations moyennes dans la ZCIT via le calcul de la métrique RR sur les composites de pluie), relativement à cette différence pour GPCP (1980-2014), pour les 13 modèles CMIP6 pré-sélectionnés dans le Tableau 13 et pour les données CMAP et GPCP.



Modèle	↓ RR N ZCIT & ↑ RR cœur ZCIT		RR Guyane	
	SSP2-4.5	SSP5-8.5	SSP2-4.5	SSP5-8.5
CESM2-WACCM	Y	Y	↓	↓
CIESM	Y	Y	↓	↓
CNRM-CM6-1	Y	Y	↓	↓
CNRM-ESM2-1	Y	Y	↓	↓
FGOALS-f3-L	N	N	~	~
GFDL-CM4	Y	Y	~	~
GISS-E2-1-H	Y	Y	↓	↓
MIROC-ES2L	Y	Y	↓	↓
MIROC6	Y	Y	~	~/↓
NorESM2-MM	Y	Y	~	~/↓

**Tableau A9.** Idem Tableau 16 mais pour les précipitations saisonnières en JFMA : diminution ou non des RR au nord de la ZCIT (et augmentation des RR au cœur de la ZCIT, 2 colonnes de gauche) et évolution des RR en Guyane (2 colonnes de droite).

RR (JASO) Modèle	↓ RR N ZCIT/Am. S		RR Guyane	
	SSP2-4.5	SSP5-8.5	SSP2-4.5	SSP5-8.5
CESM2-WACCM	Y	Y	~/↓	↓
CIESM	Y	Y	↑	~/↑
CNRM-CM6-1	Y	Y	~	↓
CNRM-ESM2-1	Y	Y	~	↓
FGOALS-f3-L	N	N	~/↓	↓
GFDL-CM4	N	N	~/↓	~/↓
GISS-E2-1-H	Y	Y	~/↑	~/↑
MIROC-ES2L	Y	Y	↓	↓
MIROC6	Y	Y	~	~
NorESM2-MM	N	N	↓	↓

**Tableau A10.** Idem Tableau 16 mais pour les précipitations saisonnières en JASO.

T (JFMA) Modèle	T Guyane (°C)	
	SSP2-4.5	SSP5-8.5
CESM2-WACCM	+2-2.5	+3-4
CIESM	+2.5-4	+3.5-5
CNRM-CM6-1	+2-2.5	+3-3.5
CNRM-ESM2-1	+2-2.5	+3-3.5
FGOALS-f3-L	+1.5-2	+2-2.5
GFDL-CM4	+1.5-2	+2.5-3
GISS-E2-1-H	+1.5-2	+2.5
MIROC-ES2L	+1.5-2	+2.5
MIROC6	+1.5-2	+2.5
NorESM2-MM	+1.5-2	+2.5-3

**Tableau A11.** Idem Tableau 17 mais pour les températures saisonnières en JFMA.



T (JASO) Modèle	T Guyane (°C)	
	SSP2-4.5	SSP5-8.5
CESM2-WACCM	+2-2.5	+3-3.5
CIESM	+5	>5
CNRM-CM6-1	+2-2.5	+3.5
CNRM-ESM2-1	+2-2.5	+3.5
FGOALS-f3-L	+1.5-2	+2.5
GFDL-CM4	+1.5-2	+2.5-3
GISS-E2-1-H	+1.5-2	+2-2.5
MIROC-ES2L	+2	+2.5-4
MIROC6	+2	+3
NorESM2-MM	+2	+2.5-3

**Tableau A12.** Idem Tableau 17 mais pour les températures saisonnières en JASO.

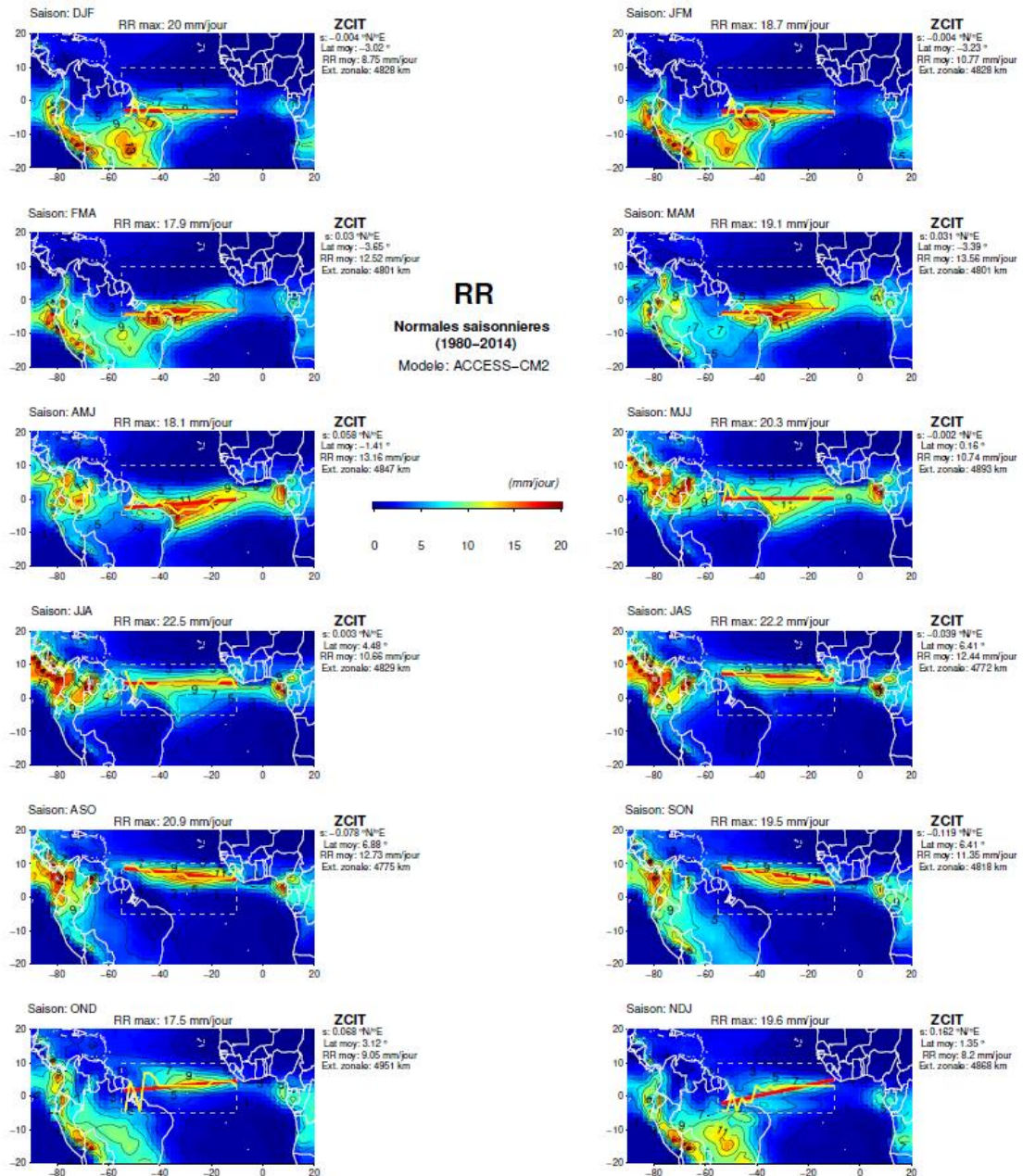
Force du vent (JFMA)	Evolution inverse à celle des RR		Force du vent Guyane	
	SSP2-4.5	SSP5-8.5	SSP2-4.5	SSP5-8.5
Modèle				
CESM2-WACCM	N	N	L:↑/O:↓	L:↑/O:↓
CIESM	N	N	L:~/O:↑	L:~/O:↑↑
CNRM-CM6-1	N	N	L:↑/O:~	L:↑/O:↓
CNRM-ESM2-1	N	N	L:↑/O:~	L:↑/O:↓
FGOALS-f3-L	Y	Y	L:~/O:↑	↑
GFDL-CM4	N	N	L:~/O:↓	L:~/O:↓
GISS-E2-1-H	N	N	L:↑/O:~	L:↑/O:↓
MIROC-ES2L	N	N	L:~/O:↓	L:~/O:↓
MIROC6	N	N	L:~/O:↓	L:~/O:↓
NorESM2-MM	N	N	L:~/O:↓	L:~/O:↓

**Tableau A13.** Idem Tableau 18 mais pour le vent saisonnier en JFMA.

Force du vent (JASO)	Evolution inverse à celle des RR		Force du vent Guyane	
	SSP2-4.5	SSP5-8.5	SSP2-4.5	SSP5-8.5
Modèle				
CESM2-WACCM	Y	Y	~	L:↑/O:~
CIESM	Y	Y	L:~/O:↑↑	L:~/O:↑↑
CNRM-CM6-1	Y	Y	L:↑/O:~	↑
CNRM-ESM2-1	Y	Y	L:↑/O:~	↑
FGOALS-f3-L	Y	Y	L:↑/O:~	~
GFDL-CM4	N	N	L:~/O:↑	↑
GISS-E2-1-H	N	N	L:~/O:↑	L:↓/O:↑
MIROC-ES2L	N	N	L:~/O:↑	L:~/O:↑
MIROC6	N	N	~	~
NorESM2-MM	N	N	L:~/O:↑	L:~/O:↑

**Tableau A14.** Idem Tableau 18 mais pour le vent saisonnier en JASO.





**Figure A1.** Normales trimestrielles (1980-2014) sur les 12 trimestres glissants des taux journaliers de précipitations RR pour le modèle ACCESS-CM2. La ligne brisée jaune relie les points où RR est maximal et dépasse 5 mm/jour pour une longitude donnée dans la zone en pointillés où les métriques de la ZCIT (droite de régression représentée par le segment rouge) sont calculées : pente  $s$ , latitude moyenne, RR moyennes et extension zonale.

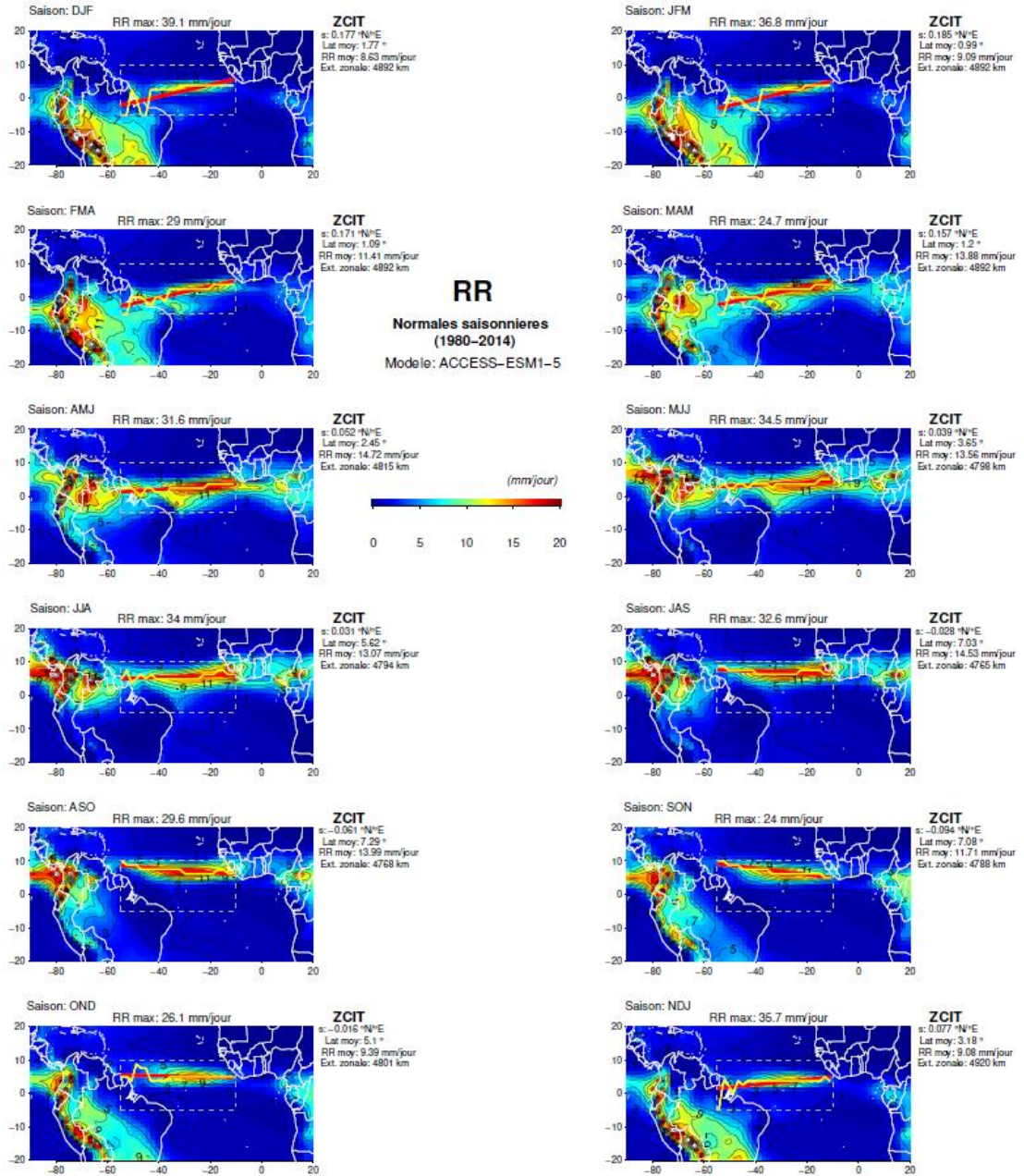
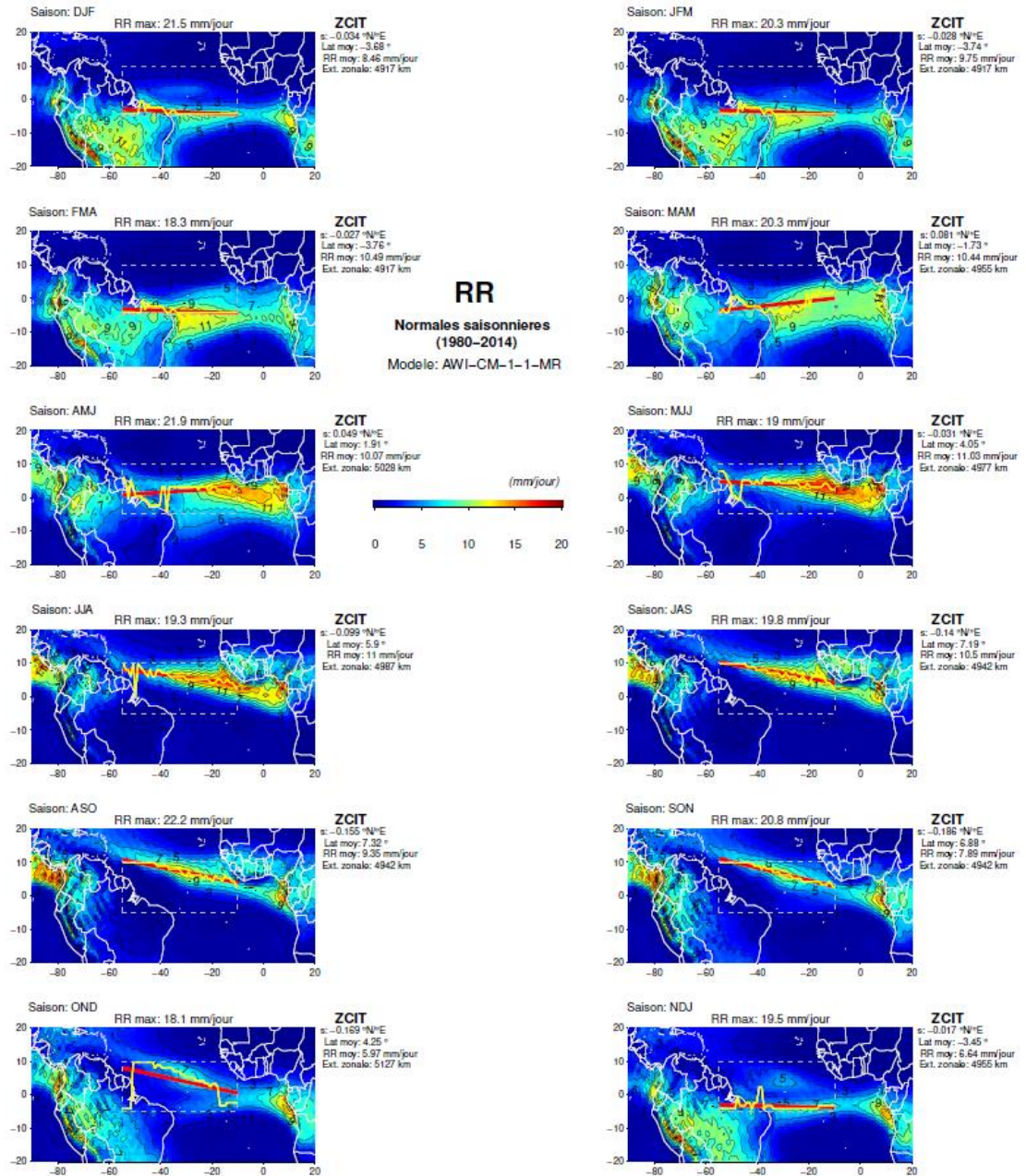


Figure A2. Idem Figure A1, excepté pour le modèle ACCESS-ESM1-5.





**Figure A3.** Idem Figure A1, excepté pour le modèle AWI-CM-1-1-MR.



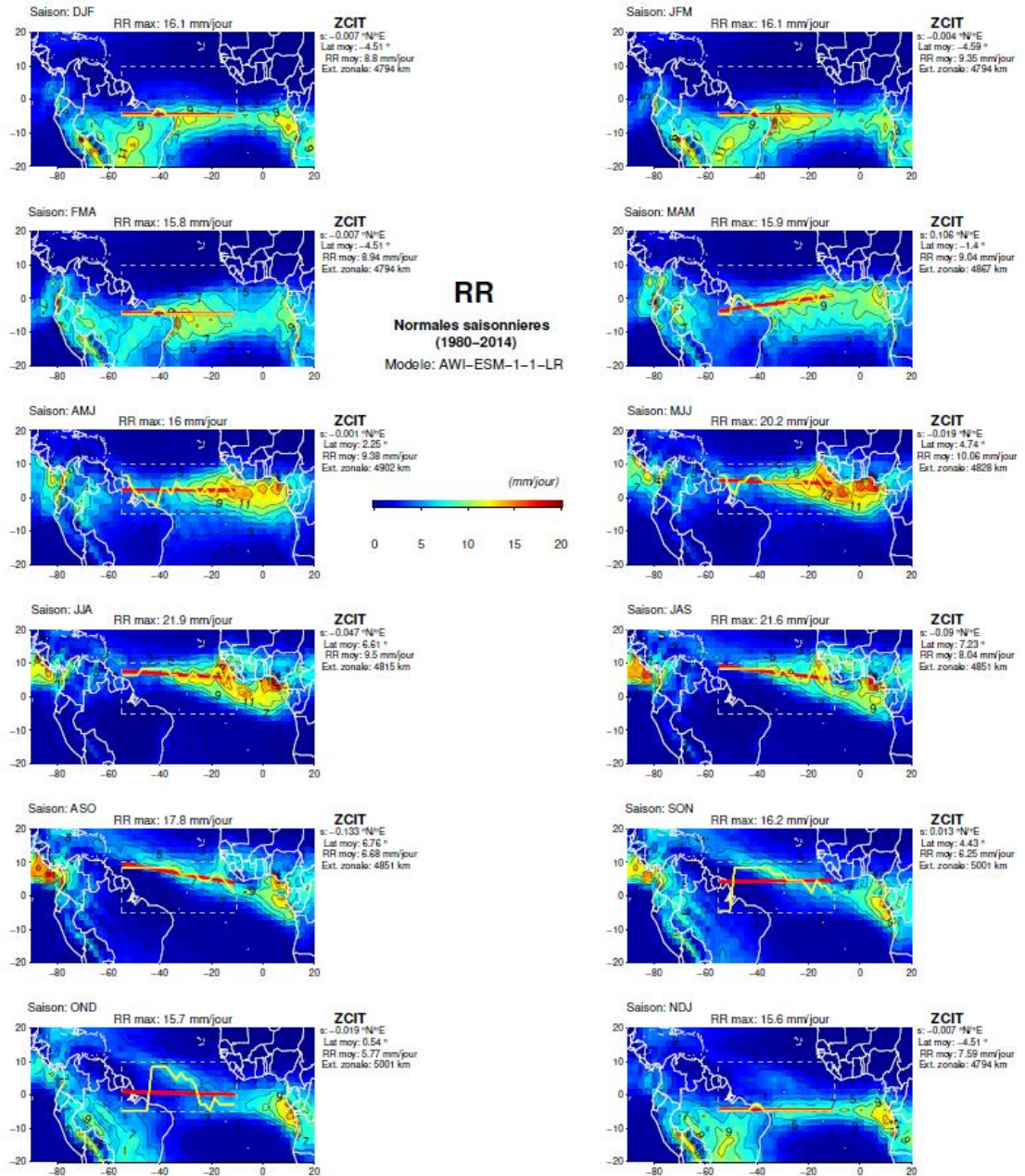


Figure A4. Idem Figure A1, excepté pour le modèle AWI-ESM1-1-LR.

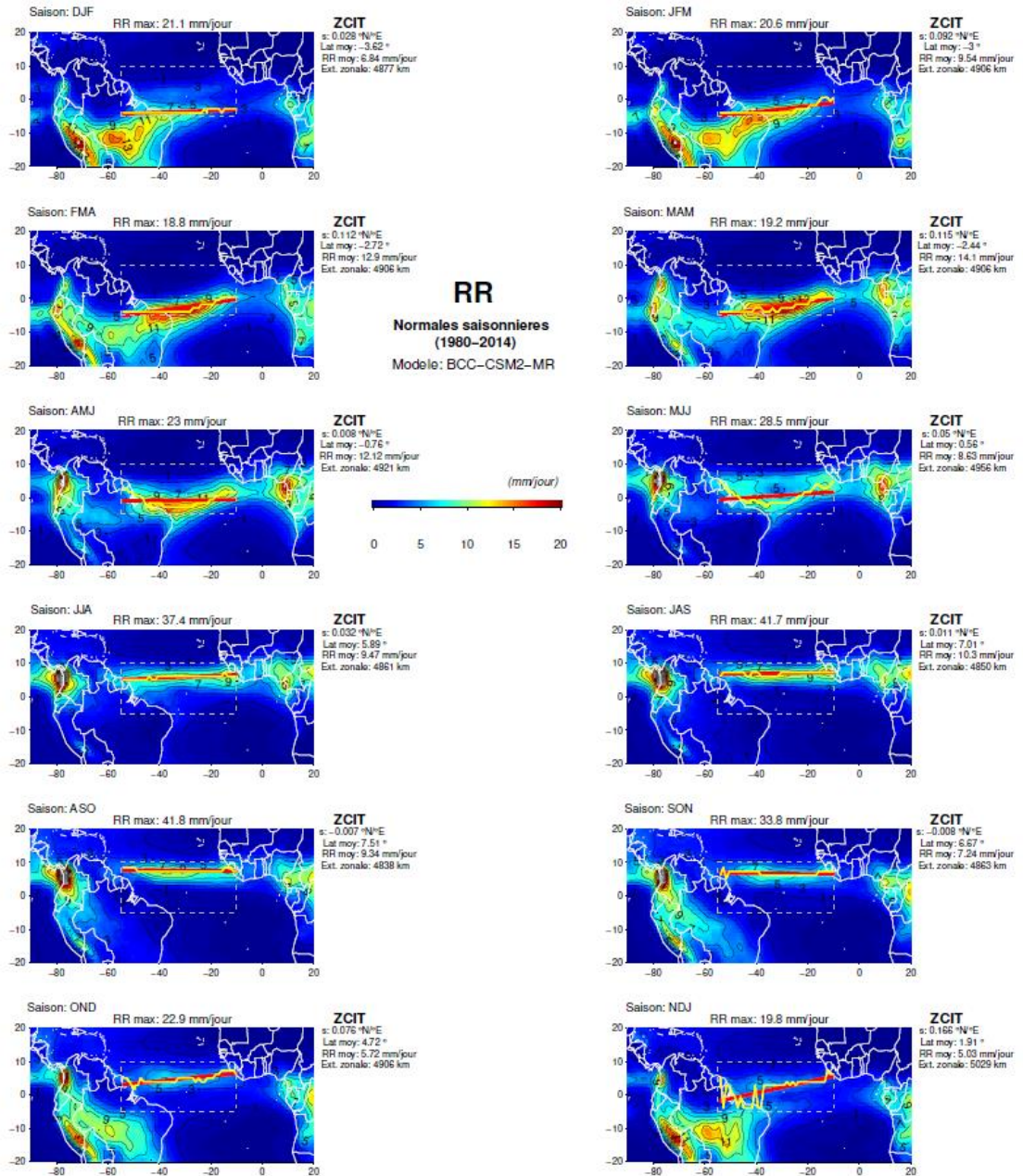
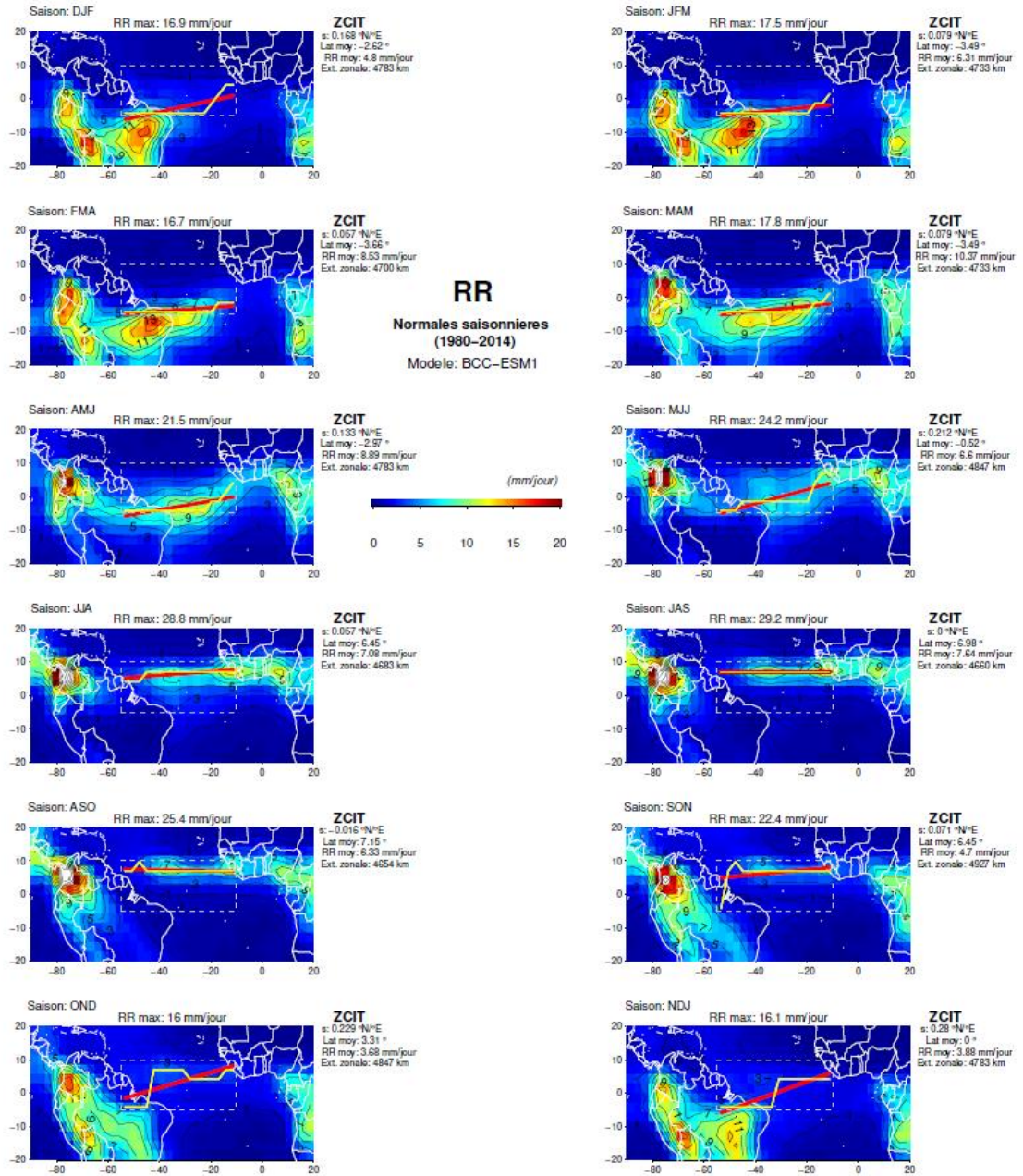


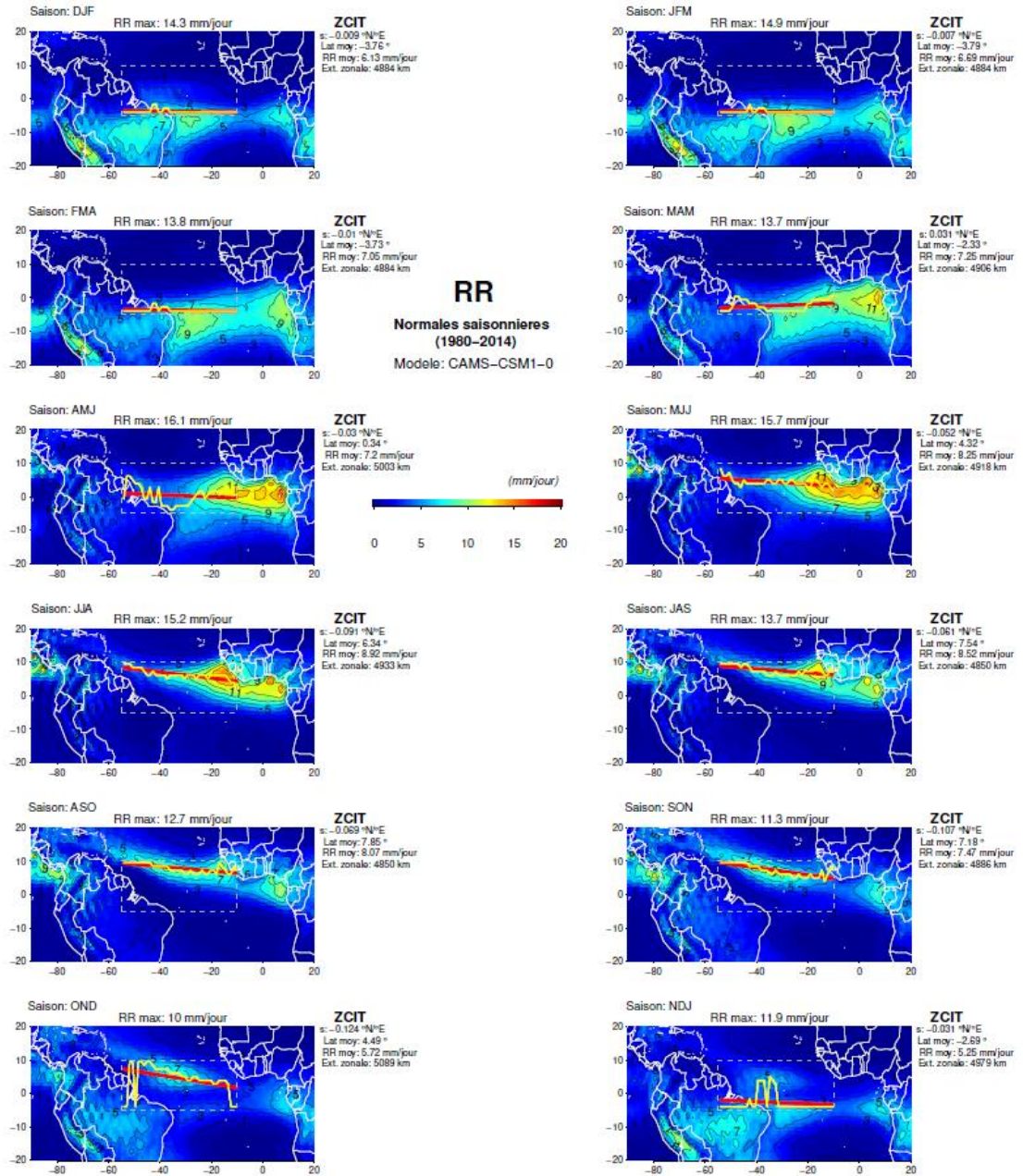
Figure A5. Idem Figure A1, excepté pour le modèle BCC-CSM2-MR.



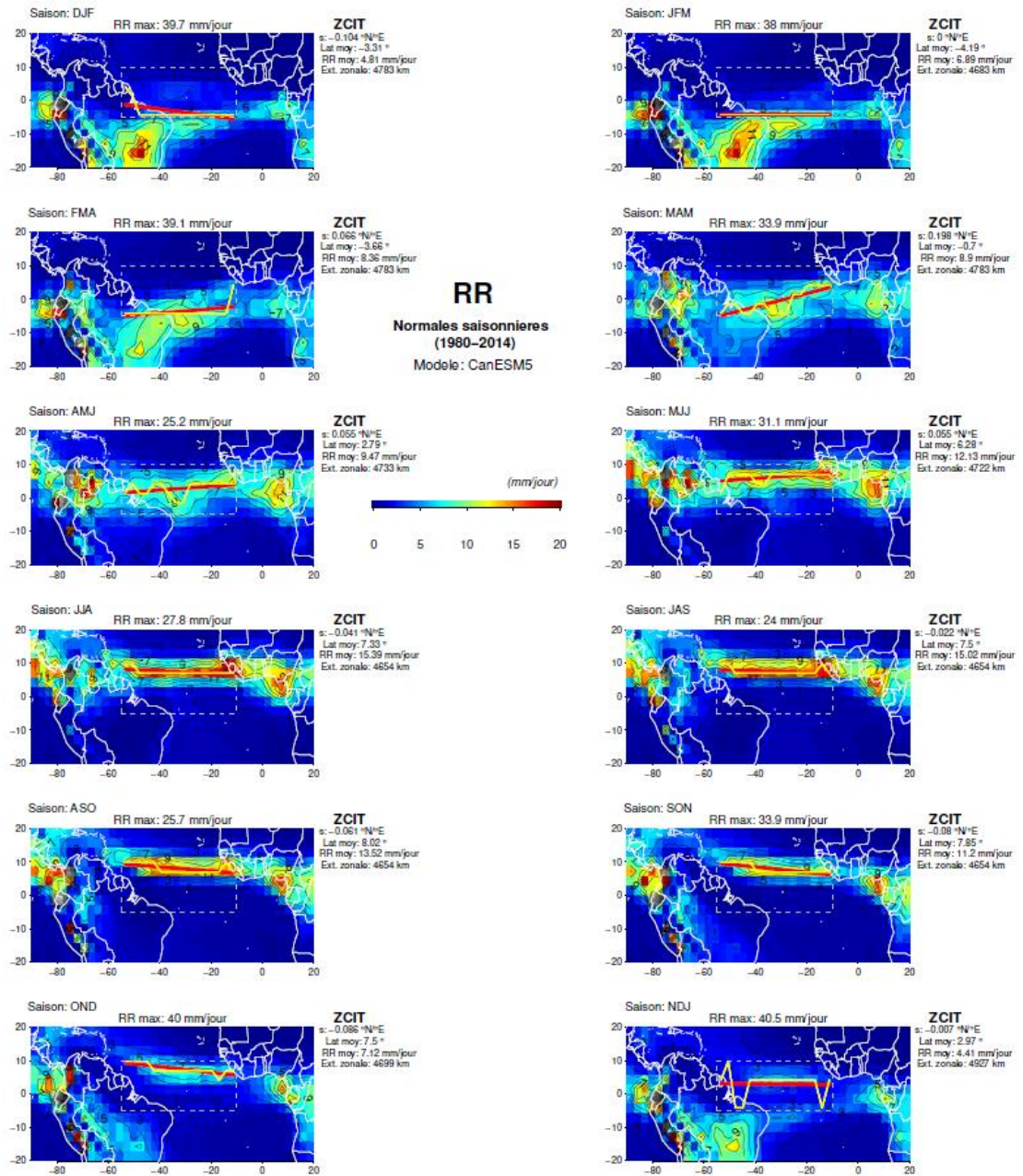


**Figure A6.** Idem Figure A1, excepté pour le modèle BCC-ESM1.





**Figure A7.** Idem Figure A1, excepté pour le modèle CAMS-CSM1-0.



**Figure A8.** Idem Figure A1, excepté pour le modèle CanESM5.



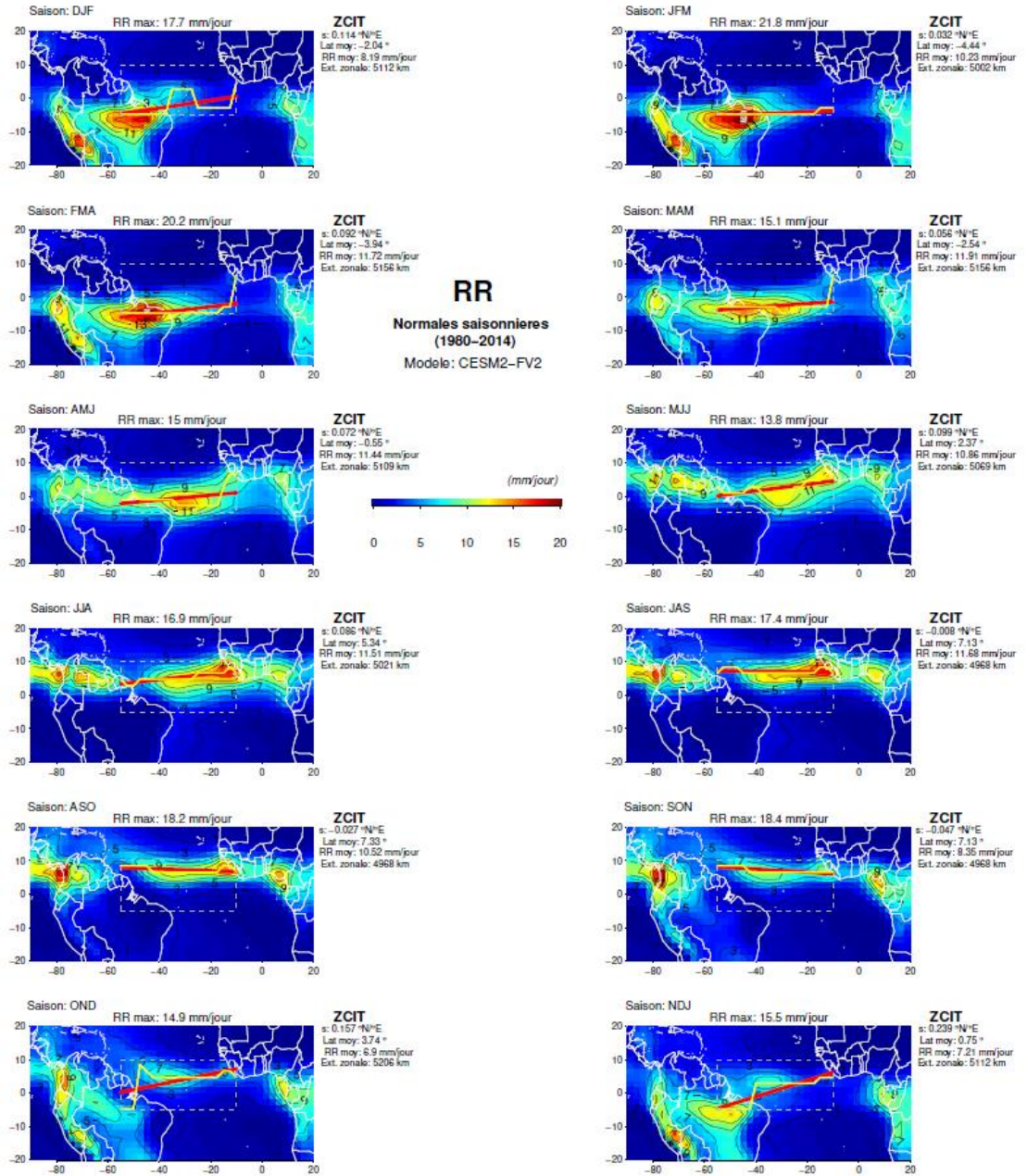


Figure A9. Idem Figure A1, excepté pour le modèle CSM2-FV2.



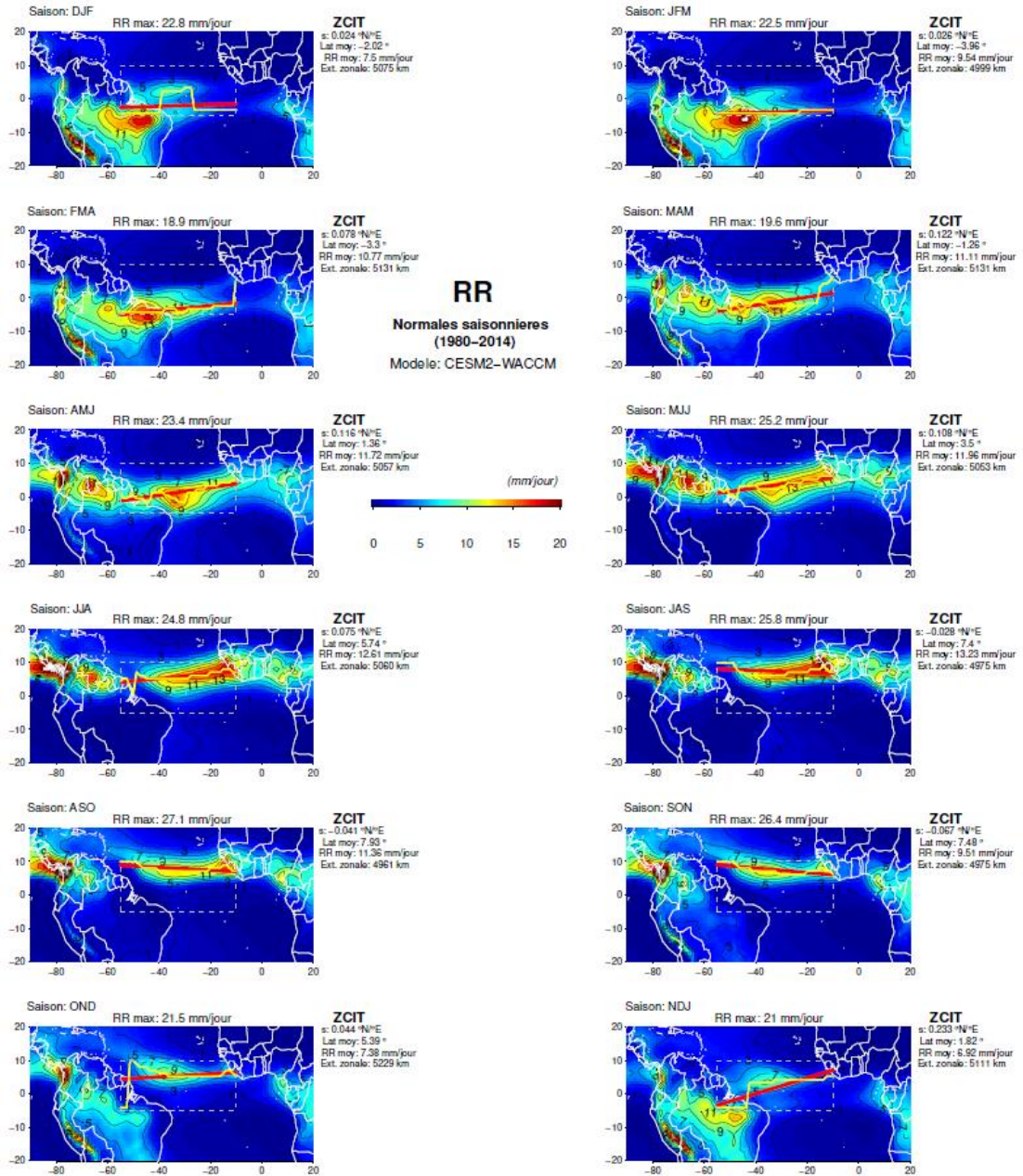


Figure A10. Idem Figure A1, excepté pour le modèle CESM2-WACCM.

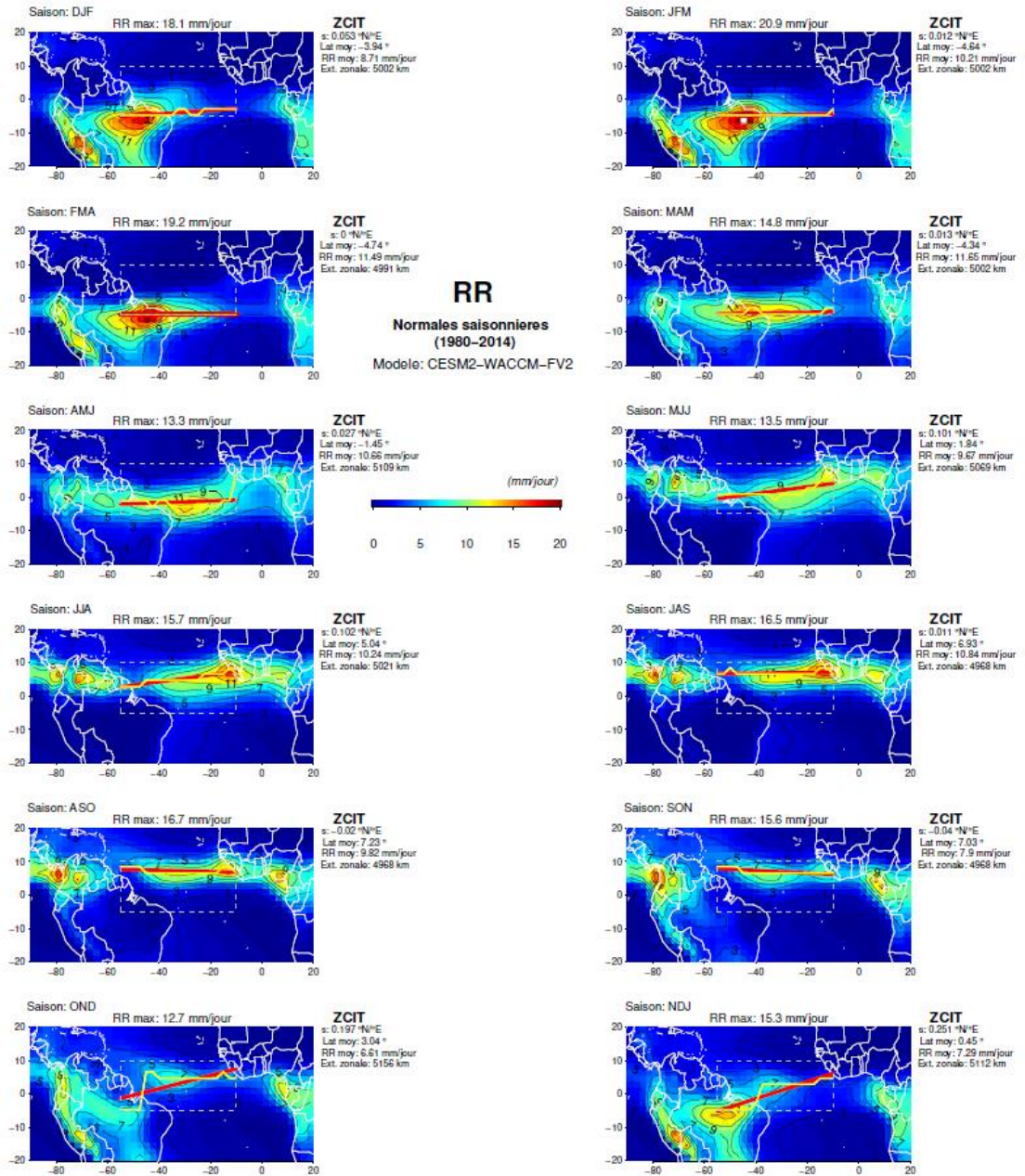


Figure A11. Idem Figure A1, excepté pour le modèle CSM2-WACCM-FV2.



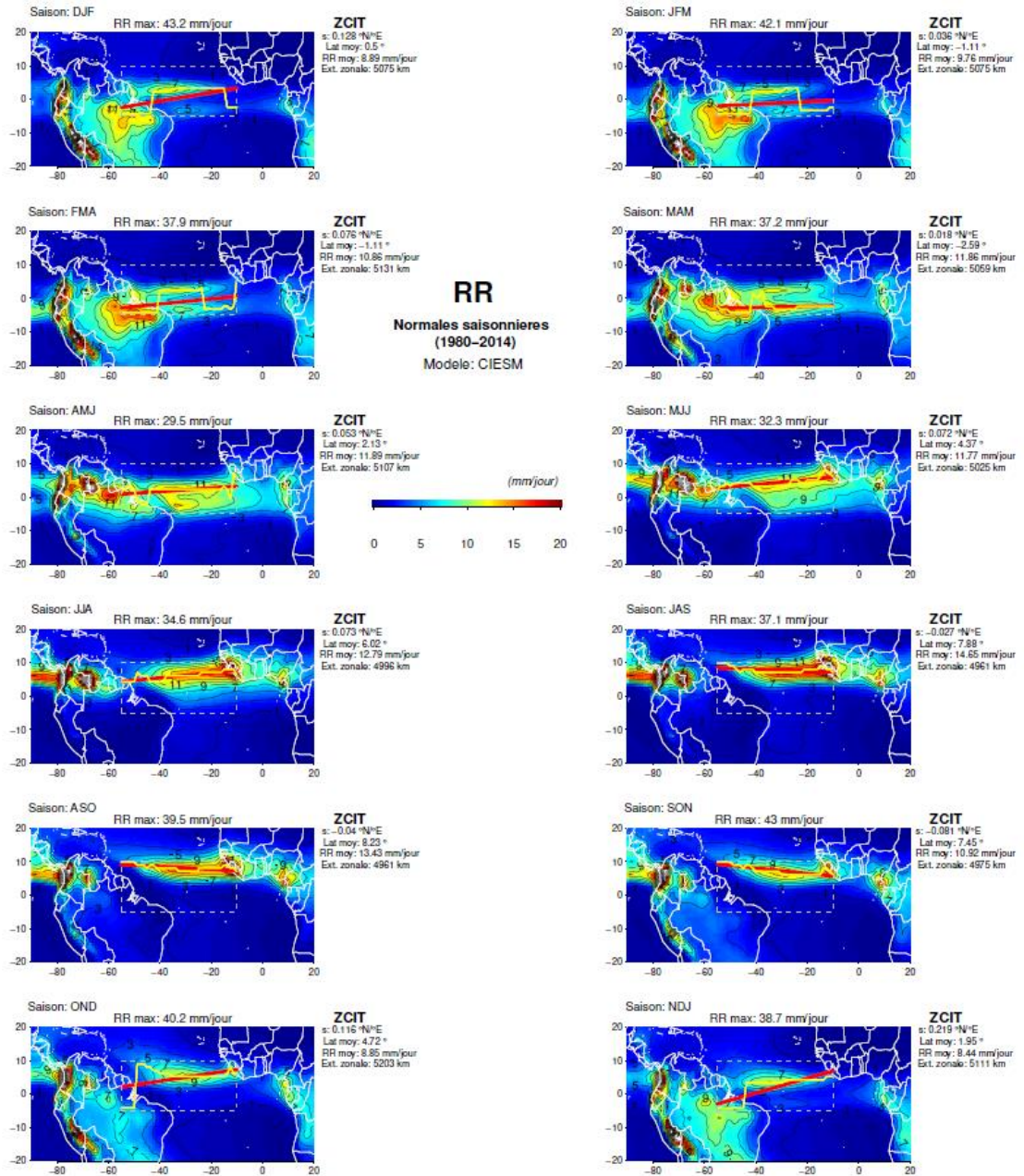
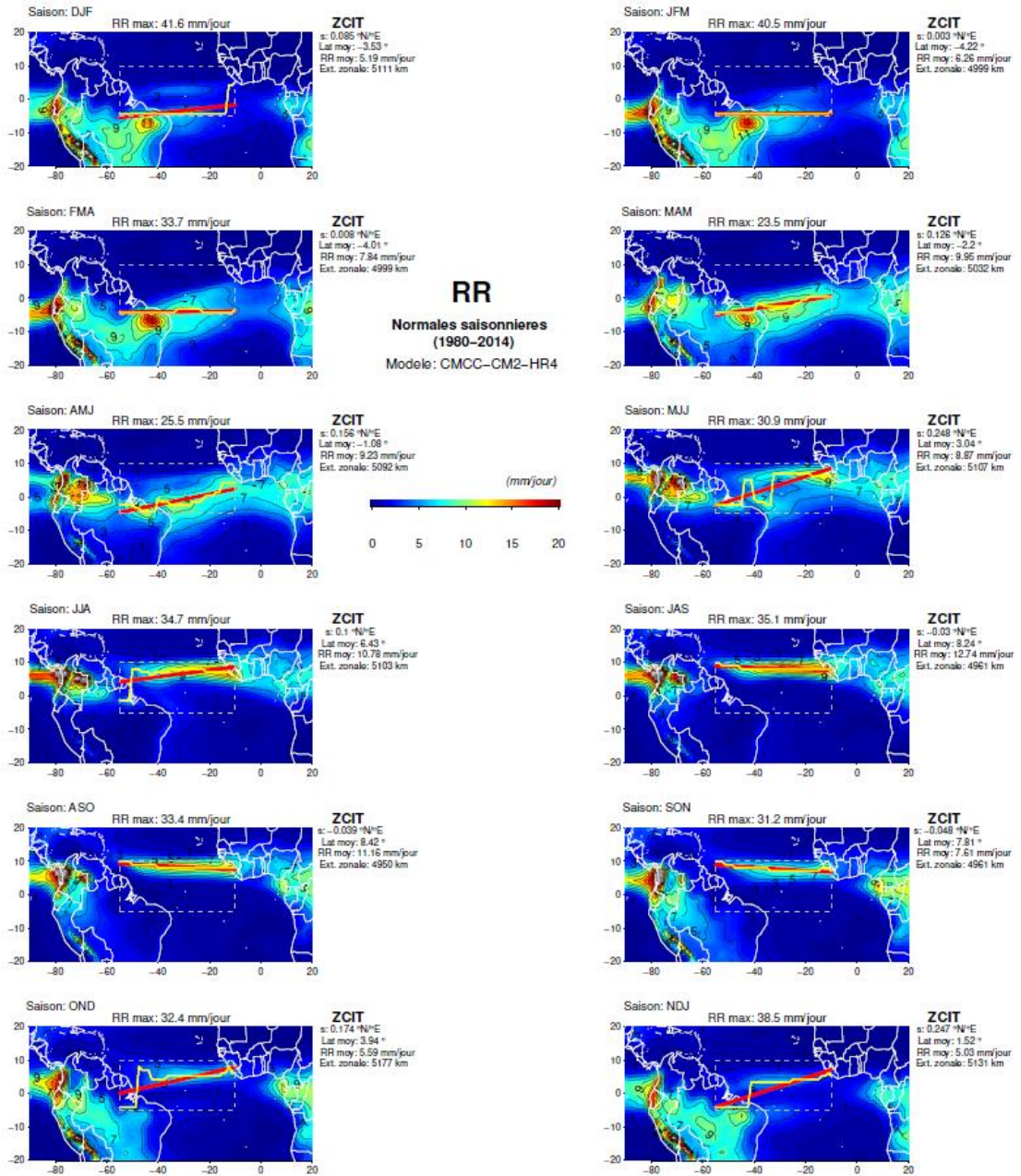
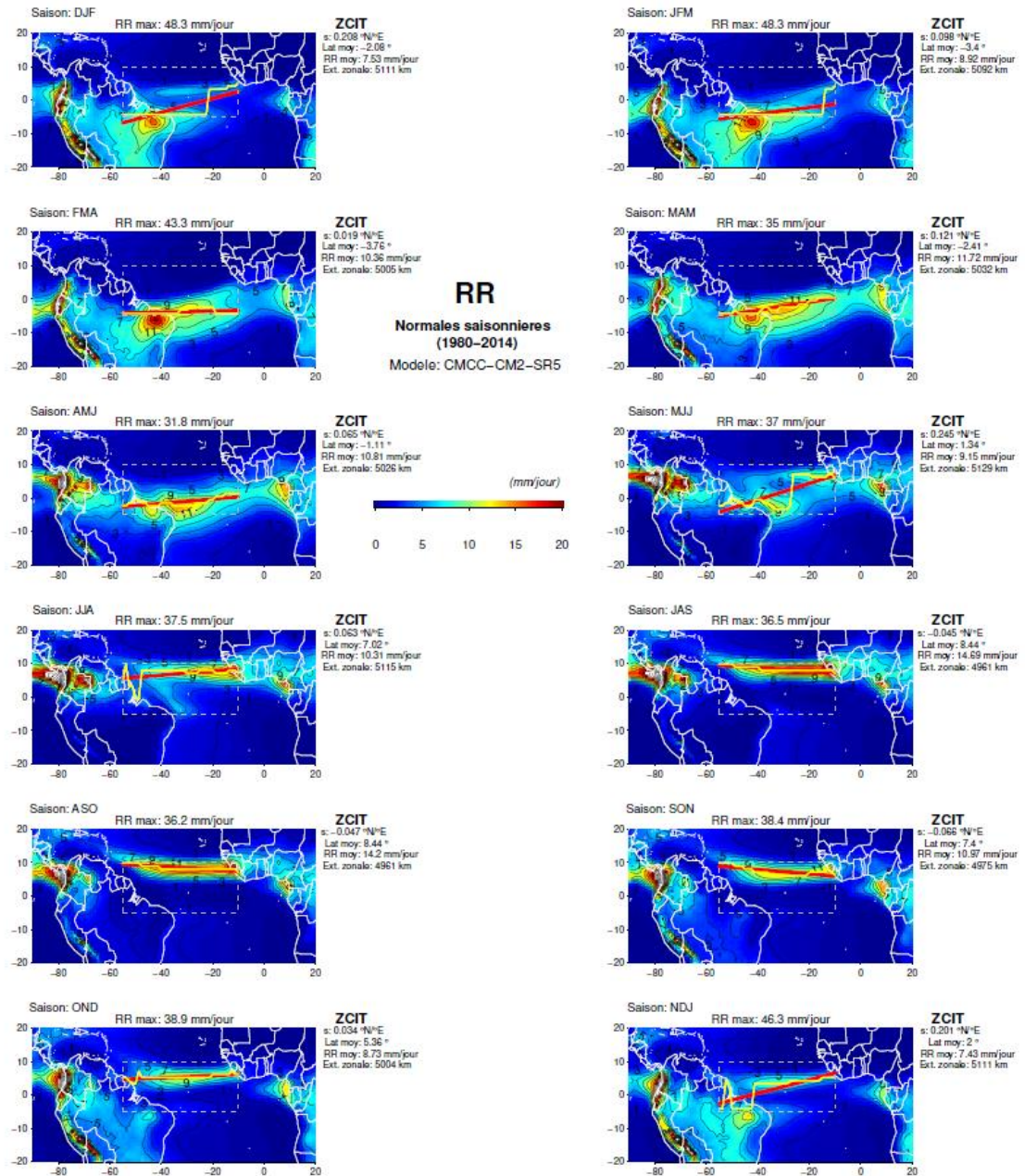


Figure A12. Idem Figure A1, excepté pour le modèle CIESM.





**Figure A13.** Idem Figure A1, excepté pour le modèle CMCC-CM2-HR4.



**Figure A14.** Idem Figure A1, excepté pour le modèle CMCC-CM2-SR5.



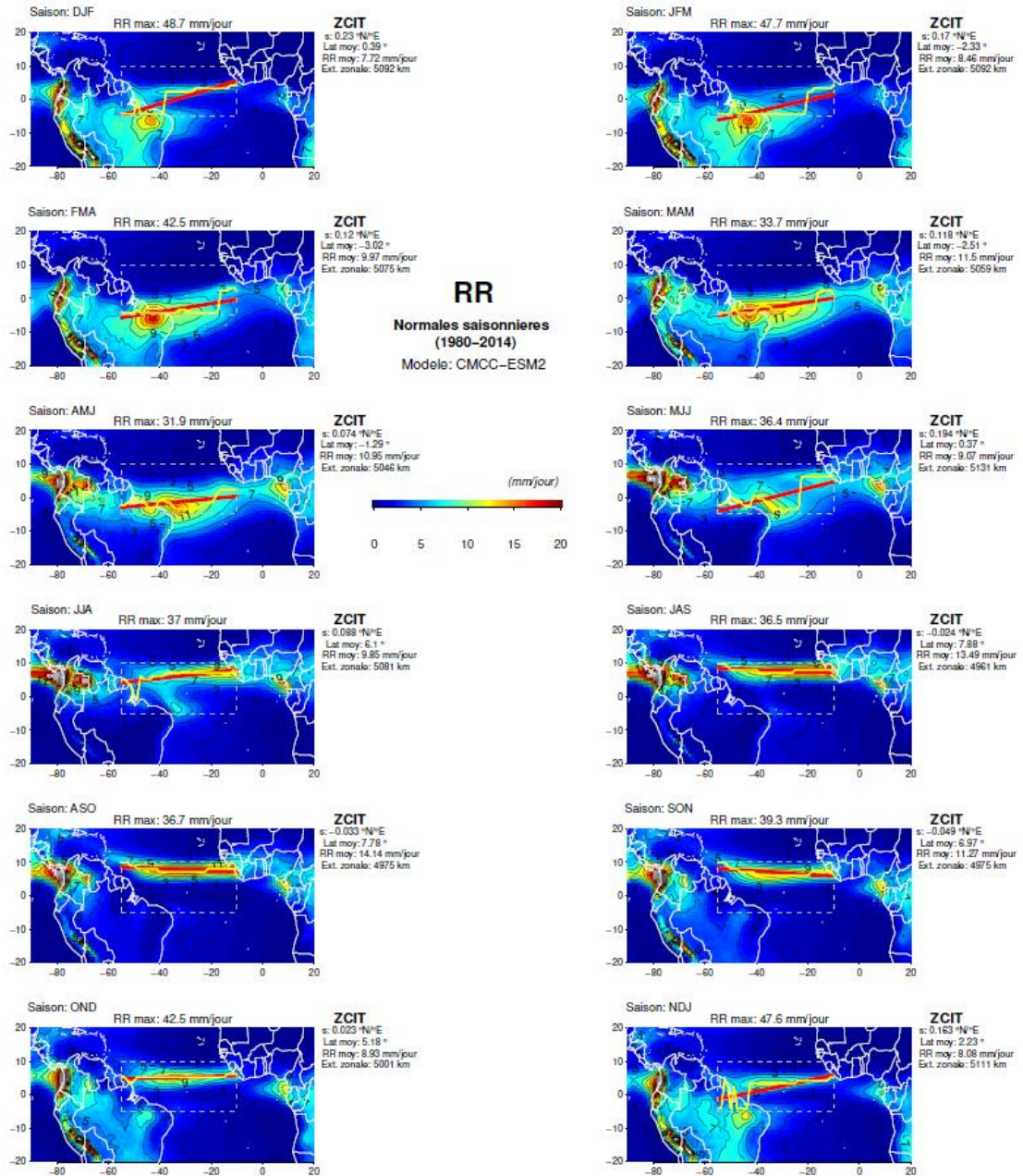


Figure A15. Idem Figure A1, excepté pour le modèle CMCC-ESM2.



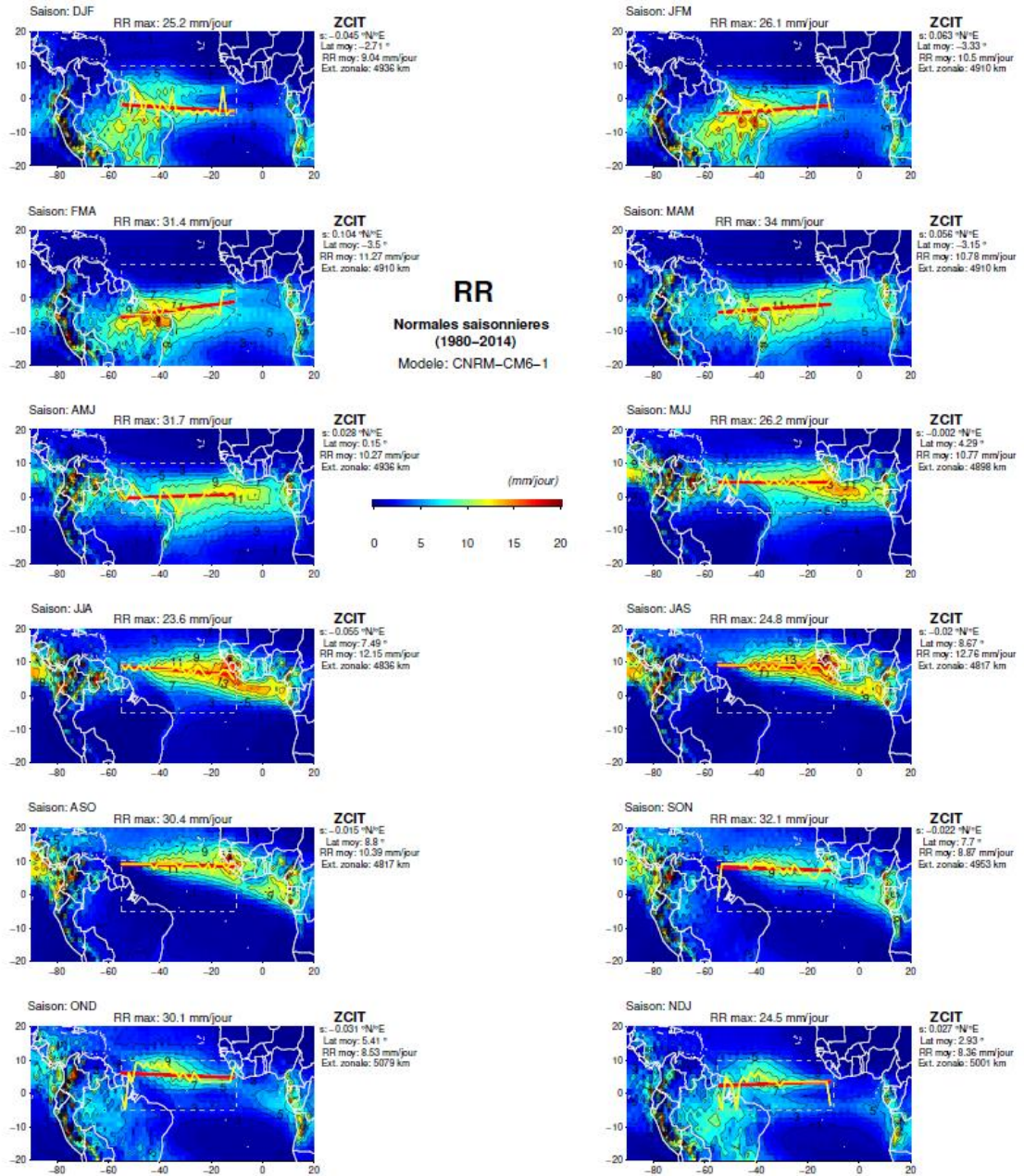


Figure A16. Idem Figure A1, excepté pour le modèle CNRM-CM6-1.

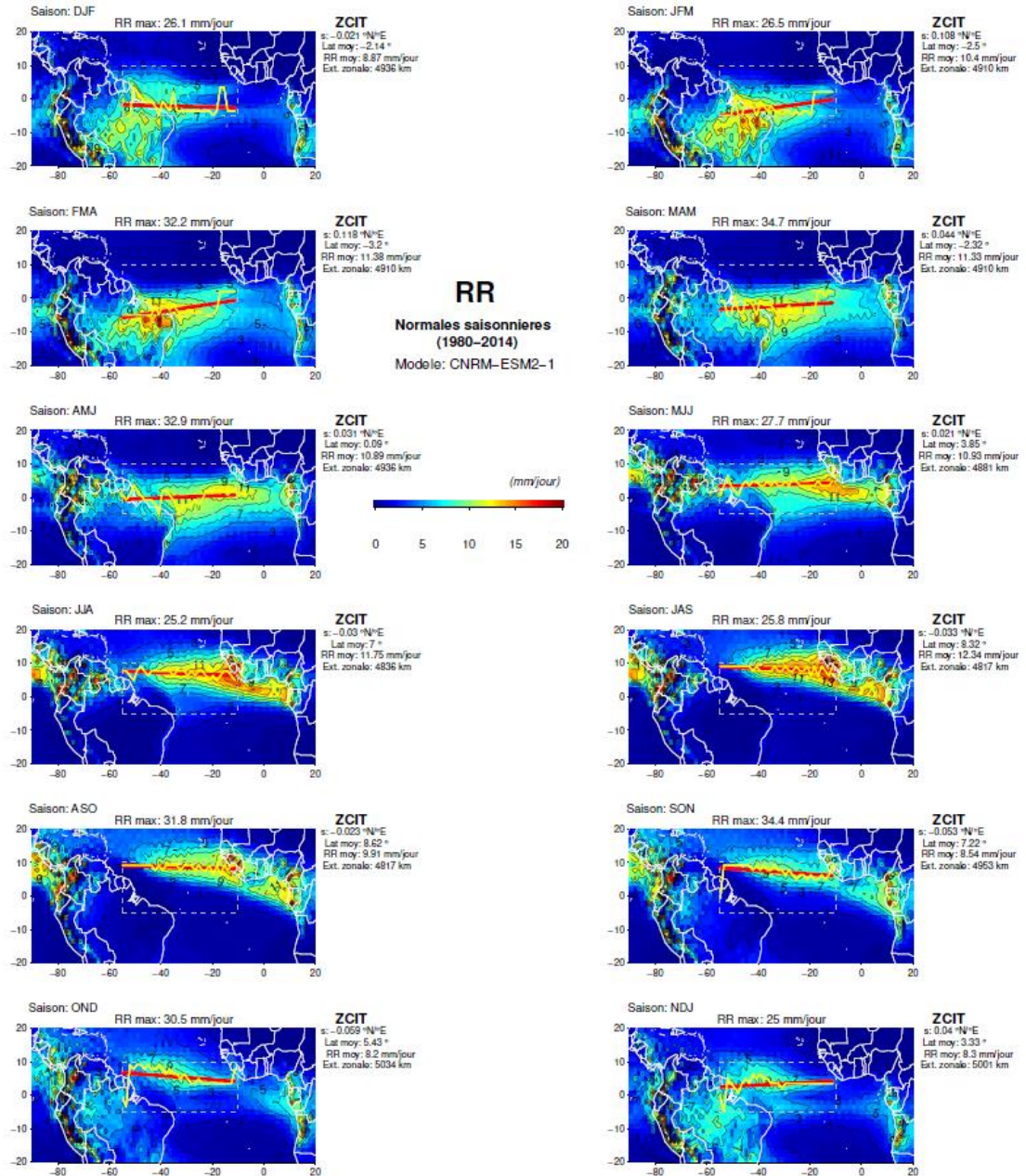


Figure A17. Idem Figure A1, excepté pour le modèle CNRM-ESM2-1.



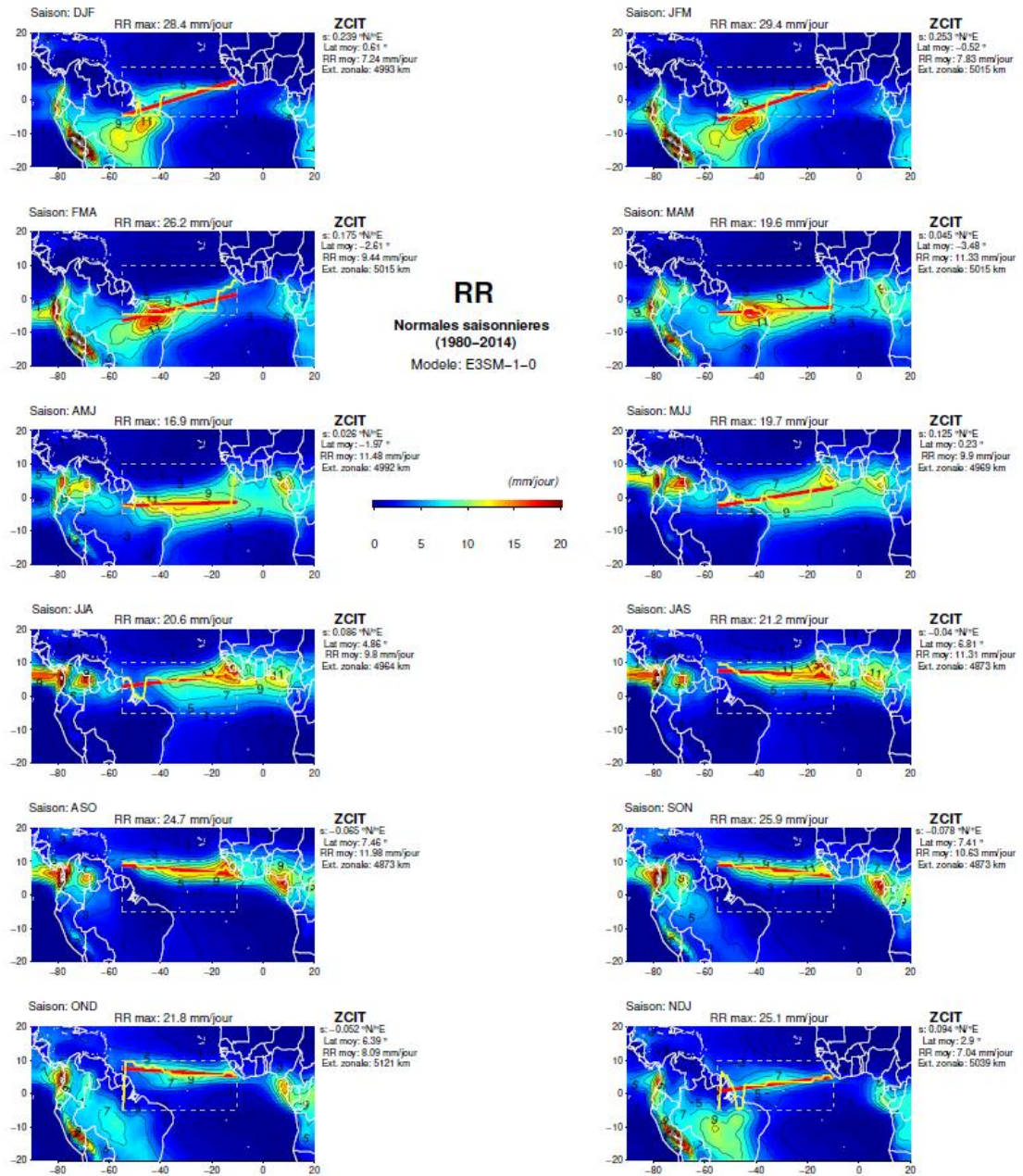


Figure A18. Idem Figure A1, excepté pour le modèle E3SM-1-0.



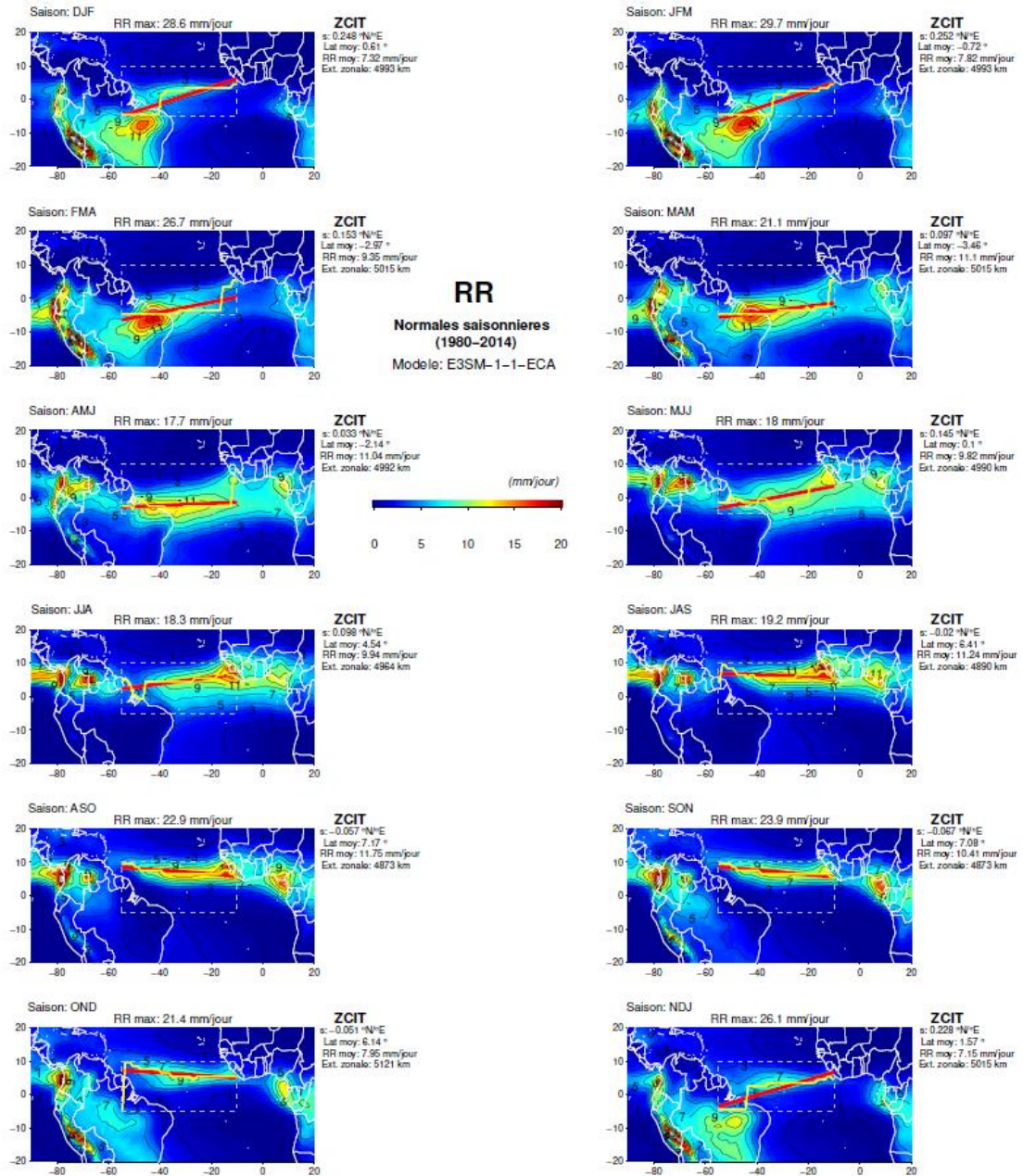


Figure A19. Idem Figure A1, excepté pour le modèle E3SM-1-1-ECA.

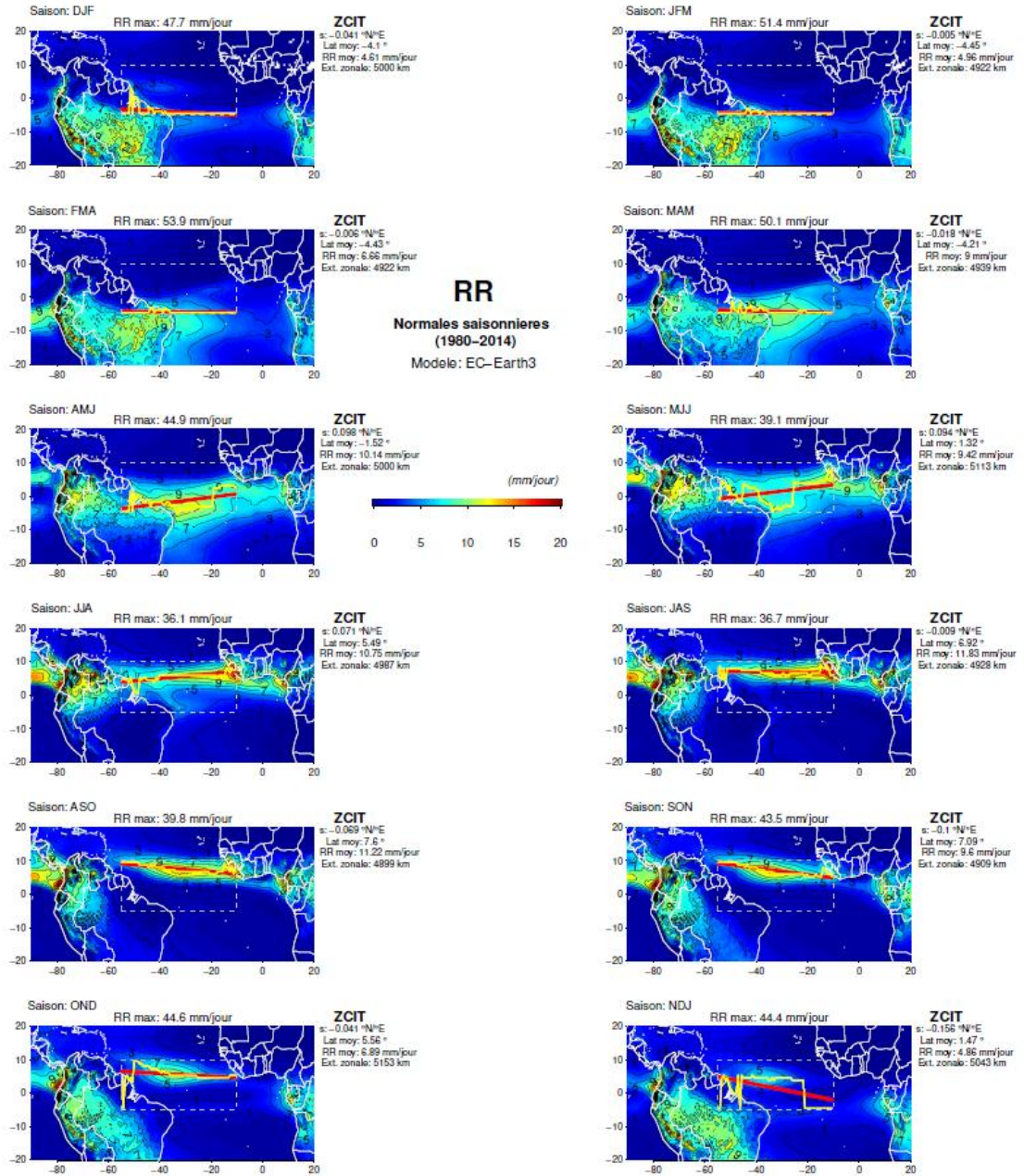


Figure A20. Idem Figure A1, excepté pour le modèle EC-Earth3.



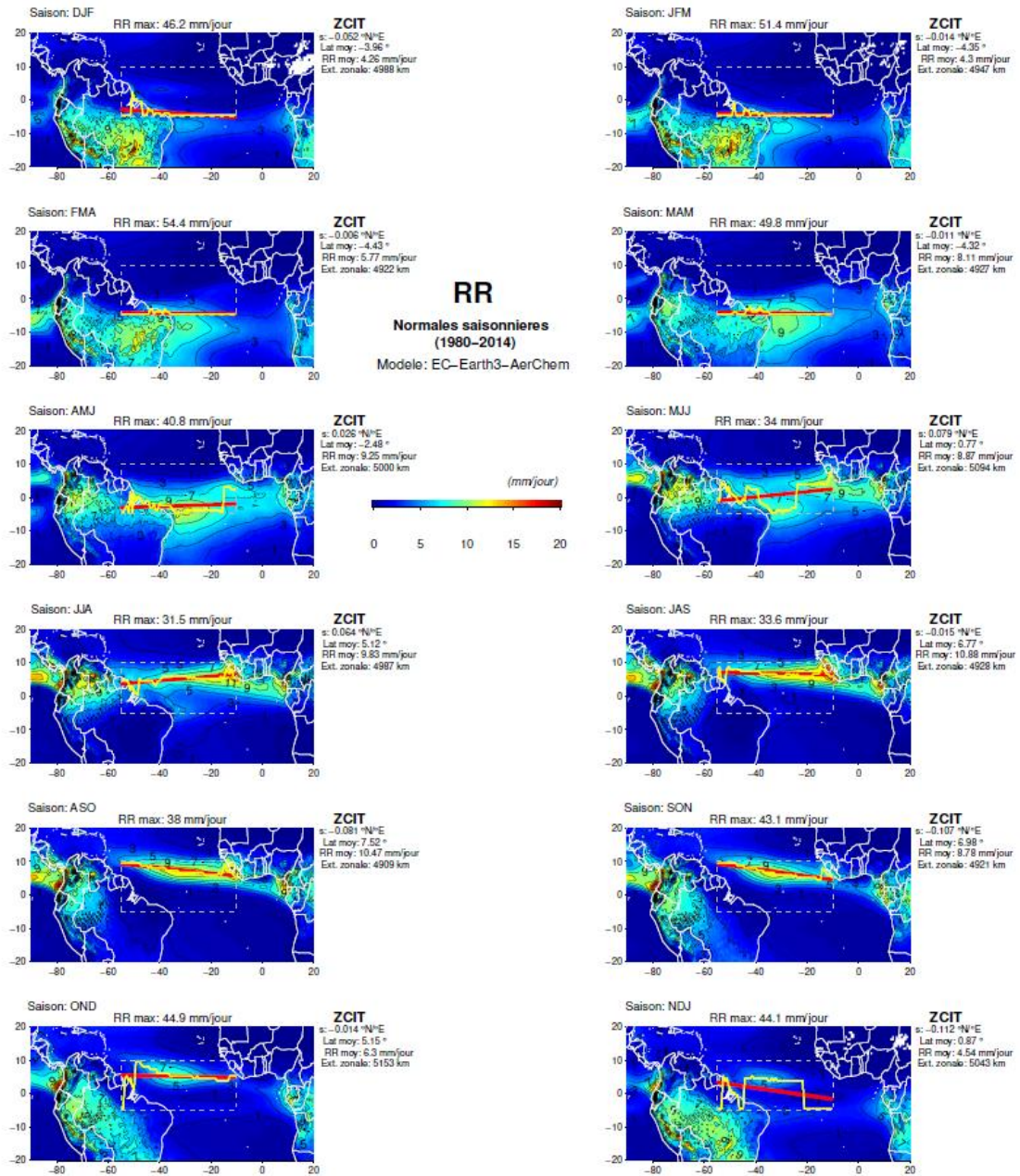


Figure A21. Idem Figure A1, excepté pour le modèle EC-Earth3-AerChem.



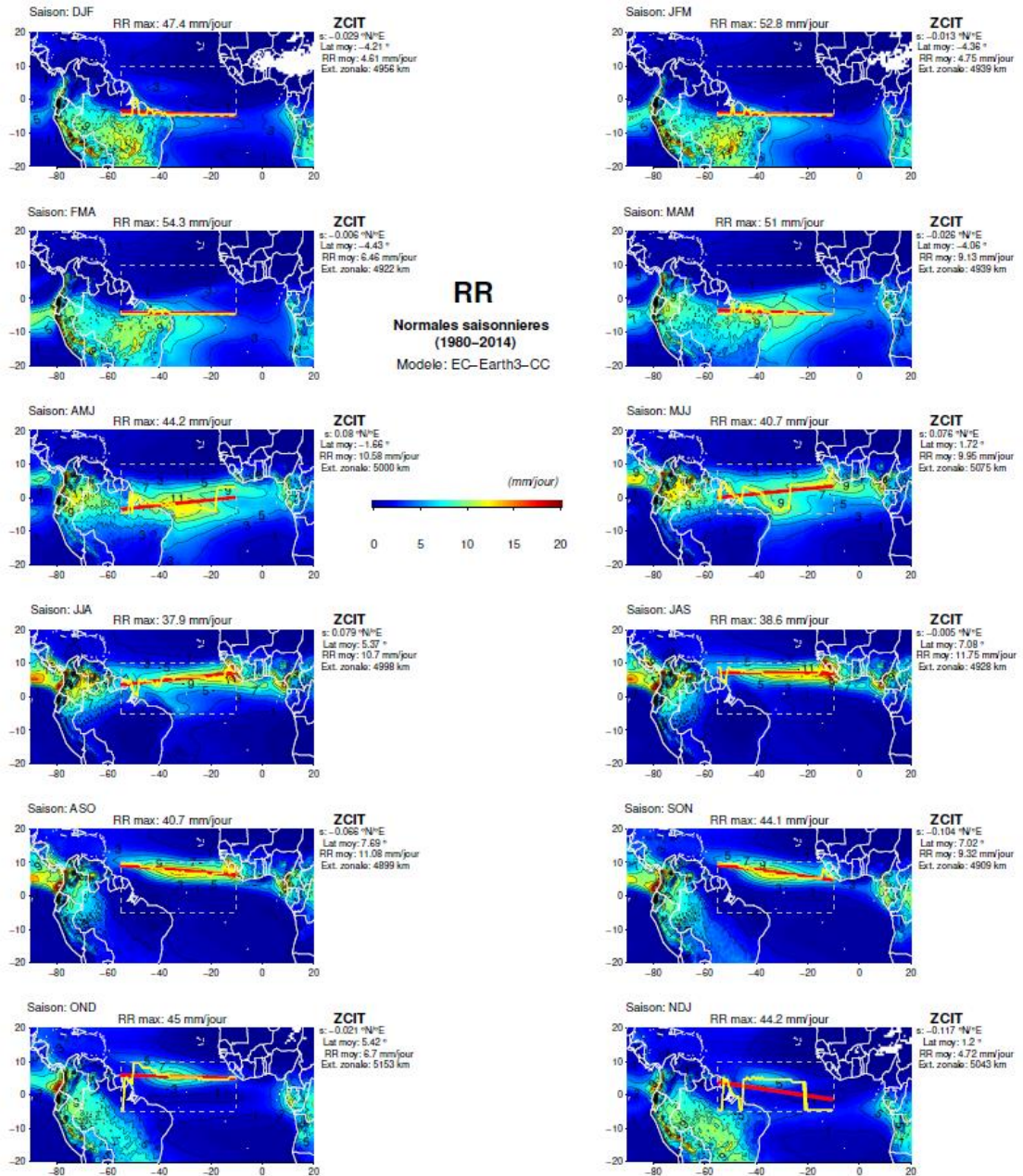


Figure A22. Idem Figure A1, excepté pour le modèle EC-Earth3-CC.

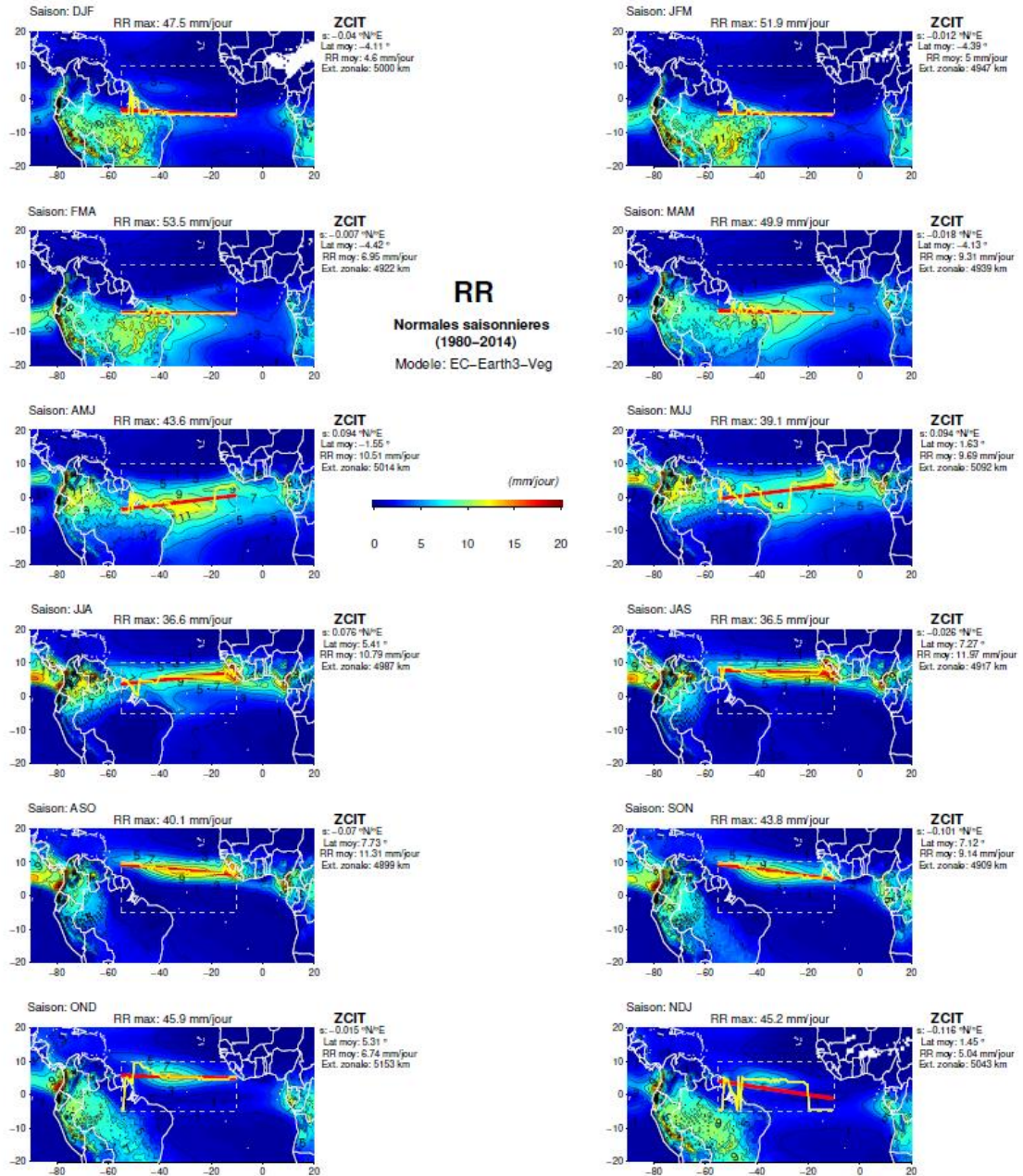
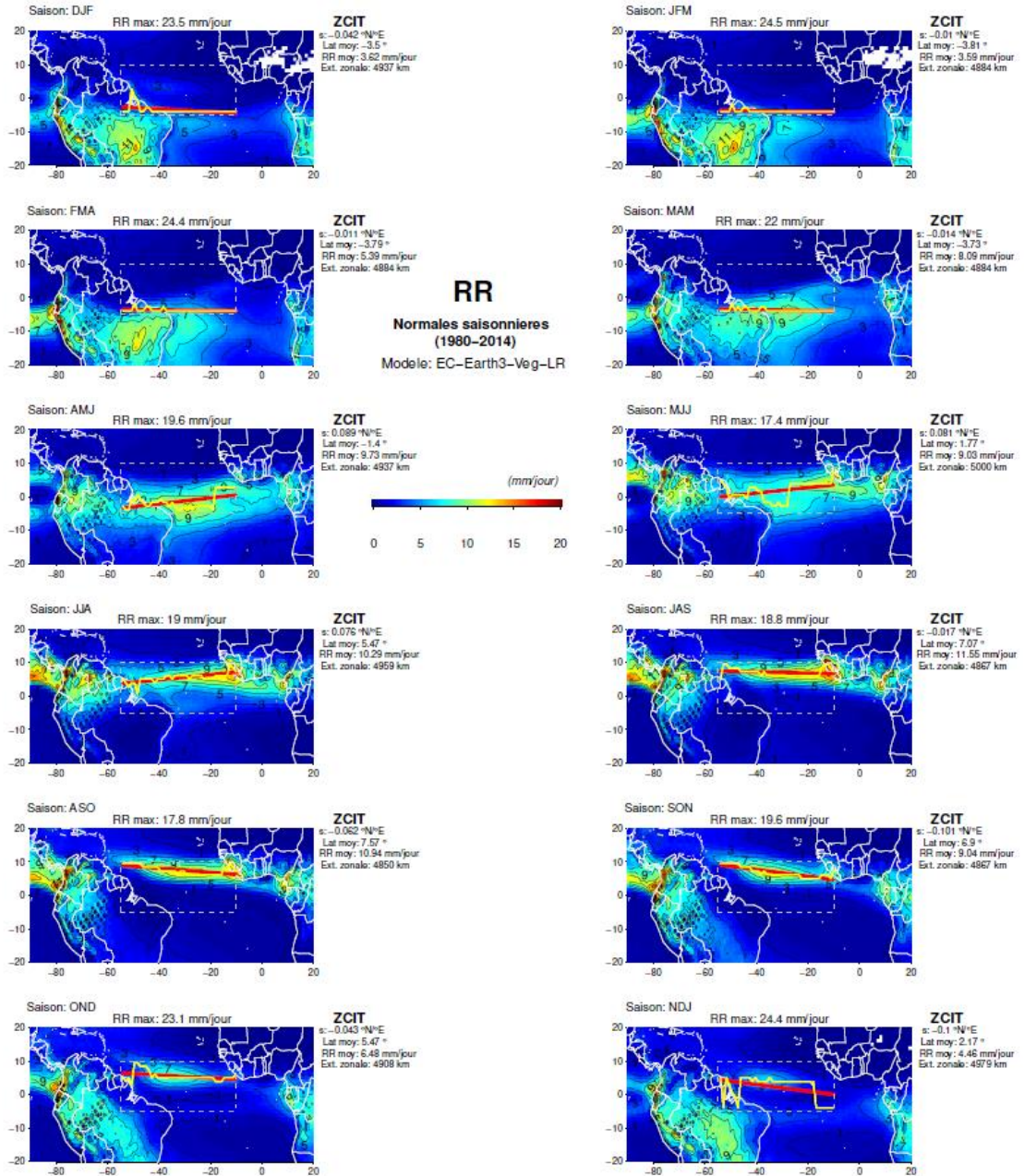


Figure A23. Idem Figure A1, excepté pour le modèle EC-Earth3-Veg.





**Figure A24.** Idem Figure A1, excepté pour le modèle EC-Earth3-Veg-LR.



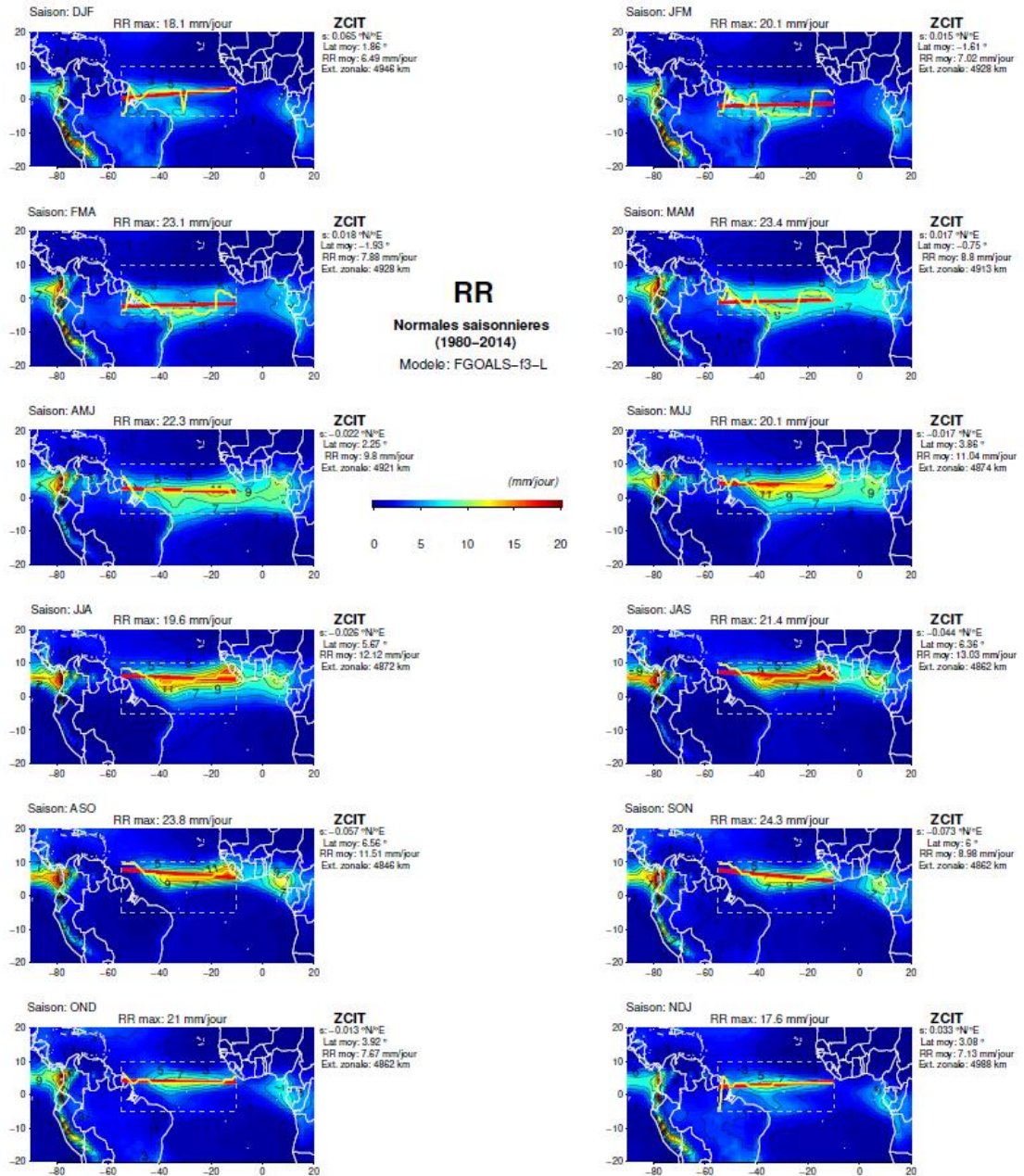


Figure A25. Idem Figure A1, excepté pour le modèle FGOALS-f3-L.

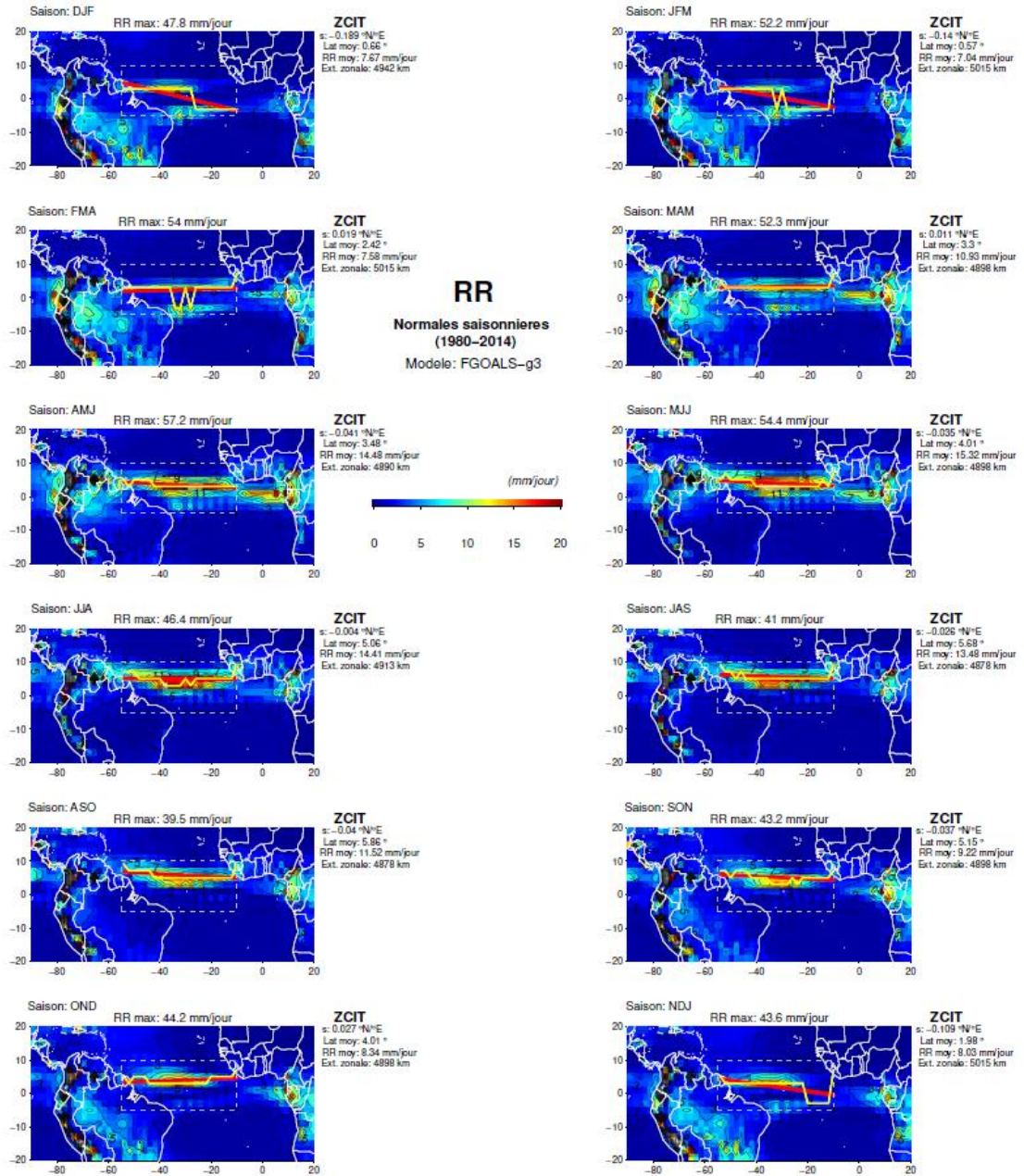


Figure A26. Idem Figure A1, excepté pour le modèle FGOALS-g3.



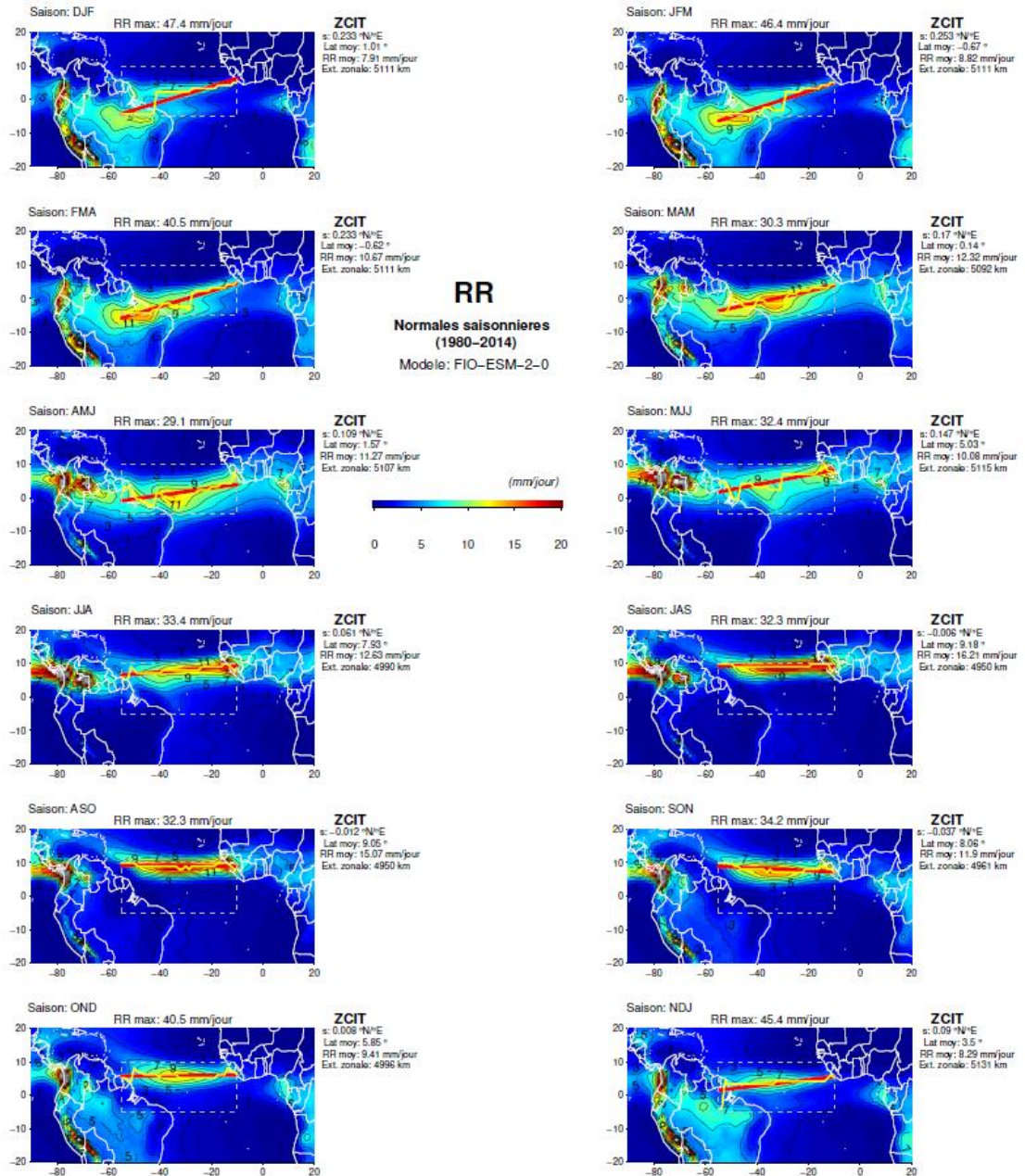


Figure A27. Idem Figure A1, excepté pour le modèle FIO-ESM-2-0.



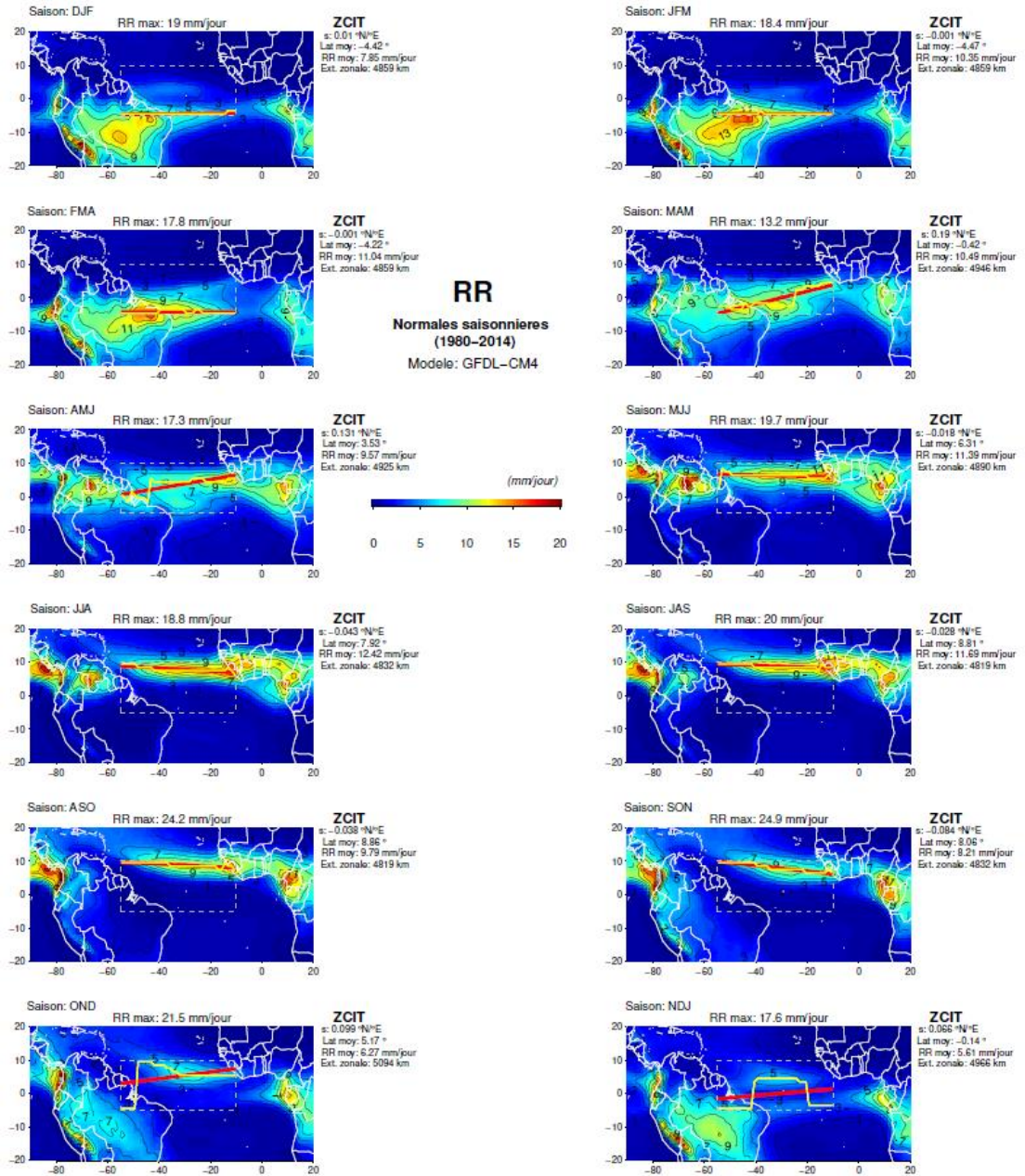


Figure A28. Idem Figure A1, excepté pour le modèle GFDL-CM4.

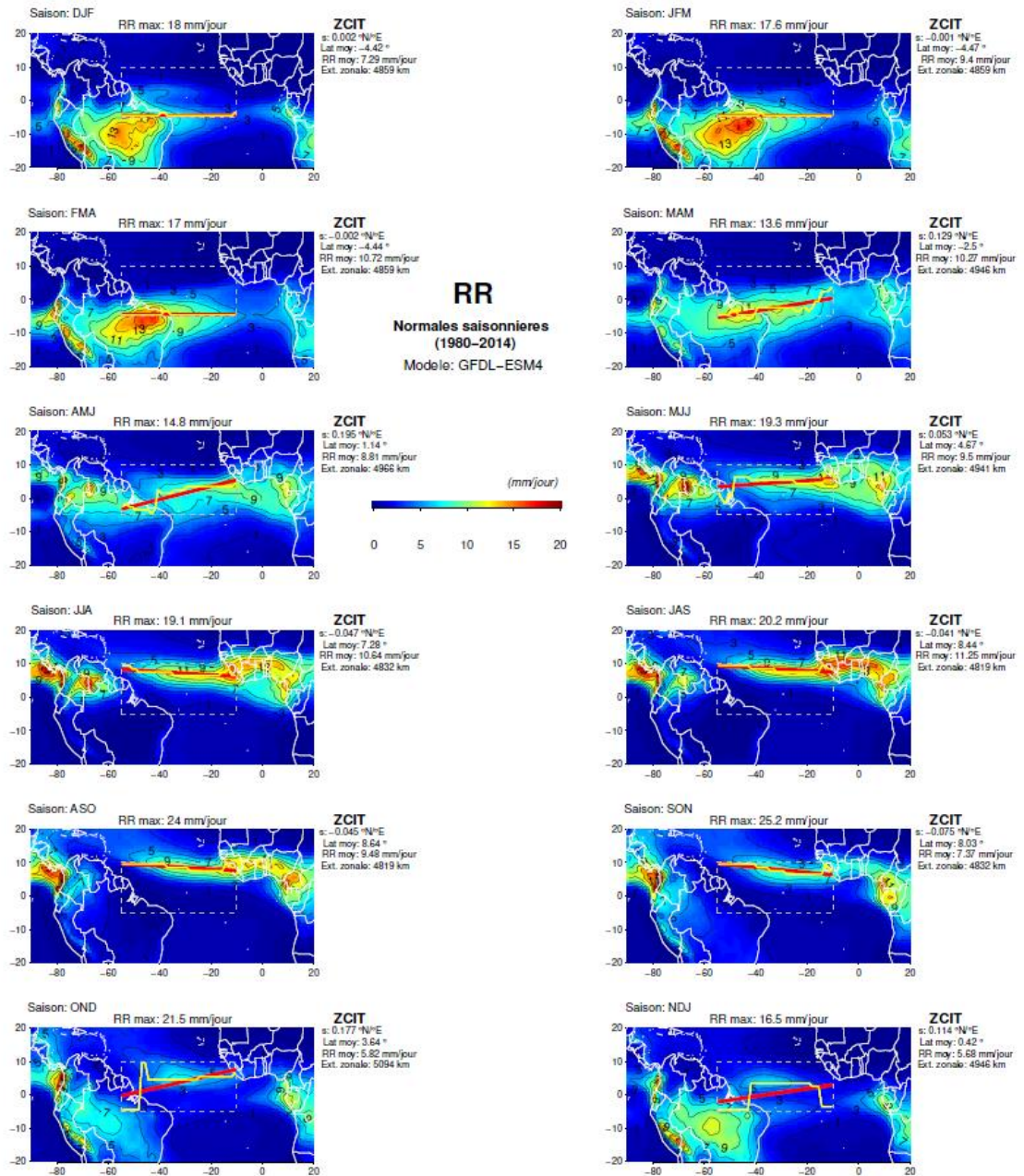


Figure A29. Idem Figure A1, excepté pour le modèle GFDL-ESM4.



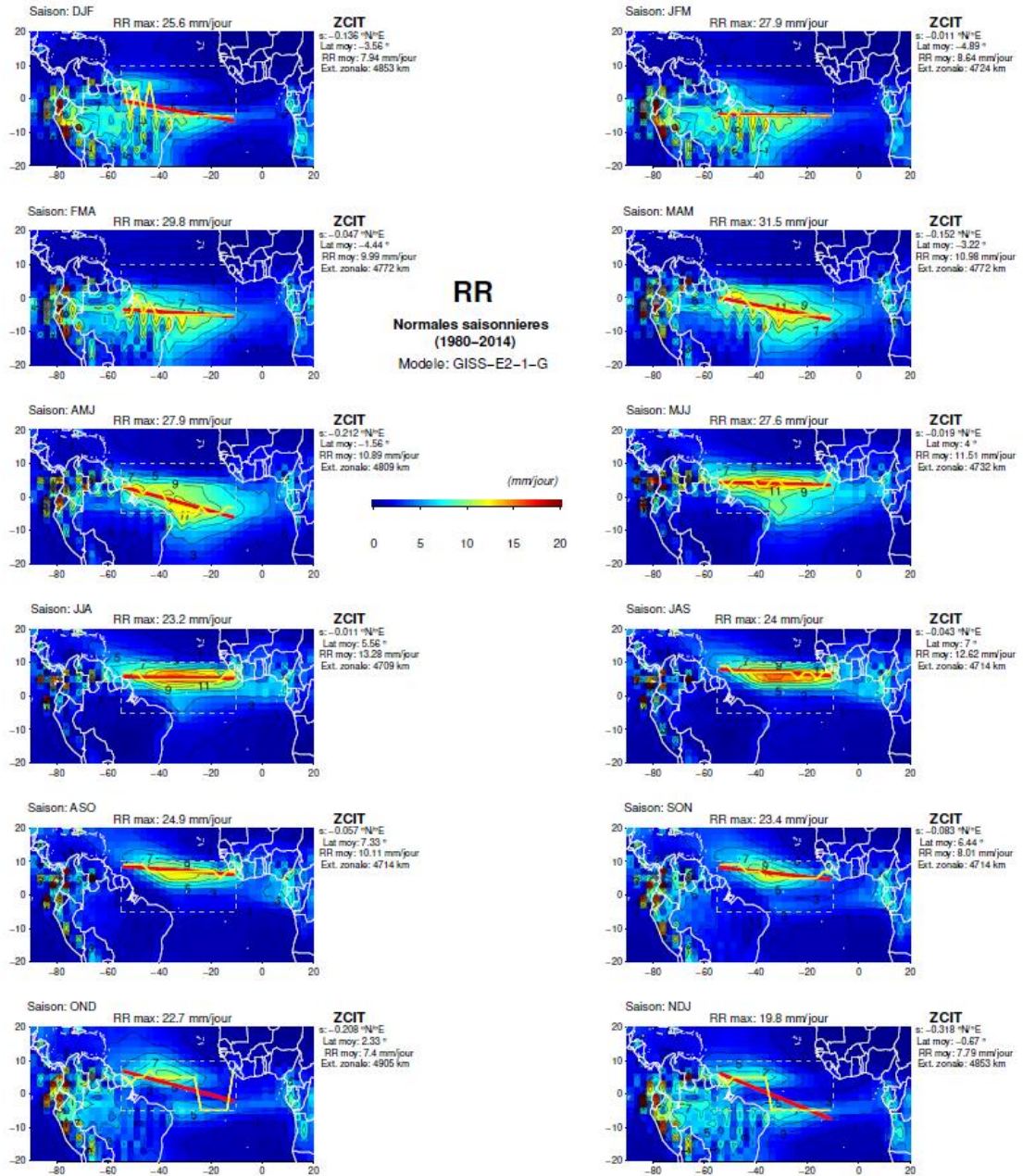


Figure A30. Idem Figure A1, excepté pour le modèle GISS-E2-1-G.



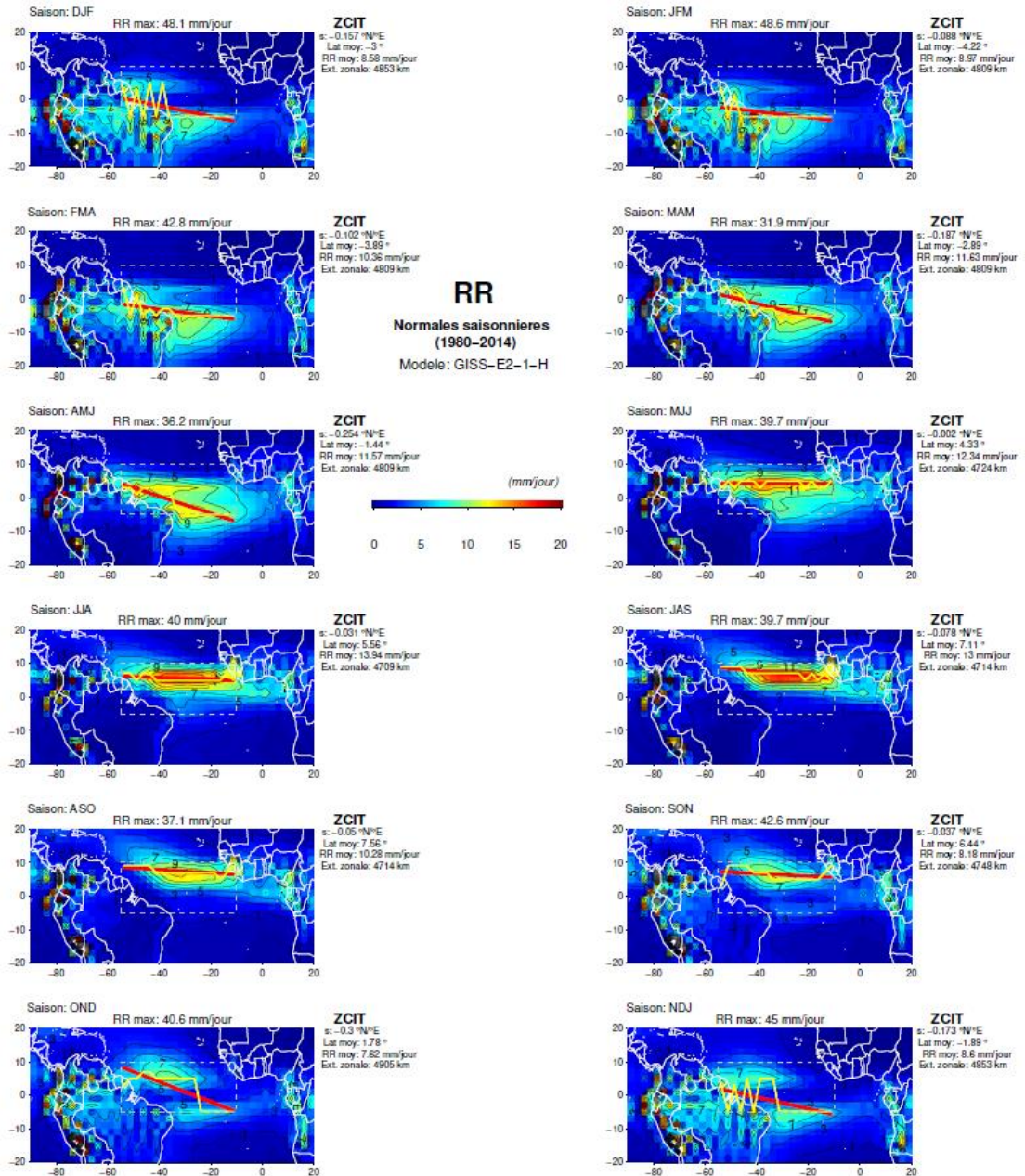


Figure A31. Idem Figure A1, excepté pour le modèle GISS-E2-1-H.

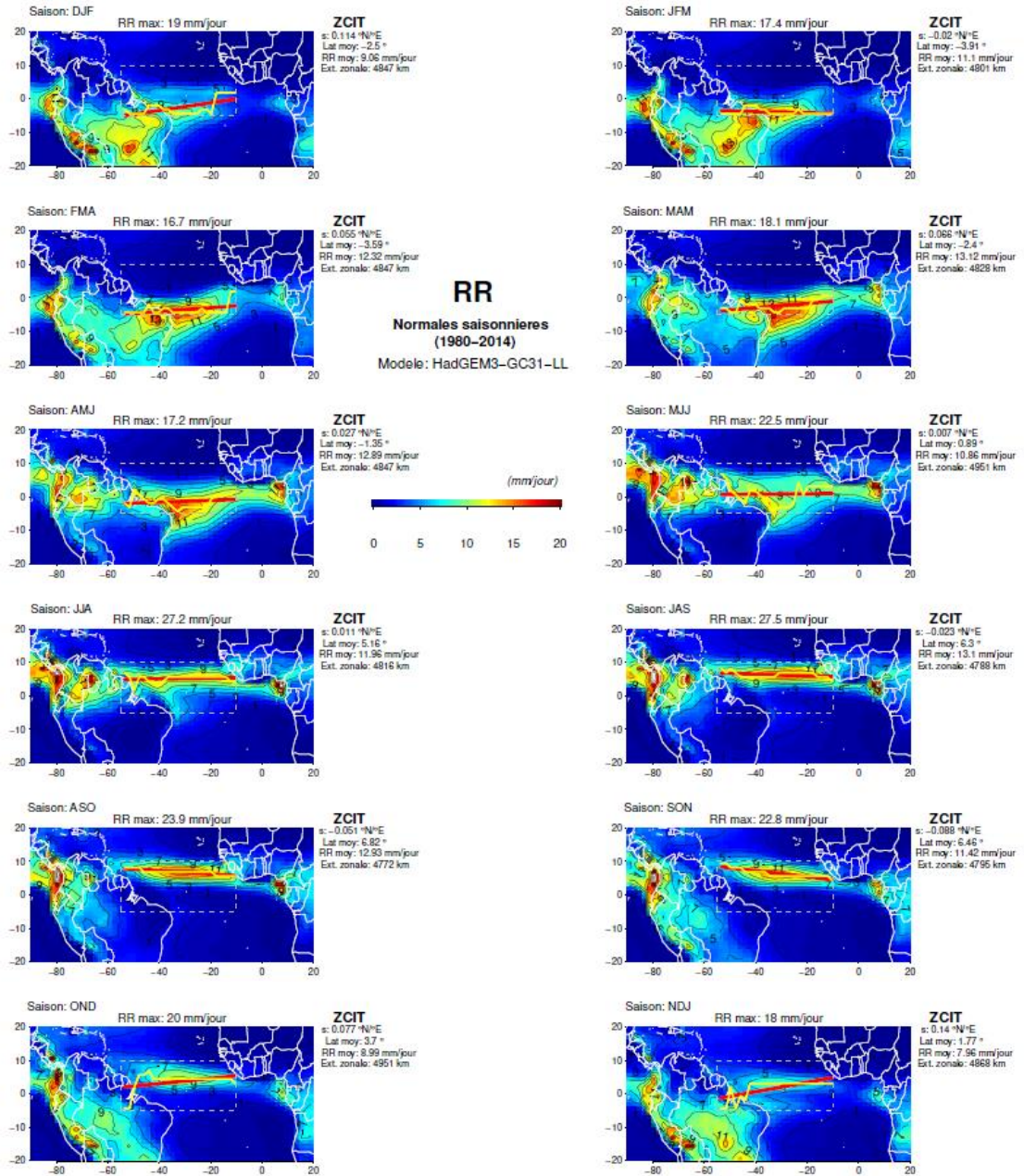


Figure A32. Idem Figure A1, excepté pour le modèle HadGEM3-GC31-LL.



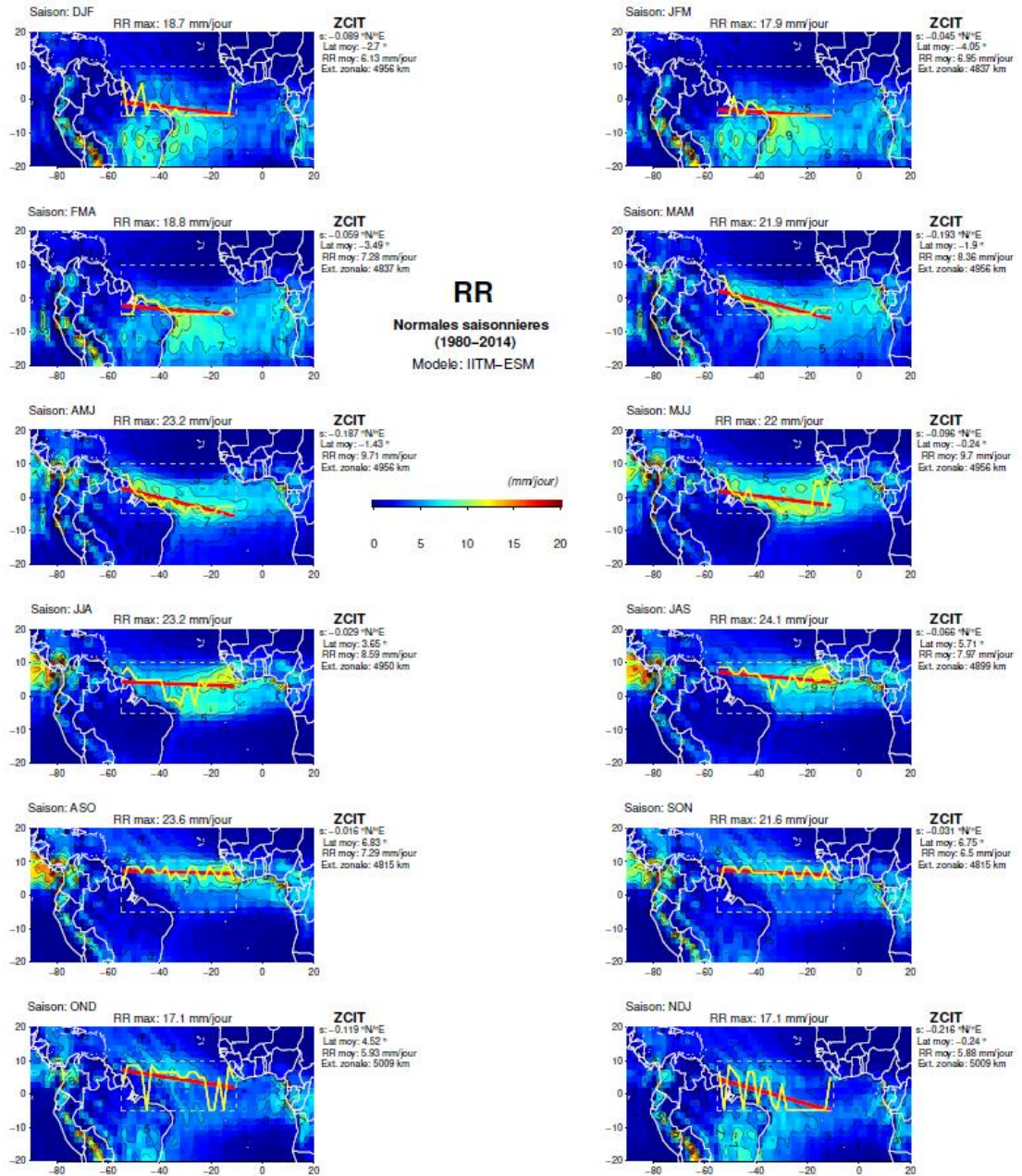


Figure A33. Idem Figure A1, excepté pour le modèle IITM-ESM.



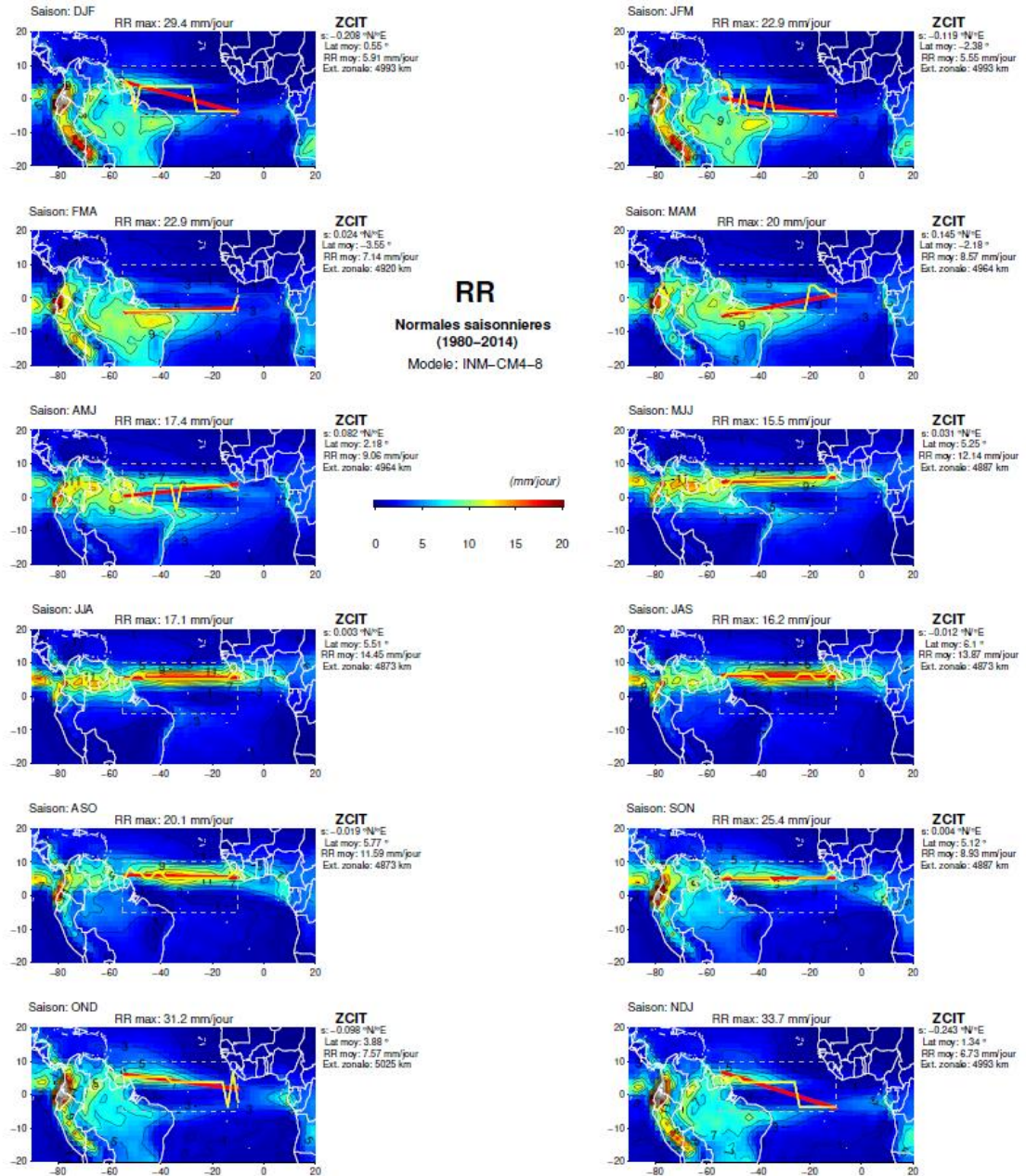


Figure A34. Idem Figure A1, excepté pour le modèle INM-CM4-8.

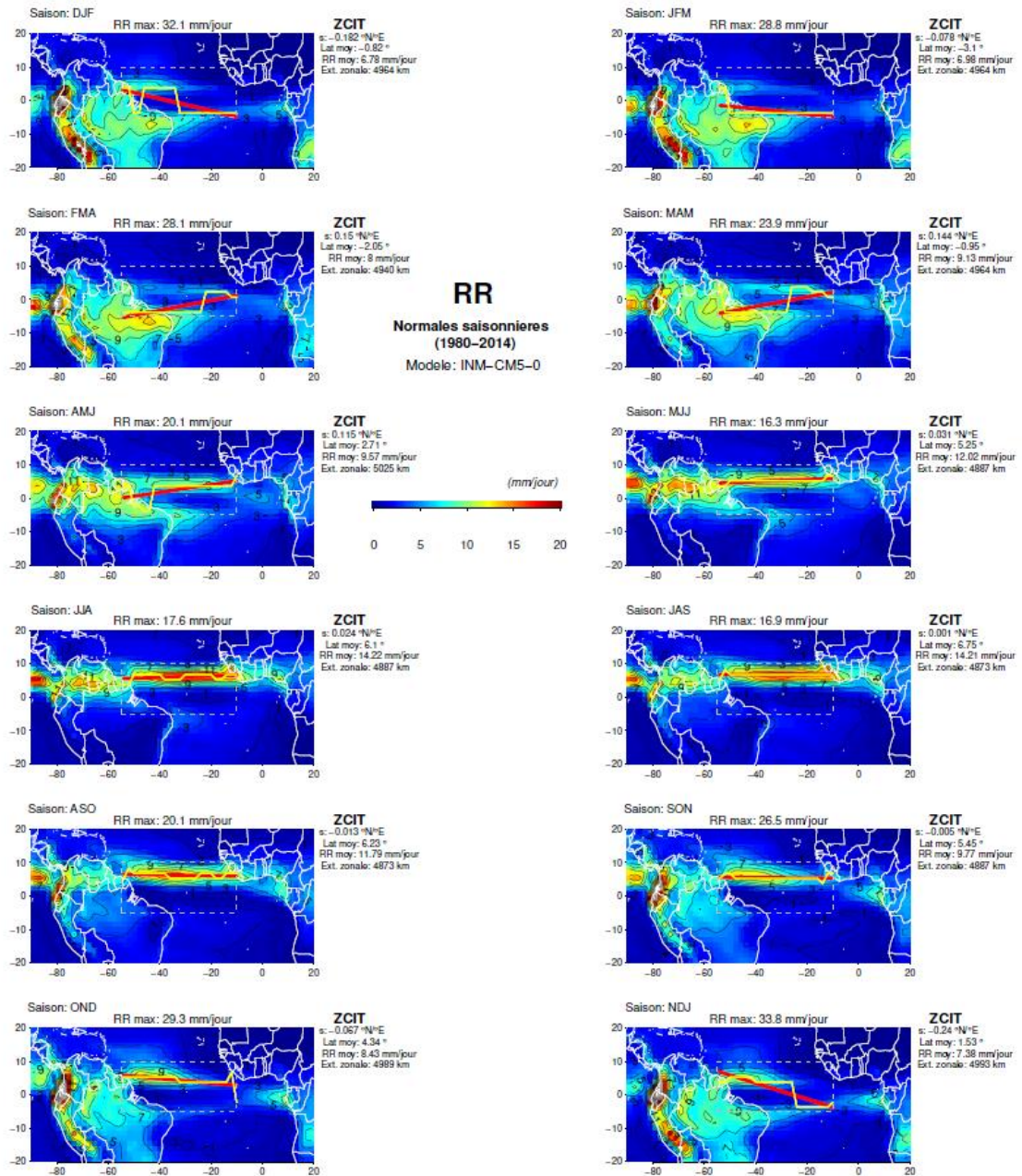
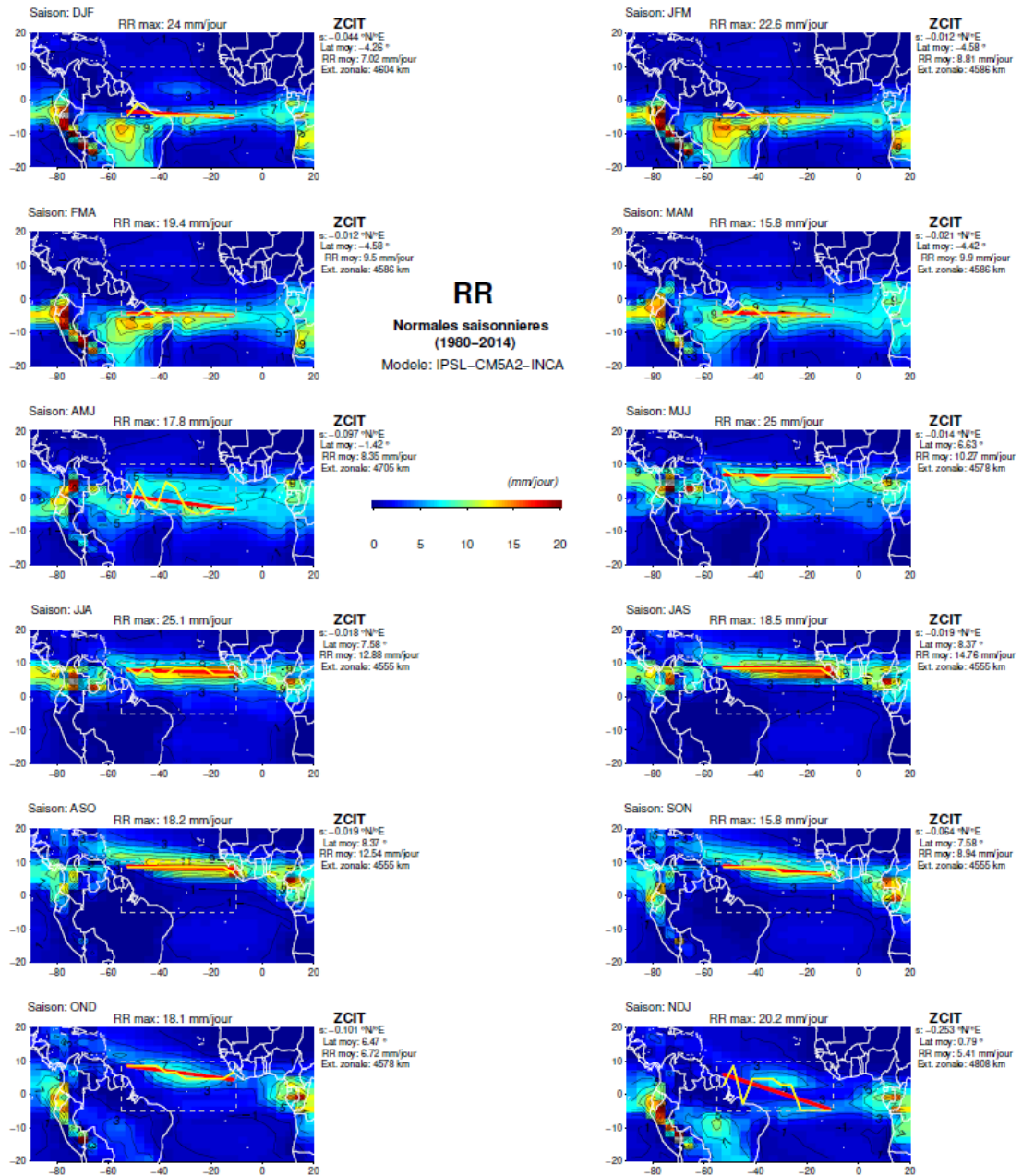


Figure A35. Idem Figure A1, excepté pour le modèle INM-CM5-0.



**Figure A36.** Idem Figure A1, excepté pour le modèle IPSL-CM5A2-INCA.



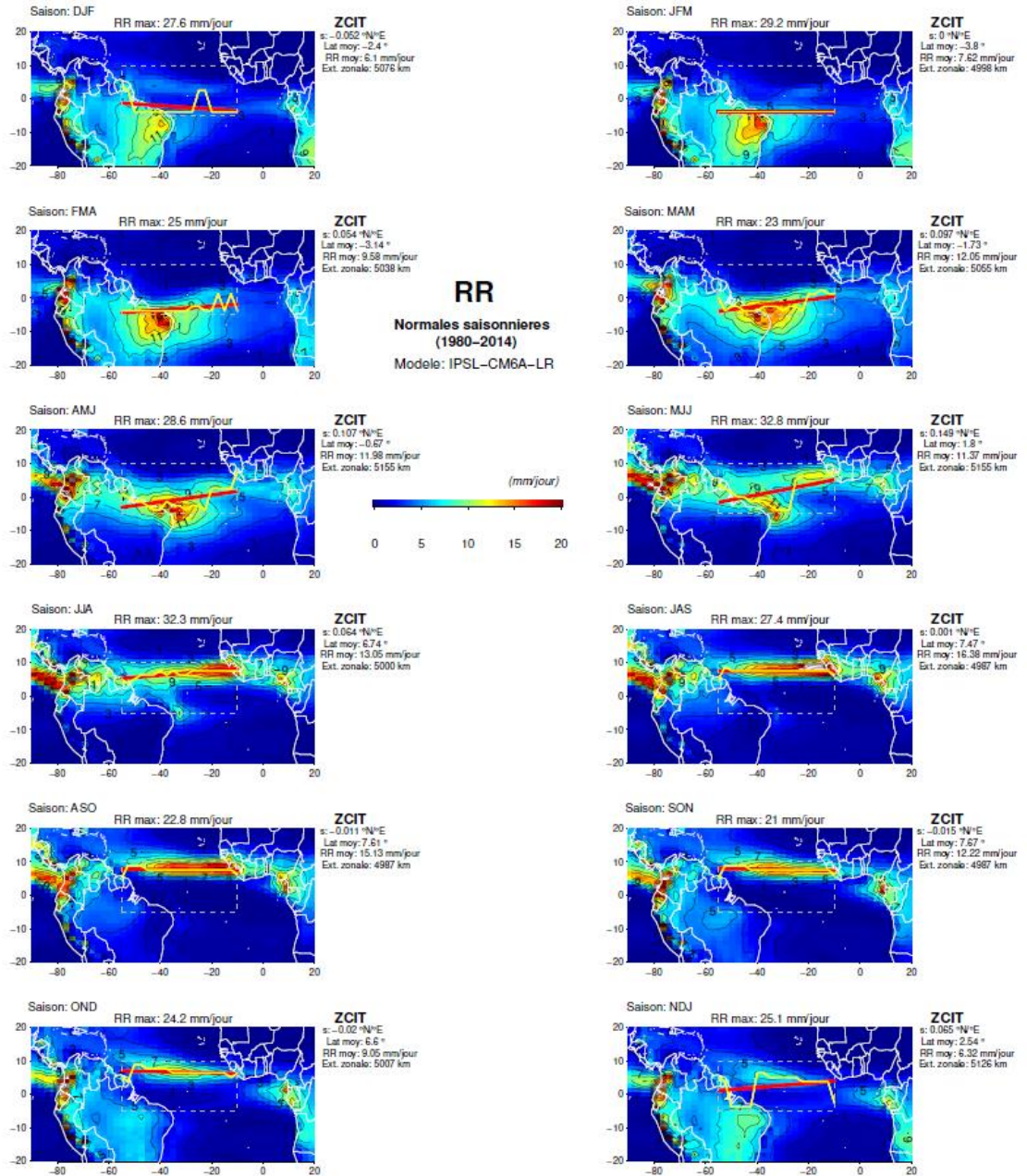


Figure A37. Idem Figure A1, excepté pour le modèle IPSL-CM6A-LR.

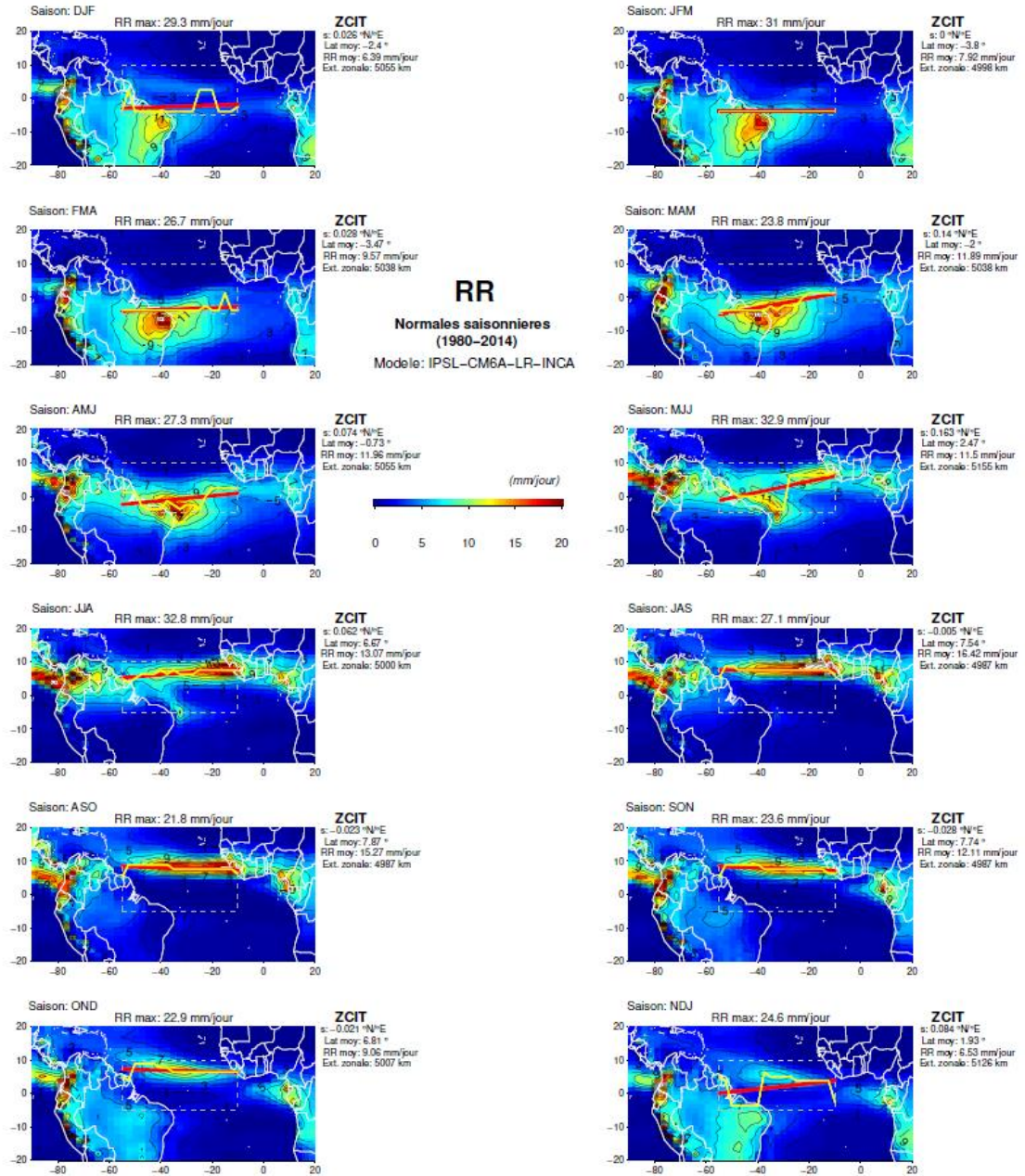


Figure A38. Idem Figure A1, excepté pour le modèle IPSL-CM6A-LR-INCA.



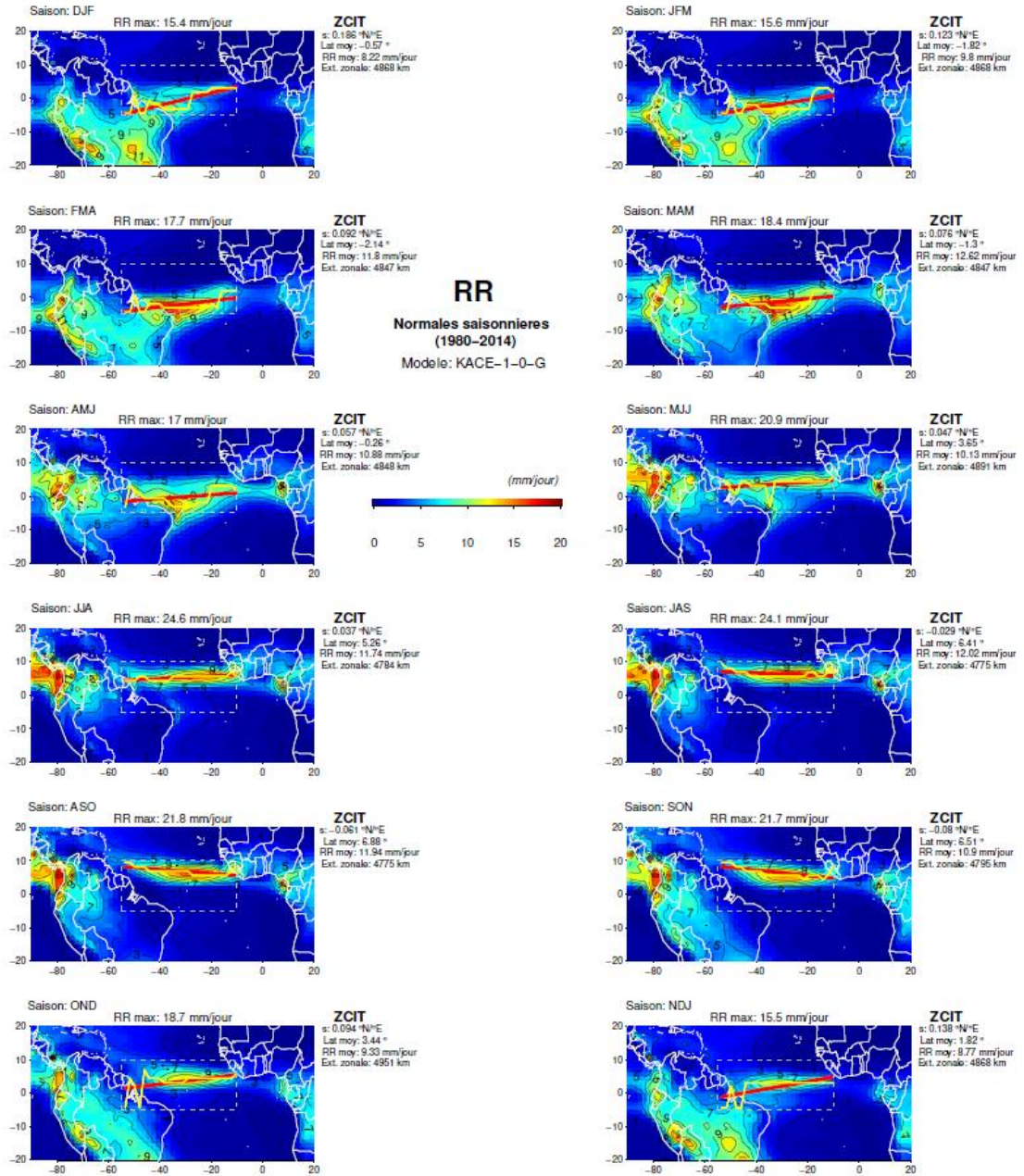


Figure A39. Idem Figure A1, excepté pour le modèle KACE-1-0-G.



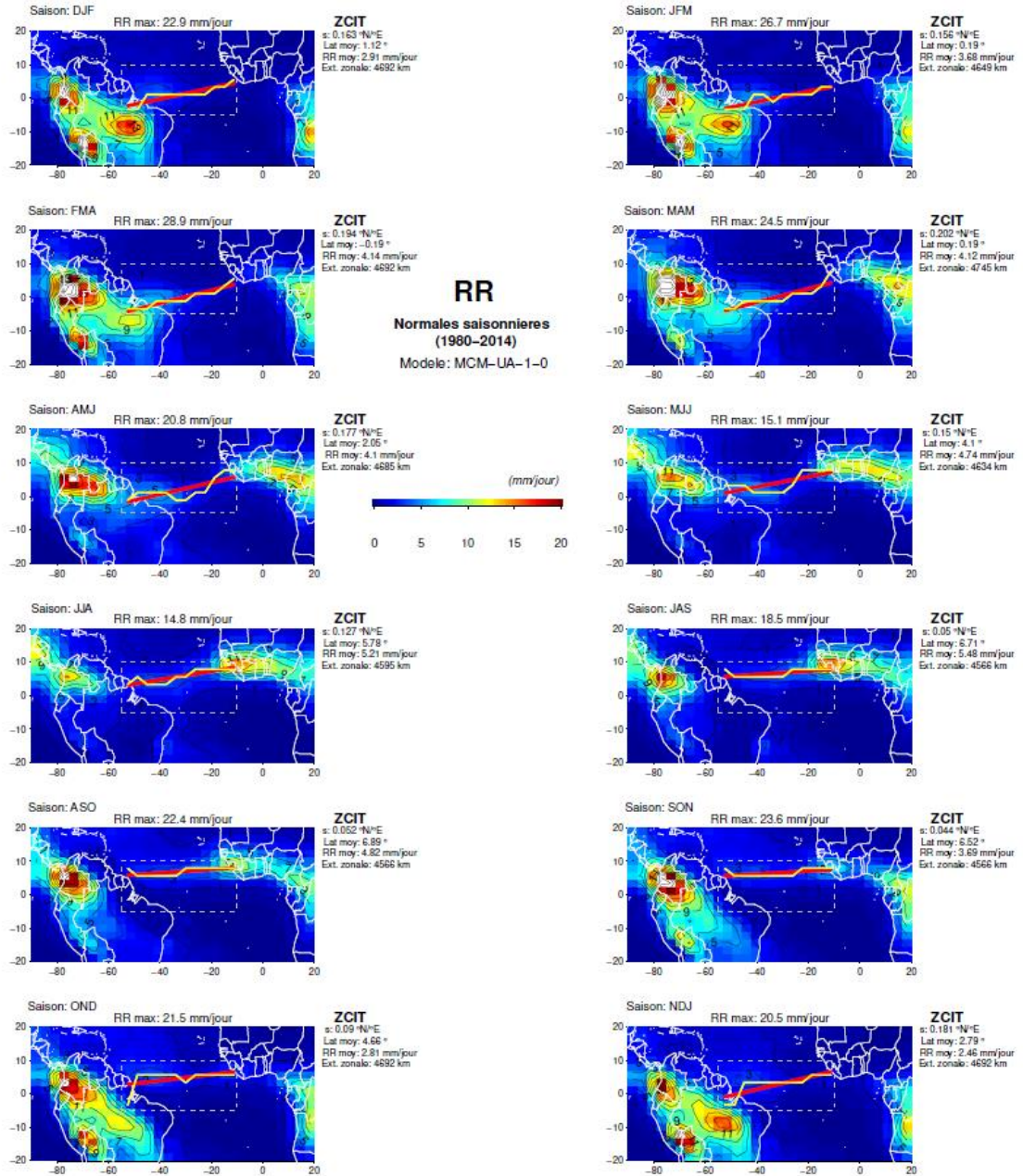


Figure A40. Idem Figure A1, excepté pour le modèle MCM-UA-1-0.

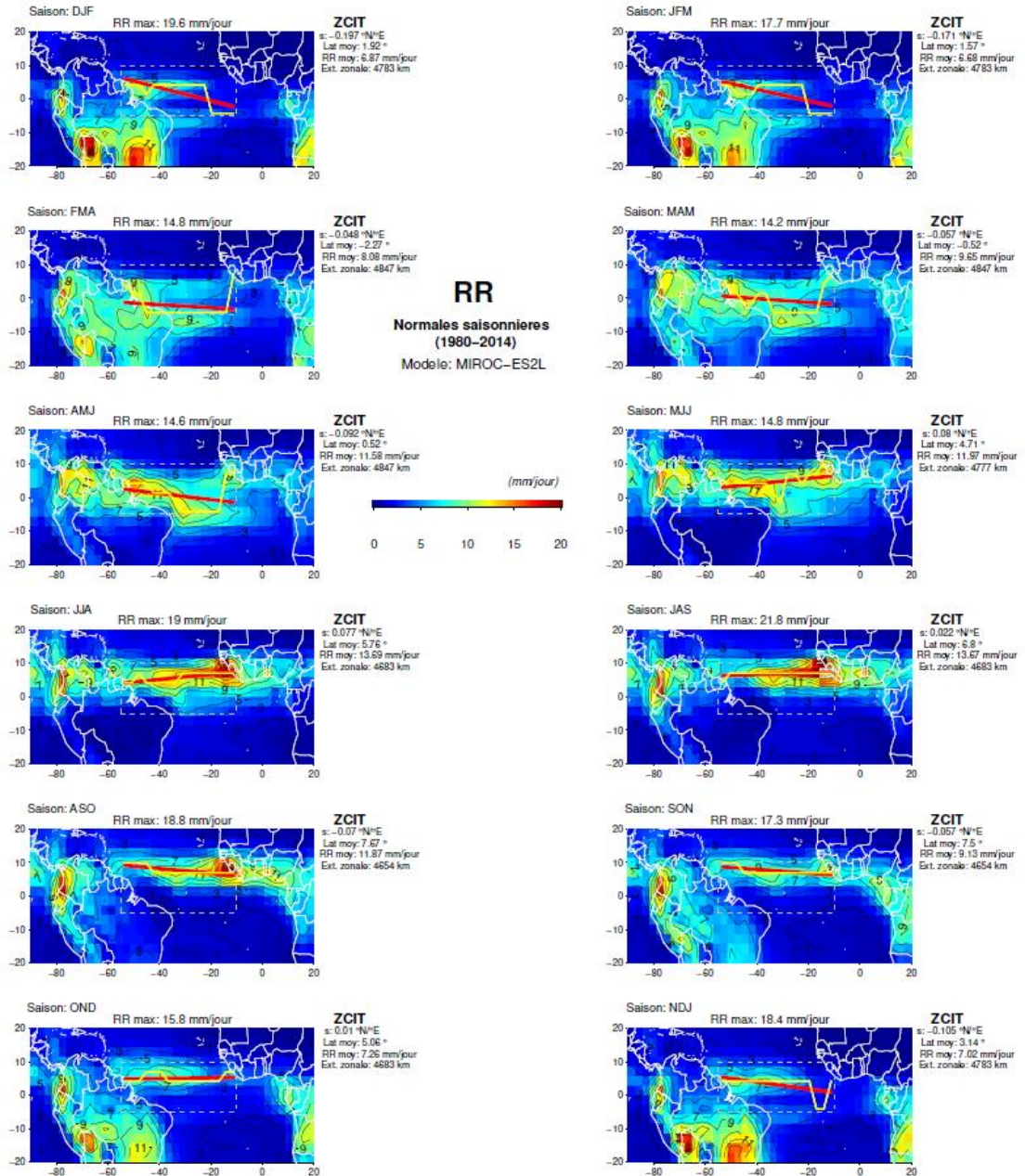


Figure A41. Idem Figure A1, excepté pour le modèle MIROC-ES2L.



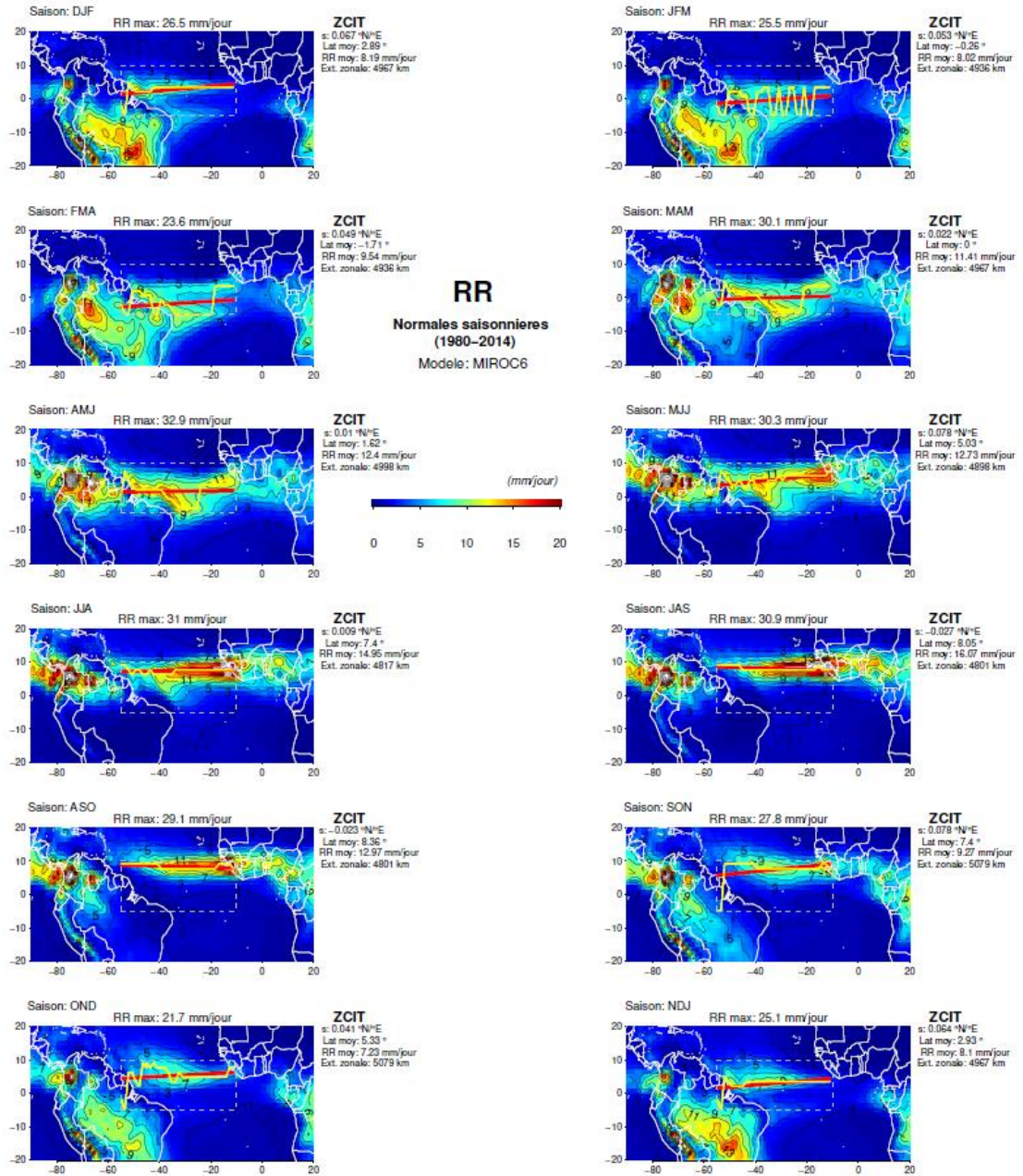
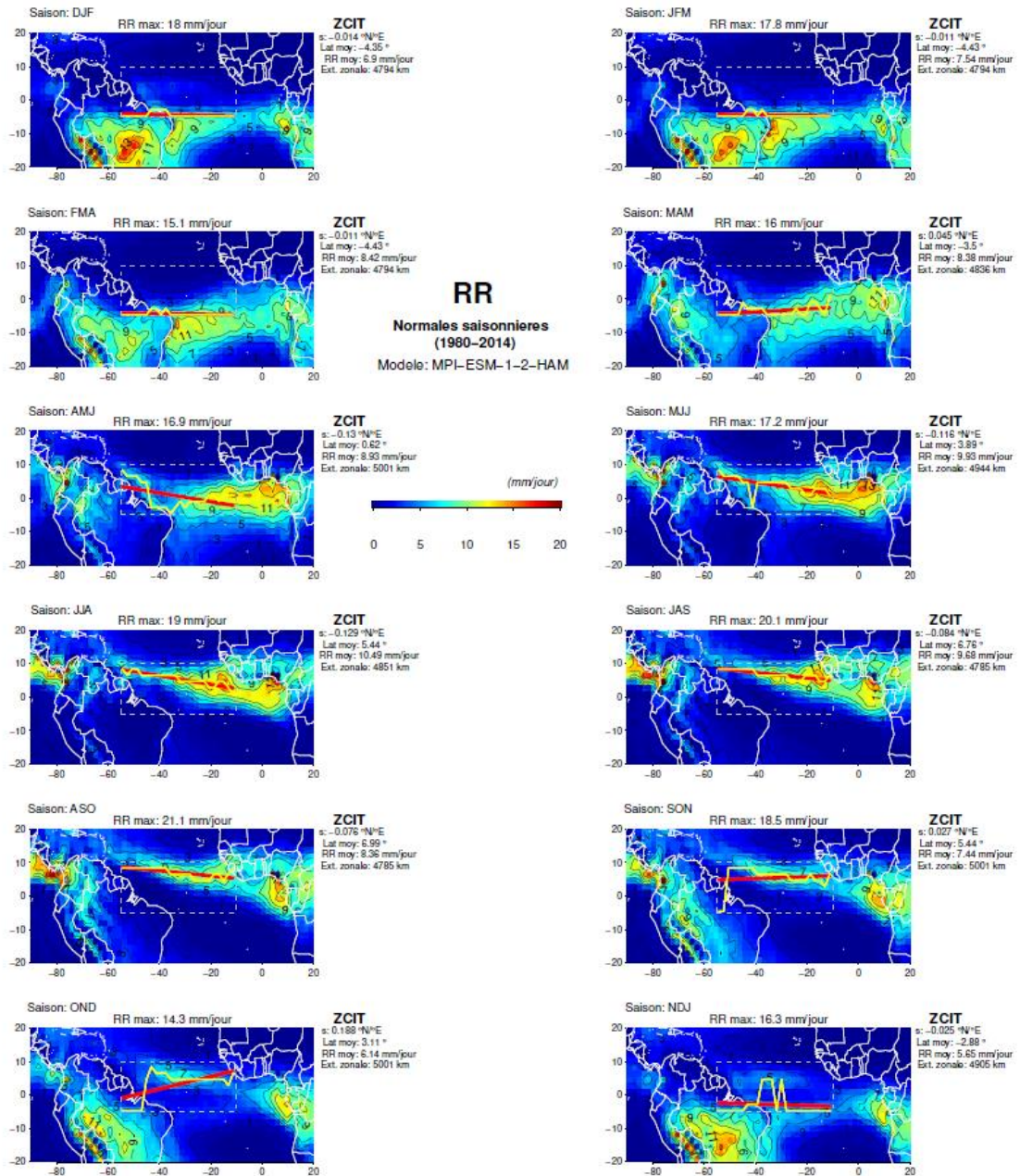


Figure A42. Idem Figure A1, excepté pour le modèle MIROC6.





**Figure A43.** Idem Figure A1, excepté pour le modèle MPI-ESM-1-2-HAM.

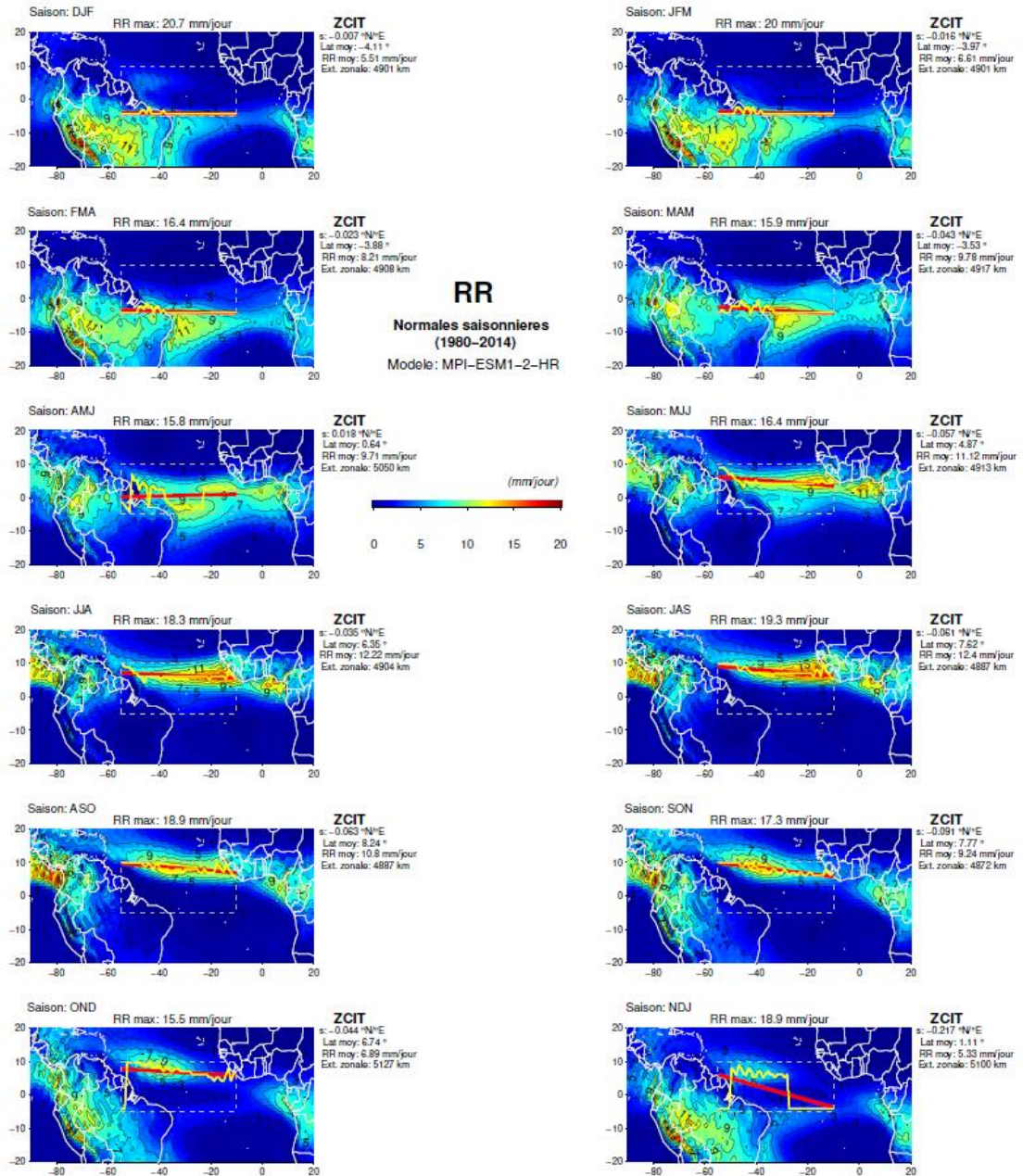


Figure A44. Idem Figure A1, excepté pour le modèle MPI-ESM1-2-HR.



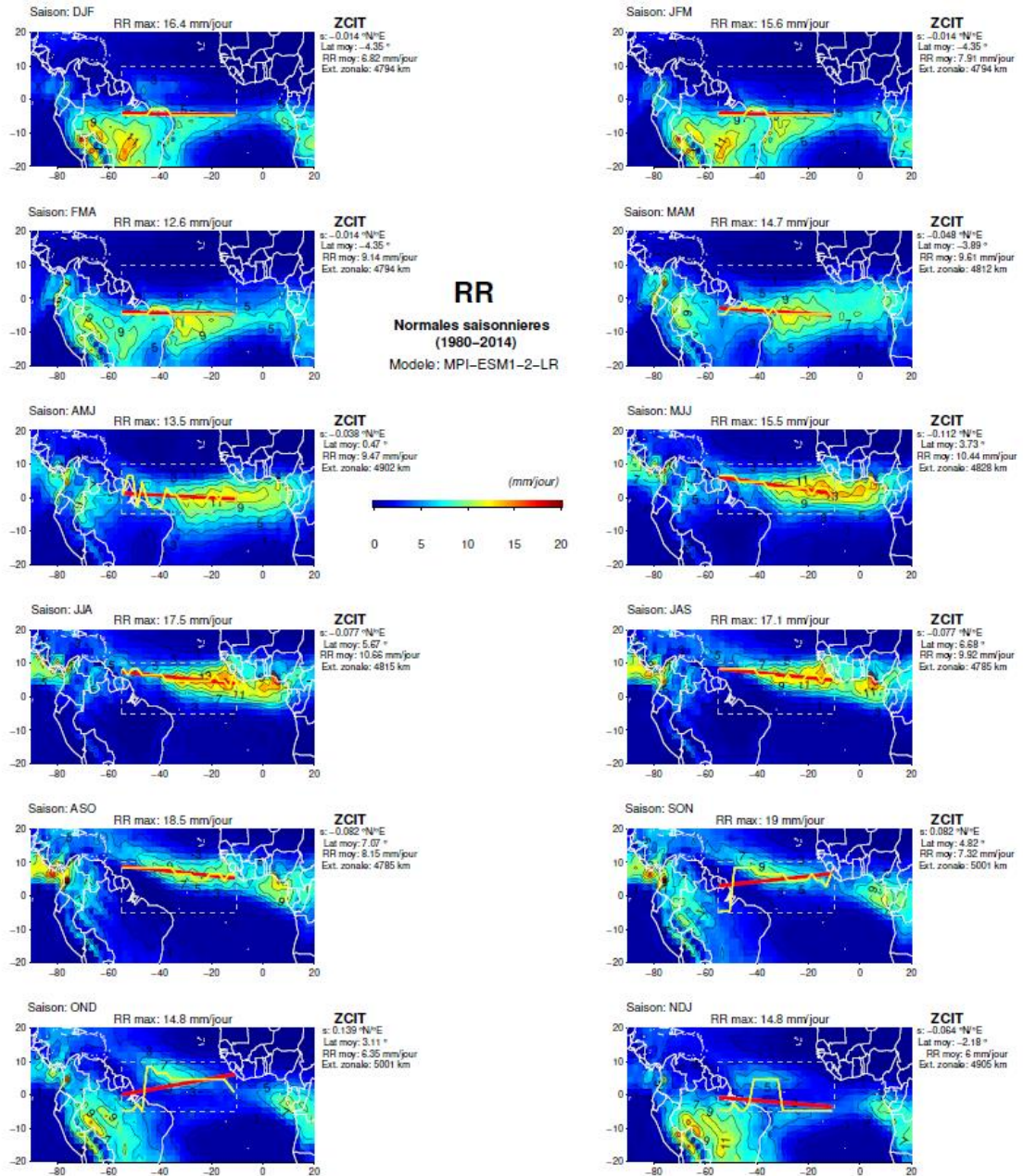


Figure A45. Idem Figure A1, excepté pour le modèle MPI-ESM1-2-LR.



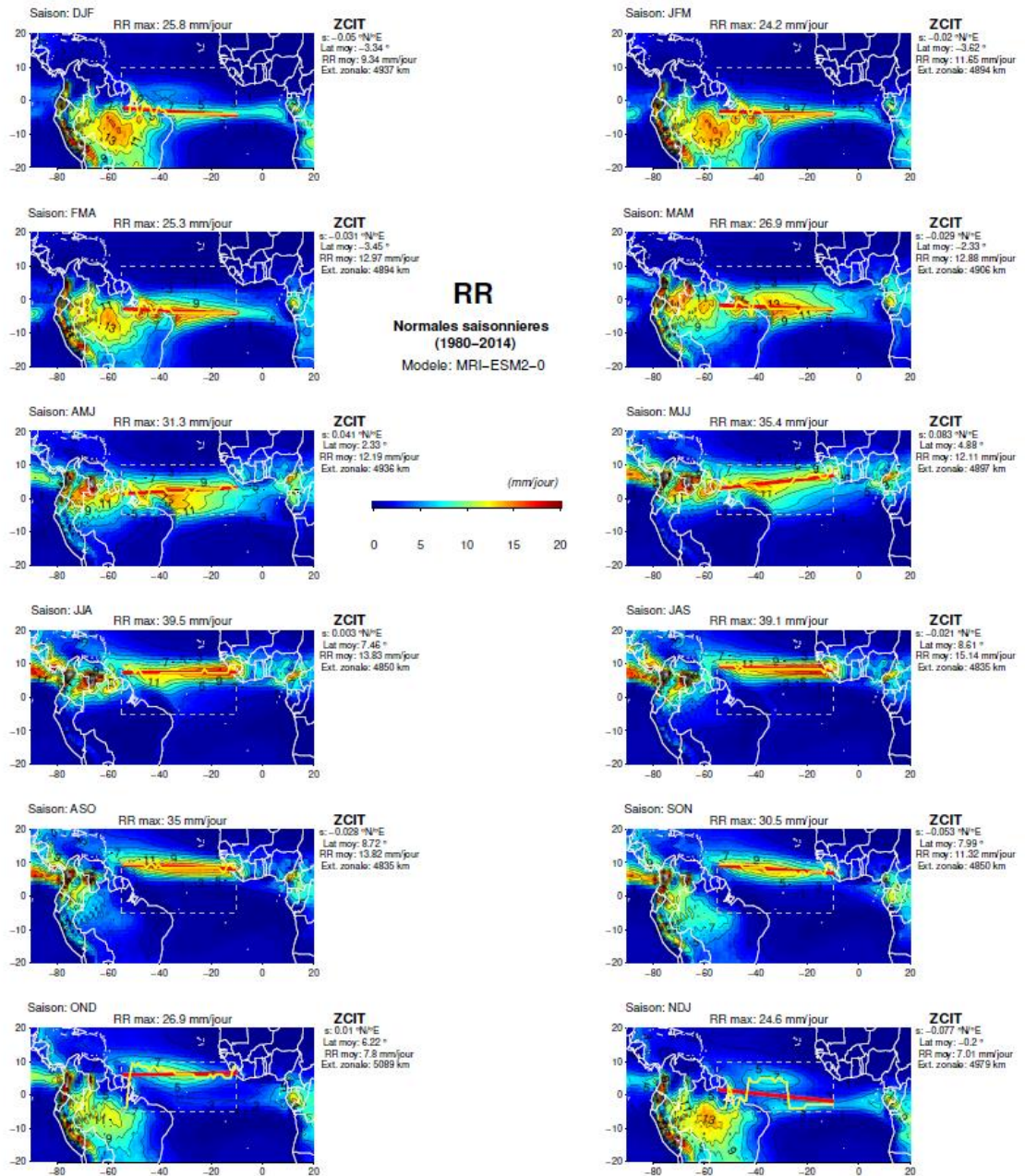


Figure A46. Idem Figure A1, excepté pour le modèle MRI-ESM2-0.

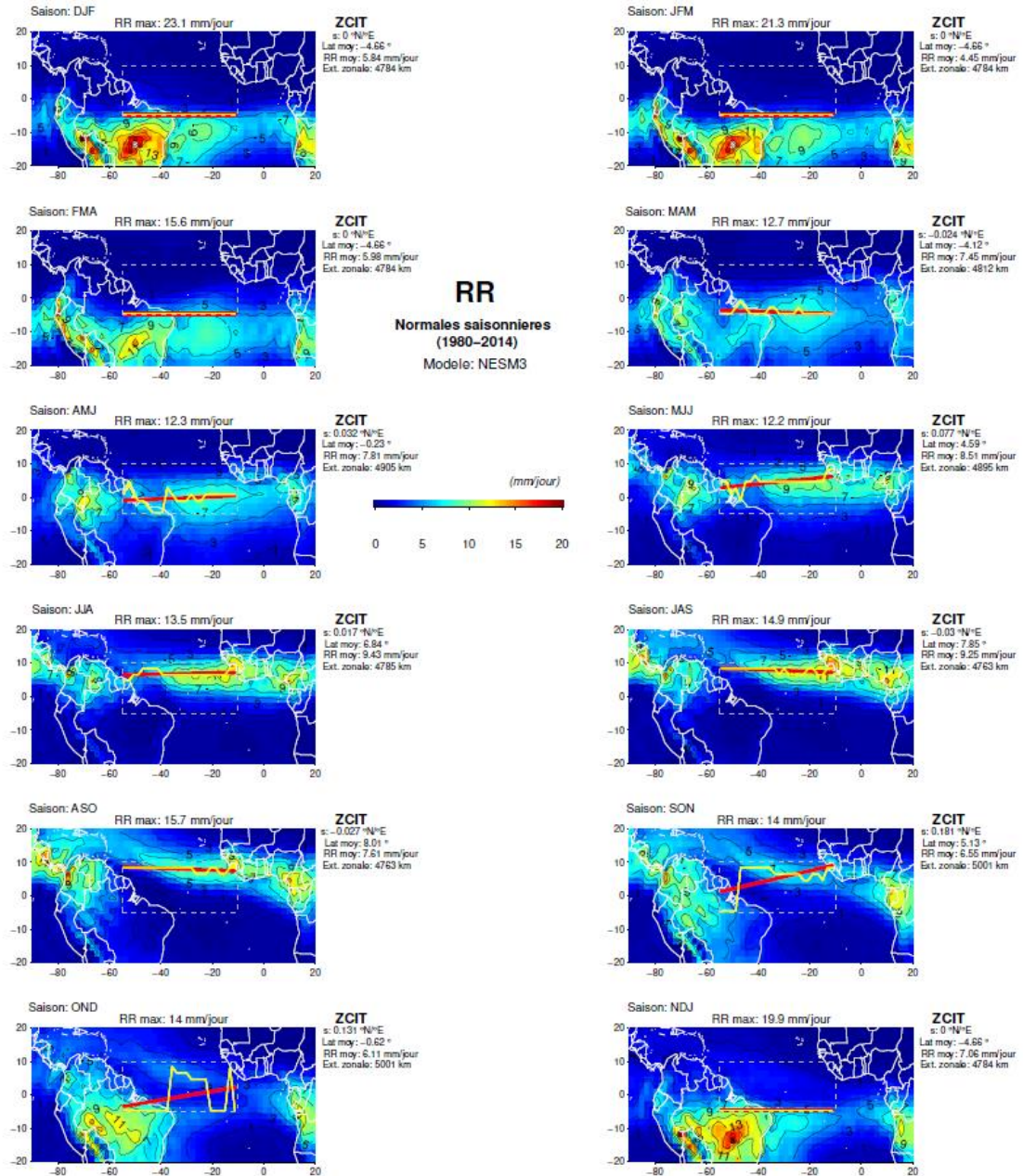


Figure A47. Idem Figure A1, excepté pour le modèle NESM3.



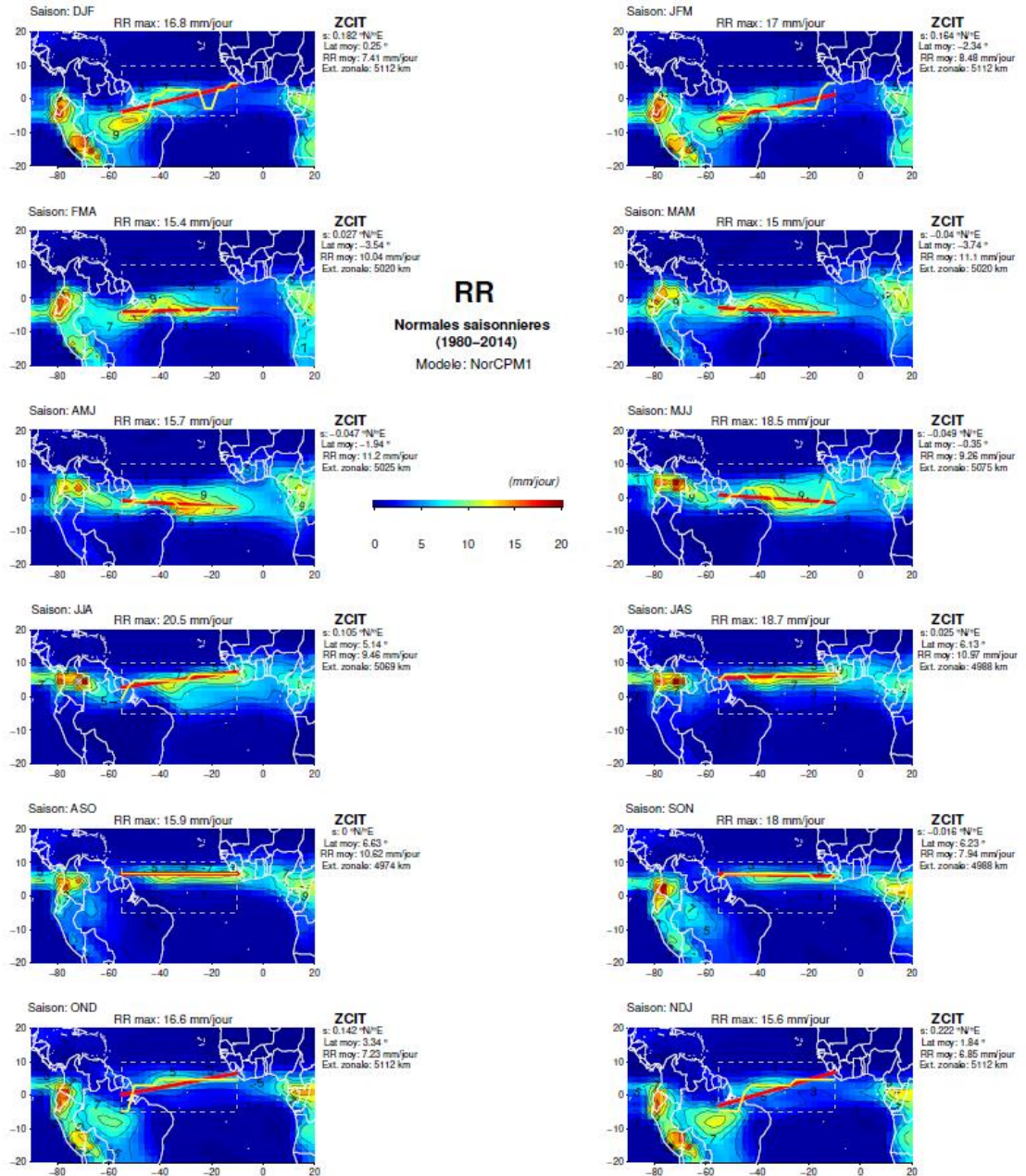


Figure A48. Idem Figure A1, excepté pour le modèle NorCPM1.



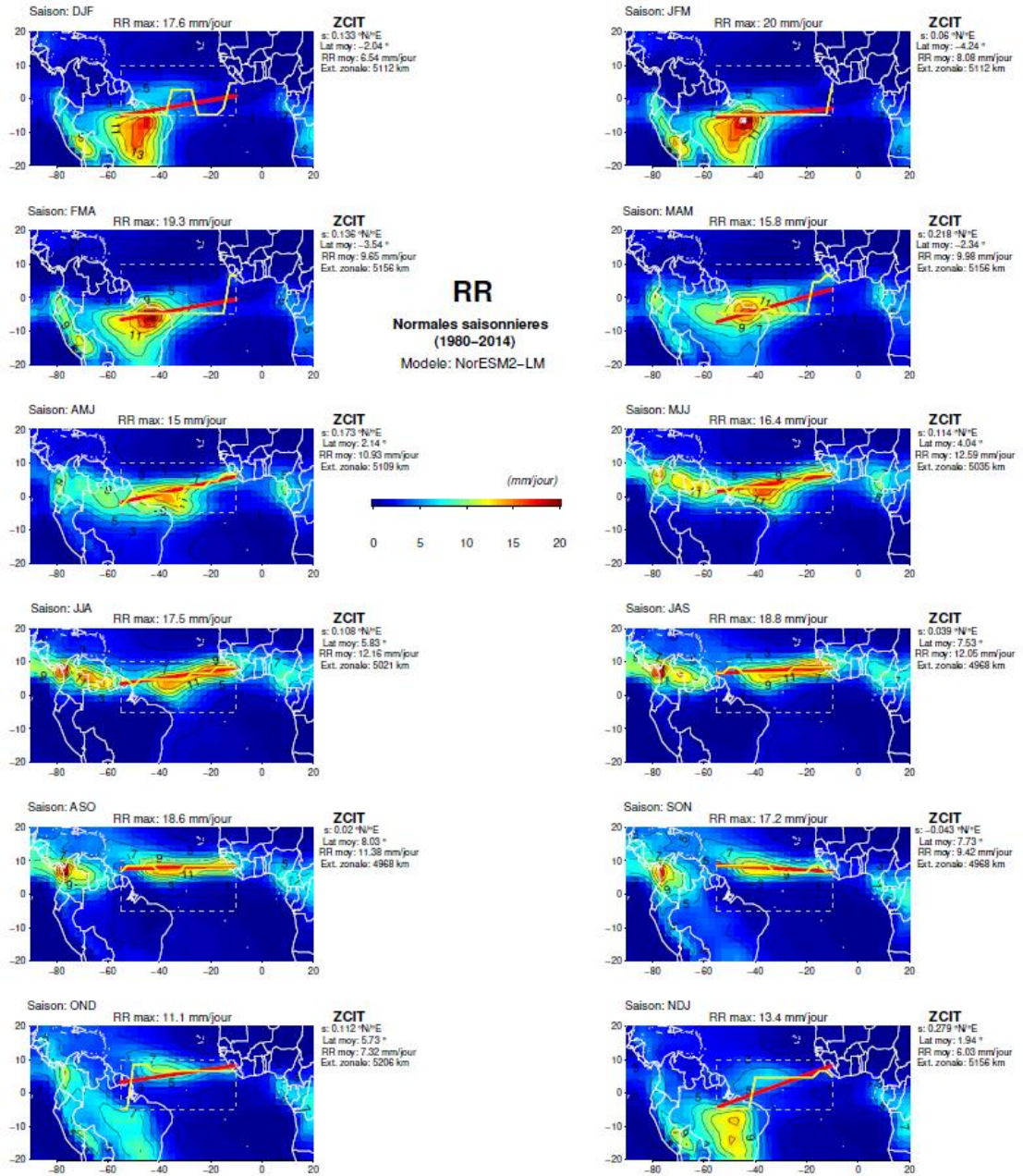


Figure A49. Idem Figure A1, excepté pour le modèle NorESM2-LM.

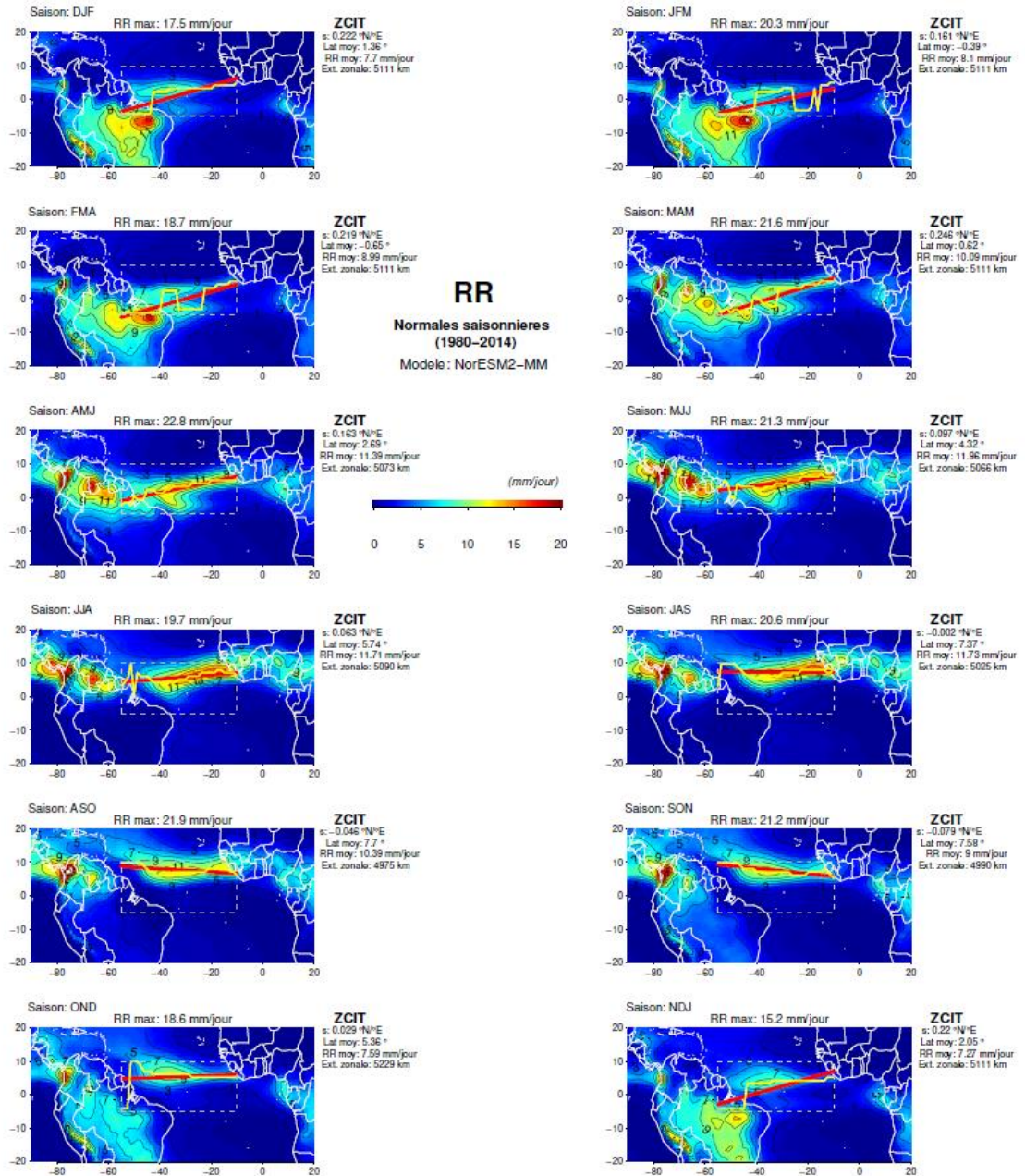


Figure A50. Idem Figure A1, excepté pour le modèle NorESM2-MM.



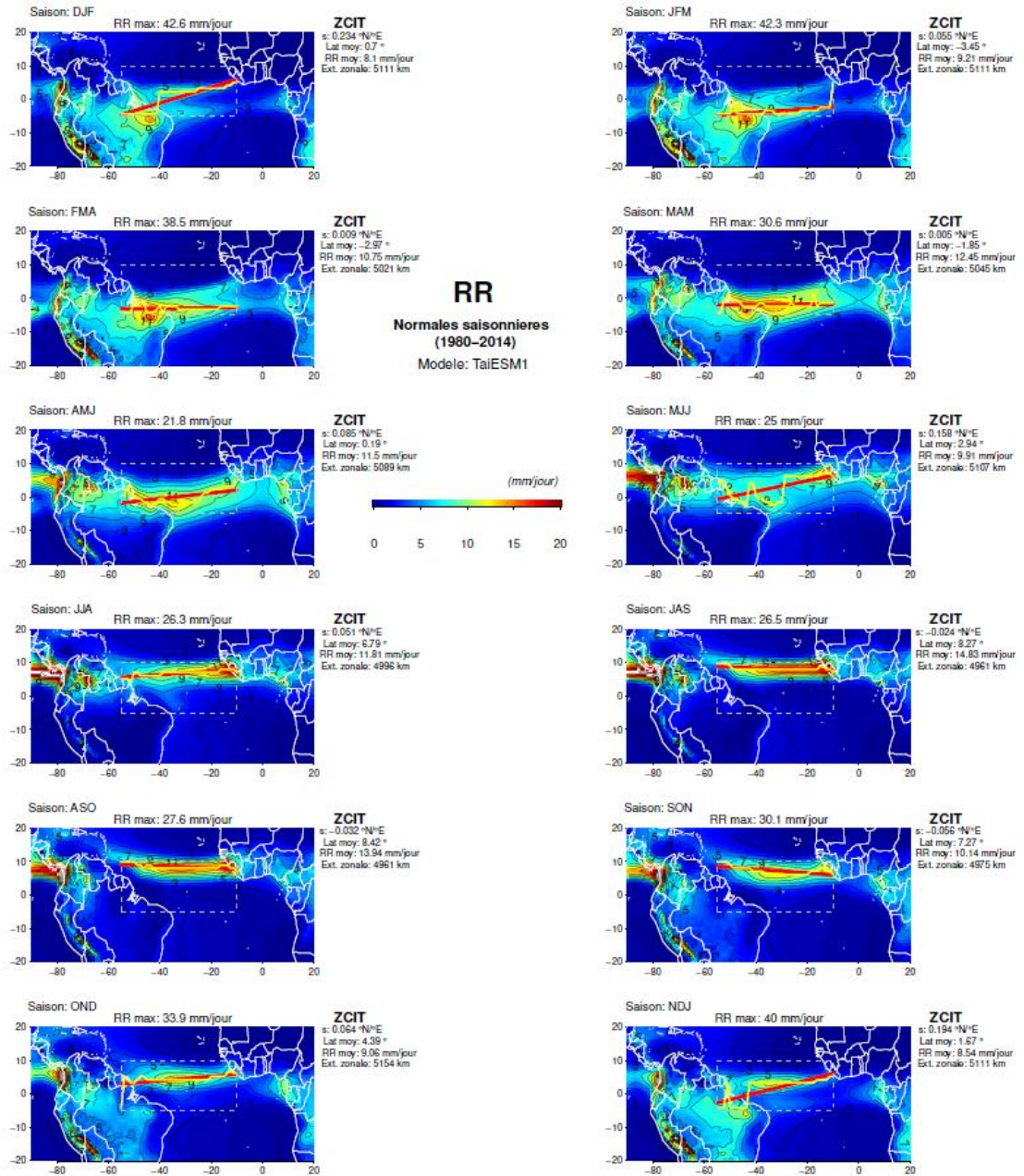


Figure A51. Idem Figure A1, excepté pour le modèle TaiESM1.



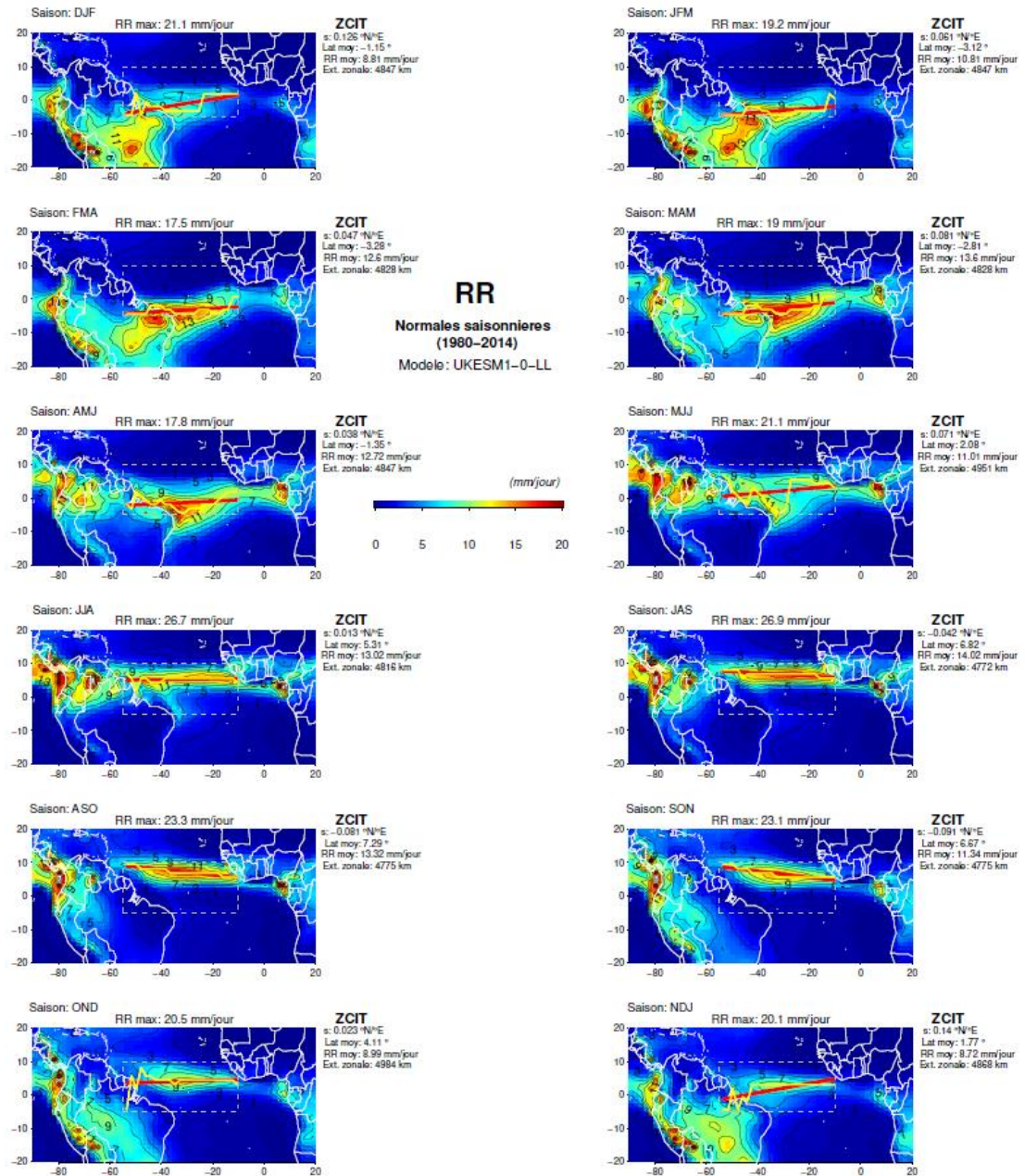


Figure A52. Idem Figure A1, excepté pour le modèle UKESM1-0-LL.

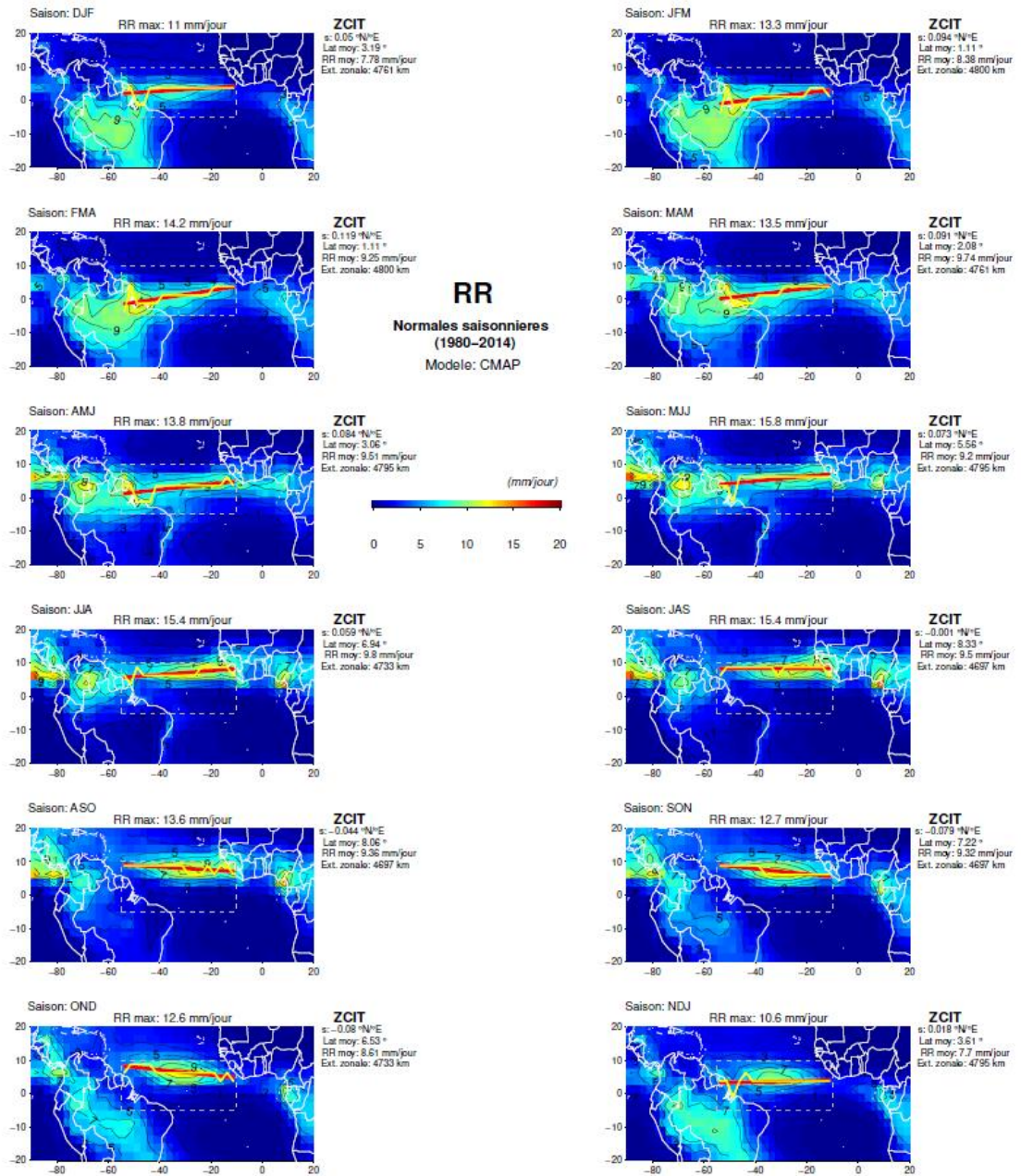


Figure A53. Idem Figure A1, excepté pour les données CMAP.

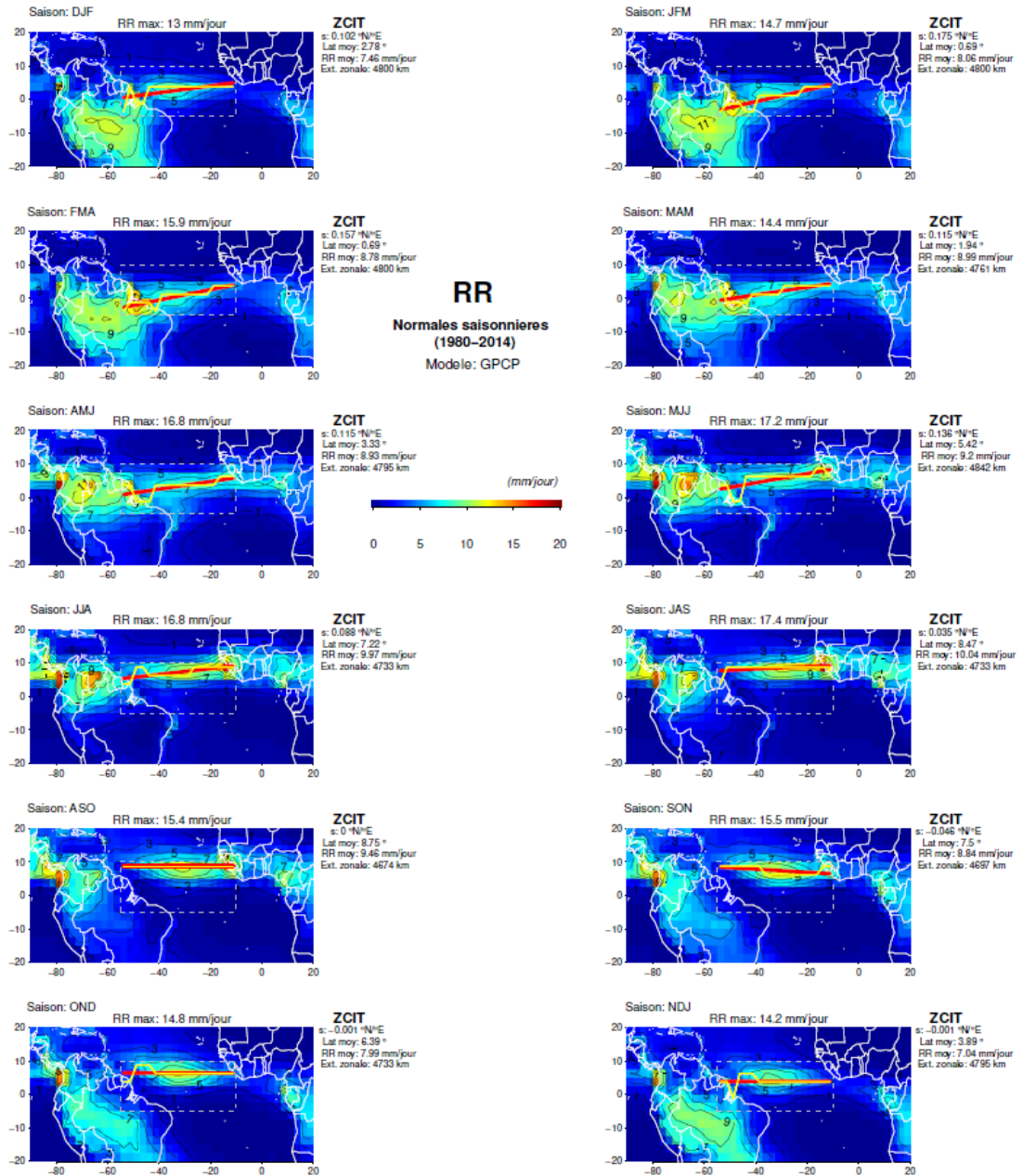


Figure A54. Idem Figure A1, excepté pour les données GPCP.



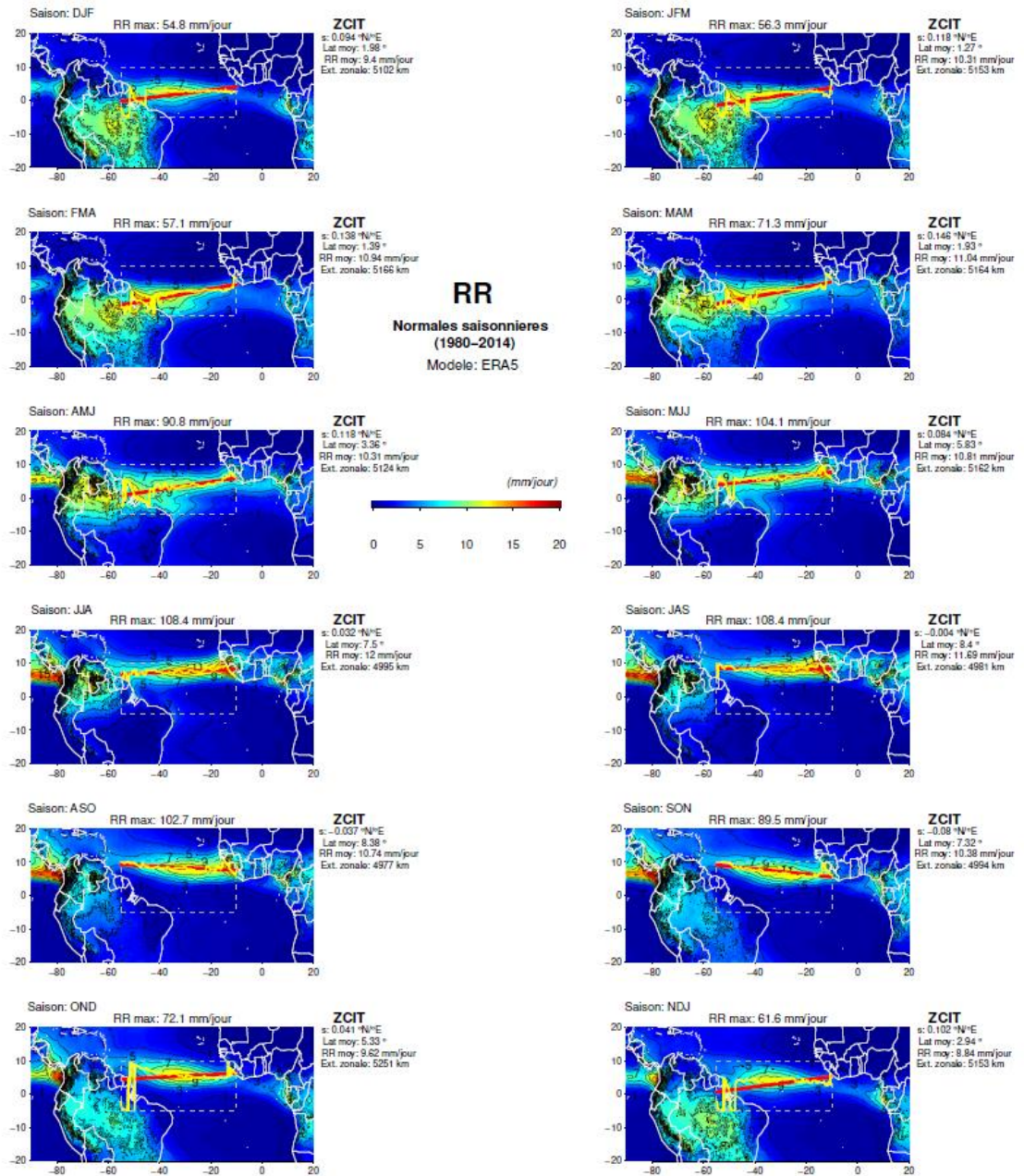
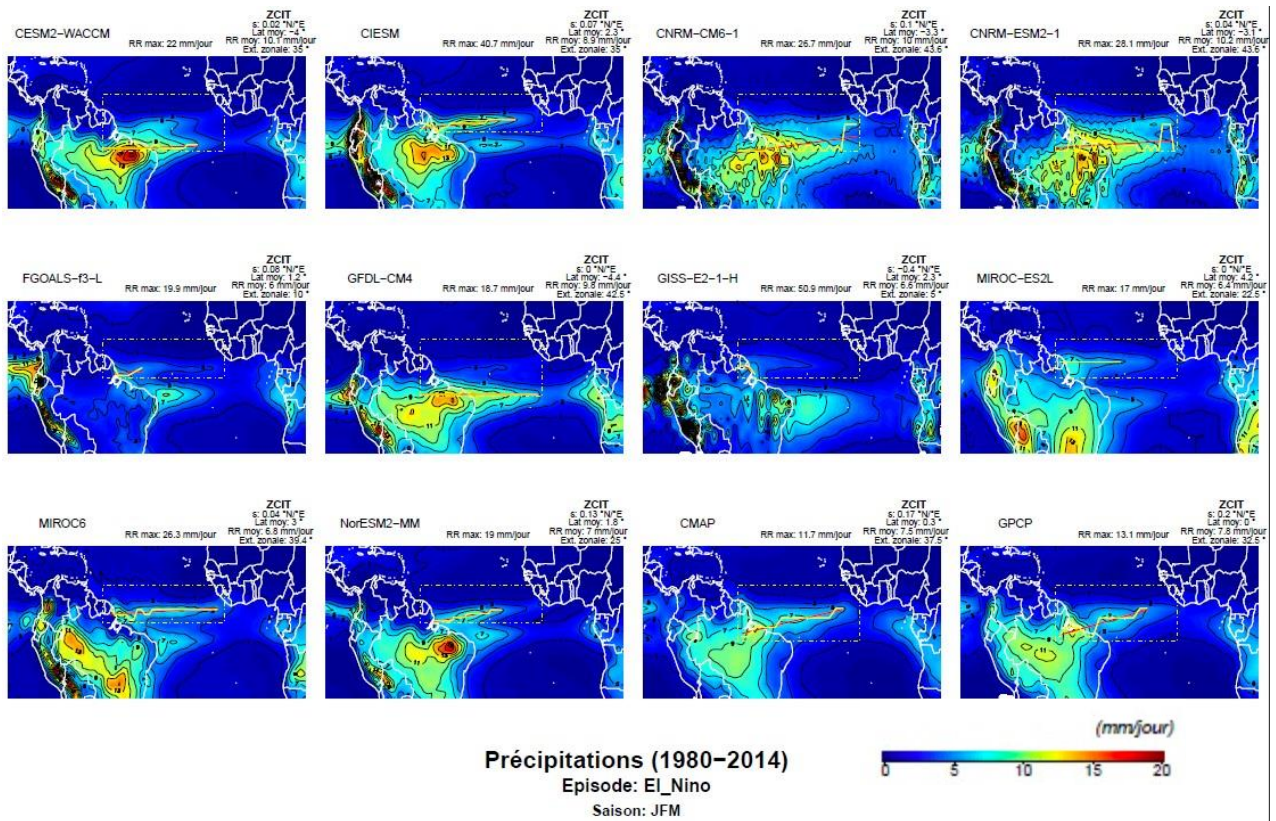
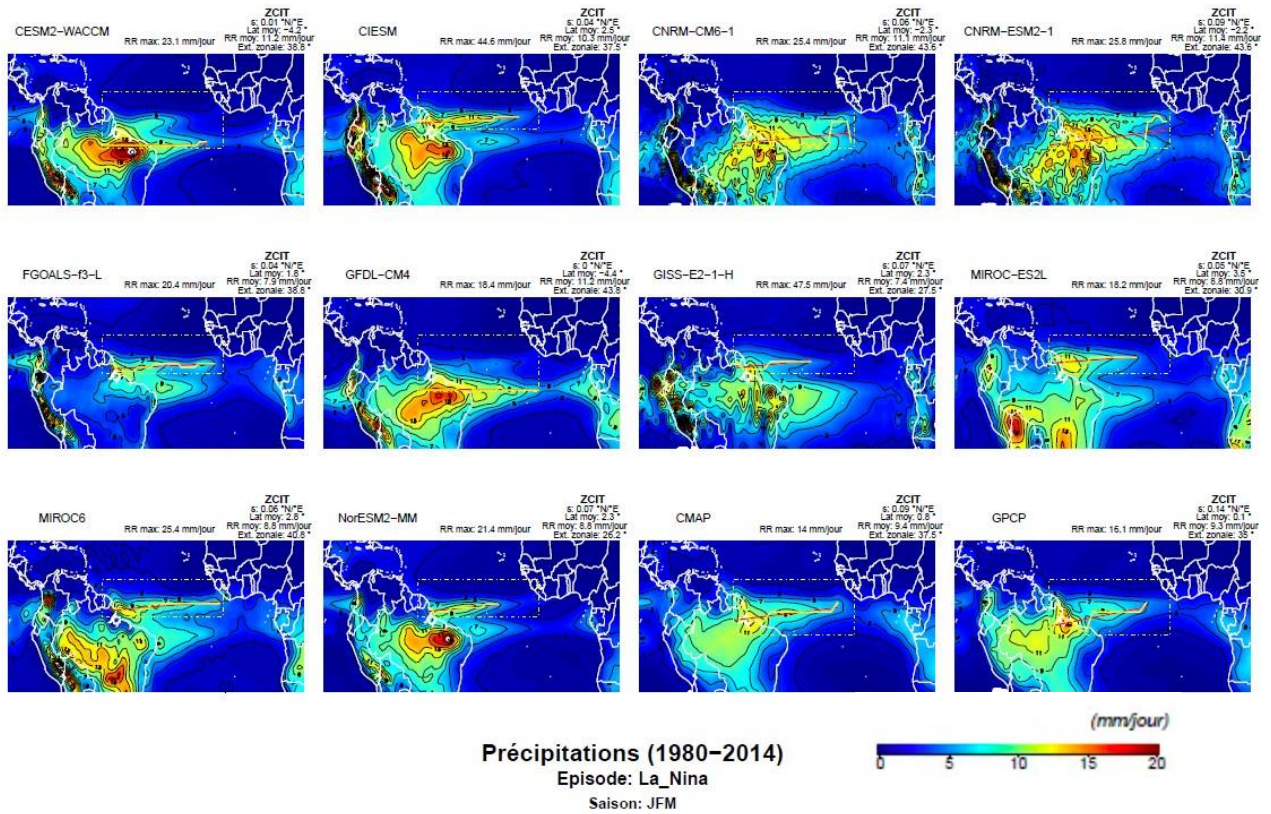


Figure A55. Idem Figure A1, excepté pour les données ERA5.



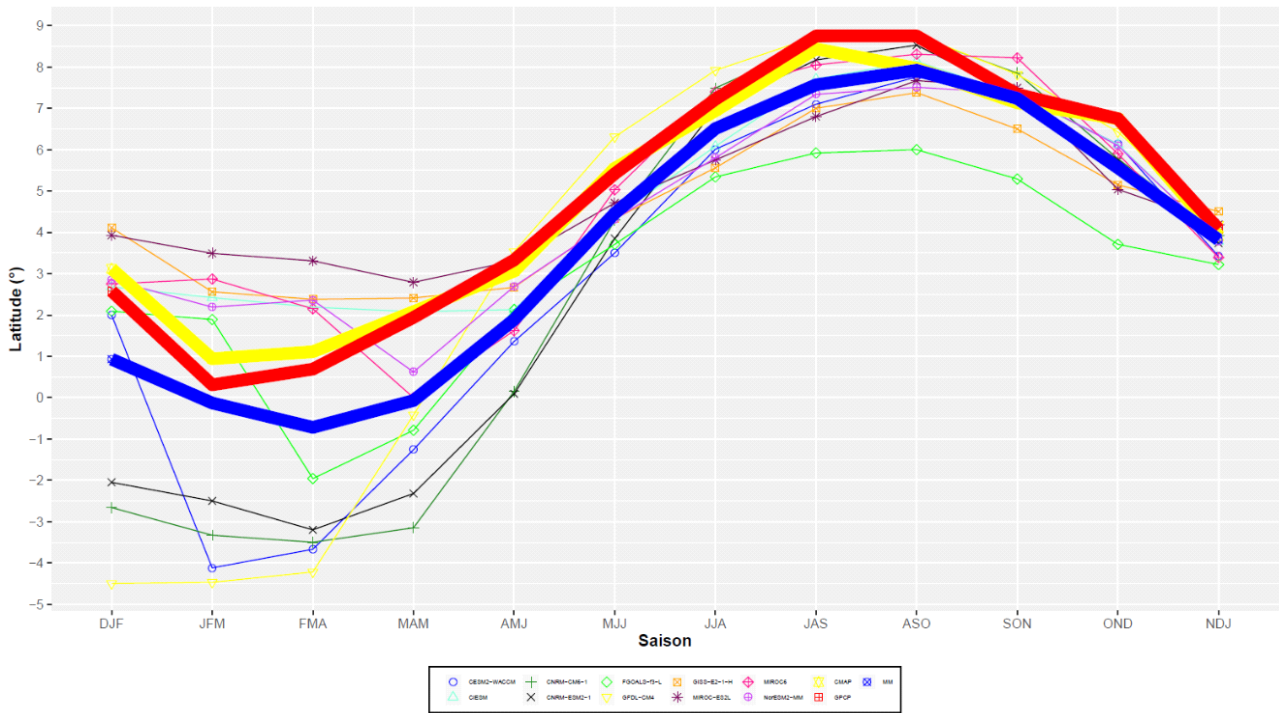
**Figure A56.** Idem Figure 46, excepté pour les moyennes composites en JFM pendant El Niño pour les 8 modèles CMIP6 retenus après la phase de sélection sur la base des simulations historiques, les 2 modèles du CNRM, CMAP et GPCP.





**Figure A57.** Idem Figure A56 mais pendant La Niña.





**Figure A58.** Idem Figure 56, excepté pour les 8 modèles CMIP6 retenus après la phase de sélection sur la base des simulations historiques, les 2 modèles du CNRM, CMAP et GPCP. La moyenne d'ensemble multi-modèle est ici calculée sur cet échantillon réduit de 10 modèles (bleu).

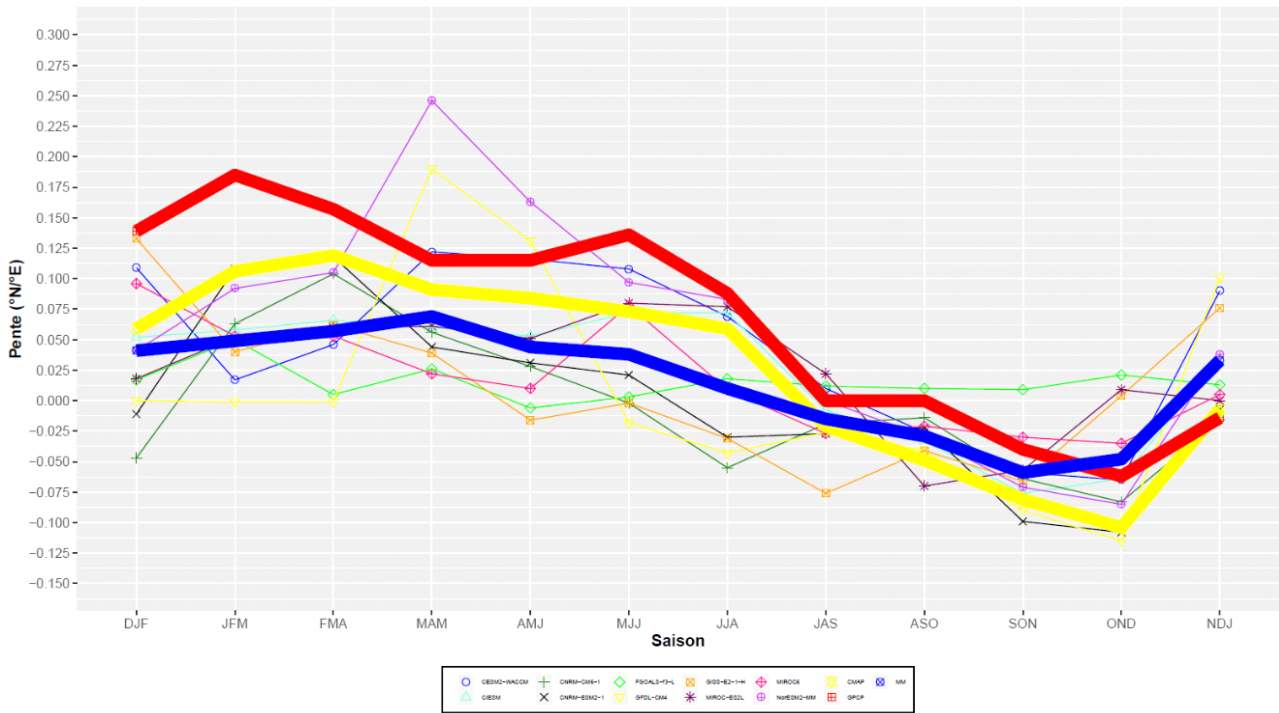
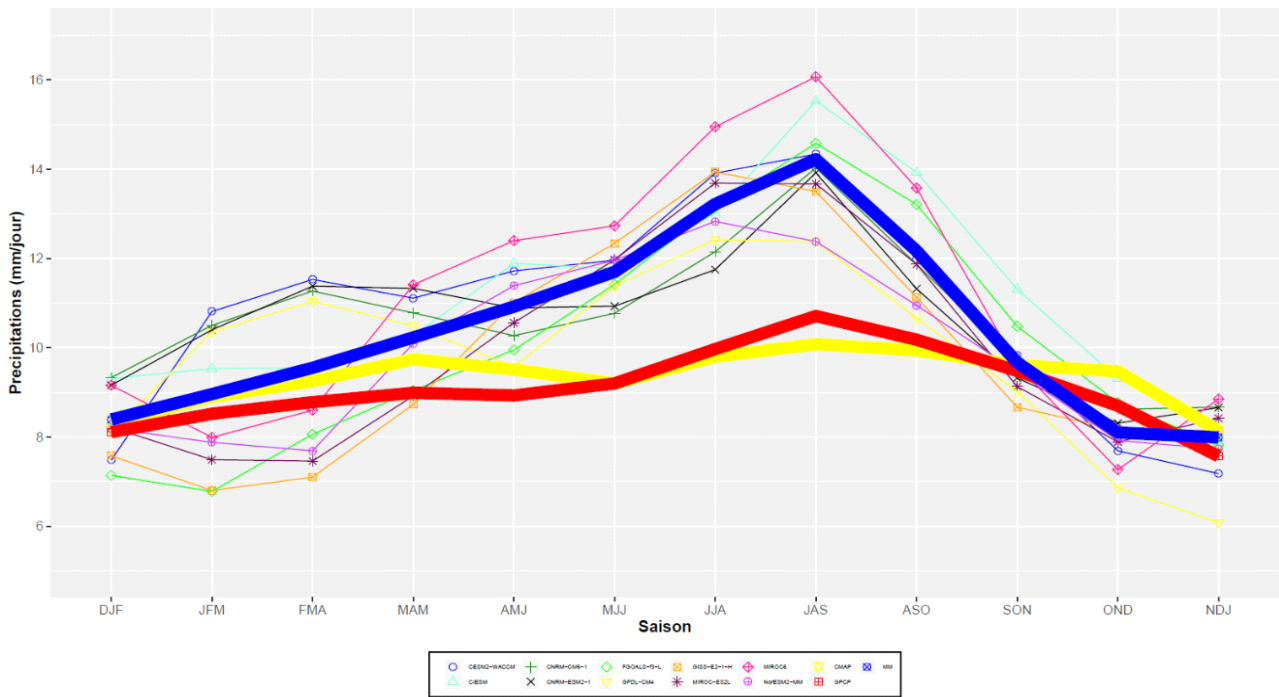
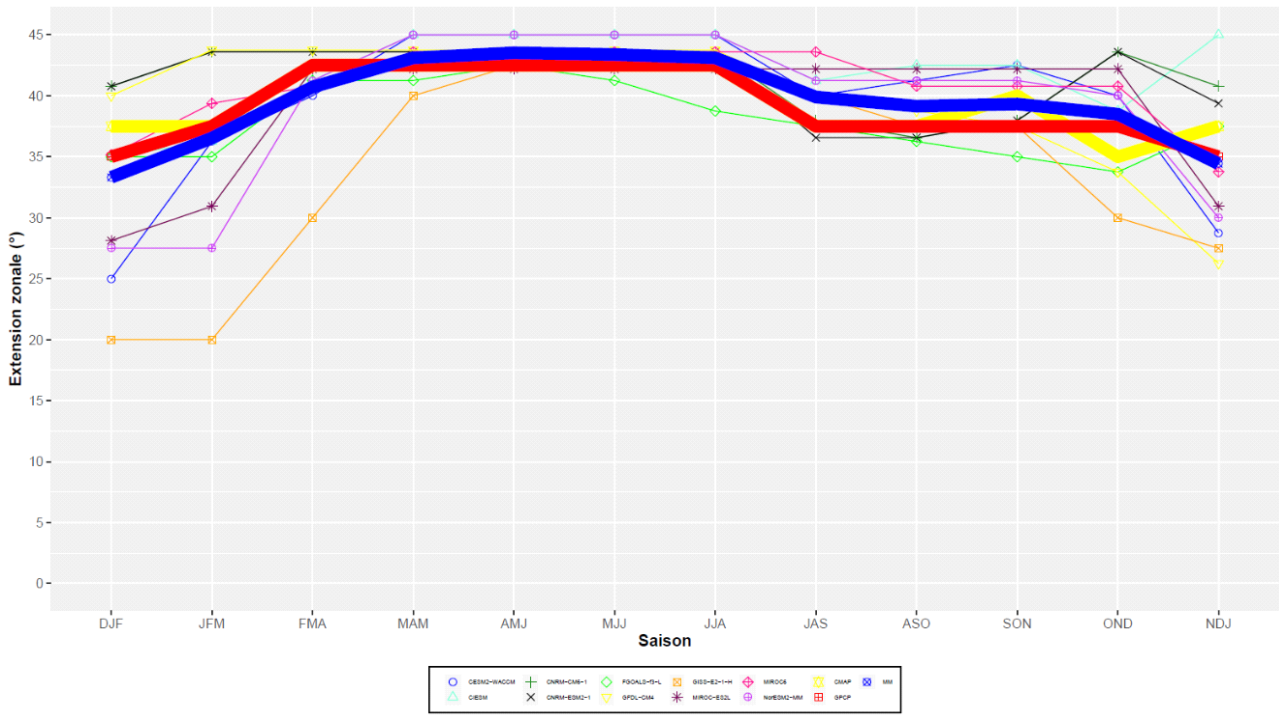


Figure A59. Idem Figure A58 mais pour la pente de la ZCIT.

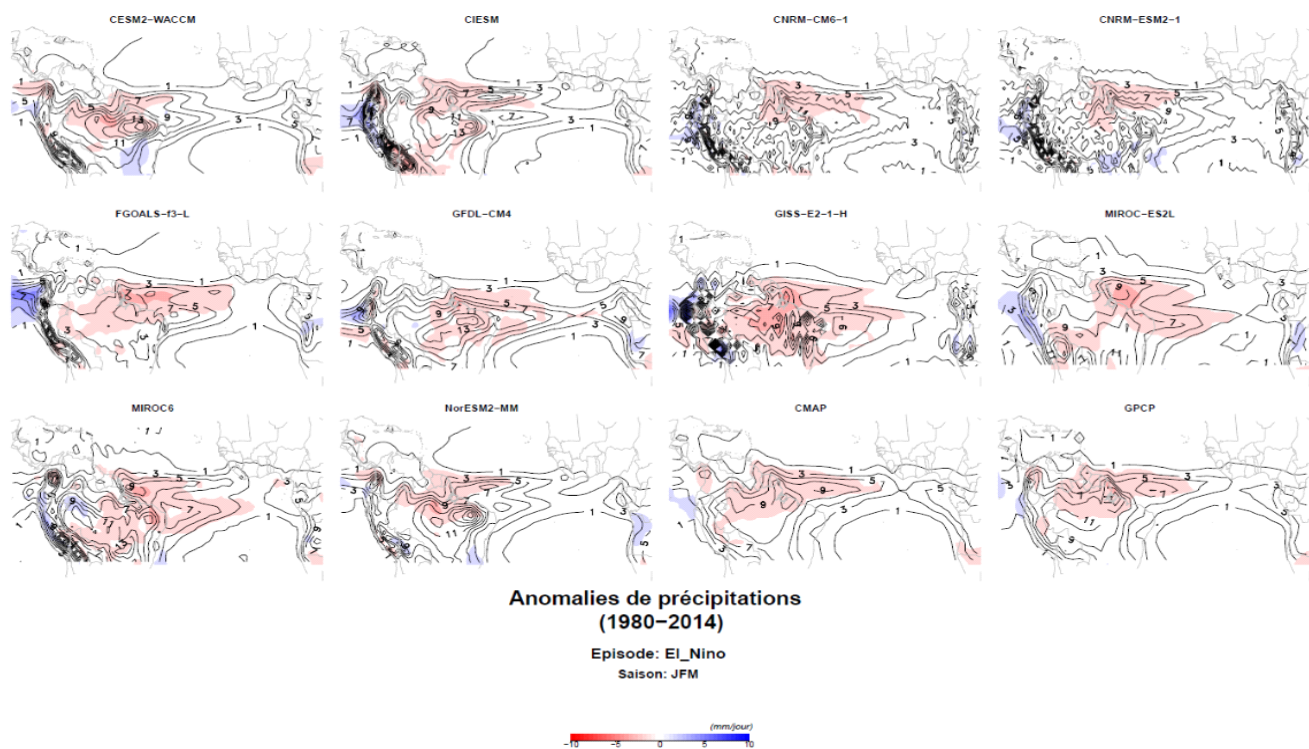


**Figure A60.** Idem Figure A58 mais pour le taux journalier moyen des précipitations dans la ZCIT. La courbe verte en traits gras représente ERA5.

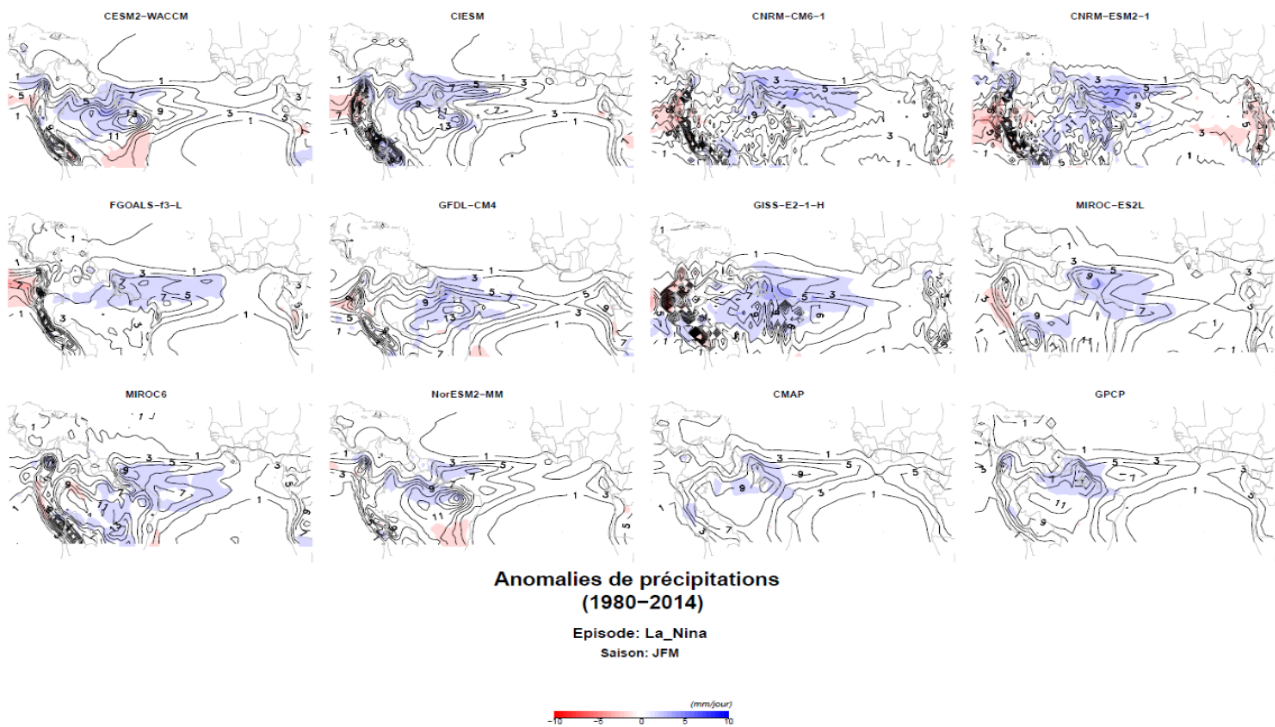




**Figure A61.** Idem Figure A58 mais pour l'extension zonale de la ZCIT.



**Figure A62.** Idem Figure 62, excepté pour les 8 modèles CMIP6 retenus après la phase de sélection sur la base des simulations historiques, les 2 modèles du CNRM, CMAP et GPCP.



**Figure A63.** Idem Figure A62 mais pour les événements La Niña.



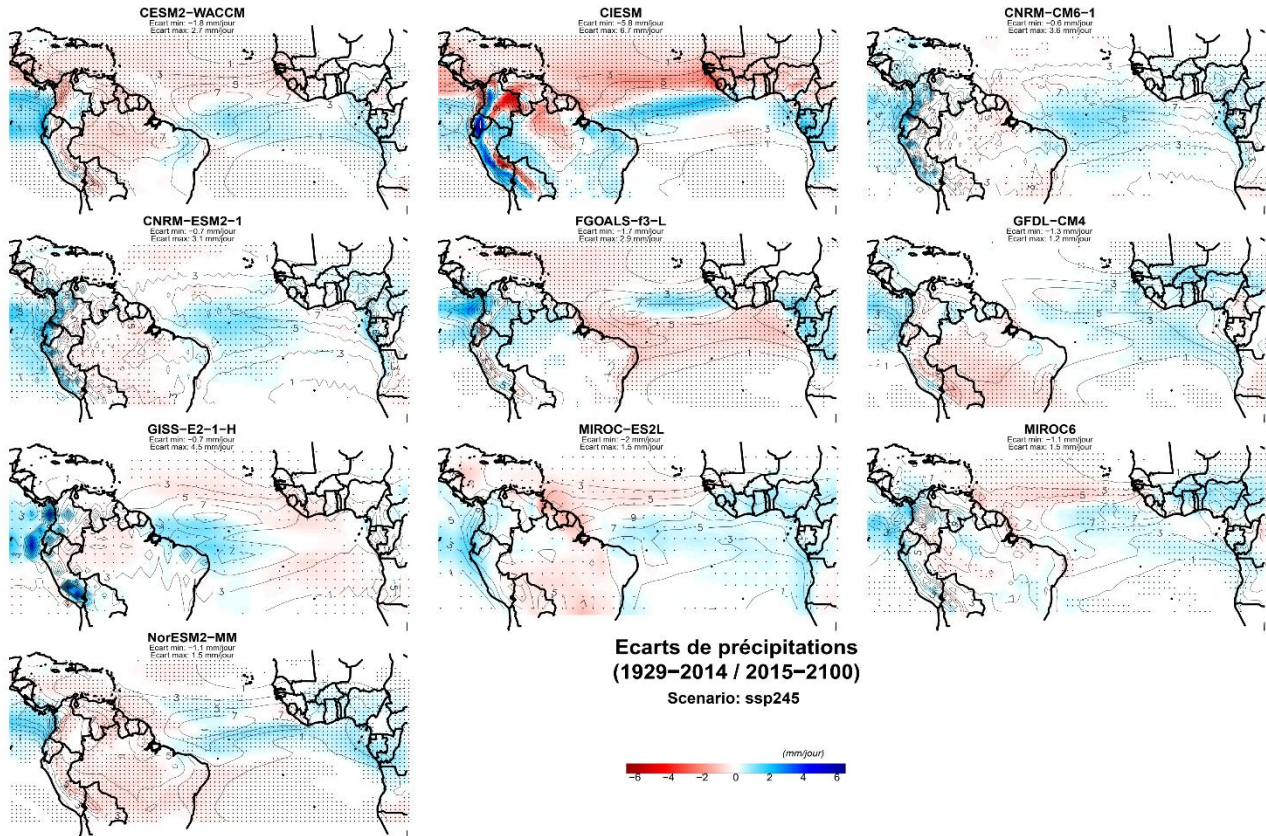


Figure A64. Idem Figure 64 mais avec le scenario SSP2-4.5.

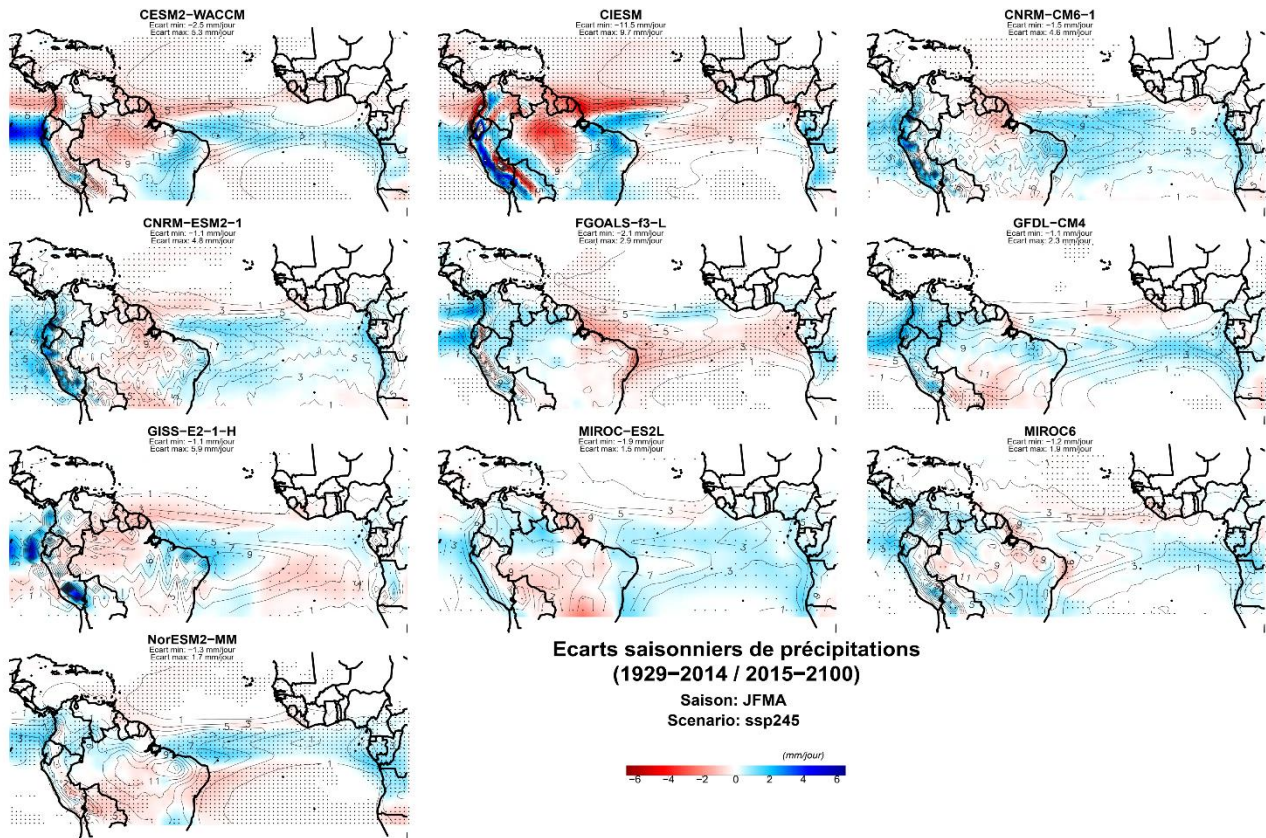


Figure A65. Idem Figure 65 mais avec le scenario SSP2-4.5.



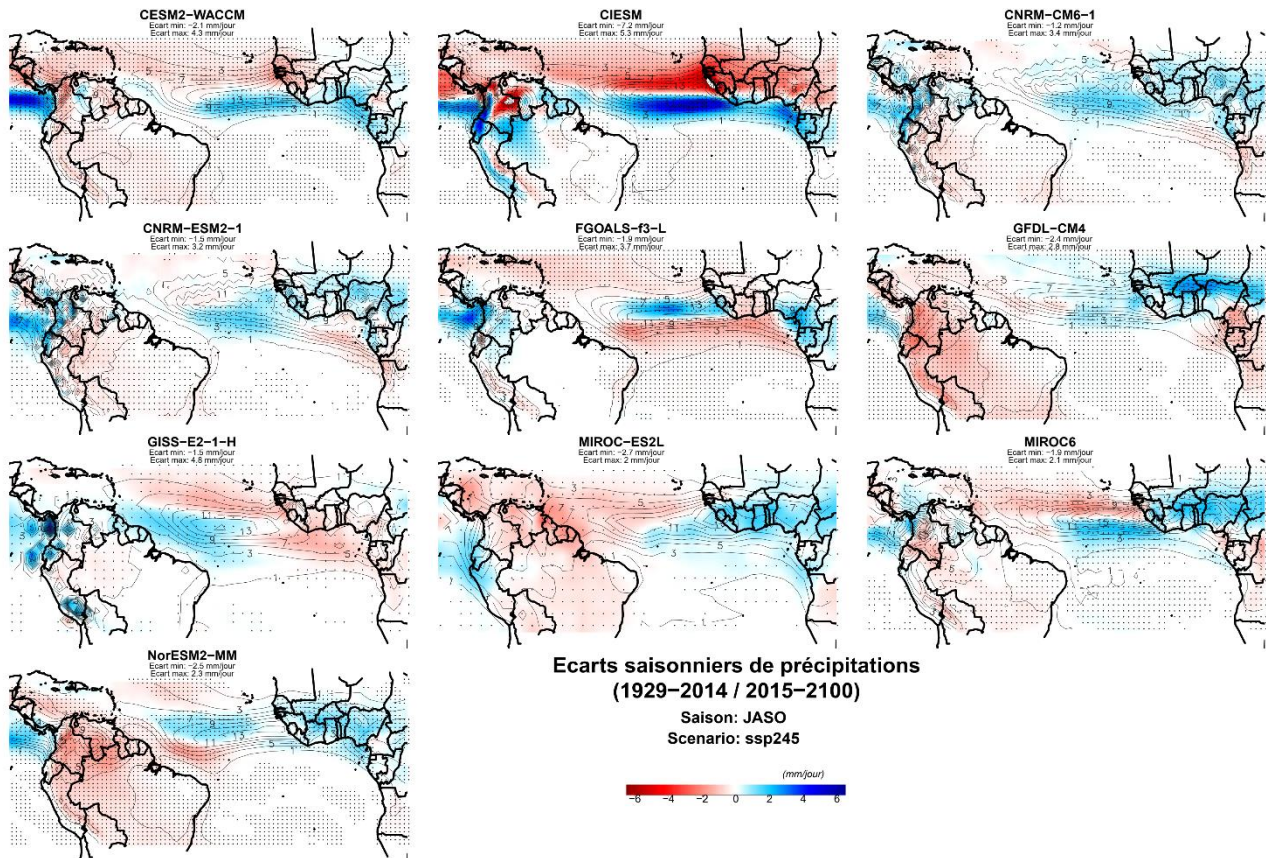


Figure A66. Idem Figure 66 mais avec le scenario SSP2-4.5.



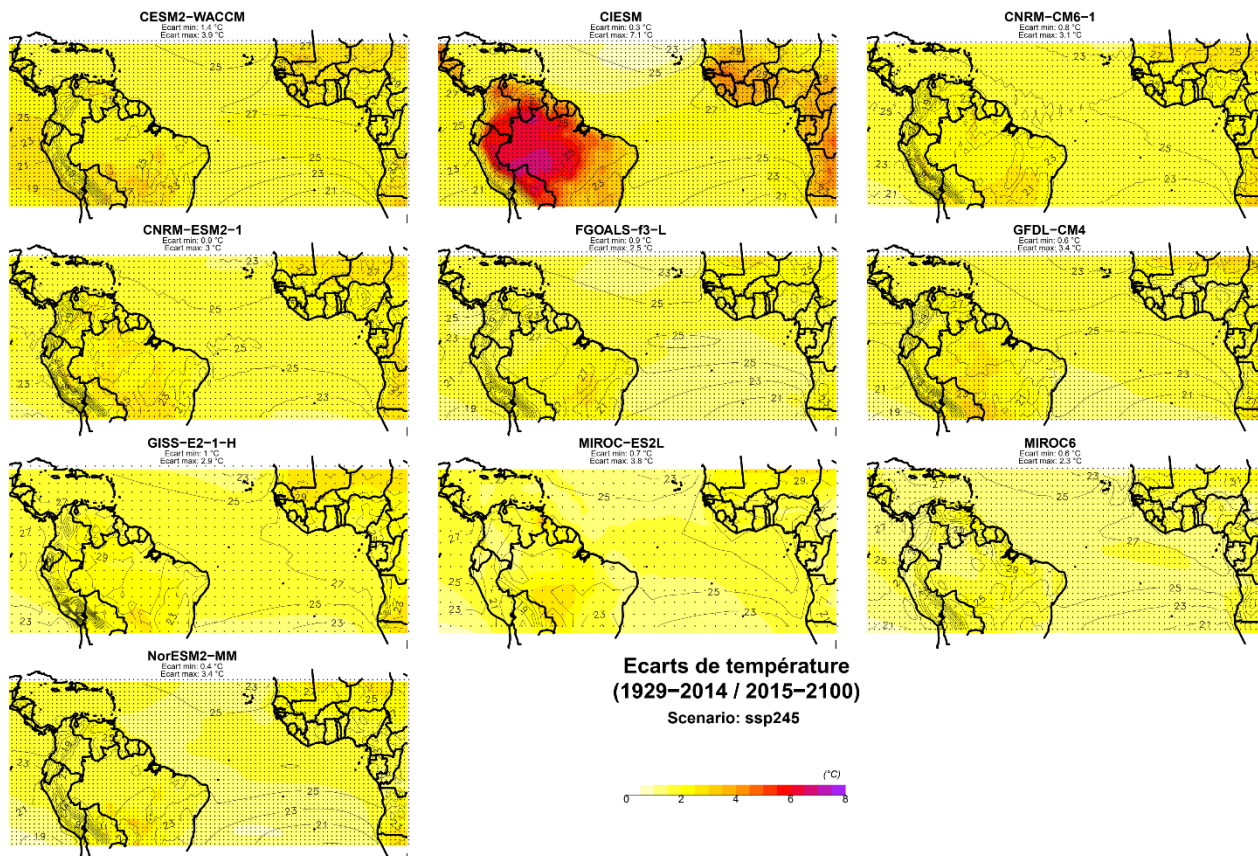


Figure A67. Idem Figure 67 mais avec le scenario SSP2-4.5.

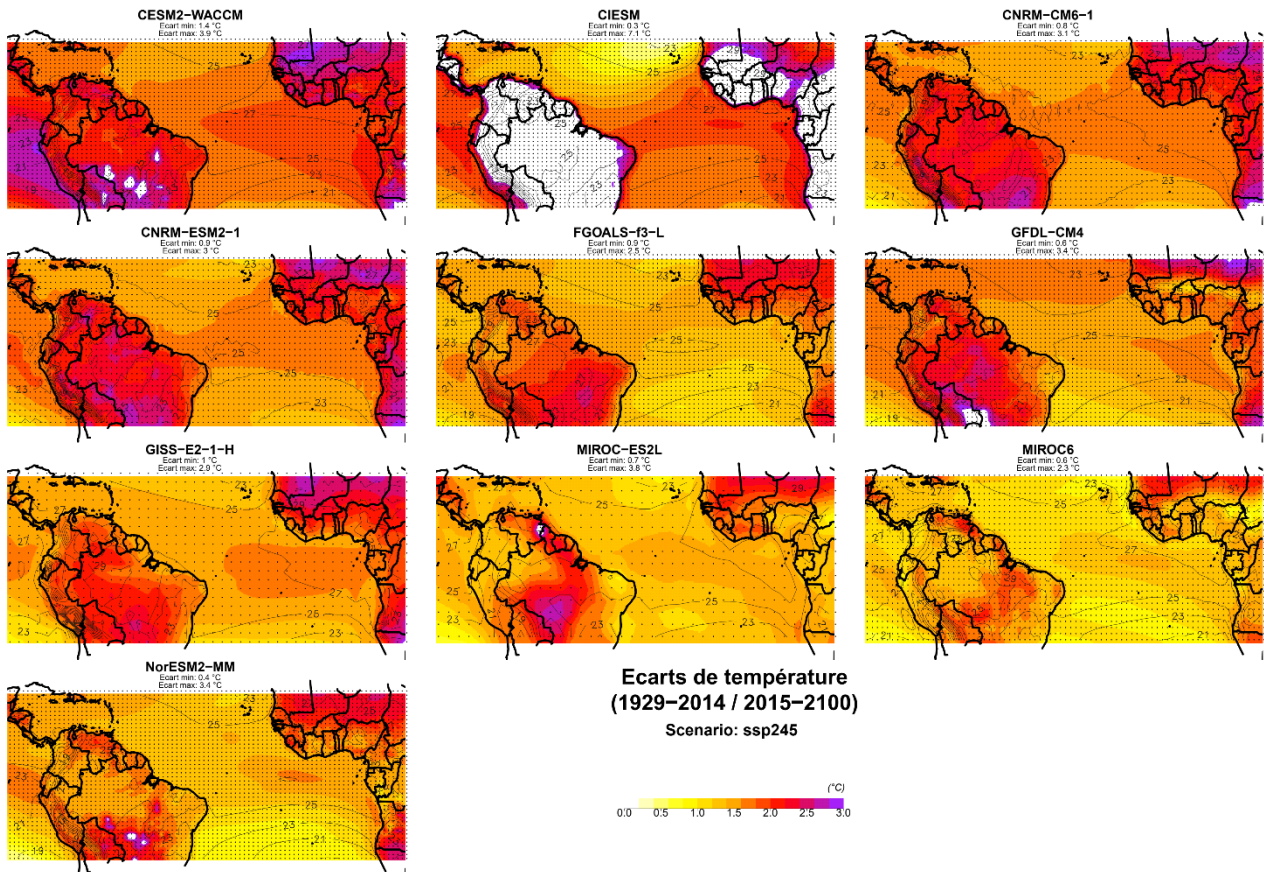


Figure A68. Idem Figure 68 mais avec le scénario SSP2-4.5.

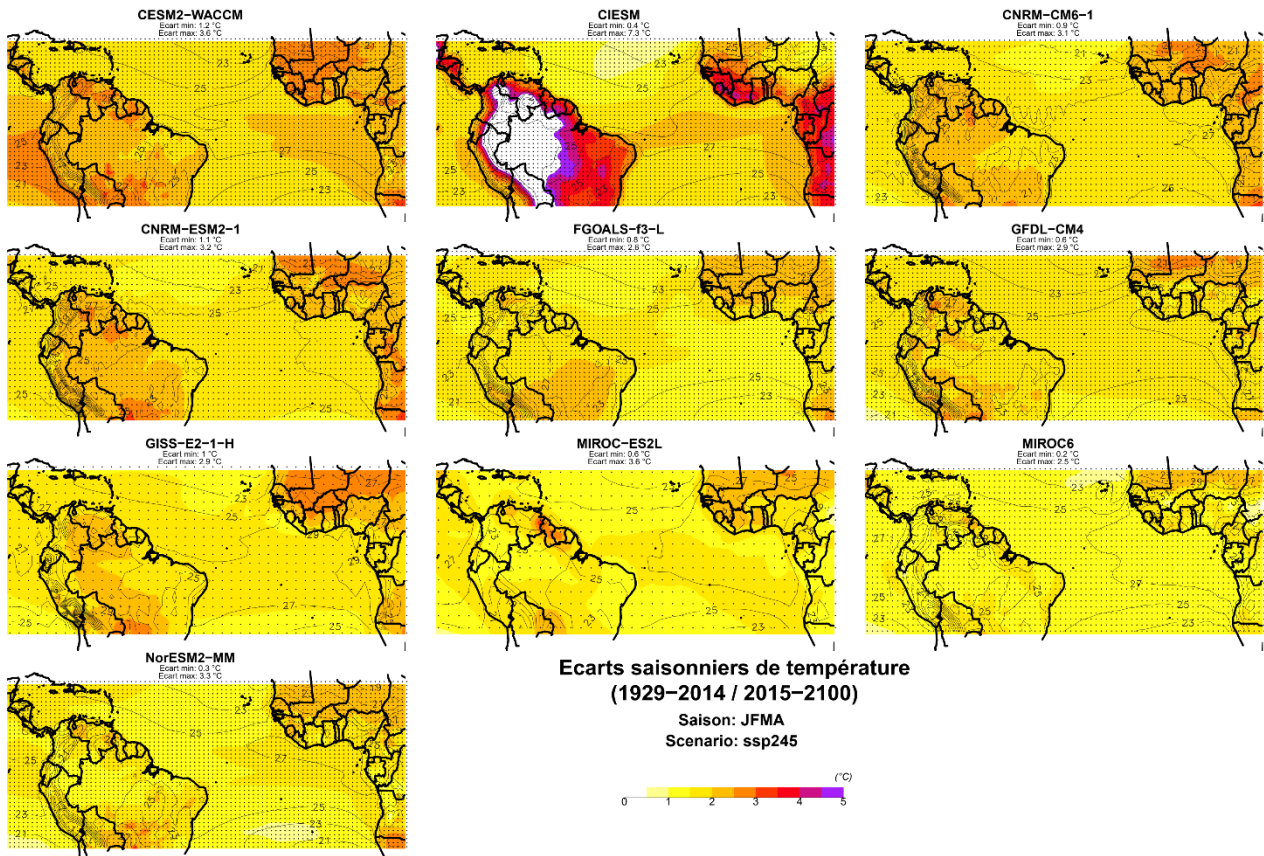
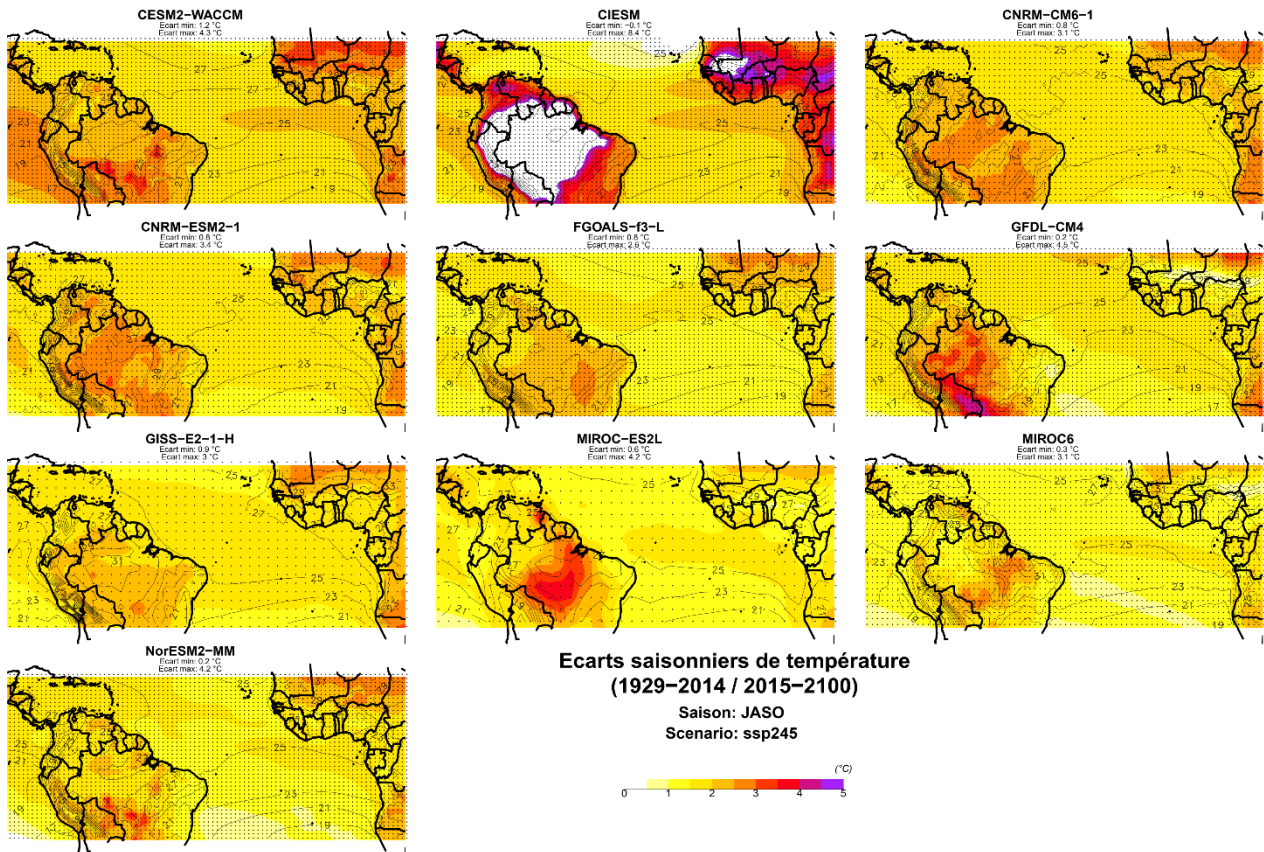


Figure A69. Idem Figure 69 mais avec le scénario SSP2-4.5.





**Figure A70.** Idem Figure 70 mais avec le scénario SSP2-4.5.

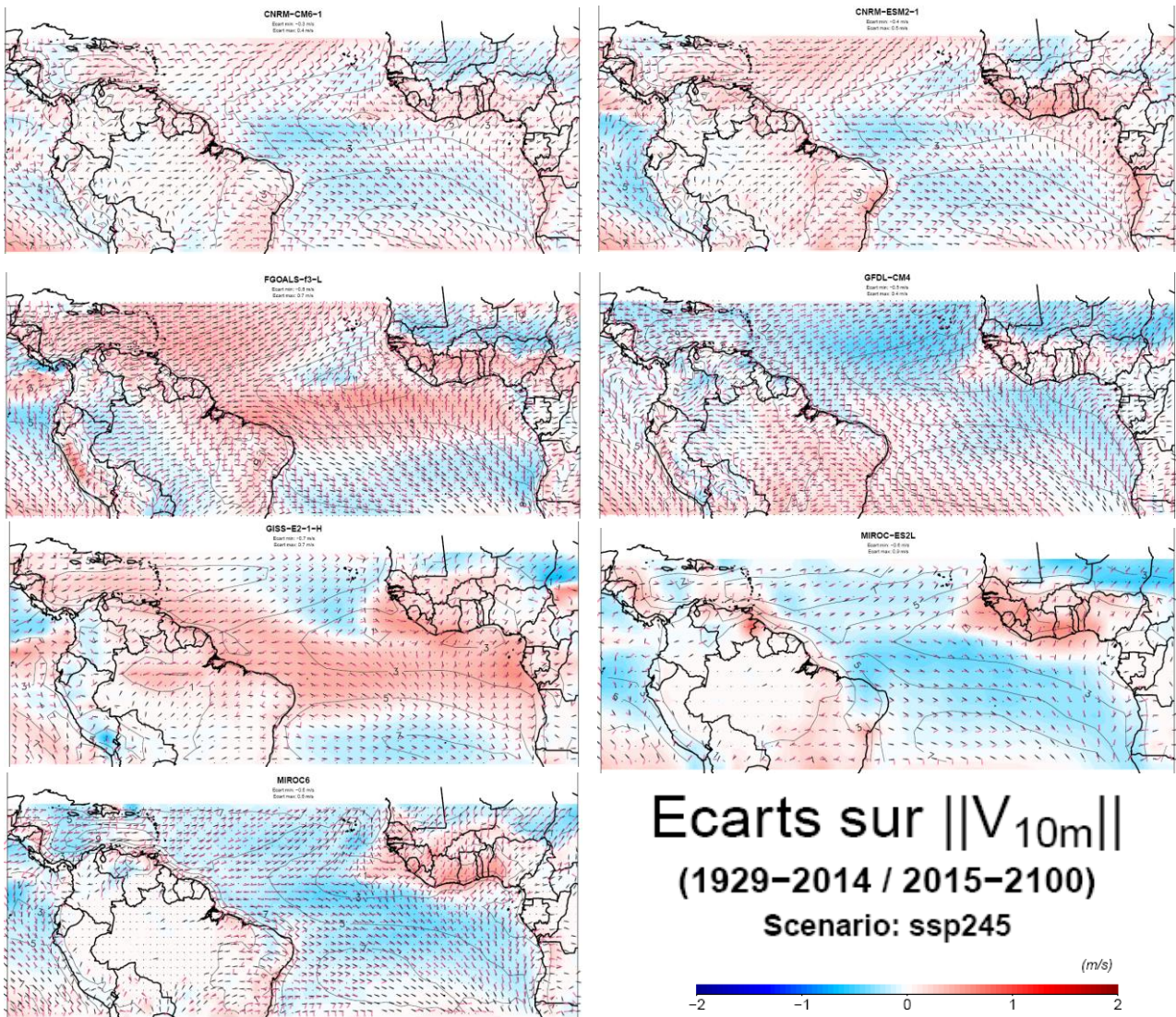


Figure A71. Idem Figure 71 mais avec le scenario SSP2-4.5.



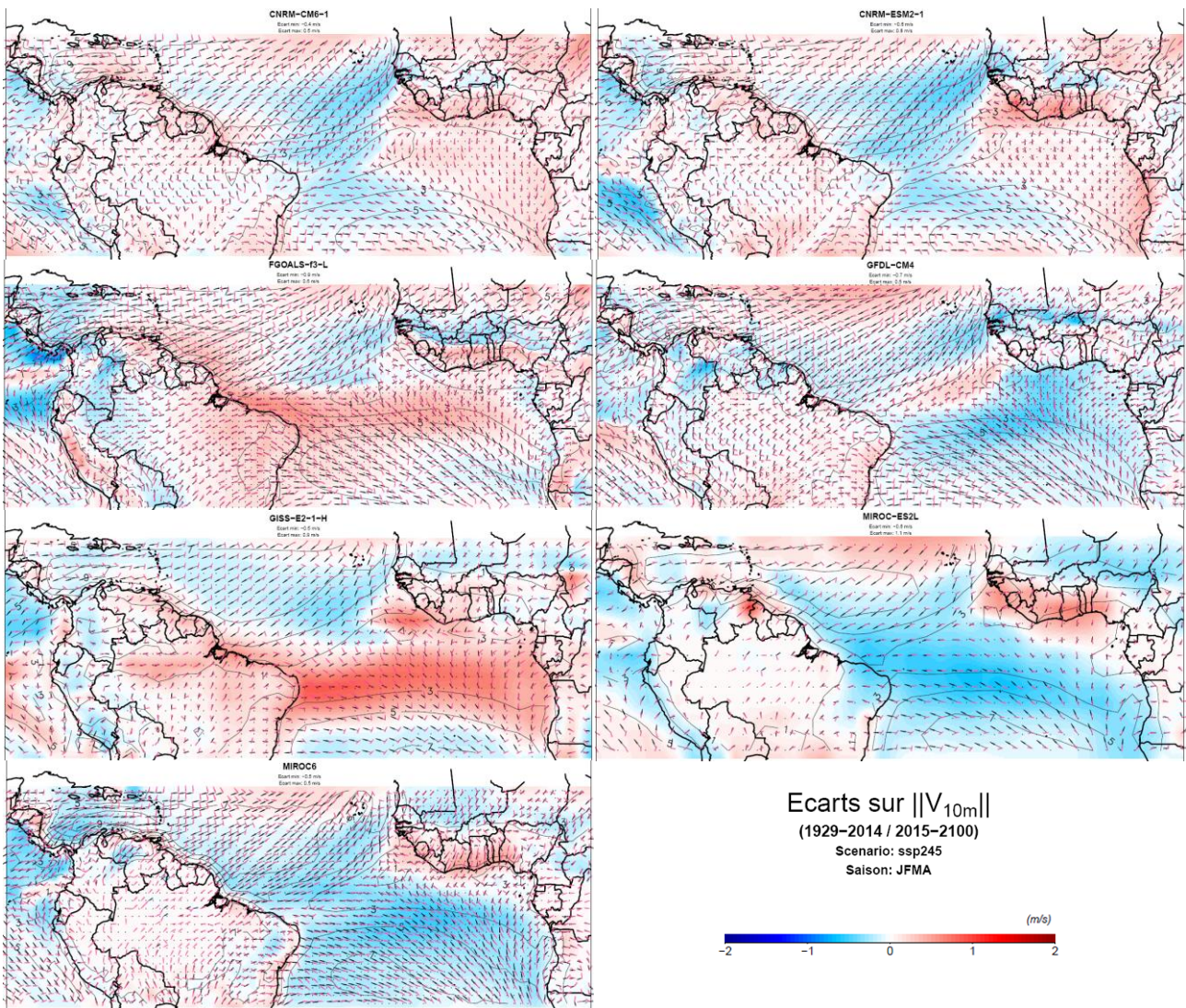
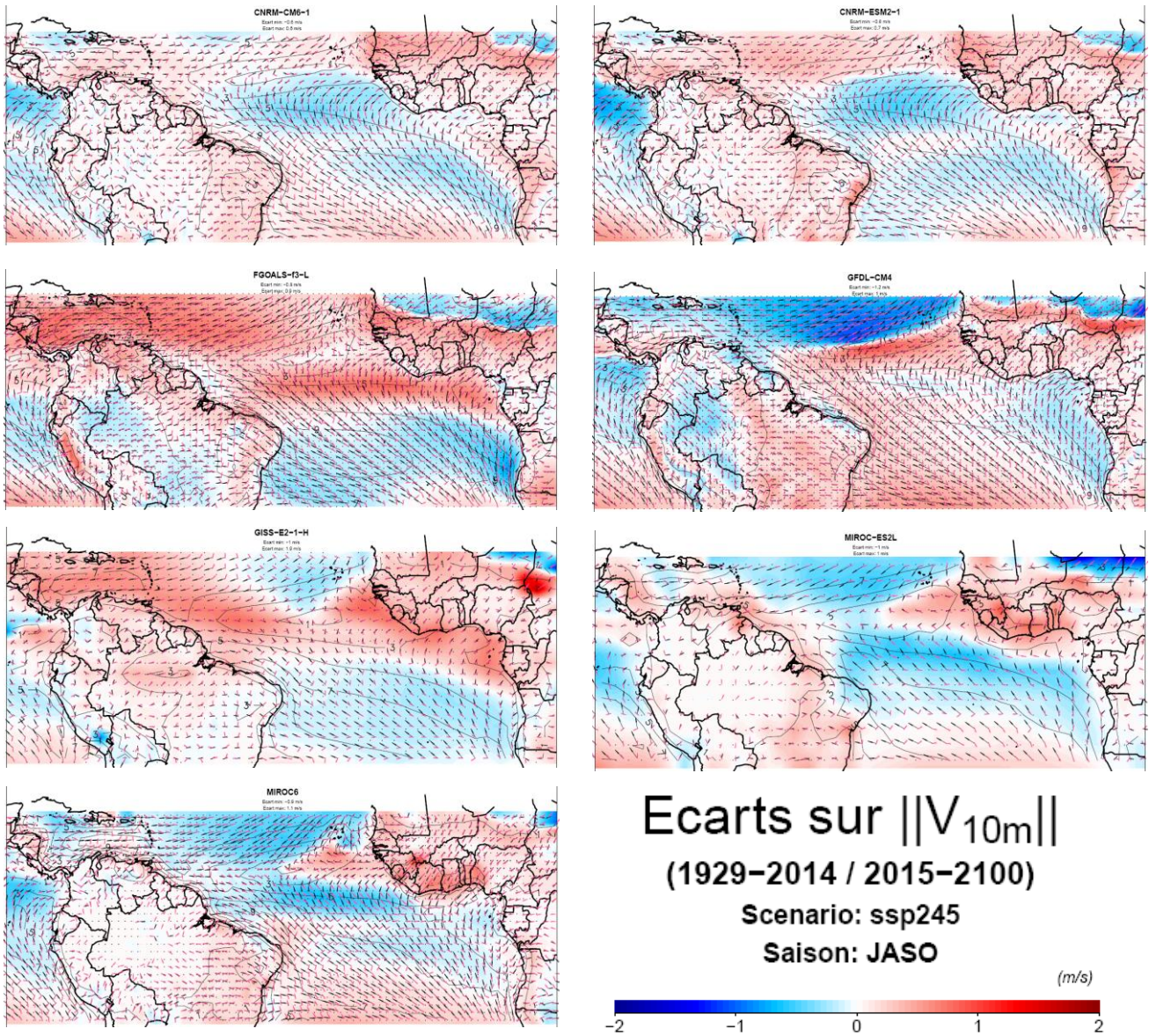
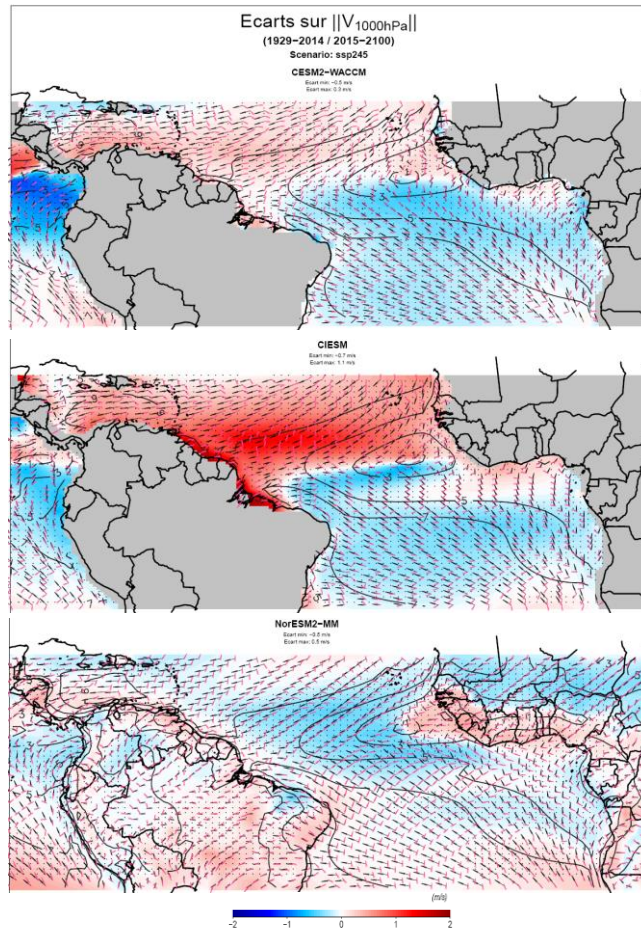


Figure A72. Idem Figure 72 mais avec le scénario SSP2-4.5.



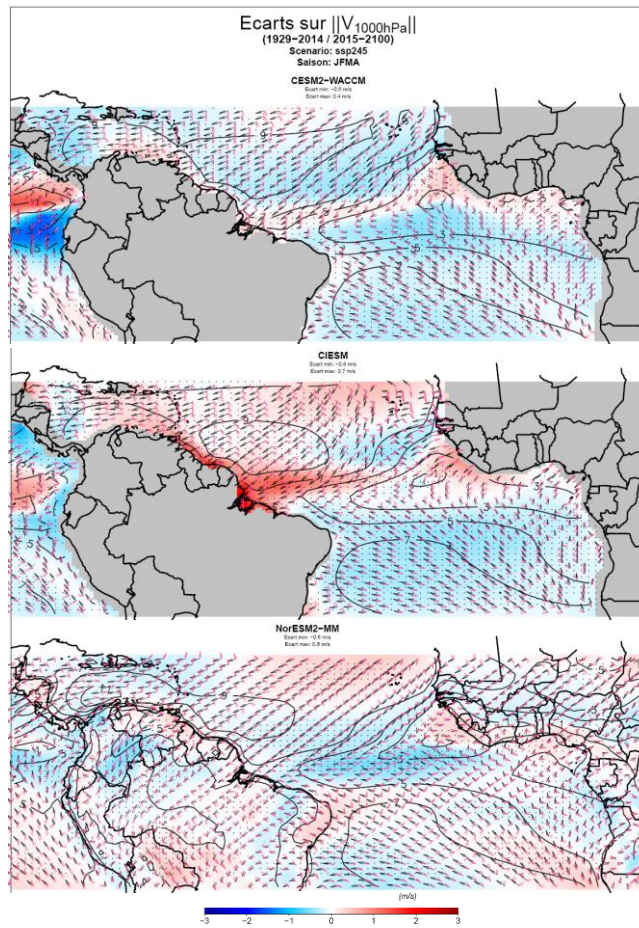


**Figure A73.** Idem Figure 73 mais avec le scenario SSP2-4.5.



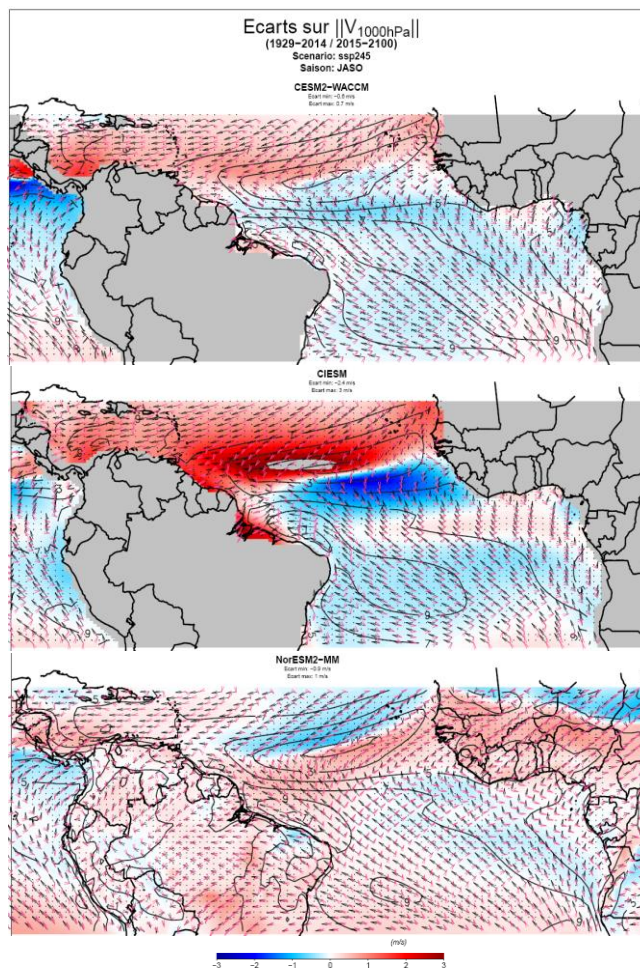
**Figure A74.** Idem Figure 74 mais avec le scenario SSP2-4.5.



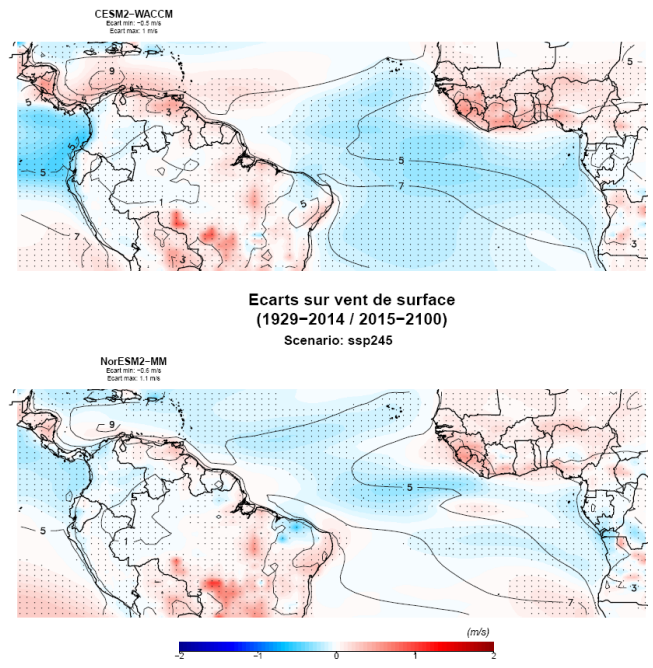


**Figure A75.** Idem Figure 75 mais avec le scenario SSP2-4.5.

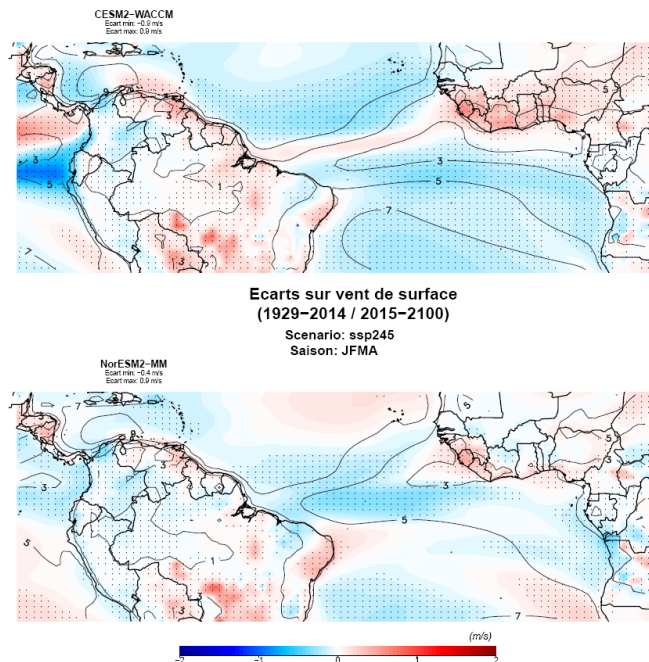




**Figure A76.** Idem Figure 76 mais avec le scenario SSP2-4.5.

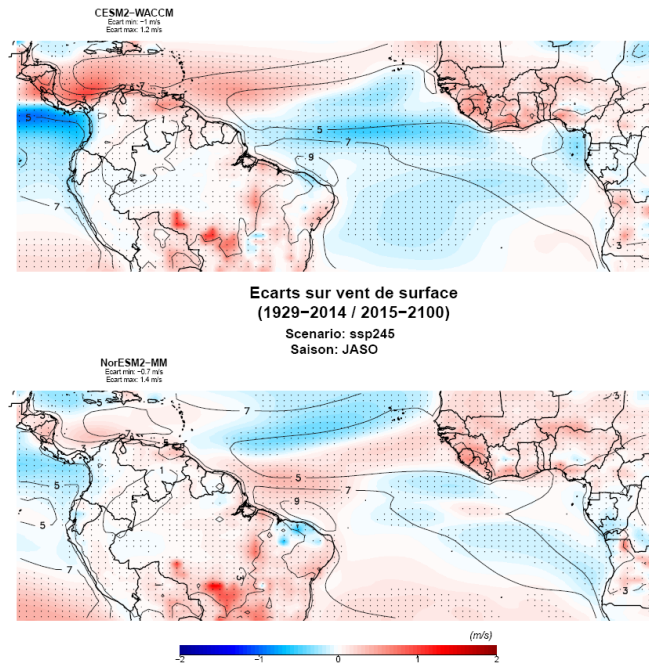


**Figure A77.** Idem Figure 77 mais avec le scenario SSP2-4.5.



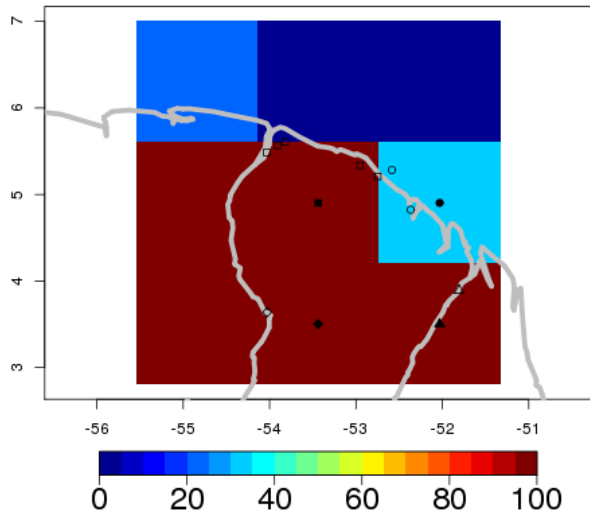
**Figure A78.** Idem Figure 78 mais avec le scenario SSP2-4.5.



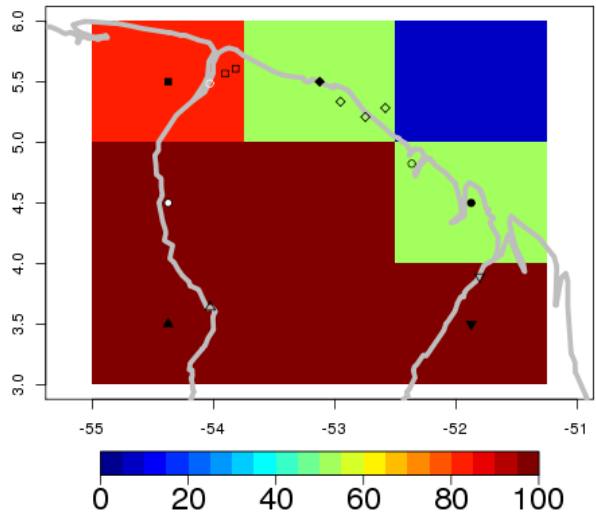


**Figure A79.** Idem Figure 79 mais avec le scenario SSP2-4.5.

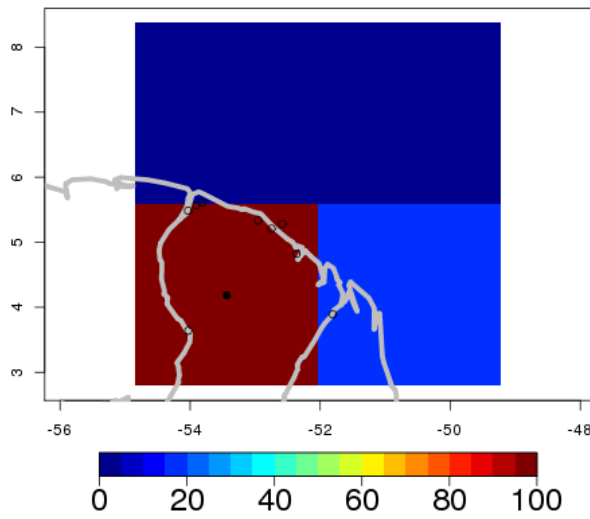
CNRM-CM6-1 land fraction, temperature station/model points



GFDL-CM4 land fraction, temperature station/model points



MIROC-ES2L land fraction, temperature station/model points



NorESM2-MM temperature station/model points

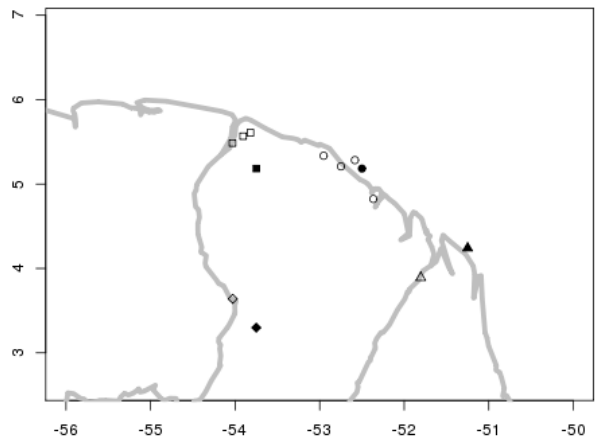
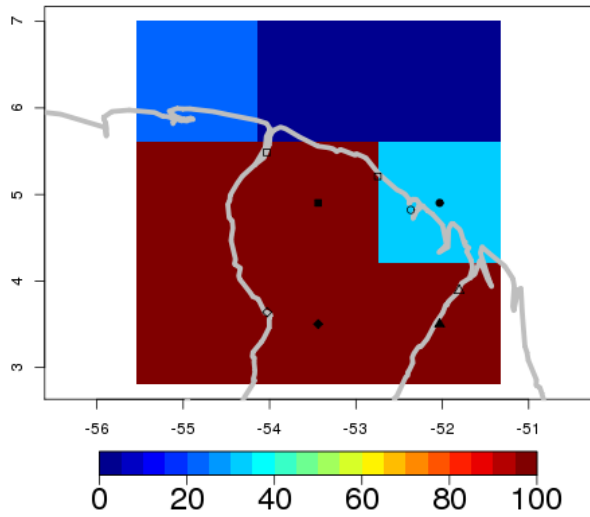
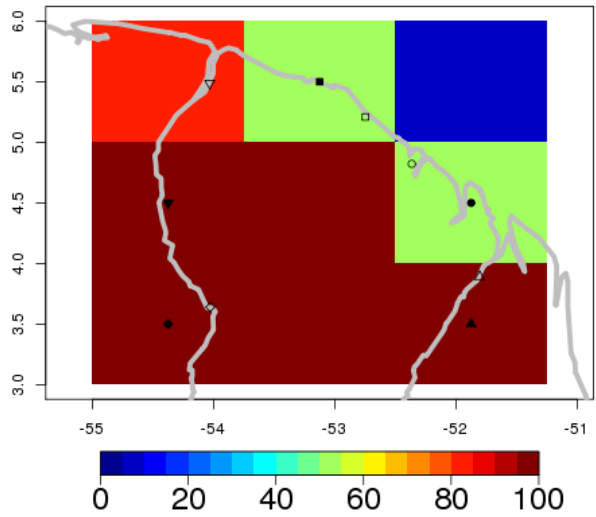


Figure A80. Idem Figure 80 mais pour les températures.

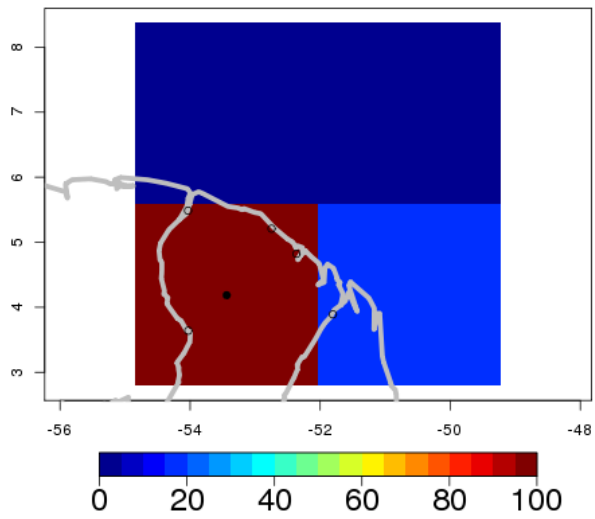
CNRM-CM6-1 land fraction, surface wind station/model points



GFDL-CM4 land fraction, surface wind station/model points

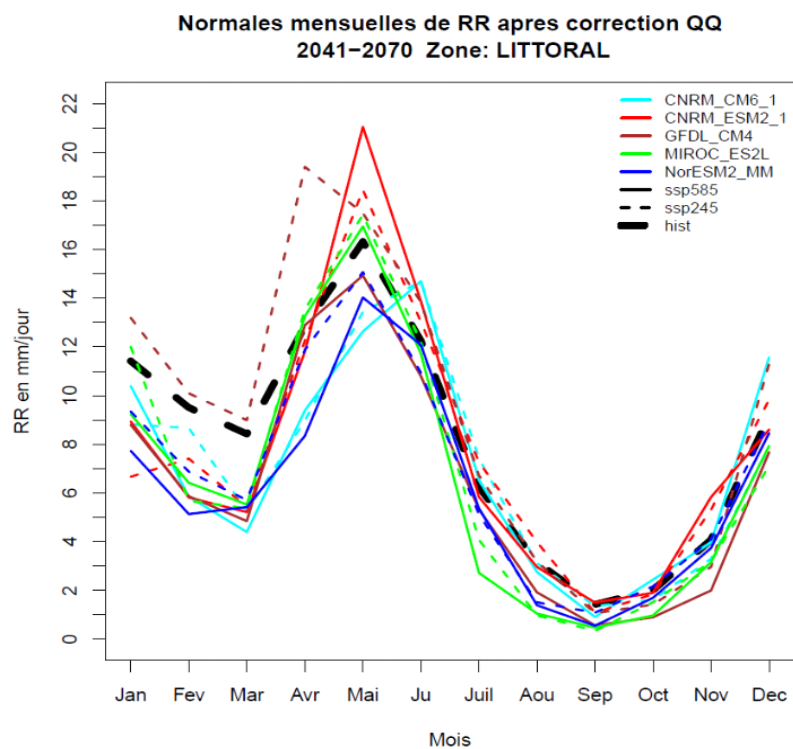


MIROC-ES2L land fraction, surface wind station/model points

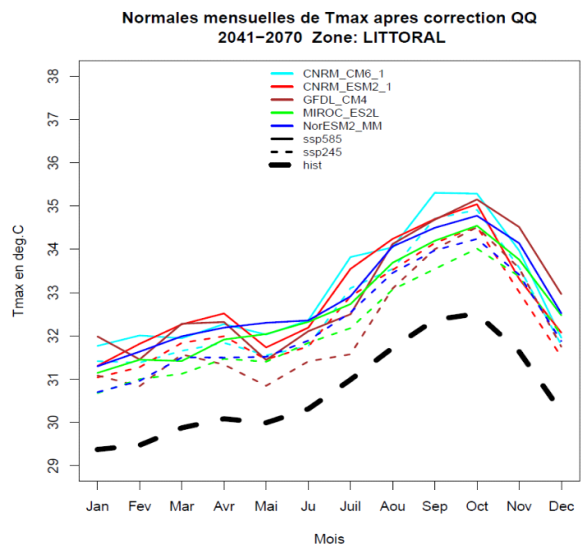
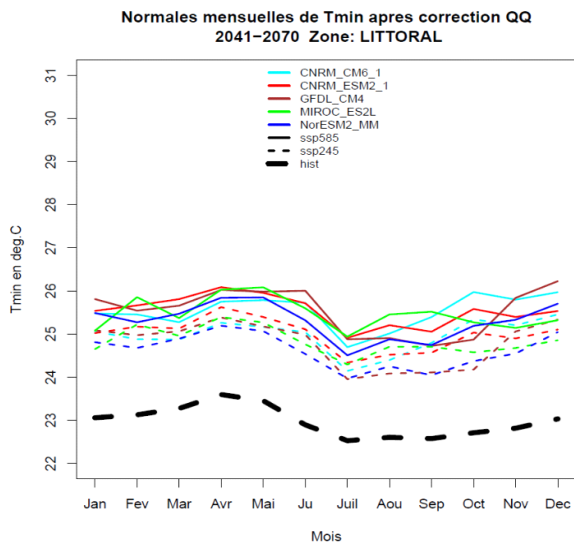


**Figure A81.** Idem Figure 80 mais pour le vent de surface. Les données quotidiennes de NorESM2-MM n'étant pas disponibles pour cette variable (Tableau 7), ce modèle n'est pas représenté ici.





**Figure A82.** Idem Figure 81 mais pour la période 2041-2070.



**Figure A83.** Idem Figure 82 mais pour la période 2041-2070.

Normales mensuelles de la force du vent a 10 m apres correction QQ  
2041-2070 Zone: LITTORAL

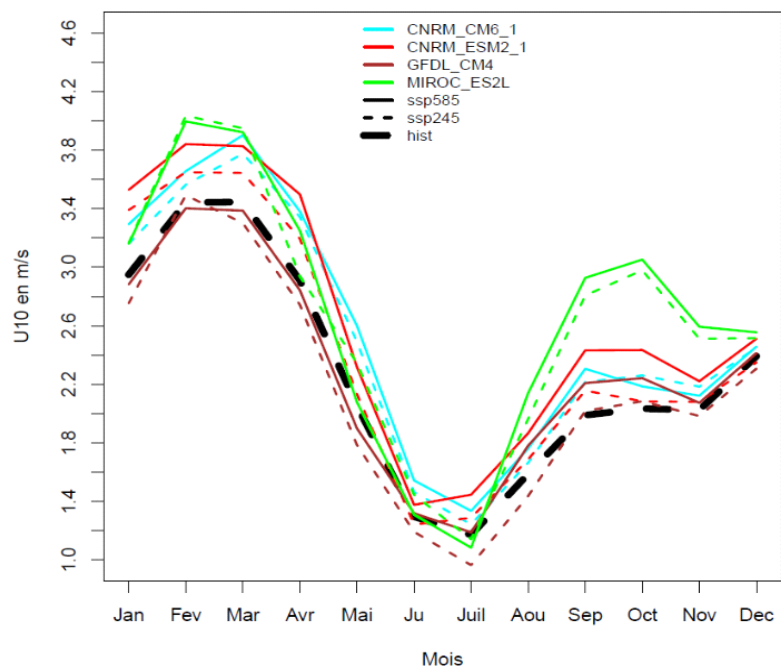


Figure A84. Idem Figure 83 mais pour la période 2041-2070.



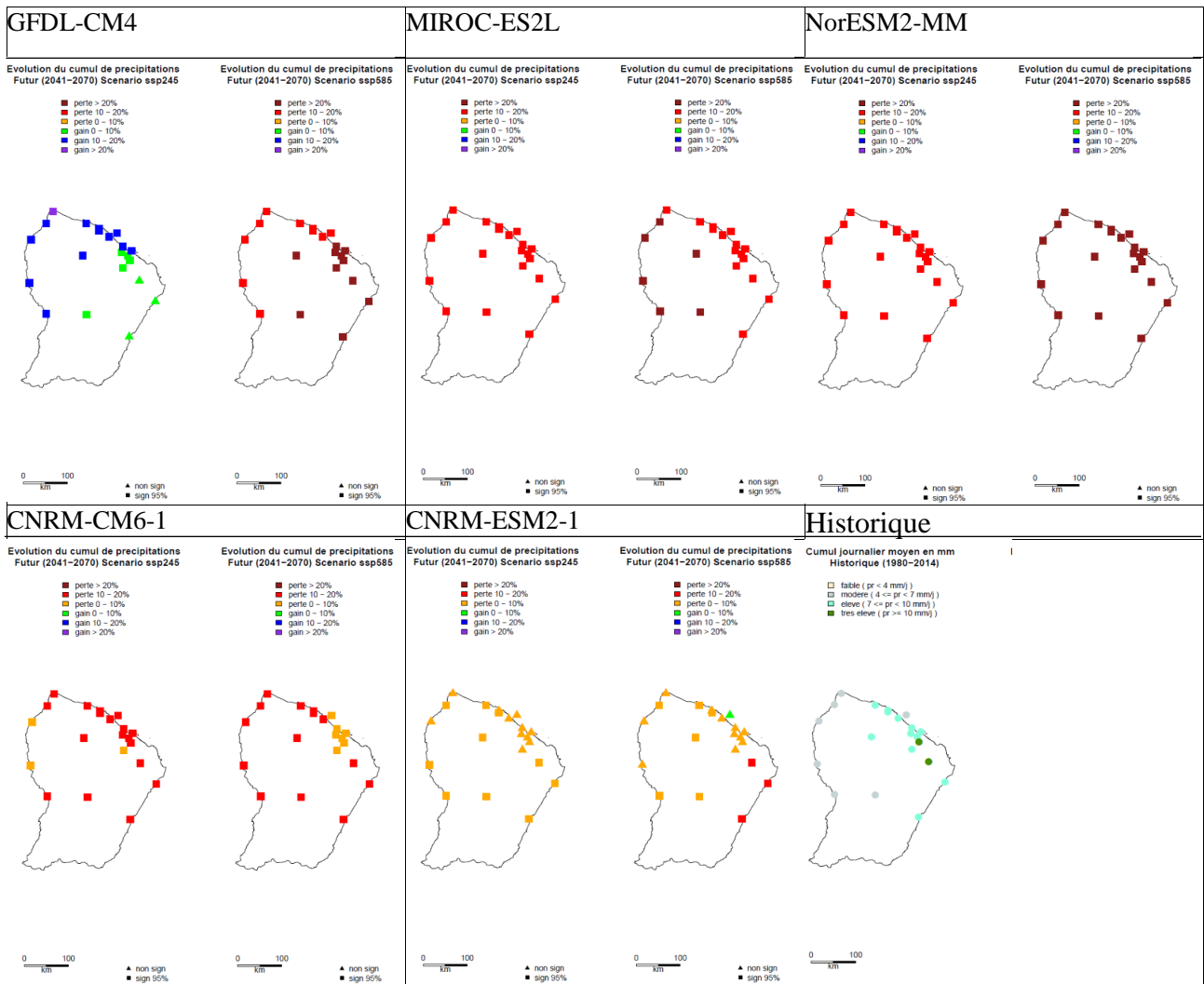


Figure A85. Idem Figure 87 mais pour la période 2041-2070.

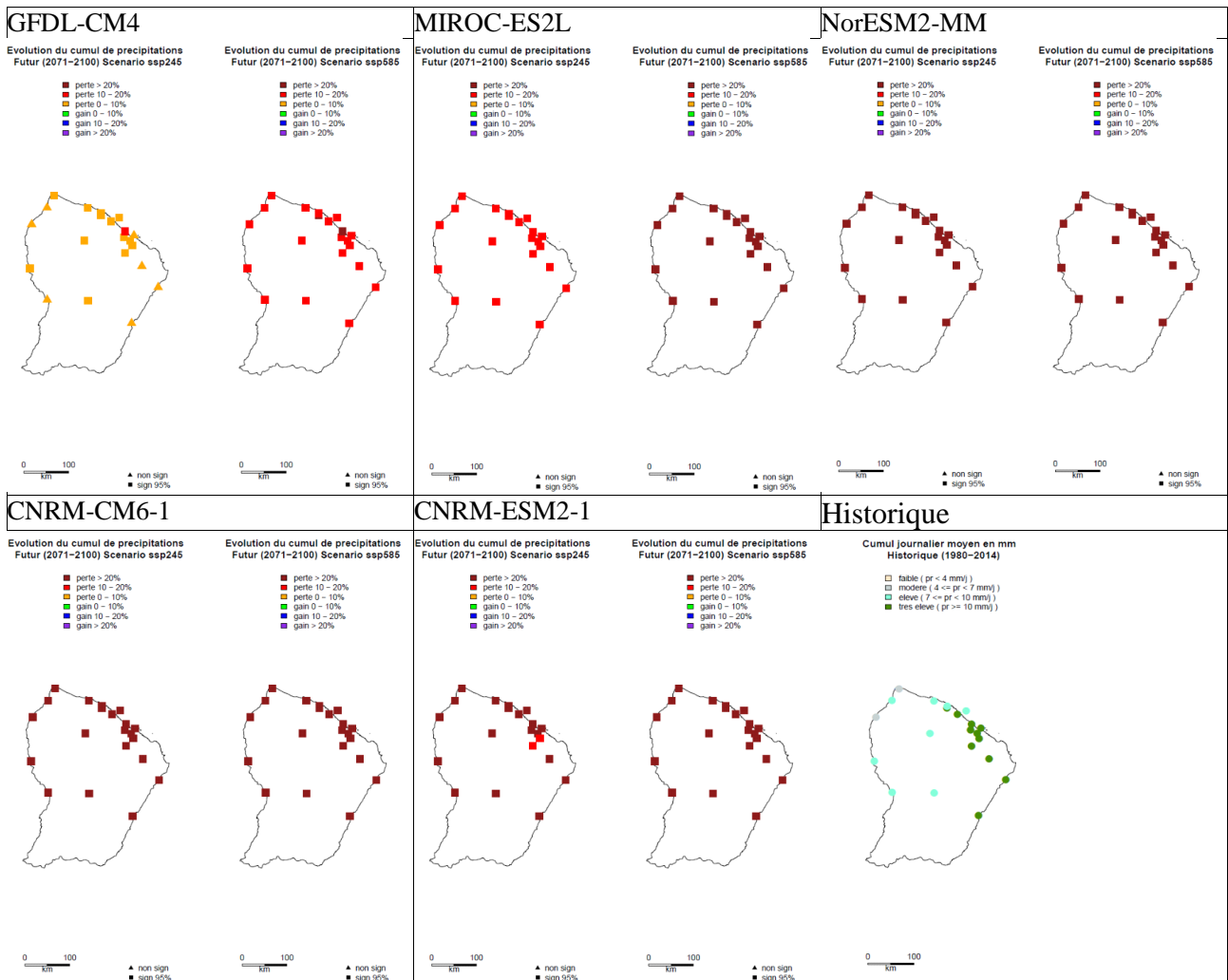


Figure A86. Idem Figure 87 mais pour les moyennes saisonnières en JFMA.

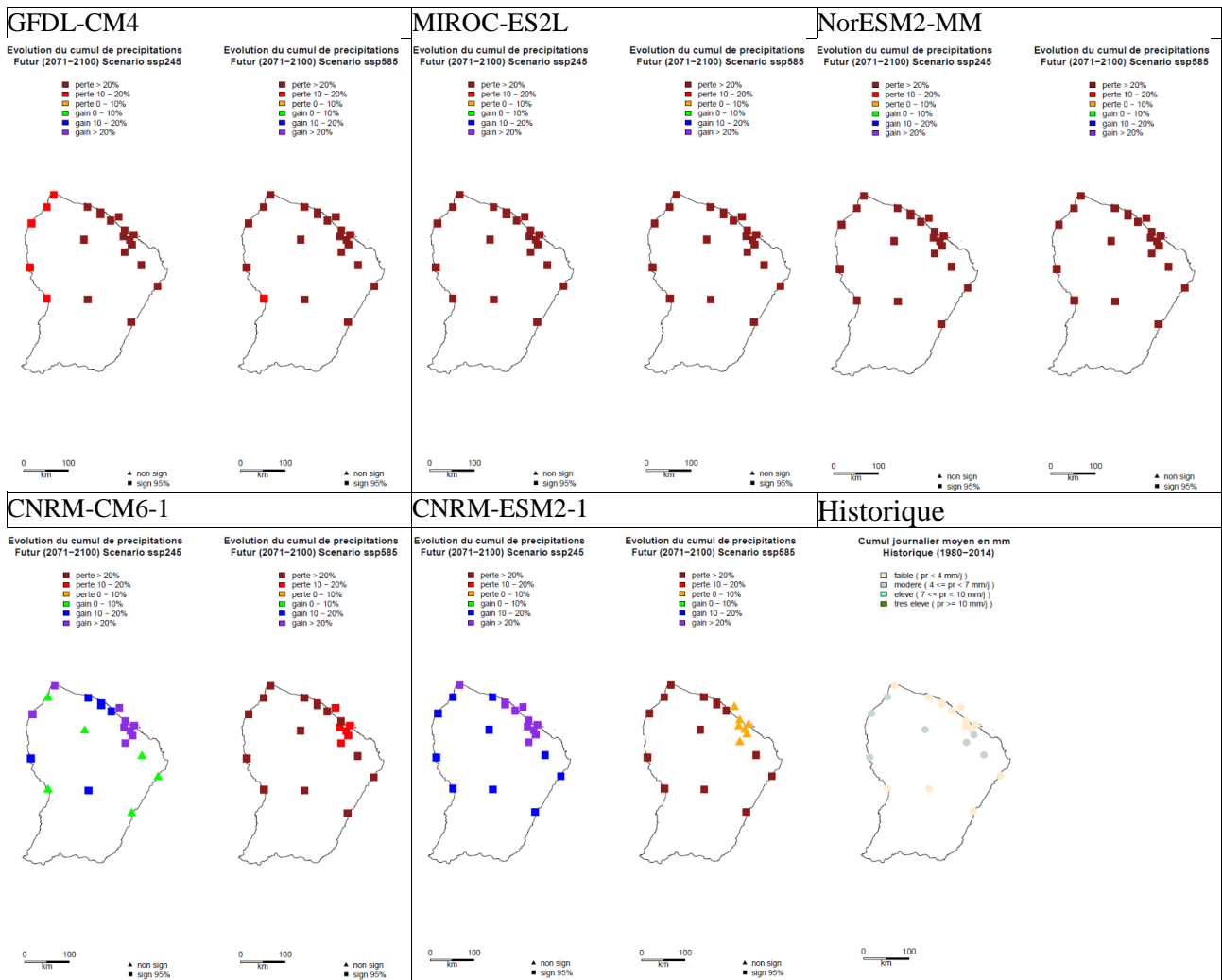


Figure A87. Idem Figure 87 mais pour les moyennes saisonnières en JASON.



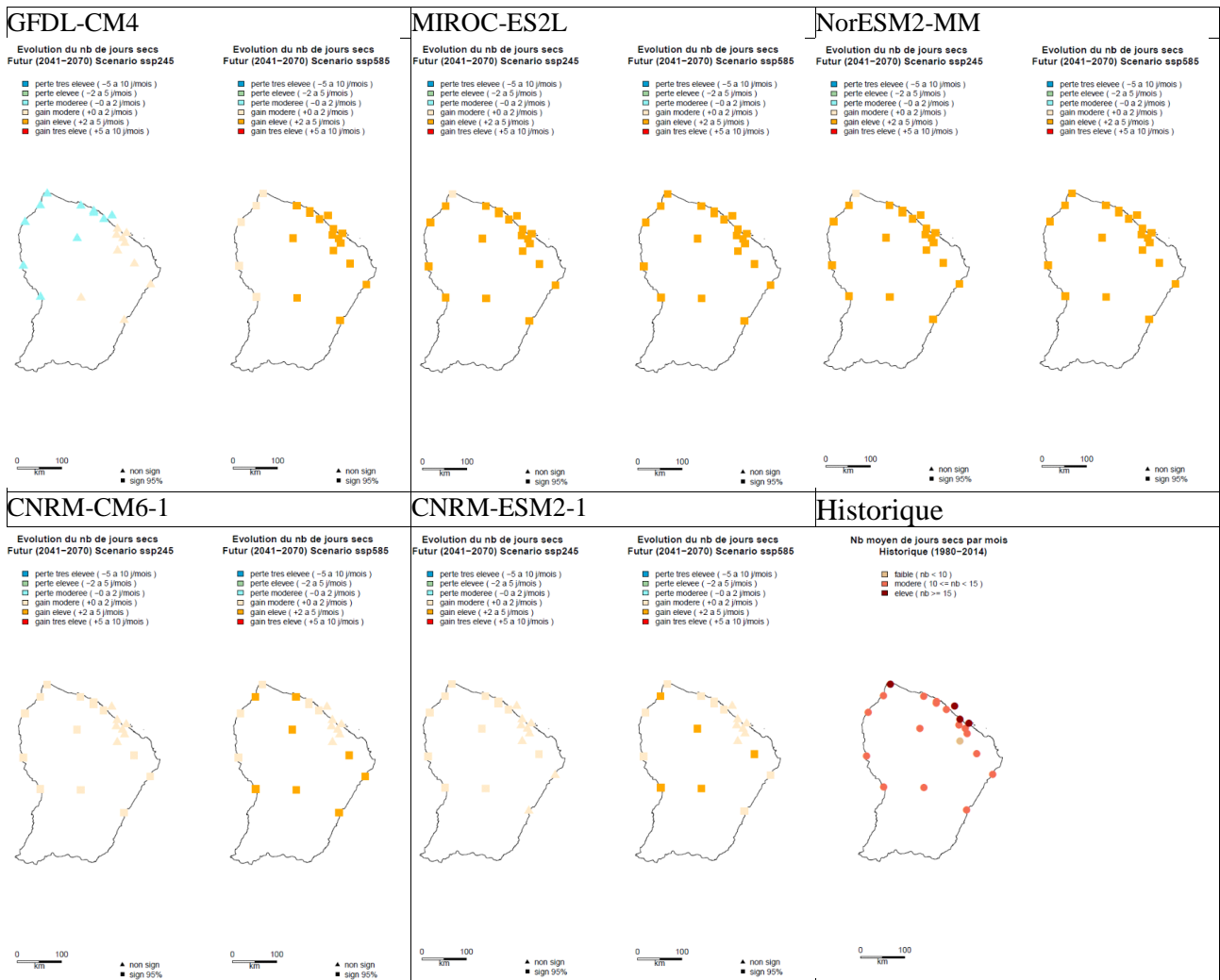
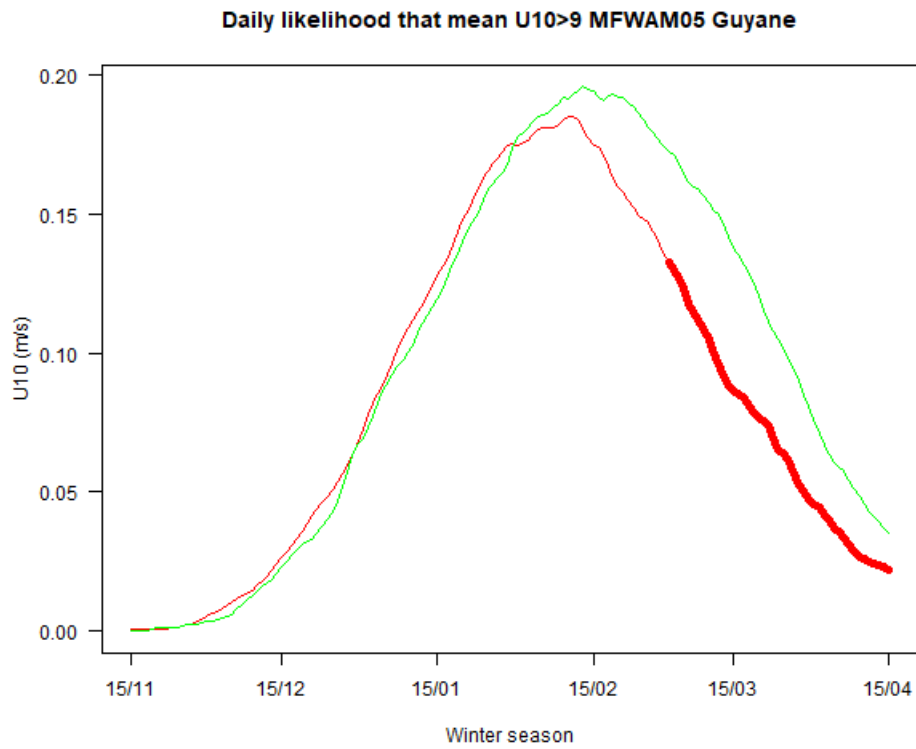


Figure A88. Idem Figure 91 mais pour la période 2041-2070.



**Figure A89.** Idem Figure 120c mais pour la probabilité journalière que U10 moyenne soit supérieure à 9 m/s.



**RÉPUBLIQUE  
FRANÇAISE**

*Liberté  
Égalité  
Fraternité*



Géosciences pour une Terre durable

**brgm**

**Centre scientifique et technique**

3, avenue Claude-Guillemin

BP 36009 - 45060 – Orléans Cedex 2 – France

Tél. : 02 38 64 34 34

**Direction régionale de Guyane**

Domaine de Suzini, Route de Montabo

BP 10552 - 97333 – Cayenne Cedex 2 – France

Tél. : 05 94 30 06 24

[www.brgm.fr](http://www.brgm.fr)