Changement climatique en Guyane : étude complémentaire sur les données hydroclimatiques et de qualité de l'air

Note de synthèse

Avril 2013

Observatoire Régional de l'Air de Guyane, Pointe Buzaré, BP 1059 97345 Cayenne Cedex

Météo-France, Direction Interrégionale Antilles Guyane, BP 645 97262 Fort-de-France Cedex

Bureau de Recherches Géologiques et Minières, Direction régionale Guyane, Domaine de Suzini – Route de Montabo, BP 552, 97333 Cayenne Cedex

PROGRAMME RÉGIONAL POUR LA MAÎTRISE DE L'ÉNERGIE

PARTENAIRES POUR LE DÉVELOPPEMENT DURABLE DE LA GUYANE

Résumé

En raison de la richesse de sa biodiversité, de sa population majoritairement installée sur le bord littoral et de sa ressource en eau, la Guyane est clairement concernée par le changement climatique et ses impacts. Si l'augmentation de la température est avérée (+ 1,3 °C sur la période 1955-2009), les tendances concernant d'autres paramètres sont moins évidentes. Ce travail a pour but d'estimer l'impact potentiel du changement climatique sur les tendances hydroclimatiques et la qualité de l'air en Guyane.

En ce qui concerne les précipitations, dont les séries de données depuis 1955 de 14 stations ont été analysées, l'étude statistique ne détecte pas d'évolution significative au niveau des moyennes annuelles, saisonnières et mensuelles. De même, les records de précipitations ont peu évolué. Par contre, plusieurs indices montrent que les principales particularités de la période étudiée se situent entre 1970 et 1990, en lien avec une position particulièrement au sud de la zone de convergence intertropicale (ZIC). De plus, une augmentation du nombre de jours avec des faibles précipitations a également été observée sur cette même période.

Au niveau de la qualité de l'air, il est avéré que l'air de Guyane est fréquemment pollué par des nuages de poussières désertiques arrivant du Sahara entre janvier et mai. Les études récentes, qui ont mis en évidence l'impact négatif de ces poussières sur la santé, justifient de s'intéresser à l'occurrence des événements de poussières. Il apparaît que la désertification qui a frappé l'Afrique de l'Ouest entre 1970 et 1990, toujours en lien avec la position de la ZIC, a provoqué une augmentation de la concentration des particules désertiques traversant l'Océan Atlantique. Une étude de corrélation entre les événements de poussières et les précipitations montre qu'en plus d'altérer la qualité de l'air, les particules du Sahara pourraient avoir une influence sur la fréquence des jours avec des faibles précipitations.

Le principal facteur influant sur les évolutions observées est la position de la ZIC dont la variabilité est liée à des cycles naturels durant de 20 à 40 ans. Cependant, l'influence anthropique sur ces cycles est encore sujette à discussion. De plus, le réchauffement climatique a pu amplifier le phénomène de désertification et est certainement un frein au reverdissement de l'Afrique de l'Ouest.

Sommaire

1. Introduction 4
2. Contexte 4
3. Objectifs 5
4. Analyses statistiques 5
5. Evolution du régime des précipitations 6
   5.1. Séries de données 6
   5.2. Paramètres étudiés 6
   5.3. Etude de l'évolution des précipitations 7
      5.3.1. Précipitations annuelles 7
      5.3.2. Précipitations saisonnières 8
      5.3.3. Précipitations mensuelles 11
      5.3.4. Indices caractéristiques d'un changement climatique 13
      5.3.5. Bilan et influence du changement climatique sur l'évolution des précipitations 15
6. Evolution de la qualité de l'air 16
   6.1. Impact des particules désertiques sur la santé 17
      6.1.1. Impact des particules sur la santé 17
      6.1.2. Cas des particules désertiques 18
   6.2. Influence du changement climatique sur la qualité de l'air 19
      6.2.1. Départ de poussières du Sahara 19
      6.2.2. Evénements de poussières en Guyane 20
      6.2.3. Corrélation entre la concentration des particules dans l'air et certains paramètres météorologiques 21
   6.3. Bilan et influence du changement climatique sur l'évolution de la qualité de l'air 24
7. BILAN ET Influence du changement climatique sur les évolutions observées 24
8. Références Bibliographiques 25
9. Liste des Tableaux 28
10. Liste des Figures 28
11. Annexes 29

1. INTRODUCTION

Du fait de la mise en évidence d'un changement climatique planétaire, il devient indispensable de mieux comprendre et d'anticiper l'influence de cette évolution sur les conditions actuelles et à venir. Les changements climatiques étant plus ou moins marquées selon les régions considérées, il est nécessaire d'étudier l'évolution du climat et ses conséquences à des échelles locales afin de définir des stratégies d'adaptation. Dans ce contexte, un premier rapport de Météo-France [1] a permis d'établir un premier bilan des connaissances par rapport à l'évolution des principaux paramètres météorologiques en Guyane. Afin d'approfondir les résultats obtenus et d'évaluer l'influence du changement climatique sur les précipitations d'une part et la qualité de l'air d'autre part, une étude a été réalisée dans le cadre d'une convention entre le BRGM, l'ORA et Météo-France. Ce rapport détaille les principaux résultats de cette étude.

2. CONTEXTE

D'après le rapport du GIEC 2007 [2], le changement climatique à la surface de la Terre est sans équivoque. L'étude a mis en évidence une augmentation anormale des températures presque partout dans le monde, avec une élévation moyenne de 0,60 °C entre 1901 et 2000, qui s'est accentuée entre 1906 et 2005 (+ 0,74 °C). La principale cause de ce réchauffement serait l'augmentation de la concentration des gaz à effet de serre dans l'atmosphère, due à l'augmentation conséquente des émissions d'origine anthropique de ces gaz.

« Les observations effectuées sur tous les continents et dans la plupart des océans montrent qu'une multitude de systèmes naturels sont touchés par les changements climatiques régionaux, en particulier par la hausse des températures » [2]. Une élévation du niveau moyen de la mer de 1,8 mm par an a notamment été observée depuis 1961 et il est probable que les surfaces touchées par des phénomènes de sécheresse se soient élargies.

Par rapport à l'influence de l'évolution du climat sur le régime des précipitations, les résultats sont moins homogènes et dépendent des régions considérées. Alors que dans certaines régions, les précipitations ont augmenté, dans d'autres elles ont diminué. Une augmentation des fortes précipitations est également très probable dans la plupart des régions.

En ce qui concerne l'évolution de la qualité de l'air, il est bien admis que l'industrialisation a conduit a une forte augmentation des émissions polluantes d'origine anthropique, avec pour conséquence une dégradation de la qualité de l'air en périphérie des agglomérations. Par contre, l'impact sur la santé de la pollution d'origine naturelle, due en particulier aux nuages de poussières formés dans les déserts, est une préoccupation bien plus récente, tout comme l'influence du changement climatique sur la production et la dispersion des polluants d'origine naturelle.

De part sa position géographique et la richesse de ses ressources naturelles, la Guyane est fortement concernée par le changement climatique [3]. Plus de 95 % du territoire est abrité par une forêt contenant une biodiversité exceptionnelle. Or, selon certains travaux, le changement climatique pourrait transformer une part importante des forêts en savane, ce qui serait accompagné d'une forte perte de biodiversité. Aussi, le changement climatique risque de conduire à une augmentation des risques naturels, concernant notamment la population, dont plus de 85 % vit sur la plaine côtière à une altitude inférieure à 50 m. Enfin, de nombreux secteurs comme la santé, l'agriculture et la pêche seront fortement impactés par une évolution du climat.

La première étude sur le changement climatique effectuée en 2012 par Météo-France [3], a mis en évidence que, comme sur l'ensemble de la surface terrestre, la température moyenne en Guyane a augmentée de manière statistiquement significative (+ 1,36 °C entre 1955 et 2009). De plus, les températures minimales et maximales observées sont également plus élevées de plus de 1 °C pour

toutes les stations étudiées. D'après les projections, une augmentation supérieure à 1 °C est encore prévue au cours des 50 prochaines années.

L'étude de l'évolution des précipitations a donné lieu à des résultats bien moins marqués. Les variations au niveau des précipitations annuelles, de 1955 à 2004, sont de l'ordre de 5 % et aucun résultat n'est statistiquement significatif. L'étude saisonnière n'a également pas conduit à des tendances statistiquement significatives. C'est pourquoi, une étude plus approfondie de l'influence du changement climatique sur le régime des précipitations est nécessaire.

En ce qui concerne la qualité de l'air en Guyane, celle-ci est le plus souvent affectée par des épisodes d'arrivée de poussières du Sahara, mais à notre connaissance, aucune étude ne s'est intéressée à l'influence de l'évolution du climat sur l'occurrence des événements de poussières.

3. OBJECTIFS

Cette étude sur le changement climatique en Guyane est focalisée principalement sur l'évolution du régime des précipitations et de la qualité de l'air.

Les données de précipitations ont fait l'objet d'une étude statistique approfondie afin de mettre en évidence une éventuelle variation entre 1955 et 2012. Les paramètres étudiés sont en particulier les moyennes des précipitations annuelles, saisonnières et mensuelles. De nombreux indices, à une échelle quotidienne ou de quelques jours et caractéristiques d'un changement climatique, ont été définis par la communauté scientifique [4]. Les plus pertinents de ces indices (par rapport au climat de la Guyane) ont été calculés et analysés statistiquement.

L'intérêt des scientifiques par rapport à la qualité de l'air est bien plus récent que pour les paramètres météorologiques. La prise de conscience des problèmes de santé engendrés par les émissions polluantes d'origine anthropique a conduit, ces dernières années, à une attention croissante par rapport à la qualité de l'air. S'il est bien admis que certaines émissions anthropiques sont toxiques, les populations sont moins informées sur les effets des polluants d'origine naturelle. Une étude bibliographique sur l'état des connaissances par rapport à l'impact sur la santé des particules a ainsi été réalisée. Concernant l'influence du climat sur la qualité de l'air, les informations sont également assez rares car les séries de données existantes par rapport à la qualité de l'air ont généralement moins de 30 ans. Les poussières du Sahara étant le principal polluant de l'air en Guyane, une étude bibliographique a été effectuée afin de recenser les différents travaux étudiant les nuages de poussières désertiques et l'influence du climat sur leur formation. Enfin, à partir des données de qualité de l'air en Guyane, dont les analyses ont débuté en 2002, des analyses statistiques ont été réalisées afin d'établir d'éventuelles corrélations avec des paramètres météorologiques.

4. ANALYSES STATISTIQUES

Toutes les analyses statistiques de cette étude ont été réalisées à l'aide du logiciel R. Le test utilisé pour déterminer une tendance par rapport à l'évolution des observations étudiées est le test de Mann-Kendall. Dans le cas de la détection d'une tendance, l'évolution a été estimée à l'aide de la méthode de la pente de Sen. Des ruptures dans les séries ont également été recherchées en utilisant le test de Pettitt. Ce test indique l'année de rupture la plus probable et le taux de significativité de cette rupture. Pour les tests de Mann-Kendall et de Pettitt, les résultats ont été caractérisés comme statistiquement significatifs lorsque la valeur de p (ou p-value) associée au test est inférieure à 0,05. Dans certains cas, des résultats avec des valeurs de p plus élevées, donc contenant une incertitude plus forte, ont été présentés afin d'essayer de mettre en évidence des tendances communes sur

l'ensemble des stations étudiées. Enfin, les tests de corrélation ont été réalisés en se basant sur la méthode de Pearson.

5. EVOLUTION DU REGIME DES PRECIPITATIONS

5.1. Séries de données

Lors de la précédente étude [1], l'évolution des précipitations annuelles et saisonnières de 1955 à 2004 avait été étudiée pour 11 stations à partir des données homogénéisées. L'homogénéisation des données a pour but de détecter des ruptures dans les séries de données, dues à des problèmes techniques (changement d'instrument, de localisation…), et d'apporter une correction pour atténuer ces ruptures. L'homogénéisation est réalisée sur les données mensuelles en s'appuyant sur les données obtenues sur des stations voisines. Les erreurs sur les mesures dues à des problèmes techniques pouvant être plus importantes que les évolutions dues à un changement climatique, le protocole préconise d'homogénéiser les données avant de rechercher une éventuelle évolution climatique. Les données homogénéisées de 2005 à 2012 n'étant pas encore disponibles, les analyses réalisées à partir des données mensuelles, saisonnières et annuelles ont été effectuées avec les séries de données en mm de 1955 à 2004. Par rapport à l'étude de 2012, nous avons ajouté à l'étude les observations recueillies dans 3 stations supplémentaires. La carte des 14 stations sélectionnées est fournie en Annexe 1. Pour 11 stations, les séries de données sont complètes. Pour les 3 autres stations les observations ont démarré après 1955 (1956 pour Roura, 1960 pour Montsinéry et 1967 pour Kourou).

Les données quotidiennes ne font pas l'objet d'homogénéisation. Ainsi, l'analyse des données quotidiennes a été réalisée à partir des séries de données en mm de 1955 à 2012. Pour cette étude, 9 stations, indiquées en Annexe 1 ont été sélectionnées. Ces stations sont celles pour lesquelles les ruptures détectées lors de l'homogénéisation des données mensuelles sont les plus faibles, donc à priori les plus fiables.

5.2. Paramètres étudiés

Les données mensuelles ont été utilisées afin d'étudier successivement la variabilité annuelle, saisonnière et mensuelle du climat. Il est bien admis que le climat guyanais est rythmé par 4 saisons, qui sont en lien avec la position de la zone de convergence intertropical (ZIC) [5] :

- De juillet à fin novembre, la ZIC est située au nord des côtes de Guyane, il s'agit de la saison sèche ;
- De fin novembre à mi-février, la ZIC se déplace vers le sud et longe les côtes de Guyane, ce qui provoque la petite saison des pluies ;
- De mi-février à fin mars, la ZIC est située au sud des côtes de Guyane, il s'agit du petit été de mars ;
- D'avril à juin, la ZIC remonte le long des côtes de Guyane et provoque la grande saison des pluies.

Cependant, la position de la ZIC présentant une forte variabilité interannuelle, les dates de début et de fin des saisons peuvent varier de plusieurs semaines. Ainsi, il est particulièrement délicat d'étudier la variabilité d'une saison aussi courte que le petit été de mars. De plus, les moyennes mensuelles montrent clairement que la pluviométrie de mars est nettement plus élevée que celle des mois de la saison sèche [5]. C'est pourquoi, dans le cadre de l'étude de la variabilité saisonnière, il paraît plus

adapté de définir uniquement 2 saisons : une saison sèche de juillet à novembre et une saison des pluies de décembre à juin.

Les données mensuelles ont également été exploitées afin de calculer le Standardized Precipitation Index (SPI) pour les différentes stations. Le SPI est un indice, développé par Mc Kee et al. [6], caractérisant les sécheresses en ne prenant en compte que les précipitations. Le SPI peut se calculer à différentes échelles de temps et nécessite de définir une période de référence. Lorsque les valeurs de SPI sont comprises entre -1 et 1, il s'agit d'une période proche de la normale par rapport à la période de référence sélectionnée. Plus les valeurs du SPI sont positives (respectivement négatives), plus la période considérée est humide (respectivement sèche). La période de référence exploitée pour le calcul du SPI est l'ensemble de la période des données, c'est-à-dire de 1955 à 2004. La période d'étude de ce travail est soit l'année (12 mois), soit la saison (7 mois successifs de décembre à juin pour la saison sèche et 5 mois de juillet à novembre pour la saison sèche), soit le mois. Il est considéré qu'une sécheresse débute lorsque le SPI atteint une valeur inférieure à - 1 et qu'elle se poursuit tant que le SPI garde une valeur négative. A titre de comparaison, nous considérerons qu'une période anormalement humide débute lorsque le SPI prend une valeur supérieure à 1 et qu'elle se poursuit tant que le SPI garde une valeur positive.

Les indices caractéristiques d'un changement climatique calculés à partir des données quotidiennes sont :

- Les records quotidiens de précipitation,
- Les records sur 5 jours successifs du cumul de précipitation sur une année,
- Le nombre de jours de pluie significative (RR ≥ 1 mm),
- Le record du nombre de jours secs (cdd) ou humides (cwd) consécutifs,
- Le nombre de jours avec des précipitations comprises entre 2 valeurs seuils X et Y (X ≤ RR < Y).

5.3. Etude de l'évolution des précipitations

Cette partie est réalisée à partir de l'étude des données mensuelles.

5.3.1. Précipitations annuelles

Les précipitations annuelles moyennes et le coefficient de variation sur la moyenne sont indiqués dans le Tableau 1. Le coefficient de variation, en moyenne de 18 %, illustre la variabilité interannuelle des précipitations. Il est intéressant de remarquer que les valeurs les plus faibles sont obtenues pour les stations les plus éloignées des côtes.

Tableau 1 : Moyennes des précipitations annuelles sur les 14 stations étudiées

	Maripasoula	Saül	Camopi	St Georges	Régina	Roura	Rochambeau
Moyenne (mm)	2381	2472	2607	3462	4299	3734	3475
Coefficient de variation (%)	13,4	12,1	12,1	15,4	14,6	19,3	19,3

	Cayenne	Montsinéry	Kourou	Sinnamary	Iracoubo	Mana	St Laurent
Moyenne (mm)	2855	3366	2913	2699	2735	1983	2446
Coefficient de variation (%)	21,9	20,3	20,2	23,7	18,9	25,8	16,4

L'évolution sur 50 ans des précipitations annuelles en Guyane est illustrée sur la Figure 1. A une exception près (Kourou), les variations sur 50 ans sont inférieures à 5 %. La faiblesse de cette valeur,

par rapport au coefficient de variation sur la moyenne, explique qu'aucune des tendances observées ne soit statistiquement significative (valeurs de p toutes supérieures à 0,25). Une évolution vers une diminution des précipitations le long des côtes semble apparaître mais cette tendance est très faible.

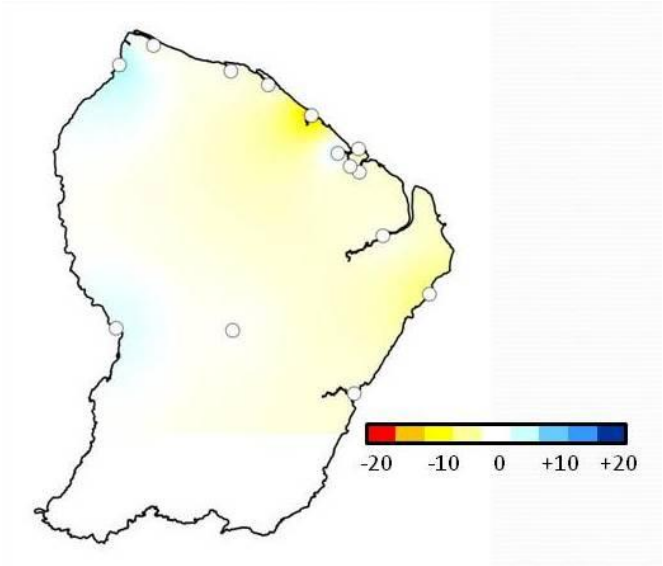


Figure 1 : Evolution (en %) des précipitations annuelles en Guyane sur la période 1955 – 2004.

L'évolution du SPI calculé sur une période de référence de 12 mois, permet une meilleure visualisation de l'évolution des précipitations au cours du temps. Elle est représentée pour l'exemple de la station de Rochambeau sur la Figure 2. Après une période assez sèche suite à la sécheresse de 1964 et une période relativement humide de 1970 à 1977, il apparaît une alternance plutôt régulière des périodes sèches et humides depuis 1980, ce qui explique l'absence de tendance au niveau de l'évolution des précipitations annuelles sur 50 ans. Aucune rupture significative n'a été détectée sur l'ensemble des séries analysées.

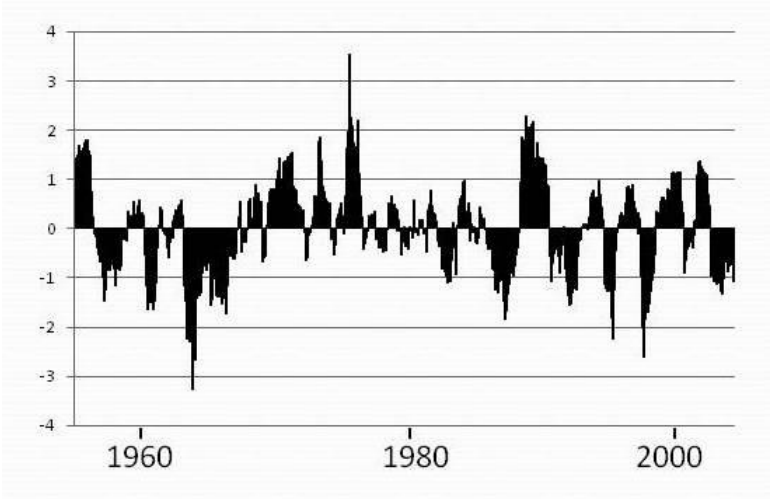


Figure 2 : Evolution du SPI, calculé sur une période de référence de 12 mois, de 1955 à 2004 à la station de Rochambeau.

5.3.2. Précipitations saisonnières

Saison sèche

L'évolution des précipitations au cours de la saison sèche (de juillet à novembre) est illustrée sur la Figure 3. Les tendances sur 50 ans restent faibles par rapport à la variabilité interannuelle des précipitations et aucune des tendances observées n'est statistiquement significative (valeurs de p supérieures à 0,20). Il apparaît tout de même que pour 8 des 11 stations situées près de la côte, les précipitations ont tendance à diminuer au cours de la saison sèche. Le test de Pettitt indique deux

ruptures proches du taux de significativité au niveau de Maripasoula (en 1971, p=0,06) et de Saint-Laurent (en 1989, p=0,05). De plus, une rupture autour de l'année 1970 est également détectée pour 6 autres stations, mais avec un taux de significativité plus faible.

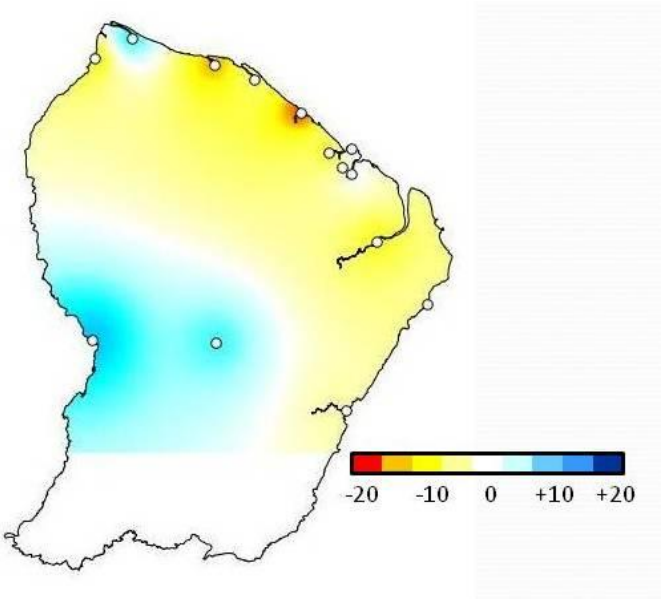


Figure 3 : Evolution (en %) des précipitations lors de la saison sèche sur la période 1955 – 2004.

Le SPI, calculé sur la saison sèche, dans le cas de la station de Saint-Laurent, est représenté dans la Figure 4. Il apparaît qu'entre 1970 et 1990, le SPI prend essentiellement des valeurs positives.

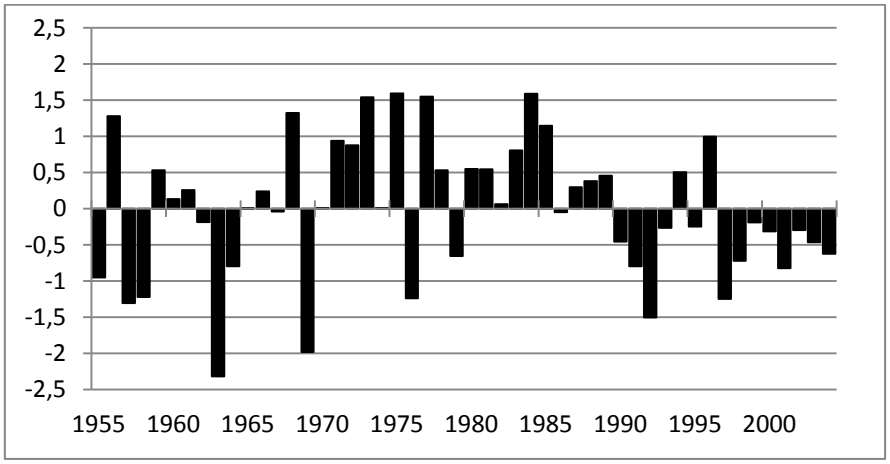


Figure 4 : Evolution du SPI calculé sur la saison sèche pour la station de Saint-Laurent.

La représentation de l'évolution de la moyenne sur 5 ans des précipitations au cours de la saison sèche, présentée sur la Figure 5 pour l'exemple de la station de Rochambeau, confirme cette tendance. Par rapport aux années précédentes et suivantes, les précipitations sont plus importantes entre 1970 et 1990. Ce résultat indique que l'évolution vers une diminution des précipitations au cours de la saison sèche, observée pour la plupart des stations, n'est pas une tendance continue sur la période d'étude, mais est plutôt due à des années plus pluvieuses de 1970 à 1990.

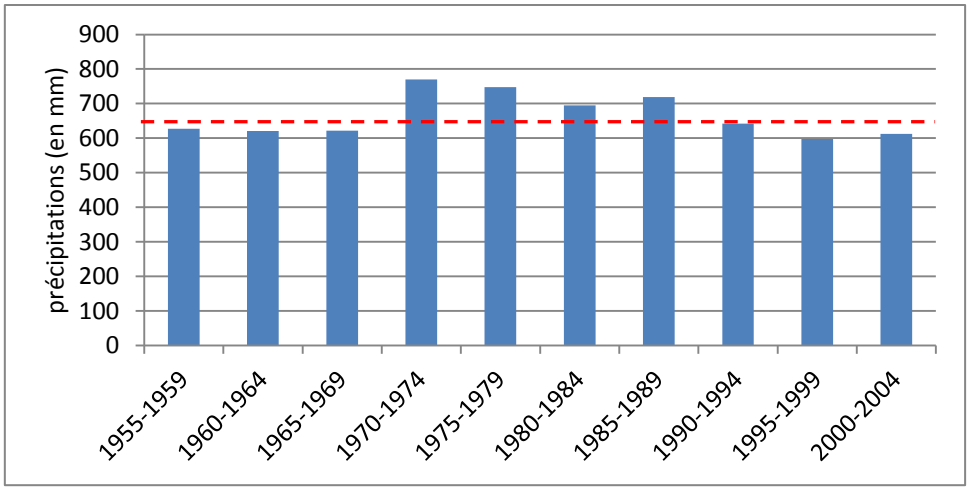


Figure 5 : Moyenne sur 5 ans des précipitations à Rochambeau au cours de la saison sèche.

Saison des pluies

L'évolution des précipitations au cours de la saison des pluies (de décembre à juin) est illustrée sur la Figure 6. Il apparaît que les évolutions observées sont faibles par rapport aux variabilités de précipitation interannuelles et aucune tendance n'est statistiquement significative (valeurs de p supérieures à 0,25). Sur l'ensemble des stations, la tendance majoritairement observée est une légère augmentation des précipitations (9 cas sur 14). Pour 6 stations, le test de Pettitt propose une rupture en 1987 ou 1988, mais aucun des résultats des tests de rupture n'est statistiquement significatif.

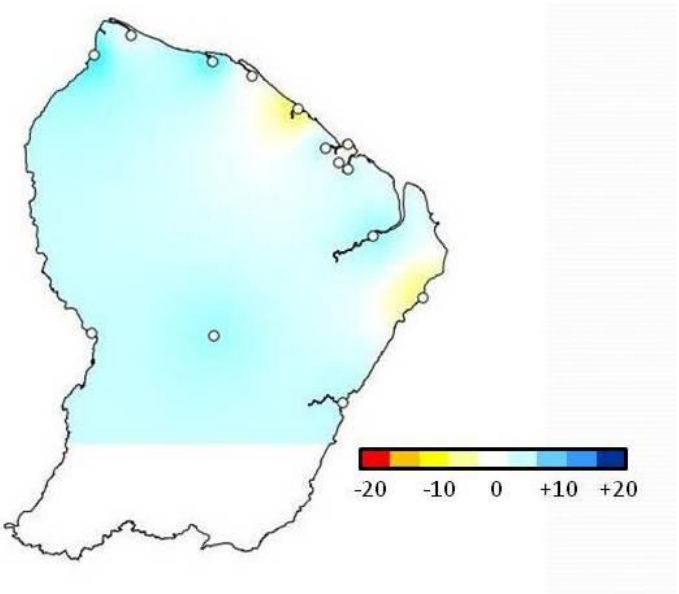


Figure 6 : Evolution (en %) des précipitations lors de la saison des pluies sur la période 1955 – 2004.

Le SPI, calculé sur la saison des pluies, dans le cas de la station de Saint-Laurent, est représenté sur la Figure 7. Les valeurs prises par le SPI sont rarement en dehors de la gamme allant de - 1 à 1. En portant une attention particulière à l'année 1988, il apparaît que depuis cette année, les valeurs du SPI sont majoritairement positives.

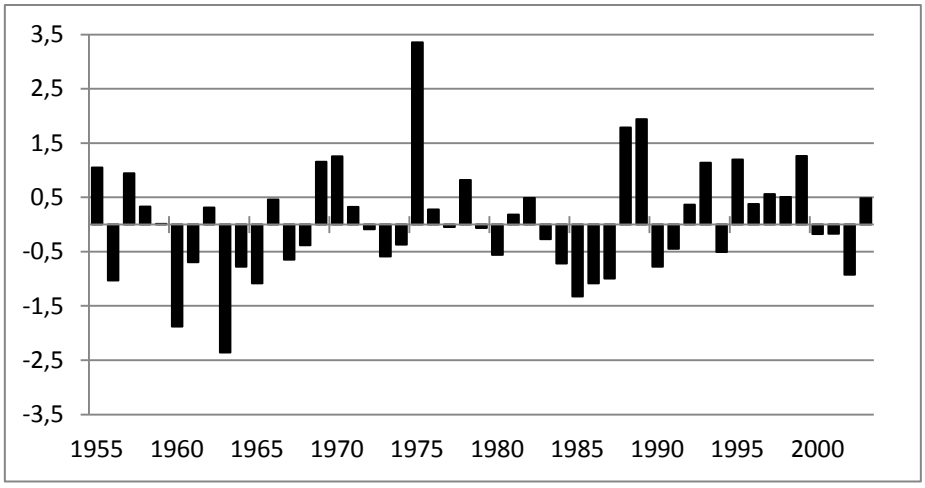


Figure 7 : Evolution du SPI calculé sur la saison des pluies pour la station de Saint-Laurent.

5.3.3. Précipitations mensuelles

Dans un premier temps, à partir des données de précipitations mensuelles, le SPI a été calculé pour chaque mois et chaque station, ce qui donne 8196 valeurs. A partir de la définition d'une période de sécheresse et d'une période anormalement humide (voir paragraphe 5.2), le cumul du nombre de mois concernés par ces phénomènes a été représenté sur les Figure 8 et Figure 9.

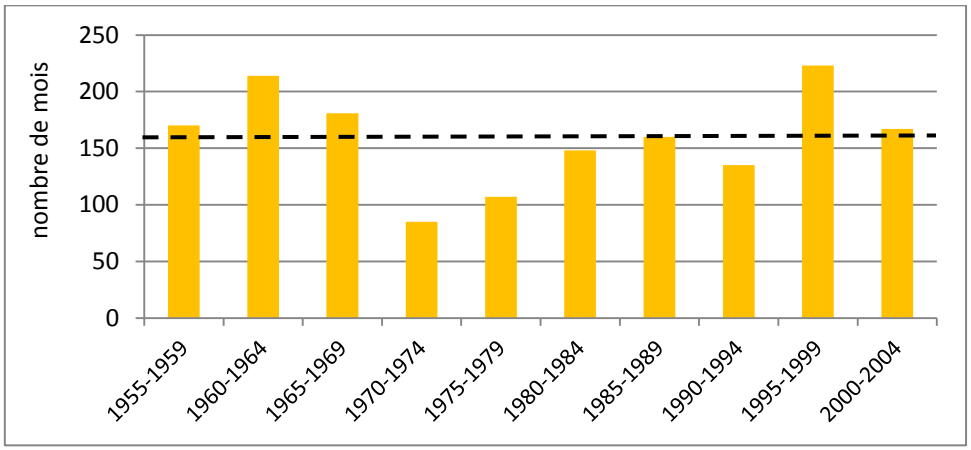


Figure 8 : Cumul par période de 5 ans du nombre de mois de sécheresse sur l'ensemble des stations (à partir du calcul du SPI sur une période de 1 mois).

Les cumuls du nombre de mois de sécheresse les plus élevés sont observés sur les périodes 1960-1964 et 1995-1999. La valeur sur la période 1960-1964 est essentiellement due à une forte sécheresse lors de l'année 1964, tandis que les sécheresses entre 1995 et 1999 sont plutôt réparties entre 3 années relativement sèches. Globalement, aucune longue période de sécheresse n'a été observée depuis 1955. Toutes sont inférieures à une année à l'exception de 2 périodes de sécheresse de 14 mois observées à Maripasoula en 1987-1988 et à Régina en 1997-1998.

Le nombre de mois anormalement humides est plus élevé sur la période 1970-1979. Cette valeur n'est pas due à une année exceptionnellement humide, mais plutôt à une pluviométrie légèrement plus importante sur l'ensemble de la période. Seules 4 périodes anormalement humides excèdent une année : 15 mois à Rochambeau en 1955-1957, 13 mois à Saint-Georges en 1970-1971, 13 mois à Régina en 1975-1976 et 13 mois à Camopi en 1988-1989.

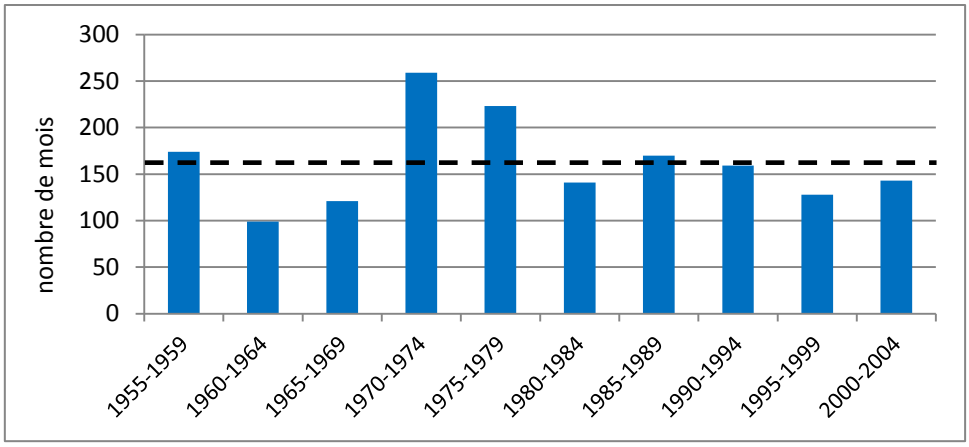


Figure 9 : Cumul par période de 5 ans du nombre de mois anormalement humides sur l'ensemble des stations (à partir du calcul du SPI sur une période de 1 mois).

Une période est considérée comme extrêmement sèche (respectivement humide) lorsque le SPI est inférieur à - 2 (respectivement supérieur à + 2). Le nombre de mois où le SPI a pris une de ces valeurs extrêmes est représenté sur la Figure 10. Il apparaît que l'évolution du climat n'a pas conduit à une augmentation des événements extrêmes à l'échelle du mois.

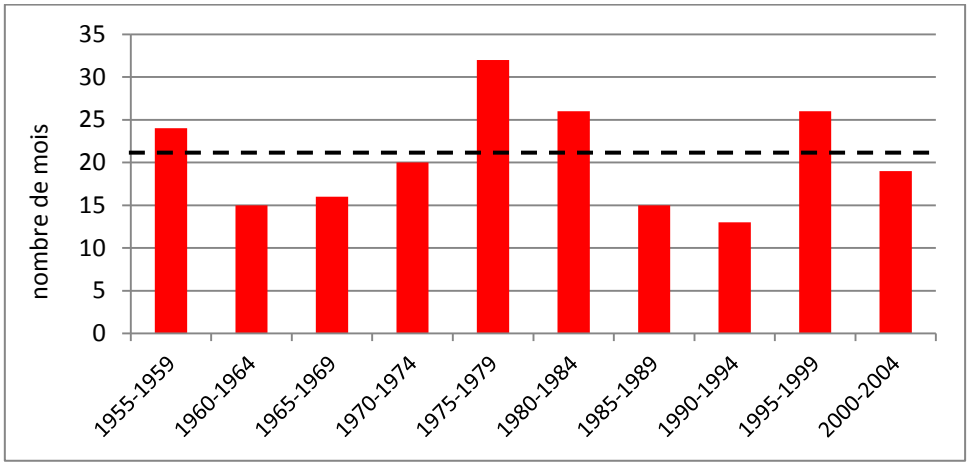


Figure 10 : Cumul par période de 5 ans du nombre de mois extrêmement secs ou humides (SPI < - 2 ou SPI > 2).

Les tests de Mann-Kendall et de Pettitt ont été effectués pour chaque station et chaque mois afin de détecter d'éventuelles tendances ou ruptures à l'échelle du mois. Le test de Mann-Kendall n'a mis en évidence aucune tendance statistiquement significative. Dans le but de rechercher une tendance commune sur l'ensemble des stations, les résultats pour lesquels la valeur de p est inférieure à 0,30 ont été répertoriés et sont précisés en Annexe 2. La tendance la plus marquée est une diminution des précipitations en décembre, observée pour 6 stations, dont 2 pour lesquelles la valeur de p est inférieure à 0,10. Le test de Pettitt détecte 7 ruptures statistiquement significatives. Parmi celles-ci, 3 sont observées au niveau des précipitations de décembre et, pour ce mois, l'année de rupture est toujours 1989.

L'évolution du SPI en décembre, calculé sur 1 mois pour la station de Cayenne, qui est la station pour laquelle la rupture était la plus marquée (p=0,01), est représentée sur la Figure 11. La rupture est due à une période avec des précipitations supérieures à la moyenne les années précédant 1989, puis inférieures à la moyenne après 1989. Les valeurs de SPI étant majoritairement négatives avant 1970, et très majoritairement positives de 1970 à 1989, il apparaît que le mois de décembre a été particulièrement humide de 1970 à 1990. Le mois de décembre étant le premier mois de forte précipitation suivant la saison sèche, ce résultat amène à l'hypothèse d'un éventuel décalage du

démarrage de la petite saison des pluies, qui aurait démarré de manière plus précoce sur la période 1970-1990.

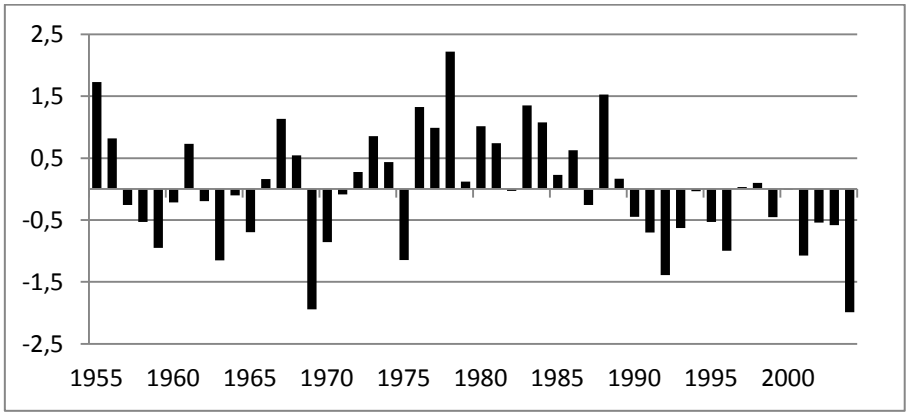


Figure 11 : Evolution du SPI calculé sur 1 mois pour le mois de décembre pour la station de Cayenne

Il paraît alors intéressant d'étudier l'évolution de la date du début de la saison sèche, pour voir si celle-ci se trouve également avancée entre 1970 et 1990, ce qui conduirait à des précipitations plus faibles en début de saison sèche. Les 2 premiers mois de la saison sèche sont les mois de juillet et d'août. Le SPI, calculé sur 1 mois pour le mois d'août pour la station de Cayenne, est représenté sur la Figure 12. Il apparaît qu'entre 1970 et 1990 les valeurs de SPI sont encore majoritairement positives. Ce résultat indique que la saison sèche aurait plutôt démarré de façon plus tardive sur cette période. Un démarrage plus précoce de la petite saison des pluies et plus tardif de la saison sèche amène à l'hypothèse d'une évolution de la position de la ZIC, qui serait située plus au sud que les autres années entre 1970 et 1990.

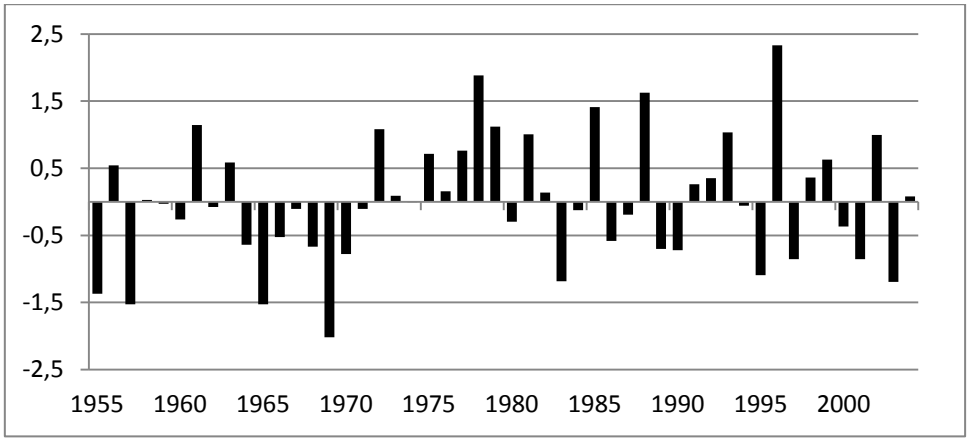


Figure 12 : Evolution du SPI calculé sur 1 mois pour le mois d'août pour la station de Cayenne

5.3.4. Indices caractéristiques d'un changement climatique

Le nombre de jours de pluie annuel fait partie des indices fréquemment étudiés pour mettre en évidence une évolution climatique. Une pluie est considérée comme significative lorsque la quantité de précipitation quotidienne atteint 1 mm. L'évolution du nombre de jours de pluie de 1955 à 2012 est représentée sur la Figure 13 pour les 9 stations présentant les séries de données quotidiennes considérées comme les plus fiables. Le nombre de jours de pluie par an, en moyenne proche de 200, a augmenté pour 6 stations. Dans 5 cas, l'augmentation est comprise entre 16 et 32 jours et les résultats sont statistiquement significatifs. Sur les 9 stations, le test de Pettitt détecte 5 fois une rupture significative en 1969. Une étude mois par mois met en valeur que cette variation est surtout constatée entre janvier et mai. En effet, sur cette période, le nombre de jours de pluie a augmenté pour toutes les stations et les résultats sont statistiquement significatifs pour 5 stations (voir Figure 13). Sur cette période, le test de Pettitt détecte une rupture significative entre 1987 et 1989 pour 8 des 9 stations.

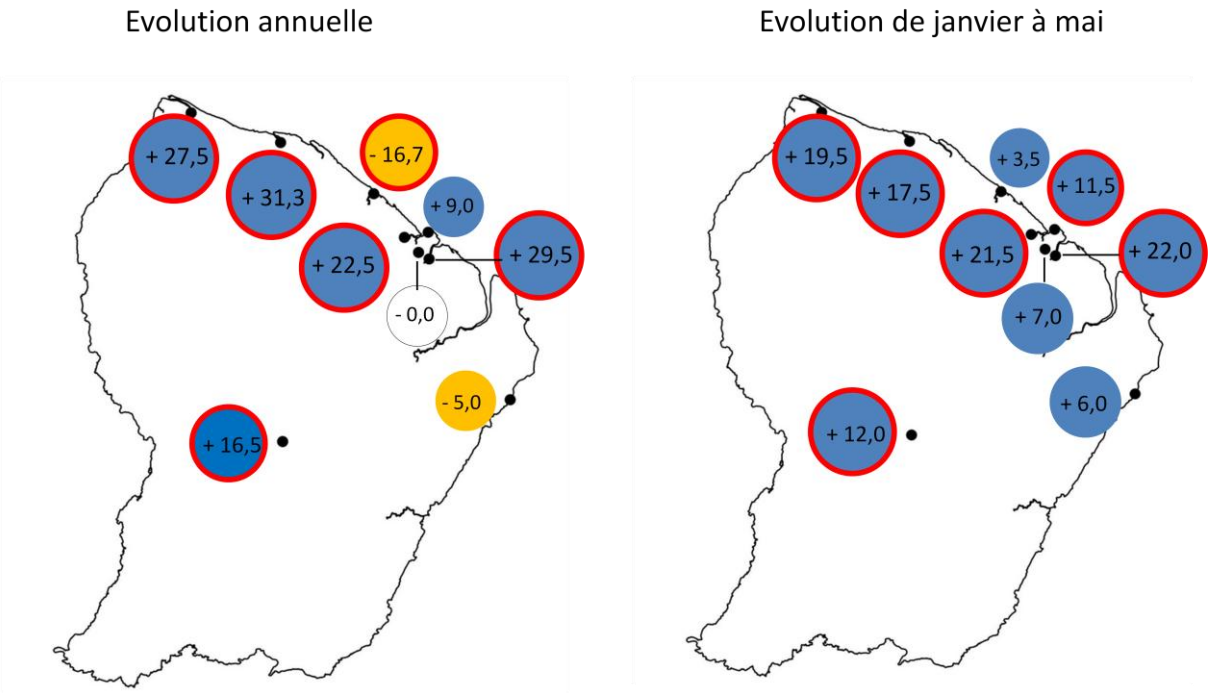


Figure 13 : Evolution sur 50 ans du nombre de jours de pluie significative (les valeurs entourées de rouge sont celles pour lesquelles les résultats sont statistiquement significatifs).

Le nombre de jours de pluies augmentant, il est nécessaire d'étudier quel type de précipitation a évolué. C'est pourquoi le nombre de jours de précipitations comprises entre des valeurs seuils, détaillées dans le Tableau 2, a été analysé. Le nombre de jours de précipitation est essentiellement en augmentation au niveau des précipitations les plus faibles, c'est-à-dire comprises entre 1 et 10 mm, avec un résultat statistiquement significatif pour 6 stations. Par conséquent, sur l'ensemble des jours de pluie significative, la quantité de pluie moyenne diminue, ce qui a été constaté de manière statistiquement significative pour 2 stations (voir Tableau 2). De plus, ce résultat explique le fait que, malgré le nombre plus élevé de jours de pluie, la quantité de précipitation annuelle varie peu.

Tableau 2 : Evolution sur 50 ans du nombre de jours avec des précipitations comprises entre des valeurs seuils (en mm) et de la moyenne de précipitation les jours de pluie significative (les variations sont indiquées quand la valeur de p est inférieure ou égale à 0,30 et surlignées pour des valeurs de p inférieures ou égales à 0,05).

	1 ≤ RR < 10		10 ≤ RR < 20		20 ≤ RR < 50		RR ≥ 50		précipitation moyenne (mm)	
	nombre de jours	p	nombre de jours	p	nombre de jours	p	nombre de jours	p	évolution sur 50 ans (%)	p
Saül	+ 12,2	0,01								
St-Georges					-5,0	0,30	- 8,3	0,08		
Roura	+ 9,9	0,03	+ 15,4	0,00	+ 6,2	0,19				
Rochambeau	+ 7,0	0,13								
Cayenne	+ 10,2	0,03							-6,4	0,16
Montsinéry	+ 16,4	0,00							-6,1	0,25
Kourou	- 7,8	0,13			-5,5	0,30				
Iracoubo	+ 17,0	0,00			+ 8,4	0,07			-12,6	0,05
Mana	+ 15,7	0,00			+ 5,0	0,30	-5,8	0,22	-13,8	0,03

Parmi les autres indices étudiés, les principaux résultats sont :

- Le plus grand nombre de jours secs consécutifs par année, qui se produit presque toujours au cours de la saison sèche, ne varie pas. Par contre, l'étude de cet indice uniquement au cours de la période entre janvier et mai met en évidence une diminution de cet indice (statistiquement significative pour 3 stations), cohérente avec l'augmentation du nombre de jours de pluie.
- Pour une raison identique, le plus grand nombre de jours humides consécutifs, qui se produit presque toujours au cours de la saison des pluies, a tendance à augmenter (de manière statistiquement significative pour 3 stations).
- Pas d'évolution au niveau du record de précipitation quotidienne à l'échelle annuelle. L'étude à l'échelle mensuelle (12 mois X 9 stations, soit 108 cas) conduit à des résultats statistiquement significatifs uniquement dans 6 cas ; 5 cas de diminution et 1 cas d'augmentation.
- Le record du cumul de précipitation sur 5 jours ne présente pas d'évolution particulière.

La principale évolution observée au niveau des indices étudiés étant une augmentation du nombre de jours de faible précipitation, entre janvier et mai, avec des ruptures au niveau des années 1969 et 1989, le profil des ruptures a été étudié. Une analyse plus détaillée a permis d'établir que c'est, en particulier, le nombre de jours de précipitations entre 1 et 5 mm qui a augmenté. L'évolution de ce nombre de jours entre janvier et mai est représentée sur la Figure 14, pour les cas des stations de Mana et de Cayenne. Afin de mettre en évidence les ruptures, les observations entre 1970 et 1989 ont été symbolisées en rouge. L'augmentation du nombre de jours de précipitations prouvée par l'étude statistique sur l'ensemble de la série de données (1955-2012) est très nettement observée sur la période 1970-1989. Par contre, après 1989, cette évolution a tendance à s'atténuer (cas de Mana), voire à s'inverser (cas de Cayenne). Cette observation indique que l'évolution du nombre de jours de faible précipitation n'est pas due à une tendance continue sur l'ensemble de la période étudiée, mais principalement à une augmentation sur la période 1969-1989.

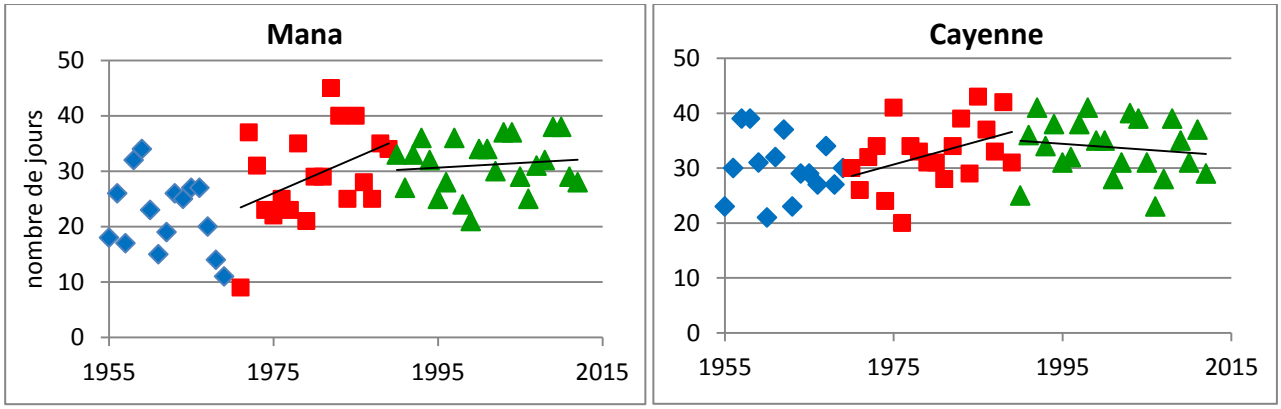


Figure 14 : Evolution du nombre de jours de précipitations comprises entre 1 et 5 mm entre janvier et mai.

5.3.5. Bilan et influence du changement climatique sur l'évolution des précipitations

Tandis que les températures ne cessent d'augmenter en Guyane, dans la continuité de l'étude précédente [1], les résultats de ce travail ne mettent pas en évidence d'évolution continue et significative au niveau des précipitations annuelles, saisonnières et mensuelles. Les principales particularités observées se situent sur la période 1970-1990, avec une saison sèche et un mois de décembre légèrement plus humides. Ces observations pourraient s'expliquer par une position plus au sud de la ZIC durant cette période, provoquant une saison des pluies plus précoce et une fin de la saison des pluies plus tardive. Ce phénomène provoquerait alors un allongement de la période du

petit été de mars, ce qui expliquerait que les précipitations annuelles n'aient pas augmentée de manière significative entre 1970 et 1990.

Une étude bibliographique par rapport à la variabilité de la position de la ZIC a été réalisée. Il en ressort que la position de la ZIC est fortement corrélée avec l'indice climatique Atlantic Multidecadal Oscillation (AMO) [7]. Le AMO est un indice calculé à partir de températures de surface (SST) de l'Atlantique nord (suite à une correction pour tenir compte de l'évolution due au réchauffement climatique), dont les phases froides et chaudes sont en alternance, avec des cycles ayant une période allant de 20 à 40 ans [8]. A une période froide au niveau des SST correspond une valeur négative du AMO et une position particulièrement au sud de la ZIC. Or, entre 1970 et 1990, le AMO a pris, comme illustré sur la Figure 15, ses valeurs les plus négatives des 50 dernières années ; ce qui confirme l'hypothèse d'une position plus au sud de la ZIC sur cette période.

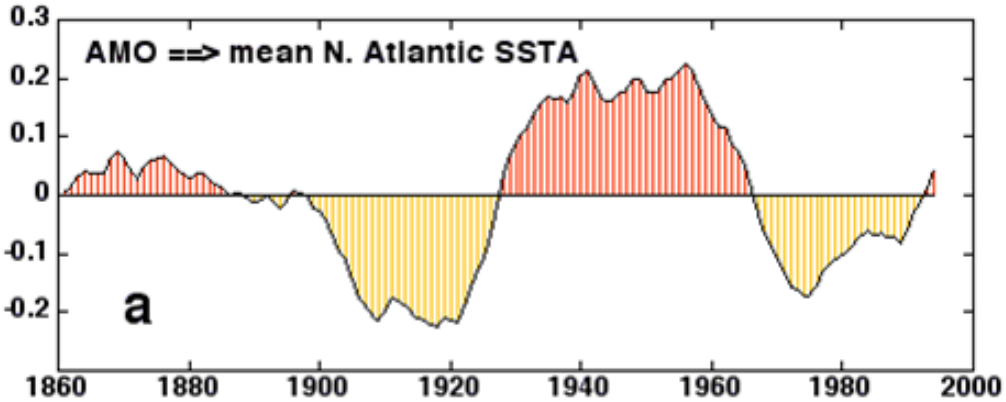


Figure 15 : Evolution de l'indice AMO de 1860 à 1990 [9].

Les cycles du AMO ne sont connus précisément que depuis 150 ans, mais certaines études mettent en évidence que ces cycles durent depuis au moins un millénaire et ainsi que ce phénomène est naturel [8]. Cependant, une influence du réchauffement climatique sur les valeurs du AMO n'est pas exclue et il est encore délicat d'évaluer l'impact des modifications d'origine anthropique sur le AMO [8, 10].

6. EVOLUTION DE LA QUALITE DE L'AIR

Parmi les polluants de l'air sont distingués les gaz (NO_x, SO_2, O_3, CO…) et les particules. En Guyane, les analyses par l'Observatoire Régional de l'Air de la concentration dans l'air des principaux polluants ont débuté en 2002. Les concentrations des polluants gazeux dans l'atmosphère dépassent rarement les seuils à partir desquels la population doit être avertie. Cependant, la présence de ces polluants, dont les émissions sont majoritairement dues aux activités humaines, doit être surveillée au cours des prochaines années, du fait du développement économique de la Guyane et notamment de l'impact de celui-ci par rapport à l'émission des gaz à effet de serre. Par contre, la pollution de l'air par les particules est un phénomène fréquemment observé en Guyane. Les particules sont les matières solide ou liquide (à l'exception des gouttelettes de nuage et de pluie) en suspension dans une masse d'air. Environ 15 % des particules émises ont une origine anthropique (résidus de moteurs ou d'autres types de combustion…), tandis que les autres ont une origine naturelle (poussières désertiques, particules marines, pollen…) [11]. La Guyane est fréquemment atteinte par des nuages de poussières désertiques dont l'origine est le Sahara [12]. Chaque année, l'arrivée de ces poussières provoque le dépassement des concentrations dans l'air correspondant aux seuils d'information (moyenne de 50 µg/m^3 sur 24 h) et même d'alerte (moyenne de 80 µg/m^3 sur 24 h). A titre de comparaison, alors que la quantité de particules d'origine anthropique émises en Guyane en 2007 était d'environ 250 t, celle de poussières africaines atteignant chaque année le bassin amazonien est

estimée à 50.10^6 t [13]. Si l'impact sur la santé des particules d'origine anthropique est une préoccupation datant de plusieurs dizaines d'années, peu d'études se sont intéressées à l'impact sur la santé des poussières désertiques. Cette étude a pour but d'établir un état des lieux sur les connaissances concernant l'impact des poussières désertiques sur la santé. Par la suite, à partir de données bibliographiques et locales (ORA, Météo-France), l'objectif est d'établir l'influence du changement climatique sur l'occurrence des arrivées de poussières en Guyane.

6.1. Impact des particules désertiques sur la santé

6.1.1. Impact des particules sur la santé

L'influence des particules sur la santé dépend essentiellement de leur taille et de leur composition chimique. Une description de l'appareil respiratoire est fournie sur la Figure 16. Les particules ayant un diamètre inférieur à 10 µm (PM_{10}) peuvent pénétrer dans la trachée et les bronches. En cas d'exposition de courte durée à des concentrations élevées, les particules provoquent des problèmes de toux, d'asthme, voire de mortalité respiratoire pour les personnes les plus fragiles. Les particules de diamètre inférieur à 2,5 µm ($PM_{2.5}$) peuvent atteindre les poumons, les alvéoles pulmonaires et même passer dans le sang lorsqu'elles sont ultrafines (diamètre inférieur à 0,1 µm). Ces particules s'accumulent dans l'organisme et génèrent, dans le cas d'exposition chronique, des affections respiratoires et cardio-vasculaires [14]. Bien qu'il soit encore délicat d'estimer tous les dommages dus à ces particules, il apparaît que ce sont les particules de diamètre inférieur à 2,5 µm qui ont l'impact sanitaire le plus grave. Une diminution de la moyenne annuelle de la concentration des $PM_{2.5}$ à la valeur guide de l'Organisation Mondiale de la Santé (OMS) conduirait annuellement à éviter 19 000 décès prématurés et à un bénéfice pour la société de l'ordre de 30 milliards d'euros [15].

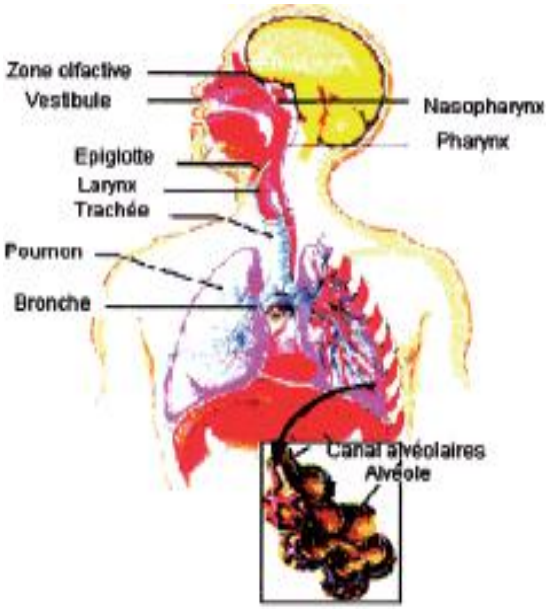


Figure 16 : Schéma de l'appareil respiratoire.

La composition chimique des particules influe également sur leur toxicité. Il est bien connu, par exemple, que les pollens provoquent des problèmes d'allergie chez les personnes sensibilisées. Il a également été établi que les suies résultant d'une combustion incomplète de combustibles fossiles ou de la biomasse ont une action cancérigène. De plus, au cours de leur transport, les particules peuvent se charger de divers polluants supplémentaires ayant également une action cancérigène voire mutagène et tératogène, comme des métaux lourds, des dioxines, des pesticides, des HAP [14]…

6.1.2. Cas des particules désertiques

Lors de leur formation, les nuages de poussières désertiques peuvent contenir des particules ayant un diamètre supérieur à 50 µm [12] et plus de 50 % (en masse) du nuage est composé de particules de diamètre supérieur à 20 µm [16]. Au cours du trajet, la quantité de grosses particules diminue et le diamètre médian des nuages de poussières, à plusieurs milliers de km de leur source, est estimé à quelques µm [12].

A l'origine, les particules de poussières sont essentiellement composées d'éléments minéraux dont les majoritaires sont Si, Al, Mg, K, Na, Ca, Fe [12, 17, 18]… Au cours de leur trajet, les particules peuvent se charger de divers types de molécules comme des micro-organismes ou des pollens [19]. Elles peuvent également entraîner et interagir avec :

- des particules marines au cours de leur passage au-dessus de l'océan [20],
- des nitrates, des sulfates, de l'ammonium ou des métaux lourds aux environs des zones industrialisées ou cultivées [16-18].

Il apparaît donc que selon la distance et le trajet parcourus par les particules, des variations au niveau de leur toxicité est à attendre.

L'impact des poussières désertiques sur la santé est une préoccupation très récente. Depuis 2005, une cinquantaine de publications peut être répertoriée sur ce sujet [21, 22], mais il est fort regrettable qu'aucune étude ne concerne spécifiquement l'impact de ces poussières sur la santé des populations d'Afrique de l'Ouest, alors que c'est dans cette région que les concentrations en poussières sont les plus élevées, avec des valeurs régulièrement largement au-dessus des seuils d'alerte [23-25]. La difficulté de ces études, due au manque d'accès aux soins des populations habitant les zones reculées et à la forte pollution anthropique dans les villes, peut expliquer le manque de travaux publiés sur ce grave problème. Une étude [24] aborde tout de même la toxicité des poussières du Sahara, mais sans pouvoir réellement distinguer l'impact des poussières désertiques de celui des particules d'origine anthropique. D'après les auteurs, les poussières désertiques semblent moins affecter la santé que les résidus de combustion, ce qui n'est pas étonnant étant donné la forte toxicité de ces derniers.

Parmi les études sur les poussières désertiques, deux travaux bibliographiques ont été publiés récemment. Un concerne l'impact des événements de poussières du Sahara sur la santé des populations européennes [22] et l'autre répertorie les différentes études concernant l'impact des poussières désertiques sur la santé [21], avec comme principales sources de poussières le Sahara et les déserts asiatiques. Les auteurs ont tenté d'établir une corrélation entre les concentrations de poussières dans l'air respiré par les populations et la quantité de certains problèmes de santé survenus les jours suivant les événements de poussières. Les effets sur la santé étudiés sont en particulier les pathologies respiratoires et cardiovasculaires, avec des critères d'étude pouvant aller du nombre d'admissions aux urgences au nombre de cas de mortalité. Sur la cinquantaine d'études recensées, une trentaine met en évidence une augmentation des pathologies en période de poussières, avec des résultats statistiquement significatifs pour plus de 20 travaux. En ce qui concerne plus particulièrement les poussières du Sahara traversant l'Océan Atlantique, une étude a été réalisée aux Canaries [26], région particulièrement touchée par les événements de poussières, lors desquels les concentrations en PM_{10} et $PM_{2.5}$ (moyennes sur 24 h) peuvent respectivement dépasser des concentrations de 500 et 200 µg/m^3. Les résultats montrent une corrélation nette entre la concentration en $PM_{2.5}$ et la mortalité due à des problèmes cardiaques, tandis que la concentration en PM_{10} est plutôt associée à des cas de mortalité respiratoire. Pour des trajets plus longs notamment jusqu'aux Caraïbes, les concentrations en poussières désertiques sont plus faibles, mais peuvent tout de même faire augmenter les concentrations en PM_{10} dans l'air jusqu'à des valeurs de 150 µg/m^3 [27, 28]. Lors de ces événements de poussières, des auteurs ont mis en évidence une augmentation significative du nombre d'admissions en pédiatrie pour des problèmes d'asthme [27], ainsi qu'un nombre plus élevé d'admissions en hôpital pour des pathologies respiratoires et cardiovasculaires [28]. Enfin, il est important de noter que toutes ces études ne sont focalisées que

sur les pathologies liées aux fortes expositions à courte durée. De nombreuses incertitudes subsistent par rapport à l'effet à plus long terme des nombreuses particules fines, considérées comme les plus nocives, qui s'accumulent dans l'appareil respiratoire.

Le trajet des poussières du Sahara pour atteindre la Guyane étant plus court que pour rejoindre les Caraïbes, les concentrations en poussières dans l'air y sont certainement plus élevées. Depuis le début des mesures à Cayenne, des concentrations journalières en PM_{10} supérieures à 200 µg/m^3 ont déjà été observées. Ces valeurs impliquent très certainement un effet néfaste des poussières du Sahara sur la santé de la population et montrent l'importance d'étendre le réseau de surveillance de la qualité de l'air en Guyane. Il serait également nécessaire d'entreprendre en Guyane une étude de l'impact sur la santé des poussières du Sahara. Pour des résultats plus fiables, cette étude pourrait être réalisée en partenariat avec d'autres régions touchées par les poussières du Sahara à la même période, afin d'élargir l'échantillon de population étudiée. Enfin, dans la mesure où la formation et la diffusion des nuages de poussières sont liées à divers paramètres météorologiques, il est légitime de s'interroger par rapport à l'impact du changement climatique sur les événements de poussières, point qui est abordé dans les paragraphes qui suivent.

6.2. Influence du changement climatique sur la qualité de l'air

A priori, la formation et la diffusion des nuages de poussières dépendent de paramètres météorologiques, en particulier la configuration des vents et le régime des précipitations. La formation des nuages de poussières transportés au-dessus de l'Océan Atlantique se déroule principalement dans l'Ouest du Sahara (Mali, Mauritanie) et au niveau de la dépression de Bodélé [29, 30]. Le trajet des nuages est mieux compris depuis quelques années notamment grâce aux données satellites d' « aerosol index » obtenues à l'aide du « Total Ozone Mapping Spectrometer » plus connu sous le nom TOMS. Une variabilité inter-saisonnière a été mise en évidence en lien avec la position de la ZIC, qui influe effectivement sur la configuration des vents et le régime des précipitations [31, 32].

6.2.1. Départ de poussières du Sahara

Les analyses de la qualité de l'air étant généralement trop récentes pour pouvoir étudier l'influence du changement climatique sur les concentrations en particules, plusieurs études ont été réalisées en se basant sur d'autres paramètres comme des données météorologiques, satellites ou des analyses de sédiments [12]. La plupart de ces travaux se rejoignent sur l'hypothèse que depuis les années 50, les arrivées de poussières du Sahara sont plus importantes, notamment dans les Alpes, en Espagne ou en Israël.

Une unique série de mesure de la quantité de poussières minérales dans l'air a été entamée dès 1965 et est toujours en cours [33]. Celle-ci, détaillée sur la Figure 17, est d'autant plus intéressante qu'elle a été réalisée à Barbade, qui est une île des Caraïbes située relativement proche de la Guyane. Si on ne s'intéresse qu'aux années où il n'y a pas eu d'événement El-Niño majeur, il apparaît que la quantité de poussières mesurée à Barbade a augmenté de 1970 à 1990.

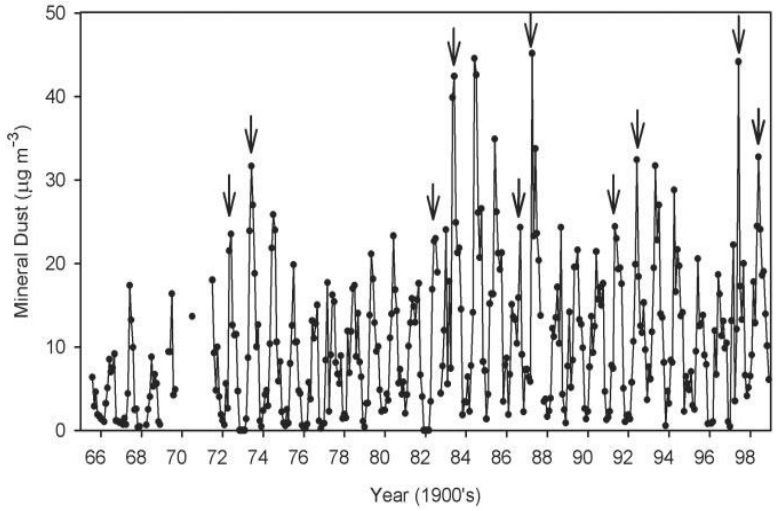


Figure 17 : Moyennes mensuelles des concentrations en poussières dans l'air à Barbade de 1965 à 1998 (les flèches indiquent les années où des événements El-Niño majeurs se sont produits) [33].

De plus, l'auteur met en évidence une corrélation très intéressante entre la quantité de poussières à Barbade et les anomalies de précipitations au Sahel de l'année précédente, présentées Figure 18. Lorsqu'une sécheresse sévit au Sahel, les concentrations en poussières à Barbade l'année suivante sont élevées. Ces résultats sont certainement en lien direct avec la désertification en Afrique de l'Ouest. De 1970 à 1990, cette région a subi une très longue période de sécheresse, qui a conduit à une progression de la surface du désert. L'accroissement de la surface de la source de formation des nuages de poussières explique par la suite la plus grande quantité arrivée à Barbade. Depuis la fin des années 1990, une pluviométrie plus classique est réapparue au Sahel. Pourtant, les concentrations en poussières à Barbade se sont maintenues au niveau de concentration élevée de la fin des années 1990. Ce résultat pourrait s'expliquer par une évolution relativement faible de la surface du désert depuis cette période.

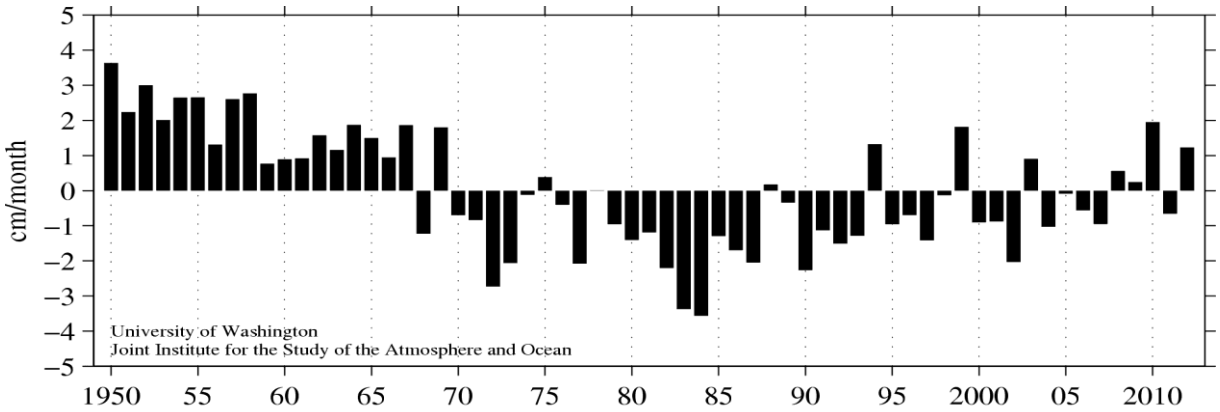


Figure 18 : Anomalies de précipitations (en cm/mois) au Sahel de 1950 à 2012 [34].

En plus de variations au niveau des précipitations, il est possible qu'une évolution de la configuration des vents ait influé sur la formation des nuages de poussières. En effet, les départs de poussières sont généralement associés à de forts vents dans le Sahara [12, 31]. D'après l'IPCC (Panel Intergouvernemental sur le Changement Climatique), les projections prévoient, au niveau des régions constituant les principales sources de poussières, une augmentation de la force des vents en hiver. Par contre, il est plus délicat de prévoir l'évolution des vents pour les autres saisons [35].

6.2.2. Evénements de poussières en Guyane

L'arrivée des nuages de poussières du Sahara varie de manière saisonnière en lien avec la position de la ZIC. Dans un premier temps, la position de la ZIC influe sur les vents et l'humidité en Afrique de

l'Ouest et ainsi sur la formation des nuages de poussières [32]. Une fois constitués, généralement à une latitude plus au nord que celle de la ZIC, les nuages de poussières sont transportés au sein d'une masse d'air sèche appelée SAL (Saharan Air Layer) au-dessus de l'Atlantique par les alizés de nord-est. A partir des analyses effectuées de 2003 à 2011 par l'ORA, la répartition annuelle des nombres de jours où la concentration sur 24 h de PM_{10} excède la valeur seuil correspondant au niveau d'information est illustrée sur la Figure 19. Ces dépassements sont presque exclusivement dus à des arrivées de poussières du Sahara, ce qui peut être vérifié à l'aide d'observations satellites [36]. Il apparaît que, dans près de 95 % des cas, ces événements se déroulent entre janvier et mai. Le même type de répartition avait déjà été observé lors d'une étude antérieure en 1978-1979 [37].

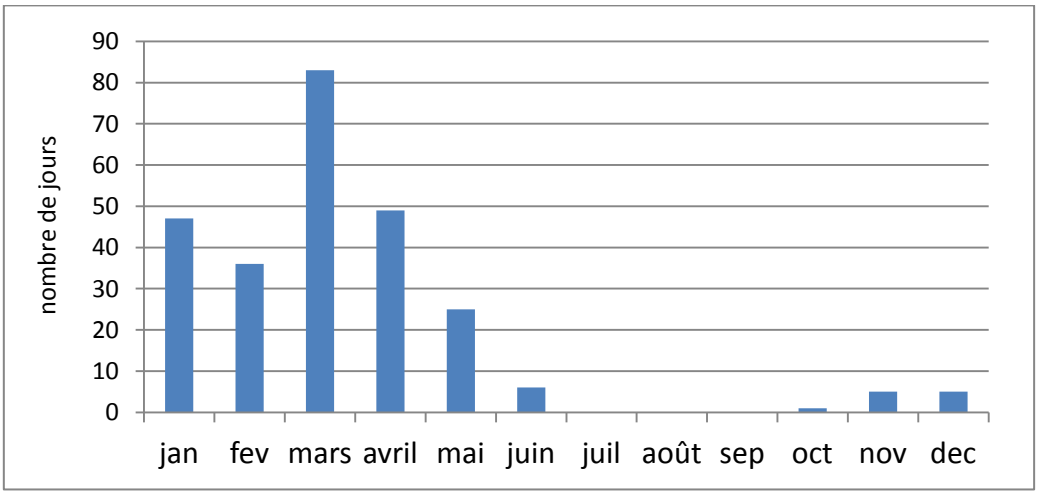


Figure 19 : Total entre 2003 et 2011 du nombre de jours où la concentration sur 24 h de PM_{10} a dépassé le seuil correspondant au niveau d'information (50 µg/m^3).

Au cours de leur trajet, les poussières se maintiennent au sein de la SAL à une latitude plus au nord que celle de la ZIC. Ceci explique que les événements de poussières se produisent en Guyane lorsque la ZIC est située à une latitude proche ou plus au sud de celle de la Guyane. Ainsi, même s'il est bien connu que les fortes précipitations lessivent l'atmosphère, les événements de poussières en Guyane se déroulent principalement de janvier à mai, qui sont parmi les mois les plus pluvieux.

Il est à noter que lors des années El Niño et La Niña, des différences sont observées au niveau de la distribution des jours de poussières. Ces différences viennent du fait que ces phénomènes climatiques conduisent à une forte variabilité de la position de la ZIC. En conséquence, des événements de poussières plus fréquents ont été observés en janvier les années La Niña (par exemple en 2007) et en mai-juin les années El Niño (par exemple en 2002 ou 2009).

L'étude réalisée à Cayenne en 1978-1979 [37] ayant été effectuée avec la même méthodologie et par la même équipe que celle concernant les concentrations de poussières minérales à Barbade [33], il est possible de comparer ces travaux. De 1978 à 1979, alors que les concentrations à Barbade n'atteignent jamais plus de 20 µg/m^3, celles-ci peuvent dépasser 25 µg/m^3 à Cayenne, ce qui peut se justifier par un trajet plus court des nuages de poussières pour arriver en Guyane. Dans la mesure où les nuages de poussières atteignant les Caraïbes et la Guyane ont la même source, il est très probable que les concentrations en poussières désertiques dans ces régions aient subi la même évolution, c'est-à-dire une augmentation de 1970 à 1990, suivie d'une stabilisation aux fortes concentrations du début des années 1990.

6.2.3. Corrélation entre la concentration des particules dans l'air et certains paramètres météorologiques

Parmi les paramètres météorologiques pouvant être corrélés avec la concentration des particules dans l'air, ceux qui ont retenu notre intérêt sont la visibilité, le rayonnement, la vitesse du vent et les précipitations. L'étude de la corrélation avec la visibilité ou le rayonnement a pour but de confirmer, à partir des séries de données de ces paramètres, que les concentrations en poussières ont eu

tendance à augmenter. L'analyse de la corrélation avec la vitesse du vent et les précipitations a pour objectif d'évaluer l'influence de ces paramètres sur les concentrations en poussières. Ainsi, dans le cas où les projections prévoient une évolution de ces paramètres, il sera possible d'estimer la qualité de l'air future.

Les données exploitées sont les moyennes sur 24 h de visibilité (en km par observation humaine), de rayonnement (J/cm^2) et de vitesse du vent (m/s) à Rochambeau, les précipitations quotidiennes (mm) à Rochambeau et Cayenne, et les concentrations en PM_{10} (µg /m^3) à Cayenne. Dans la mesure où la nébulosité influe sur le rayonnement et la visibilité, les observations de ce paramètre (noté sur 10 par observation humaine), réalisées à Rochambeau, ont également été prises en compte. Le test de corrélation a été réalisé à partir de toutes les observations disponibles de 2002 à 2011. L'étude a été réalisée à partir des observations disponibles les plus proches possibles et les corrélations sont répertoriées dans le Tableau 3.

Tableau 3 : Corrélation entre les paramètres météorologiques sélectionnés et les concentrations en particules dans l'air.

	Nébulosité	Visibilité	Rayon-nement	Vitesse du vent	RR Cayenne	RR Roch.	PM_{10}
Nébulosité	1						
Visibilité	-0,45	1					
Rayonnement	-0,79	0,48	1				
Vitesse du vent	-0,05	-0,03	0,11	1			
RR Cayenne	0,42	-0,29	-0,50	-0,17	1		
RR Rochambeau	0,45	-0,33	-0,55	-0,17	0,77	1	
PM_{10}	0,07	-0,21	-0,08	0,51	-0,10	-0,08	1

La proximité de Cayenne et de Rochambeau a pour conséquence une forte corrélation (0,77) au niveau des précipitations observées au niveau de ces 2 stations. Ce résultat justifie la possibilité de rechercher des corrélations entre les paramètres étudiés, même si les observations n'ont pas été réalisées au même endroit. En ce qui concerne les paramètres météorologiques, il est logique de constater que la nébulosité est corrélée négativement avec la visibilité et le rayonnement et positivement avec les précipitations au niveau des 2 stations. Peu de corrélations apparaissent entre les concentrations en particules et les paramètres météorologiques. La plus forte, avec la vitesse du vent, peut s'expliquer par le fait qu'un vent fort provoque une concentration plus élevée de particules marines à Cayenne. Pour des résultats plus spécifiques aux poussières de Sahara, nous avons étudié les mêmes corrélations les jours d'événements de poussières (PM_{10} > 50 µg/m^3). La visibilité et le rayonnement étant plus corrélés à la nébulosité (respectivement -0,45 et -0,79) qu'aux concentrations en particules (respectivement -0,21 et -0,08), nous nous sommes restreints aux jours de faible nébulosité (≤ 6). Les corrélations obtenues sont présentées dans le Tableau 4.

Tableau 4 : Corrélation entre les paramètres météorologiques sélectionnés et les concentrations en particules dans l'air les jours d'événements de poussières (PM_{10} > 50 µg/m^3) et de faible nébulosité (≤ 6).

	Nébulosité	Visibilité	Rayon-nement	Vitesse du vent	RR Cayenne	RR Roch.	PM_{10}
Nébulosité	1						
Visibilité	-0,11	1					
Rayonnement	-0,56	0,25	1				
Vitesse du vent	0,21	-0,15	-0,25	1			
RR Cayenne	0,17	-0,03	-0,22	-0,05	1		
RR Rochambeau	0,23	-0,06	-0,29	-0,08	0,83	1	
PM_{10}	0,12	-0,50	-0,15	0,13	-0,09	-0,05	1

Les valeurs négatives observées entre la concentration en particules et la visibilité (-0,50) ou le rayonnement (-0,15) confirment que les poussières limitent ces paramètres. Cependant, ces corrélations ne sont pas assez marquées pour estimer une tendance par rapport à l'évolution des concentrations en poussières dans l'air, en se basant sur les séries d'observation de visibilité ou de rayonnement de ces 30 dernières années. Avec les conditions sélectionnées, la corrélation entre la concentration en particules et la vitesse du vent a diminué, ce qui pourrait être due à une plus forte dispersion des poussières désertiques dans le cas de vent fort. Enfin, la corrélation entre les concentrations en particules et les précipitations est presque nulle. Dans la mesure où il est bien admis que des fortes précipitations lessivent l'atmosphère, nous avons étudié plus précisément l'influence des différents types de précipitations sur les concentrations en particules dans l'air.

Pour cela, l'étude a été restreinte à janvier-avril, la période d'arrivée de poussières. Les paramètres définis pour la recherche de corrélation sont le nombre de jours où la concentration en poussières dépasse le seuil d'information (PM_{10} > 50 µg/m^3) appelé par la suite nombre d'événements, le nombre de jours avec des précipitations comprises entre des valeurs seuils X et Y (en mm) et le cumul de précipitations (en mm) des jours pour lesquels les précipitations sont comprises entre des valeurs seuils X et Y. Les résultats sont présentés dans le Tableau 5.

Tableau 5 : Corrélations entre le nombre d'événements de poussières et les précipitations sur la période janvier-avril.

	Nombre de jours de précipitations							
	RR=0	0<RR<1	1≤RR<2	2≤RR<5	5≤RR<10	10≤RR<20	20≤RR<50	RR≥50
Nombre d'événements de poussières	0,34	0,76	0,38	-0,30	0,29	-0,79	-0,37	-0,50

	Cumul de précipitations						
	0<RR<1	1≤RR<2	2≤RR<5	5≤RR<10	10≤RR<20	20≤RR<50	RR≥50
Nombre d'événements de poussières	0,83	0,45	-0,23	0,28	-0,79	-0,26	-0,52

Des corrélations négatives dont une très forte (-0,79) sont observées entre le nombre d'événements et le nombre de jours de précipitations supérieures à 10 mm, ce qui suggère qu'une pluie quotidienne de 10 mm permettrait de lessiver une atmosphère chargée en poussières. Un jour de précipitation nulle, la concentration en particules de l'air peut être faible ou élevée, car elle dépend d'une éventuelle arrivée de poussières, d'où la faible corrélation entre le nombre d'événements et le nombre de jours sans pluie (RR=0). Par contre, il est très intéressant de constater qu'il existe une corrélation entre le nombre d'événements et le cumul de précipitations des jours de pluies comprises entre 0 et 2 mm, particulièrement forte (0,83) dans le cas des pluies comprises entre 0 et 1 mm. Ce résultat pourrait s'expliquer cette fois par une influence des poussières sur les précipitations. En effet, il est connu que les gouttes de pluie se forment sur des aérosols qui servent de noyaux de condensation. Une forte concentration en poussières ayant pour conséquence un plus grand nombre de noyaux de condensation, il est possible que les poussières du Sahara influent sur le régime des précipitations [38, 39].

Une étude plus approfondie, au jour le jour, serait intéressante pour confirmer les hypothèses qu'une pluie de 10 mm suffise à lessiver l'atmosphère et que les arrivées de poussières soient reliées à de très faibles précipitations.

6.3. Bilan et influence du changement climatique sur l'évolution de la qualité de l'air

Le principal polluant de l'air en Guyane étant les particules du Sahara, dont la toxicité a été démontrée, cette étude a porté un intérêt particulier à l'occurrence des événements de poussières désertiques. Les premières études réalisées dans différents pays se rejoignent sur le fait que les concentrations en poussières ont augmenté, en particulier lors de la période 1970-1990 et que, depuis, ces mêmes concentrations se maintiennent aux valeurs élevées de la fin des années 1980 [33]. Cette évolution est principalement attribuée à la désertification en Afrique de l'Ouest. La forte sécheresse qui a frappé cette région a conduit à une progression du désert de 1970 à 1990, donc à une source de poussières plus vaste. Depuis, la pluviométrie est redevenue plus classique, mais cela ne suffit certainement pas à compenser les effets de la sécheresse ou alors à plus long terme.

Une forte influence de la température de surface de l'Océane Atlantique sur la pluviométrie en Afrique de l'Ouest explique la sécheresse en Afrique de l'Ouest [40, 41]. Comme expliqué précédemment, les valeurs extrêmement faibles de l'indice AMO de 1970 à 1990 sont à associer à une position plus au sud de la ZIC et par conséquent à une pluviométrie plus faible en Afrique de l'Ouest. Si l'influence anthropique sur le AMO reste à démontrer, par contre il paraît clair que le réchauffement climatique a certainement contribué à amplifier le phénomène de désertification en Afrique et ainsi à la production de nuages de poussières.

7. BILAN ET INFLUENCE DU CHANGEMENT CLIMATIQUE SUR LES EVOLUTIONS OBSERVEES

Au contraire de la température qui augmente de façon presque continue depuis une cinquantaine d'années en Guyane, aucune tendance significative n'est observée au niveau des précipitations moyennes. Aucune évolution significative des événements extrêmes n'a également été détectée. Les principales particularités sont attribuées à un léger décalage des saisons entre 1970 et 1990, dû à une position particulièrement au sud de la ZIC. Cette position est fortement liée à l'indice AMO dont les cycles de 20 à 40 ans existent depuis plusieurs centaines d'années, c'est-à-dire bien avant l'apparition de l'influence anthropique sur le climat. Les variations en lien avec le AMO se produisant sur une période de 20 ans en plein milieu de notre période d'étude d'environ 50 ans, il est possible que d'autres variations climatiques d'influence anthropique aient été masquées, car plus faibles. Ainsi, suite à la validation de l'homogénéisation des observations de 2005 à 2012, des résultats plus précis sont à attendre. Cependant, en raison de l'éloignement de certains postes, il est nécessaire de rappeler la difficulté d'homogénéiser des données en Guyane. Il est à noter qu'une étude préliminaire réalisée à partir des données non homogénéisées de 1955 à 2012 (résultats non présentés) a montré des évolutions dont la significativité est légèrement plus forte et parfois similaires sur un nombre important de stations. Aussi, il est important de préciser qu'une absence d'évolution au niveau des précipitations, accompagnée d'une augmentation de la température, risque de conduire à des sécheresses plus marquées.

Malgré un intérêt plus récent, des évolutions plus nettes semblent se dégager en ce qui concerne la qualité de l'air. La désertification en Afrique de l'Ouest de 1970 à 1990 a conduit à une augmentation des concentrations en poussières traversant l'Océan Atlantique. Si cette désertification est en lien avec la position de la ZIC, le réchauffement climatique a certainement également eu un impact et risque de compliquer le reverdissement de l'Afrique de l'Ouest.

Sur la période pour laquelle les concentrations en particules dans l'air de Guyane sont disponibles (2002-2011), une corrélation intéressante entre la fréquence des événements de poussières et celle des faibles précipitations (< 2 mm) a été mise en évidence. Le rapprochement entre ce résultat et l'augmentation du nombre de jours de faibles précipitations (1-5 mm) sur la période 1970-1990

pourrait indiquer que la désertification en Afrique de l'Ouest a conduit à une augmentation des concentrations en poussières atteignant la Guyane, qui ont-elles-mêmes provoqué une fréquence plus importante de jours de faible pluviométrie. Ainsi, il est probable que le nombre de jours de précipitations inférieures à 1 mm ait également augmenté. Cependant, il faut noter que cette hypothèse n'est pas vérifiable, car il n'est pas possible d'étudier de manière précise les précipitations inférieures à 1 mm, du fait d'une différence de traitement des données avant 1990. En effet, sur cette période, lorsqu'une observation inférieure à 1 mm était attribuée à de la rosée, la valeur répertoriée était 0, tandis que plus récemment, toutes les observations inférieures à 1 mm sont prises en compte. Les observations futures seront donc nécessaires pour conforter cette hypothèse.

Enfin, à partir des modèles de projections, dont la précision ne cesse de croître, l'étude de l'évolution des températures, des précipitations et de la configuration des vents devraient permettre de mieux anticiper les évolutions futures [42, 43].

8. REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

1. Direction Interrégionale Antilles-Guyane, M.-F., *Changement climatique en Guyane : état des connaissances*. 2012, Météo-France.

2. GIEC, *Bilan 2007 des changements climatiques*, 2008. Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat, http://www.ipcc.ch/pdf/assessment-report

3. Lecompte, P., M. Moisan, N. Brehm, et al., *A propos de l'impact du changement climatique en Guyane*. 2011, BRGM. p. 53.

4. Klein Tank, A.M.G., F.W. Zwiers, and X. Zhang, *Guidelines on analysis of extremes in a changing climate in support of informed decisions for adaptation*. 2009, World Meteorological Association.

5. Héritier, P., *Le climat guyanais*. 2011, Météo-France.

6. Mc Kee, T.B., N.J. Doesken, and J. Kleist, *The relationship of drought frequency and duration to time scales*, in *Eigth Conference on Applied Climatology*. 1993: Anaheim, California.

7. Wang, C., S. Dong, A.T. Evan, et al., *Multidecadal Covariability of North Atlantic Sea Surface Temperature, African Dust, Sahel Rainfall, and Atlantic Hurricanes.* Journal of Climate, 2012. 25(15): p. 5404-5415.

8. NOAA, *AMO (Atlantic Multidecadal Oscillation) Index*, 2005. National Oceanic and atmospheric administration, http://www.esrl.noaa.gov/psd/data/timeseries/AMO/

9. Enfield, D.B., A.M. Mestas-Nuñez, and P.J. Trimble, *The Atlantic Multidecadal Oscillation and its relation to rainfall and river flows in the continental U.S.* Geophysical Research Letters, 2001. 28(10): p. 2077-2080.

10. Enfield, D.B. and L. Cid-Serrano, *Secular and multidecadal warmings in the North Atlantic and their relationships with major hurricane activity.* International Journal of Climatology, 2010. 30(2): p. 174-184.

11. Momas, I. and G. Bergametti, *Processus et enjeux sanitaires des particules.* Pollution atmosphérique, 2012: p. 7.

12. Goudie, A.S. and N.J. Middleton, *Saharan dust storms: nature and consequences.* Earth-Science Reviews, 2001. 56: p. 179-204.

13. Koren, I., Y.J. Kaufman, R. Washington, et al., *The Bodélé depression: a single spot in the Sahara that provides most of the mineral dust to the Amazon forest.* Environmental Research Letters, 2006. 1(1).

14. Villenave, E., G. Aymoz, and M. Beekmann, *La pollution de l'air par les particules : des connaissances scientifiques au service des acteurs.* Pollution atmosphérique, 2012: p. 10-16.

15. Chanel, O., *L'évaluation monétaire des effets sanitaires associés à la pollution atmosphérique.* Pollution atmosphérique, 2012: p. 80-83.

16. Castillo, S., T. Moreno, X. Querol, et al., *Trace element variation in size-fractionated African desert dusts.* Journal of Arid Environments, 2008. 72(6): p. 1034-1045.

17. Rodriguez, S., A. Alastuey, and X. Querol, *A review of methods for long term in situ characterization of aerosol dust.* Aeolian Research, 2012. 6: p. 55-74.

18. Alastuey, A., X. Querol, S. Castillo, et al., *Characterisation of TSP and PM2.5 at Izana and Sta. Cruz de Tenerife (Canary Islands, Spain) during a Saharan Dust Episode (July 2002).* Atmospheric Environment, 2005. 39(26): p. 4715-4728.

19. Gyan, K., W. Henry, S. Lacaille, et al., *African dust clouds are associated with increased paediatric asthma accident and emergency admissions on the Caribbean island of Trinidad.* International Journal of Biometeorology, 2005. 49(6): p. 371-376.

20. Worobiec, A., I. SzalÃ³ki, J. OsÃ¡n, et al., *Characterisation of Amazon Basin aerosols at the individual particle level by X-ray microanalytical techniques.* Atmospheric Environment, 2007. 41(39): p. 9217-9230.

21. Longueville, F., P. Ozer, S. Doumbia, et al., *Desert dust impacts on human health: an alarming worldwide reality and a need for studies in West Africa.* International Journal of Biometeorology, 2013. 57(1): p. 1-19.

22. Karanasiou, A., N. Moreno, T. Moreno, et al., *Health effects from Sahara dust episodes in Europe: Literature review and research gaps.* Environment International, 2012. 47: p. 107-114.

23. Lindén, J., J. Boman, B. Holmer, et al., *Intra-urban air pollution in a rapidly growing Sahelian city.* Environment International, 2012. 40: p. 51-62.

24. Val, S., C. Liousse, E. Doumbia, et al., *Physico-chemical characterization of African urban aerosols (Bamako in Mali and Dakar in Senegal) and their toxic effects in human bronchial epithelial cells: description of a worrying situation.* Particle and Fibre Toxicology, 2013. 10(1): p. 10.

25. Dieme, D., M. Cabral-Ndior, G. Garçon, et al., *Relationship between physicochemical characterization and toxicity of fine particulate matter (PM2.5) collected in Dakar city (Senegal).* Environmental Research, 2012. 113(0): p. 1-13.

26. Lopez-Villarrubia, E., F. Ballester, C. Iniguez, et al., *Air pollution and mortality in the Canary Islands: a time-series analysis.* Environmental Health C7 - 8, 2010. 9(1): p. 1-11.

27. Monteil, M.A., *Saharan dust clouds and human health in the English-speaking Caribbean: what we know and do not know.* Environmental Geochemistry and Health, 2008. 30(4): p. 339-343.

28. Blateau, A., D. Bouopda, A. Le Tertre, et al., *Effets sanitaires des brumes de sable désertique à la Martinique, 2001-2006.* Bulletin de Veille Sanitaire, 2012. 3: p. 11-15.

29. Prospero, J.M., P. Ginoux, O. Torres, et al., *ENVIRONMENTAL CHARACTERIZATION OF GLOBAL SOURCES OF ATMOSPHERIC SOIL DUST IDENTIFIED WITH THE NIMBUS 7 TOTAL OZONE MAPPING SPECTROMETER (TOMS) ABSORBING AEROSOL PRODUCT.* Reviews of Geophysics, 2002. 40(1): p. 1002.

30. Washington, R., M. Todd, N.J. Middleton, et al., *Dust-Storm Source Areas Determined by the Total Ozone Monitoring Spectrometer and Surface Observations.* Annals of the Association of American Geographers, 2002. 93(2): p. 297-313.

31. Nakamae, K. and M. Shiotani, *Interannual variability in Saharan dust over the North Atlantic Ocean and its relation to meteorological fields during northern winter.* Atmospheric Research, 2013. 122: p. 336-346.

32. Engelstaedter, S., I. Tegen, and R. Washington, *North African dust emissions and transport.* Earth-Science Reviews, 2006. 79: p. 73-100.

33. Prospero, J.M. and P.J. Lamb, *African Droughts and Dust Transport to the Caribbean: Climate Change Implications.* Science, 2003. 302(5647): p. 1024-1027.

34. JISAO, *Sahel rainfall index*, 2012. University of Washington, jisao.washington.edu/data_sets/sahel/

35. Field, C.B., B. V., T.F. Stocker, et al., *Managing the Risks of Extreme Events and Disasters to Advance Climate Change Adaptation*. 2012, Intergovernmental Panel on Climate Change: Cambridge. p. 582.

36. NASA, *NASA's Earth Observatory System Data and Information System*, http://lance-modis.eosdis.nasa.gov/cgi-bin/imagery/realtime.cgi

37. Prospero, J.M., R.A. Glaccum, and R.T. Nees, *Atmospheric transport of soil dust from Africa to South America.* Nature, 1981. 289: p. 570-572.

38. Martin, S.T., M.O. Andreae, P. Artaxo, et al., *Sources and properties of Amazonian aerosol particles.* Reviews of Geophysics, 2010. 48(2): p. RG2002.

39. Posfai, M., D. Axisa, E. Tompa, et al., *Interactions of mineral dust with pollution and clouds: An individual-particle TEM study of atmospheric aerosol from Saudi Arabia.* Atmospheric Research, 2013. 122: p. 347-361.

40. Lodoun, T., A. Giannini, P. Sibiry Traoré, et al., *Changes in seasonal descriptors of precipitation in Burkina Faso associated with late 20th century drought and recovery in West Africa.* Environmental Development, 2012.

41. Shanahan, T.M., J.T. Overpeck, K.J. Anchukaitis, et al., *Atlantic Forcing of Persistent Drought in West Africa.* Science, 2009. 324(5925): p. 377-380.

42. Lacressonière, G., V.H. Peuch, J. Arteta, et al., *How realistic are air quality hindcasts driven by forcings from climate model simulations?* Geosci. Model Dev. Discuss., 2012. 5: p. 2083-2138.

43. Yuval, D.M. Broday, and P. Alpert, *Exploring the applicability of future air quality predictions based on synoptic system forecasts.* Environmental Pollution, 2012. 166: p. 65-74.

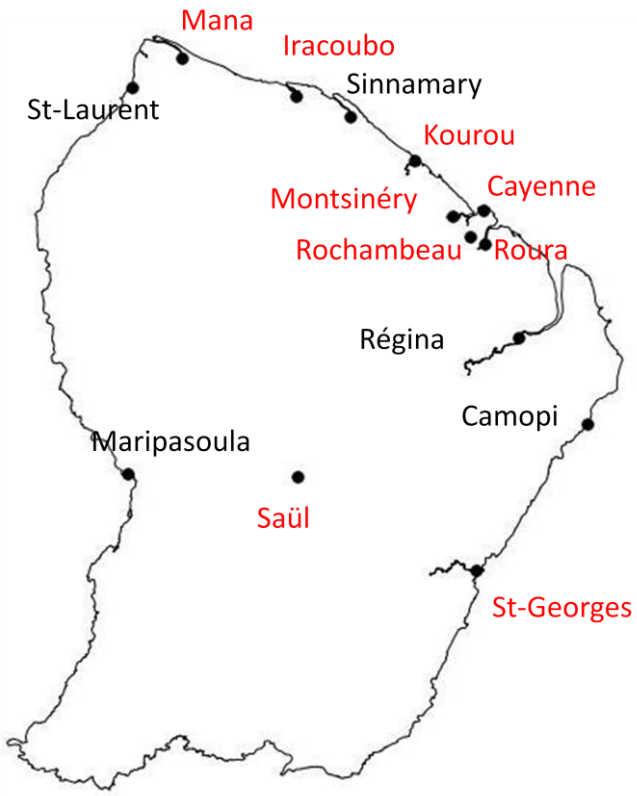
9. LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1 : Moyennes des précipitations annuelles sur les 14 stations étudiées 7
Tableau 2 : Evolution sur 50 ans du nombre de jours avec des précipitations comprises entre des valeurs seuils (en mm) et de la moyenne de précipitation les jours de pluie significative (les variations sont indiquées quand la valeur de p est inférieure ou égale à 0,30 et surlignées pour des valeurs de p inférieures ou égales à 0,05). 14
Tableau 3 : Corrélation entre les paramètres météorologiques sélectionnés et les concentrations en particules dans l'air. 22
Tableau 4 : Corrélation entre les paramètres météorologiques sélectionnés et les concentrations en particules dans l'air les jours d'événements de poussières (PM_{10} > 50 µg/m^3) et de faible nébulosité (≤ 6)..... 22
Tableau 5 : Corrélations entre le nombre d'événements de poussières et les précipitations sur la période janvier-avril. 23

10. LISTE DES FIGURES

Figure 1 : Evolution (en %) des précipitations annuelles en Guyane sur la période 1955 – 2004. 8
Figure 2 : Evolution du SPI, calculé sur une période de référence de 12 mois, de 1955 à 2004 à la station de Rochambeau..... 8
Figure 3 : Evolution (en %) des précipitations lors de la saison sèche sur la période 1955 – 2004. 9
Figure 4 : Evolution du SPI calculé sur la saison sèche pour la station de Saint-Laurent..... 9
Figure 5 : Moyenne sur 5 ans des précipitations à Rochambeau au cours de la saison sèche. 10
Figure 6 : Evolution (en %) des précipitations lors de la saison des pluies sur la période 1955 – 2004. 10
Figure 7 : Evolution du SPI calculé sur la saison des pluies pour la station de Saint-Laurent. 11
Figure 8 : Cumul par période de 5 ans du nombre de mois de sécheresse sur l'ensemble des stations (à partir du calcul du SPI sur une période de 1 mois). 11
Figure 9 : Cumul par période de 5 ans du nombre de mois anormalement humides sur l'ensemble des stations (à partir du calcul du SPI sur une période de 1 mois)..... 12
Figure 10 : Cumul par période de 5 ans du nombre de mois extrêmement secs ou humides (SPI < - 2 ou SPI > 2)..... 12
Figure 11 : Evolution du SPI calculé sur 1 mois pour le mois de décembre pour la station de Cayenne 13
Figure 12 : Evolution du SPI calculé sur 1 mois pour le mois d'août pour la station de Cayenne 13
Figure 13 : Evolution sur 50 ans du nombre de jours de pluie significative (les valeurs entourées de rouge sont celles pour lesquelles les résultats sont statistiquement significatifs). 14
Figure 14 : Evolution du nombre de jours de précipitations comprises entre 1 et 5 mm entre janvier et mai..... 15
Figure 15 : Evolution de l'indice AMO de 1860 à 1990 [9]..... 16
Figure 16 : Schéma de l'appareil respiratoire. 17
Figure 17 : Moyennes mensuelles des concentrations en poussières dans l'air à Barbade de 1965 à 1998 (les flèches indiquent les années où des événements El-Niño majeurs se sont produits) [33]... 20
Figure 18 : Anomalies de précipitations (en cm/mois) au Sahel de 1950 à 2012 [34]..... 20
Figure 19 : Total entre 2003 et 2011 du nombre de jours où la concentration sur 24 h de PM_{10} a dépassé le seuil correspondant au niveau d'information (50 µg/m^3)..... 21

11. ANNEXES



Annexe 1 : Répartition des 14 stations sélectionnées pour l'étude de l'évolution des précipitations. En ce qui concerne l'analyse des données mensuelles, les séries de données homogénéisées des 14 stations ont été exploitées. Pour l'analyse des données quotidiennes, les séries de données utilisées sont celles pour lesquelles les ruptures sont les plus faibles lors du processus d'homogénéisation. Ces stations sont indiquées en rouge sur la carte.

	Juillet		Août		Sept.		Octob.		Novem.		Decem.		Janvier		Fevrier		Mars		Avril		Mai		Juin	
	%	p	%	p	%	p	%	p	%	p	%	p	%	p	%	p	%	p	%	p	%	p	%	p
Maripasoula			29,1	0,18							-31,4	0,07												
Saül	23,6	0,15					31,5	0,19			-19,0	0,28												
Camopi			-25,0	0,16	-44,8	0,28	37,9	0,26											17,3	0,29				
St-Georges											-34,2	0,06									19,2	0,17		
Régina	-20,4	0,16															-31,2	0,26			21,8	0,17		
Roura			-27,1	0,11	31,4	0,21									-34,0	0,28								
Rochambeau					45,5	0,19																		
Cayenne											-37,6	0,13												
Montsinéry																			36,7	0,22				
Kourou					-55,0	0,25					-42,2	0,13												
Sinnamary			37,5	0,21							-29,0	0,19												
Iracoubo	-21,3	0,26															-41,3	0,18					28,8	0,13
Mana															-34,3	0,21								
St-Laurent																	-45,8	0,16	38,7	0,22	15,2	0,30		

Annexe 2 : Evolution des précipitations mensuelles pour 14 stations de Guyane. Pour chaque mois, la première colonne précise la tendance sur 50 ans et la deuxième colonne, la valeur de p du test de Mann-Kendall. Les valeurs surlignées en jaune sont celles pour lesquelles la valeur de p est inférieure à 0,10.