

# Données SIEREM et TRMM 3b42 v7 : une association possible pour l'étude des précipitations en région équatoriale sur une période récente?

Valentin Brice EBODE<sup>\*</sup>, Jean Guy DZANA, Joseph Armathé AMOUGOU et Romain Armand Soleil BATHA

<sup>1</sup> Université de Yaoundé 1, Faculté des Arts Lettres et Sciences Humaines, Département de Géographie, BP 755, Yaoundé, Cameroun

\* Correspondance, courriel : *ebodebriso@gmail.com* 

# Résumé

Cet article est consacré à la vérification d'une possible association entre les pluies SIEREM (Système d'Informations Environnementales sur les Ressources en Eau et leur Modélisation) et TRMM (Tropical Rainfall Measuring Mission) pour l'étude des précipitations en région équatoriale sur une période récente. Pour cela, la fiabilité de chacune de ces sources de données a d'abord été évaluée. Les données SIEREM ont été évaluées en comparant les valeurs des pluies de chacun des 12 postes retenus à celle de la maille correspondante sur les périodes 1950-1999, et ce, aux pas de temps mensuel et annuel. Au pas de temps mensuel, les coefficients de corrélation obtenus oscillent généralement autour de 0,9. Cela confirme une très bonne relation linéaire entre les variables comparées. Les écarts entre elles sont aussi faibles, au regard des valeurs du biais, du Root Mean Square Error (RMSE) et de l'indice de Nash. A l'échelle annuelle, les régressions montrent des évolutions globalement similaires et les écarts moyens calculés sont négligeables dans la majorité des cas. L'évaluation des données TRMM a été faite à l'échelle stationnelle comme dans le cas précédent et dans les limites de trois bassins équatoriaux (Ntem, Nyong et Kienké) au moyen d'une comparaison avec les données SIEREM. A l'échelle stationnelle et au pas de temps journalier, les résultats montrent une différence importante entre les données TRMM et stationnelles, avec des coefficients de corrélation inférieurs à 0,5 et des indices de Nash négatifs aux six stations étudiées. A l'échelle mensuelle et annuelle, les données TRMM et stationnelles montrent une concordance nettement meilleure, malgré une sous-estimation des pluies TRMM en zones escarpée et côtière. A ce pas de temps, les coefficients de corrélation obtenus oscillent entre 0,69 et 0,81 sur l'ensemble des sites étudiés. Au pas de temps annuel, on note des tendances évolutives similaires entre les deux jeux de données à la plupart des stations. Dans les limites des bassins étudiés, les données SIEREM et TRMM montrent de bonnes relations linéaires, mais des écarts importants dans le cas de certains mois pour lesquels il a été nécessaire d'apporter des corrections. Les facteurs correctifs établis pour ces mois améliorent de façon considérable la proximité entre les deux jeux de données comparés. Les évolutions notées à partir des séries de pluies ajustées concordent avec celles des écoulements des collecteurs principaux de ces bassins. Ces résultats peuvent permettre à la communauté scientifique d'avancer considérablement dans la compréhension de la pluviométrie de la région équatoriale, déjà suffisamment complexe.

Mots clés : évaluation, précipitation, SIEREM, TRMM, région équatoriale.

### Abstract

# SIEREM and TRMM 3b42 v7 data : a possible association for the study of precipitation in the equatorial region over a recent period?

This article is devoted to the verification of a possible association between SIEREM (Environmental Informations System on Water Resources and Their Modeling) and TRMM (Tropical Rainfall Measuring Mission) rainfall for the study of precipitation in the equatorial region on a recent period. For this, the reliability of each of these data sources was first assessed. The SIEREM data were evaluated by comparing the rainfall values of each of the 12 stations selected with that of the corresponding grid over the period 1950-1999, at monthly and annual time steps. At the monthly time step, the correlation coefficients obtained generally oscillate around 0.9. This confirms a very good linear relationship between the compared variables. The differences between them are also slight, concerning the values of the bias, the RMSE and the Nash index. On annual scale, the regressions show broadly similar trends and the average deviations calculated are nealiaible in the majority of cases. The evaluation of the TRMM data was made at the stationary scale as in the previous case and within the limits of three equatorial watersheds (Ntem, Nyong and Kienke) using a comparison with the SIEREM data. At the stationary scale and at the daily time step, the results show a significant difference between the TRMM and stationary data, with correlation coefficients less than 0.5 and negative Nash index at the six stations studied. On monthly and annual scale, TRMM and stationary data show a much better agreement, compared to what is observed on daily scale, despite an underestimation of TRMM rainfall in rugged and coastal areas. At this time step, the correlation coefficients obtained oscillate between 0.69 and 0.81 on all the sites studied. At the annual time step, there are similar evolutionary trends between the two datasets at most of the stations. Within the limits of the watersheds studied, the SIEREM and TRMM data show good linear relationships, but significant deviations in the case of certain months for which it was necessary to make corrections. The corrective factors established for these months considerably improve the proximity between the two compared datasets. The changes noted from the adjusted rainfall series are also consistent with those of the flows from the main collectors of these watersheds. These results may allow the scientific community to make considerable progress in understanding the pluviometry of the equatorial region, which is already sufficiently complex.

Keywords : evaluation, rainfall, SIEREM, TRMM, equatorial area.

# 1. Introduction

L'étude de la pluviométrie dans les régions tropicales fait face au problème de l'insuffisance des données, due à des réseaux de stations peu denses, et à de nombreuses lacunes dans les séries historiques [1, 2]. Et pourtant, dans le contexte du changement global actuel, il est très important de pouvoir caractériser la variabilité spatio-temporelle des précipitations sur la base des données fiables, afin d'évaluer correctement son impact sur les ressources naturelles (eau, végétation, etc.). La qualité des données pluviométriques utilisées s'avère d'une très grande importance pour de telles opérations. Dans cette optique, le Laboratoire HydroSciences Montpellier-HSM a élaboré pour l'Afrique, une base de données de pluies mensuelles à partir d'un fond de données pluviométriques africaines, hérité entre autres de l'Office de la Recherche Scientifique et Technique Outre-Mer (ORSTOM), et de son expérience en gestion des bases de données hydroclimatiques en zone intertropicale. Il s'agit des grilles de données permettant de diffuser les données pluviométriques élaborées au demi-degré carré. Les grilles de pluies mensuelles dont il s'agit ont plusieurs fois été évaluées au moyen des comparaisons à celles mises à disposition par la « Climate Research Unit » de l'Université de « East Anglia », ou encore celle du Global Historical Climatology Network (GHCN). Il ressort de ces comparaisons que, les grilles SIEREM sont calculées à partir d'un plus grand nombre de points de mesures, et donnent de meilleurs résultats lorsqu'elles sont utilisées en entrée des modèles pluie-débit [3]. Comparativement à d'autres sources de données souvent utilisées pour ces comparaisons, il ressort également que la grille du CRU est la plus proche de celle du SIEREM [4-6], même si des différences peuvent être relevées entre elles en Afrique du nord et de l'est, au Sahel et au sud-ouest de la côte africaine [7]. Les grilles de pluies SIEREM ont été utilisées dans certaines études régionales traitant des changements climatiques [8, 9] et de leur impact sur les régimes hydrologiques en Afrique de l'Ouest [3]. Elles représentent à cet effet une bonne alternative pour l'étude des précipitations dans la région. Il convient cependant de les compléter après 1999, et pourtant, de longues séries chronologiques sont souvent limitées et peu disponibles ces dernières années. Cette insuffisance de données fiables et continues est encore plus marquée en Afrique centrale [10]. Le réseau actif ne comprend plus que 35 stations en RDC (soit 1 station pour 67 000 km<sup>2</sup>), 22 au Cameroun et moins de 20 pour l'ensemble Gabon, Congo et RCA [10]. Les recherches traitant directement de l'impact du climat sur les ressources naturelles, au rang desquelles l'eau, sont à peine émergentes dans cette partie de l'Afrique après les années 2000, malgré leur importance pour une gestion durable et efficace de ces ressources. Cela tient en grande partie à la rareté et à la difficulté d'accès aux données *in situ* sus-évoquée. Face à ce manque considérable de données difficilement remédiable à court et à moyen terme, une solution envisageable pour tenter d'appréhender la pluviométrie de la région est de recourir aux estimations satellitaires. Obtenues via différentes méthodologies, elles présentent plusieurs avantages et inconvénients [11 - 13]. Certains problèmes récurrents sont répertoriés dans la littérature s'agissant des données satellitales.

Tout d'abord, il est observé dans ces dernières de nombreuses sources d'erreurs qui sont dues à des problèmes techniques (avaries, problèmes de précision...) ou à la transformation des signaux des différents capteurs [14]. On note aussi, un autre problème ayant trait à la topographie de la région étudiée, c'est celui de la mauvaise estimation des pluies dans les zones escarpées. Ces régions sont généralement sujettes à une forte fluctuation des pluies en fonction du relief [15], et il est possible que les données satellitales aient du mal à bien représenter cette variabilité. De plus, les micro-ondes et infrarouges ont des problèmes d'adaptation aux reliefs, cela engendre des erreurs qui doivent être corrigées avec des valeurs interpolées généralement sous-estimées [16]. Malgré cela, les satellites fournissent des informations importantes comparées aux données ponctuelles (pluviomètres). Ils permettent d'obtenir une répartition spatiale des pluies, et donc de pouvoir connaître la variabilité des précipitations dans l'espace et le temps à des échelles fines. Ce qui, dans une région comme celle d'Afrique centrale, avec une faible densité de pluviomètres et des relevés pluviométriques parfois peu fiables, est un atout important. Parmi les différentes estimations existantes, les données issues du spectroradiomètre TRMM sont particulièrement intéressantes car elles ont été spécialement conçues pour fournir des informations dans les régions tropicales où tombent près des deux tiers des précipitations globales [17]. Il a d'ailleurs été postulé qu'elles sont l'une des données de pluies satellitaires se rapprochant le plus des observations en région équatoriale [18]. De plus, ces données ont fait l'objet d'un grand usage dans d'autres régions du monde dans les domaines variés comme la modélisation hydrologique ou encore l'estimation de l'humidité du sol pour déterminer les caractéristiques de la végétation [19, 20]. Cette étude a non seulement pour objectif d'éliminer les doutes potentiels qui subsisteraient quant à l'usage des données SIEREM et TRMM, mais aussi de vérifier s'il est possible de les associer pour l'étude de la pluviométrie sur une période récente en région équatoriale. Dans cette perspective, la proximité de ces deux jeux de données aux observations ponctuelles est d'abord évaluée. Après quoi, l'on procède à la vérification d'une possible association entre les deux sources de données, afin d'obtenir les séries de pluies actualisées et fiables permettant d'étudier l'évolution des précipitations dans cette région.

### 2. Matériel et méthodes

#### 2-1. Cadre d'étude

La fenêtre d'évaluation des données considérée dans cette étude s'étend de 1°8' à 5°42' de latitude Nord et de 9°7' à 13°44' de longitude Est *(Figure 1)*. Intégralement comprise en milieu équatorial camerounais, cet espace a une topographie marquée de l'Est à l'Ouest par trois principales unités de relief. Dans ses parties médiane et Est, se trouve une unité correspondant au grand plateau Sud-camerounais dont l'altitude varie entre 364 et 981 m. Au Sud-Ouest, on a l'unité la plus basse. Elle correspond à la plaine côtière et son altitude oscille entre 0 et 363 m. L'unité la plus élevée est située au Nord-Ouest. Elle correspond aux hautes terres de l'Ouest et son altitude est comprise entre 982 et 4029 m. Dans cette région relativement accidenté du point de vue du relief, règne un climat caractérisé par des contrastes pluviométriques relativement importants, liés d'une part au relief, et d'autre part à la proximité avec l'océan Atlantique. Les différences pluviométriques s'organisent ainsi selon un gradient Est-Ouest dictant la durée de la saison des pluies, et par là même, les précipitations annuelles. Les températures sont assez homogènes sur l'étendue étudiée au cours de l'année (entre 22 et 26°C en moyenne). Dans ces conditions, la pluviométrie est le facteur principal permettant de caractériser les différents climats de cette région. On distingue donc d'une part, la zone orientale (où se situe le plateau Sud-camerounais) qui enregistre environ 1600 mm de précipitations au cours de l'année. Elle a quatre saisons bien tranchées, parmi lesquelles la saison de pluies du printemps (de mars à juin), la saison sèche d'été (juillet et août), la saison de pluies d'automne (de septembre à novembre) et la saison sèche d'hiver (décembre à février). D'autre part, on a la zone occidentale (comprenant le littoral et les hauts plateaux de l'Ouest) avec des pluies annuelles plus abondantes (oscillant autour de 2500 mm) qui tombent durant 9 mois d'affilée entre mars et novembre.



Figure 1 : Localisation du cadre d'évaluation des données SIEREM et TRMM 3B42 V7

Dans le cadre de ce travail de validation, trois jeux de données de pluies ont été utilisés, en occurrence les observations ponctuelles, les grilles de pluies SIEREM et les estimations de pluies TRMM 3B42 V7. Les pluies stationnelles été obtenues auprès du service météorologique du Ministère des transports au Cameroun et sont dépourvues de lacunes. Les grilles de pluies SIEREM été mise au point par le Laboratoire HydroSciences Montpellier-HSM, à partir d'un fond de données pluviométriques (environ 7000 points de mesure) africaines, hérité entre autre de l'ORSTOM, et de son expérience en gestion des bases de données hydroclimatiques en région intertropicale [3, 21]. Disponible sur la période 1940-1999, l'unité d'espace de ces données est une maille de surface 0,5° x 0,5°, soit approximativement 2750 km² dans la zone considérée [7]. Les grilles en question sont en accès libre aux formats ASCII et NetCDF sur le site http://www.hydrosciences.org/spip.php?article1387. Les estimations de pluies TRMM 3B42 V7 sont celles de la plateforme TRMM. Lancée en 1997, elle a été construite conjointement par les Etats-Unis et le Japon et offre plusieurs jeux de données pré-calibrés, au rang desquels, le produit journalier TRMM 3B42 V7 (1998-2014) à une résolution spatiale de 0,25° x 0,25°. Ces données combinent des synthèses d'images TRMM et d'autres données satellitaires [22]. Ainsi, les capteurs micro-ondes des satellites AQUA, NOAA (National Oceanic and Atmsopheric Administration), DMSP (Defense Meteorological Satellite Program) et les données visible/infrarouge des satellites géostationnaires sont pris en compte dans les algorithmes d'estimation des précipitations [22]. Ces estimations sont ensuite ajustées en incorporant les mesures climatiques mensuelles au sol des réseaux GPCP et CAMS (Climate Assessment and Monitoring System) pour donner les produits mensuels TRMM 3B43. Les coefficients d'ajustement calculés pour ce produit sont enfin appliqués aux données iournalières pour donner le produit final TRMM 3B42, version 7 [22], téléchargeable gratuitement sur le site https://giovanni.gsfc.nasa.gov, au format ASCII. Les données hydrométriques ont été également utilisées dans cette étude. Celles du Nyong proviennent de deux sources. Sur la période 1951-1988, la série utilisée est celle du CRH (Centre de Recherche Hydrologique). Sur la période 1998-2015, la série de débits utilisée est celle de l'ORE-BVET (Observatoire de Recherche en Environnement/ Bassins versants expérimentaux tropicaux). Les séries complètes des débits du Ntem (1953-2015) et de la Kienké (1955-2015) proviennent du CRH. Les séries de débits collectées sont en général lacunaires au cours des décennies 1990 et 2000. En effet, après 1987, du fait des contraintes budgétaires, le service hydrologique n'a plus garanti la continuité des observations. On note alors l'abandon d'un grand nombre de stations observées, dont celles étudiées.

### 2-3. Méthodes d'évaluation

# 2-3-1. Grilles de pluie SIEREM

Bien que les données SIEREM soient élaborées à partir des données observées, le souci de vérifier leur proximité aux observations ponctuelles nous conduit à les évaluer au même titre que les estimations dans cette étude. Cette évaluation a été effectuée aux pas de temps mensuel et annuel, ceci en comparant les valeurs de pluies de chaque poste à celles de la maille correspondante. Dans le cadre de cette comparaison, nous avons opté pour le choix des indices qui rendent compte de la relation linéaire entre deux variables (Coefficient de corrélation, Régressions, etc.), mais aussi pour ceux qui évaluent les écarts entre elles (Biais, Indice de Nash, etc.). La raison de ce choix est de s'assurer d'une part que, les écarts entre les deux sources de données ne sont pas importants. D'autre part, il s'agit de vérifier que, les deux jeux de données montrent des évolutions dans le même sens. A l'échelle mensuelle, O4 critères statistiques (le Coefficient de Corrélation de Corrélation (R) est le rapport entre la covariance ( $\gamma$ ) des observations et des estimations, et le produit de leurs écarts types *(Equation 1)*. Il donne une indication sur l'intensité et le sens

de la relation linéaire entre deux variables. Variant entre -1 et +1, il rend compte d'une corrélation forte s'il est inférieur à -0,5 ou supérieur à 0,5.

$$R = \frac{\gamma P_{est} P_{obs}}{\sigma P_{est} \sigma P_{obs}} \tag{1}$$

Le biais est le rapport de la différence entre les observations et les estimations, et les observations *(Equation 2).* Il donne une indication en pourcentage sur la surestimation ou sous-estimation d'une donnée en général non observée par rapport aux observations.

$$Biais = 100 \frac{\sum_{i=1}^{N} (P_{est.i} - P_{obs.i})}{\sum_{i=1}^{N} P_{obs.i}}$$
(2)

Le RMSE (Root-Mean-Square Error) quant à lui, est la racine carrée du rapport entre la somme des différences au carré des observations et des estimations sur le nombre de jour N *(Equation 3)*. Il donne l'ampleur moyenne de l'erreur (ici en mm pour des lames d'eau de pluie) tout en donnant plus de poids aux erreurs importantes (Delahaye, 2013).

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{N} (P_{obs.i}-P_{est.i})^2}{N}}$$
(3)

Le critère de Nash-Sutcliffe est un critère souvent utilisé en hydrologie pour qualifier la qualité d'un modèle. Il donne un rapport de la différence au carré entre les observations et les estimations pour les rapporter à un écart sur la moyenne des observations *(Equation 4)*. Il varie entre 0 et 1. Lorsque le critère de Nash vaut 1, les estimations sont identiques aux observations. Lorsqu'il vaut 0, il est considéré que le modèle n'est pas mieux que si l'on avait pris à chaque pas de temps, la moyenne temporelle des observations.

$$Nash = 1 - \frac{\Sigma(P_{est} - P_{obs})^2}{\Sigma(P_{obs} - \overline{P}_{obs})^2}$$
(4)

A l'échelle annuelle nous avons opté pour une comparaison des tendances évolutives des jeux de données comparés sur l'intervalle 1950-1999, et pour le calcul des écarts entre leurs moyennes interannuelles.

#### 2-3-2. Estimations de pluies TRMM 3B42 V7

Dans un premier temps, les données TRMM sont évaluées à l'échelle stationnelle comme dans le cas précédent pour s'assurer de leur proximité aux observations. Dans un second, leur évaluation a été faite par une comparaison avec les pluies SIEREM dans les limites de certains bassins équatoriaux (Ntem : 19563 km<sup>2</sup>; Nyong : 14438 km<sup>2</sup> et Kienké : 1364 km<sup>2</sup>) pour lesquels les séries de débits sont disponibles jusqu'à une période récente. Le but de cette seconde opération est de vérifier la proximité entre les deux sources de données, et ainsi de voir s'il est possible de les associer pour constituer de longues séries allant des années 1940 aux années récentes. Le choix des bassins versants pour cette opération tient à la disponibilité des débits au travers desquels la fiabilité des séries de pluies ainsi constituées peut être vérifiée. La comparaison de données satellitaires avec des mesures ponctuelles fournies par des stations est difficile. Dans un cas idéal, il faudrait disposer de plusieurs stations par pixel TRMM [24], ce qui permettrait d'interpoler les données terrain à la même résolution que les données satellitaires. Le krigeage représente la méthode d'interpolation optimale [25]. Cette approche a été utilisée dans un grand nombre d'études à travers le monde [26 - 28]. Toutefois, une interpolation à partir d'un réseau de station aussi peu dense que le nôtre apparaît inapproprié. C'est la raison pour laquelle il a été décidé de réaliser cette étape de validation à partir des 12 stations sélectionnées en comparant leurs mesures aux pixels TRMM correspondants. Plusieurs pas de temps ont été testés dans l'optique de déterminer l'échelle la plus fine permettant l'usage des données TRMM. A l'échelle journalière, la validation a été faite uniquement à six stations disposant des données à ce pas de temps. Au-delà du coefficient de corrélation de Pearson et de l'indice de Nash considérés comme des critères standards pour ce type d'opérations, nous avons choisi des indices additionnels de vérification à ce pas de temps comme le POD (Probability Of Detection), le FAR (False Alarm Ratio) et le FBI (Frequency Bias Index). Le choix de ces trois derniers à ce pas de temps se justifie par leur capacité à détecter les jours pluvieux au-delà d'un certain seuil [16, 29]. Plusieurs seuils ont été fixés à travers le monde pour différencier un jour pluvieux d'un jour sec. Le seuil de 0,1 mm a été retenu en Arabie Saoudite ; 0,5 mm en Corée et 1 mm au Pérou. Dans le cadre de cette étude, le seuil de 0,5 mm a été retenu. Les principes du coefficient de corrélation et du biais ont déjà été présentés plus haut. Il convient à présent de présenter ceux des autres indices, pour une meilleure interprétation des résultats qu'ils produisent. Le FBI est le rapport entre les estimations TRMM et les pluies observées *(Equation 5)*. Lorsque le FBI est supérieur à 1, les estimations sont surestimées par rapport aux observations, et inversement quand il est inférieur à 1.

$$FBI = \frac{(a+b)}{(a+c)} \tag{5}$$

Le FAR mesure la part des fausses alertes (pluies estimées mais non observées) dans les pluies estimées par le satellite *(Equation 6)*.

$$FAR = \frac{b}{(a+b)} \tag{6}$$

Enfin le POD quantifie la part de pluies correctement estimées par le satellite *(Equation 7)*.

$$POD = \frac{a}{(a+c)} \tag{7}$$

Avec a : nombre de jours de pluies observés et estimés ; b : nombre de jours de pluies estimés, mais non observés ; c : nombre de jours de pluies observés, mais non estimés et d : nombre de jours de pluies non observés et non estimés.

Aux échelles mensuelle et annuelle, le choix des méthodes de comparaison a été guidé par le fait que, la zone investiguée dispose déjà d'une source de données fiable pouvant servir pour les études d'impact, en occurrence, les grilles de pluies mensuelles SIEREM (conçue à partir des données observées) disponibles pour la période 1940-1999. Il convient à présent de rechercher une autre source de données pour les compléter. Cela nous a conduit une fois de plus, à opter pour des indices qui rendent compte de la relation linéaire entre deux variables (Coefficient de corrélation, Régressions, etc.), et pour ceux qui évaluent les écarts entre elles (Biais, Indice de Nash, etc.) dont les principes ont été présentés plus haut. Bien que la période analysée soit assez courte (11 années), elle est déjà suffisamment importante pour entrevoir des modes de variabilité interannuelle significatifs des précipitations [30]. A l'échelle des bassins retenus, la validation des données TRMM est faite uniquement à l'échelle mensuelle, en le comparant aux pluies SIEREM sur la période 1998-1999. Ces deux années sont les seules pour lesquelles les deux sources de données comparées sont disponibles à la fois. On s'attachera également, à vérifier la concordance des tendances et la faiblesse des écarts, au moyen des indices appropriés à ce pas de temps déjà évoqués plus haut. Ainsi, en cas de tendances similaires et d'écarts faibles entre les deux jeux de données, on est en droit de conclure que les données de

pluies TRMM peuvent constituer directement une alternative pertinente pour le complètement des données SIEREM après 1999. En cas de tendances similaires, mais d'écarts considérables, on fera recours aux facteurs correctifs (ajustement mathématique apporté à un calcul pour tenir compte d'écarts dans l'échantillon ou dans la méthode de mesure) pour améliorer la précision des données TRMM et ajuster les deux jeux de données. Cela peut se faire en rapportant la moyenne des données observées à celle des données estimées sur une période donnée [31]. On note :

$$F_{c} = P_{o}/P_{e}$$
(8)

#### Avec F<sub>c</sub> : facteur correctif, P<sub>o</sub> : moyenne des pluies observées et P<sub>e</sub> : moyenne des pluies estimées.

L'analyse des pluies et des débits a été réalisée à l'aide des tests statistiques de détection de rupture (corrélation sur le rang et test de Pettitt; [32]).

# 3. Résultats

#### 3-1. Evaluation des données SIEREM

Le **Tableau 1** met en évidence les résultats de la comparaison entre les pluies stationnelles et les grilles SIEREM correspondantes au pas de temps mensuel. Son analyse confirme une bonne relation linéaire entre les deux jeux de données comparés. On note une forte corrélation entre ces derniers à toutes les stations étudiées. Les coefficients de corrélation sont supérieurs à 0,9 dans la majeure partie des cas. La station de Kribi présente la corrélation la moins forte, avec un coefficient de corrélation de 0,8. De même, les écarts entre les données comparées sont en général faibles, bien qu'il soit relevé une légère surestimation des pluies SIEREM dont la plus importante atteint 20 % dans le cas de Bafia. Les stations de Douala et Nkongsamba se distinguent avec des écarts importants matérialisés par des biais négatifs respectifs de -104,5 % et -43,3 %, qui sont la marque d'une sous-estimation des pluies SIEREM (*Tableau 1)*. Les pluies SIEREM reflètent assez bien les observations ponctuelles. Les erreurs calculées atteignent difficilement 50 mm. La station de Douala a enregistré l'erreur la plus importante qui est de 143,2 mm (Tableau 1). Les valeurs des pluies stationnelles sont très proches de celles des mailles SIEREM correspondantes, au regard des indices de Nash obtenus (*Tableau 1)*. Ces indices varient entre 0,6 (Douala) et 0,96 (Bertoua). Le cycle annuel des pluies stationnelles et SIEREM sont globalement similaires dans les différents cas étudiés. Cependant, on note parfois une surestimation des pluies SIEREM en juillet et août *(Figure 2)*. Au pas de temps annuel, quoique les valeurs des pluies SIEREM soient légèrement plus importantes, les écarts entre les moyennes interannuelles des deux jeux de données restent relativement faibles, excepté à la station de Douala, où on note un écart avoisinant 50 % (*Tableau 2*). Cela serait lié à l'usage d'un nombre de stations plus important pour le calcul de la pluie moyenne de cette grille [21]. Ces faibles écarts en général relevés sont associés à des tendances évolutives globalement similaires et parfois identiques à ces mêmes stations (*Figure 3*).

	Critères statistiques								
		Stations-S	SIEREM		Stations-TRMM				
Stations	Coefficient		RMSE	Indice de	Coefficient		RMSE	Indice de	
	de	Biais			de	Biais			
	corrélation			Nash	corrélation			Nash	
Abong-mbang	0,92	-5,4	48,1	0,78	0,78	-5,4	67	0,59	
Akonolinga	0,94	15	43,3	0,78	0,8	-4,3	65,5	0,6	
Ambam	0,93	11,4	47	0,77	0,69	-21	90,3	0,5	
Bafia	0,93	20,9	48,9	0,73	0,71	-7,9	72,5	0,5	
Bertoua	0,94	2,2	22,5	0,96	0,7	-8,9	74,4	0,46	
Douala	0,96	-104	143	0,63	0,8	-129	224,8	0,43	
Dschang	0,97	9,8	50,9	0,82	0,69	-36	102,7	0,38	
Ebolowa	0,9	-3	53,5	0,73	0,7	2,28	73,5	0,5	
Kribi	0,8	-25	86,4	0,6	0,73	-88	185,3	0,45	
Nkongsamba	0,98	-43	78,2	0,81	0,78	-2,2	122,5	0,61	
Sangmélima	0,95	10,1	40,7	0,81	0,75	-4,6	73,6	0,55	
Yaoundé	0,93	8,9	46,6	0,77	0,77	2,92	71,7	0,56	

Tableau 1 : Statistiques (Coefficient de corrélation, Biais, RMSE, Indice de Nash) relatives à lacomparaison entre pluies stationnelles et SIEREM, et entre pluies stationnelles et TRMM à l'échellemensuelle. RMSE, Root Mean Square Error

 

 Tableau 2 : Ecarts entre les moyennes interannuelles des pluies stationnelles et SIEREM, et entre les moyennes interannuelles des pluies stationnelles et TRMM

	Stations	SIEREM	Ecarts (%)	Stations	TRMM	Ecarts (%)
Abong-mbang	1666,4	1601,8	3,9	1562,2	1497,9	4,1
Akonolinga	1518,6	1699,7	-10,7	1539,9	1488,3	3,4
Ambam	1650,2	1788,3	-7,7	1834,8	1580	13,8
Bafia	1478,6	1730,4	-14,6	1412,6	1316,7	6,8
Bertoua	1556	1583,6	-1,7	1510,8	1447,8	4,2
Douala	3892,9	2638,5	47,5	3722,8	2165,7	41,8
Dschang	1614,8	1967,4	-17, <b>9</b>	1839,9	1407,8	23,5
Ebolowa	1824,1	1788,3	2	1674,3	1703,2	-1,7
Kribi	2896,3	2598	11,5	3320,4	2266,1	31,8
Nkongsamba	2617	2097,8	24,7	2404,9	2377,5	1,1
Sangmélima	1685,6	1808,4	-6,8	1650,8	1602,7	2,9
Yaoundé	1600,5	1708,1	-6,3	1659,9	1 <b>69</b> 5,2	-2,1

### 3-2. Evaluation des données TRMM à l'échelle stationnelle

Le **Tableau 3** présente les résultats des critères statistiques retenus pour l'évaluation des données TRMM au pas de temps journalier. Son analyse montre une différence remarquable entre les estimations satellitaires et les données stationnelles pour certains critères statistiques. L'indice de Nash est négatif aux six stations, ce qui indique que les estimations sont moins bonnes que les valeurs de référence. D'après le coefficient de corrélation de Pearson, on note une mauvaise relation linéaire entre les deux séries de données, quelle que soit la station considérée *(Tableau 3)*. Cette faible performance des données TRMM peut s'expliquer par le mouvement rapide des nuages et le caractère orageux des précipitations qui influencent la distribution spatiale et temporelle des précipitations dans l'espace concerné. La différence d'échelle pourrait également expliquer en partie l'écart entre les deux jeux de données. En réalité, l'estimation des pluies par satellite ne donne accès qu'à des valeurs moyennes sur des surfaces assez grandes. C'est pourquoi les observations ponctuelles présentent une variabilité importante par rapport aux valeurs surfaciques.



**Figure 2 :** Comparaison des cycles pluviométriques annuels moyens entre pluies stationnelles et SIEREM et entre pluies stationnelles et TRMM

#### mm 2500 mm 2500-Akonolinga Abong-mbang mm 3500 Ambam . . . . . . . 2000 2000 2800 ----1500 1500 2100 . . . . . . ...... ••• ···· ...... 1000-1400 1000 •••• -0.9175x + 3478.1 $R^2 = 0.0038$ y = -0.2626x + 2120. $R^2 = 0.001$ $R^2 = 0.001$ = 0,7293x + 78,497 $y = -0,8921x + 3461, R^2 = 0,0131$ $R^2 = 0,0131$ y=-0,8378x+3442,4 500 500 700 y = 2,3891x - 3067 $R^2 = 0,0108$ y $R^2 = 0,006$ $R^2 = 0,0026$ 0 0 1955 -1960 -1975 -1975 -1980 -1985 -1995 -955. 1965 1976 1975 1986 1985 1985 1990 1960 1975 1975 1975 1985 1985 1990 1950 1960 956 95 1950 mm 6000 mm 250 mm 2500 Douala Bafia Bertoua 2000 2000 4800 .... 150 1500 3600 . . . . . . •. • 1000 1000 2400 y = -3,0318x + 7-1,0091x + 3470,9 $R^2 = 0,1118$ $\begin{array}{c} \textbf{-5,8244x+13056} \\ \textbf{R}^2 = \textbf{0,1623} \\ \end{array} \underbrace{ y = -3,6347x+8760,} \\ \textbf{R}^2 = 0,1228 \end{array}$ 500 500 1200 $\begin{array}{c} \textbf{24,682x+52627} \\ \textbf{R}^2 = \textbf{0,3771} \\ \textbf{R}^2 = \textbf{0,0233} \end{array} \\ + \begin{array}{c} \textbf{24,682x+52627} \\ \textbf{R}^2 = \textbf{0,0233} \end{array}$ $R^2 = 0.0092$ 0 1960 1965 1970 1975 1980 1985 1995 1960 1975 1975 1980 1985 1985 1995 1955 1960 1965 1970 1975 1980 1985 1990 1955 1955 950 950 1950 Dschang mm 3000 $mm_{2500}$ Ebolowa mm 5000 Kribi : . . . 2400 \*\*\*\* 4000 . 2000 . ..... 180 1500 3000 . . . . 84 : . . . . . . . . . 82 1,\*\* 1200 $\begin{array}{c} y = -2,7817x + 7459,8\\ \textbf{-3,4141}x + \textbf{8589,9} \\ \textbf{R}^2 = 0,0469 \\ \textbf{R}^2 = 0,0469 \end{array}$ 1000 2000 =-0.8378x + 3442. $\begin{array}{c} y = 1,0068x + 4884,2 \\ R^2 = 0,0007 \\ \hline R^2 = 0,0007 \\ \hline R^2 = 0,0007 \end{array}$ -2,1574x + 6083,9 $R^2 = 0,006$ $R^2 = 0,006$ 600 500 1000 0 0 0 1955-1960-1975-1975-1980-1985-1985-1995-1995-1995-1955. 1960. 1975. 1975. 1980. 1985. 1985. 1985. 1955. 1960. 1975. 1975. 1980. 1985. 1985. 1985. 1950 950 1950 mm 4000 Nkongsamba Sangmélima mm 250 mm 2500 Yaoundé ······ 3200 2000 2000 · . . . . . . 2400 1500 1500 ·. • • 1600 1000 1000 -1,1029x + 3885, R<sup>2</sup> = 0,02 =-4,5252x+10536 $\begin{array}{c} \textbf{-11,259x+24848} \\ \textbf{R}^2 = \textbf{0,2801} \\ \end{array} \begin{array}{c} y = 1,7028x\text{-}1264, 2 \\ \textbf{R}^2 = 0,0168 \end{array}$ y = -1,2874x + 4227,5 $R^2 = 0,0075$ y = -0,2925x + 2386 $R^2 = 0,0009$ 800 500 500 $R^2 = 0.0887$ 0 0961 1965 -1970 -975 -0861 985 950-1960 1965 1970 1975 1980 1985 1990 950 955 .096 965 1970 975 980 985 1950 1955 1990 955 566 990 995 1995 **STATIONS-TRMM** mm Abong-mbang mm 2000 Akonolinga mm 250 Ambam 2 1600 2000 2000 ٠ • 1500 1200 150 1000 8589.8 1000 800 =-11,041x + 2369 $R^2 = 0,0302$ = 12,851x - 24200R<sup>2</sup> = 0,0806 R<sup>2</sup> = 0,0806 =-24,381x + 5033 R<sup>2</sup> = 0,0735 -34,555x + 70777 y $R^2 = 0,276$ -18,741x + 39373R<sup>2</sup> = 0,0514 500 400 500 У 0 0 2000-2001-2003-2005-2005-2006-2006-2006-2008-2008-1999-2000-2001-2002-2003-2004-2005-2006-2007-1999 1998 1999 1998 905 mm 2000 mm 2000 mm 500 Douala Bafia Bertoua • 160 • 1600 400 -1200 1200 300 ٠ . • . 8 • 800 800 2000 -31,769x + 65046 R<sup>2</sup> = 0,1636 400 1 1000-= 47,298x-91015 y = -3,2918x + 8759R<sup>2</sup> = 0,1002 R<sup>2</sup> = 0,0007400 y = -10,535x + 22419 $R^2 = 0.0216$ =-10,997x + 23538 y = -9,9527x + 21383 $R^2 = 0.0221$ $R^2 = 0.0655$ у $R^2 = 0,0331$ 0 2002-2003-2005-2005-2006-2006-2008-1999. 2000. 2003. 2005. 2005. 2005. 2007. 1999-2000 2001-2002 2003-2005 2005-2005 2005-2005 1998 2001 200 866 mm 2500mm 5000 mm 2500 Dschang Ebolowa Kribi 2000 2000-4000 1500 1500 ٠ 3000 • 1000 2000 1000 $\begin{array}{c} -177,88x+359436\\ \mathbf{R}^2=\mathbf{0,4602} \qquad y=-58,525x+11943\\ \mathbf{R}^2=\mathbf{0,3863} \end{array}$ $\begin{array}{c} \textbf{-24,777x+51469} \\ \textbf{R}^2 = \textbf{0,1386} \\ \textbf{R}^2 = \textbf{0,0798} \end{array} \\ \textbf{y} = \textbf{-15,501x+32456} \\ \textbf{R}^2 = \textbf{0,0798} \end{array}$ $\begin{array}{ll} \textbf{-20,622x+42980} & \textbf{y}=-29,972\textbf{x}+6173\\ \textbf{R}^2=\textbf{0,0846} & \textbf{R}^2=\textbf{0,1552} \end{array}$ 500 500 -1000 0 0 1999 2001 2002 2003 2005 2005 2005 2005 2006 2008 2000 2001 2003 2004 2005 1998 1999 2006 200 mm 2500-<u>Sangmélima</u> mm 3500 Nkongsamba mm 2500 Yaoundé . 2000 2800 2000 : 2100 150 1500 • . : • • 1400 1000 1000 3 0001x y = 5,0764x - 8472.8+ 9612 $R^2 = 0.0058$ = 3,5727x - 5496,3 $R^2 = 0,003$ 700 $\begin{array}{l} \textbf{-16,398x+35251} \\ \textbf{R}^2 = \textbf{0,0521} \\ \end{array} \begin{array}{l} y = 22,355x-42399 \\ \textbf{R}^2 = 0,0388 \\ \end{array}$ 500 -28,205x + 58146 $R^2 = 0,1937$ $R^2 = 0,0065$ 500 0 0 1999. 2000. 2002. 2003. 2004. 2005. 2005. 2007. 966 2008 1998 1999 2001 2002 2003 2005 2005 2005 2005 2005 2007 2008 1999 2000 2002 2003 2005 2005 2005 2007 1998

# **STATIONS-SIEREM**

**Figure 3 :** Comparaison des évolutions interannuelles entre pluies stationnelles et SIEREM et entre pluies stationnelles et TRMM

	Critères statistiques								
	Coefficient de	Indice							
Stations	Corrélation	de Nash	POD	FAR	FBI				
Ebolowa	0,21	-0,85	0,62	0,37	1,11				
Kribi	0,47	-0,03	0,66	0,19	0,82				
Yaoundé	0,34	-0,91	0,61	0,48	1,31				
Douala	0,22	-0,8	0,64	0,3	0,92				
Sangmélima	0,31	-0,4	0,62	0,45	1 <i>,</i> 02				
Bertoua	0,38	-0,2	0,65	0,42	1				

 Tableau 3 : Statistiques (Coefficient de corrélation, Indice de Nash, POD, FAR et FBI) relatives à la comparaison entre pluies ponctuelles et TRMM à l'échelle journalière. POD: Probability of Detection;

 FAR: False Alarm Ratio; FBI : Frequency Bias Index

D'autres critères par contre, présentent des résultats acceptables au pas de temps journalier (*Tableau 3*). Selon le POD, les données TRMM estiment correctement 61 % (Yaoundé) à 66 % (Kribi) de jours pluvieux. De même, le FAR indique que 19 % (Kribi) à 48 % (Yaoundé) de jours pluvieux sont estimés, mais non observés au sol. A s'en tenir au FBI, pour 2/3 des stations étudiées (Ebolawa, Yaoundé, Sanamélima et Bertoua), le nombre de jours pluvieux observés est inférieur à celui estimé (Tableau 3). Comparativement à l'échelle journalière, il est noté une nette amélioration dans la relation linéaire entre les données observées et estimées à l'échelle mensuelle (Tableau 1). Cela s'observe au travers des coefficients de corrélation entre les deux jeux de données aux différentes stations qui varient entre 0,69 (Dschang) et 0,8 (Akonolinga). Seulement 2 des 12 stations étudiées présentent des coefficients de corrélation inférieurs à 0,7. Si l'on considère le RMSE qui montre une grande sensibilité aux volumes, il ressort qu'il est inférieur à 75 mm pour plus de 50 % de stations évaluées. Il est par contre important pour les stations situées en régions montagneuses (Dschang et Nkongsamba) et pour celles situées sur la côte (Kribi et Douala) qui ont une pluviométrie plus élevée (Tableau 1). Il se pourrait donc au regard de ce résultat, que les effets d'altitude et de la côte sont à l'origine d'une réduction de la précision. L'indice de Nash montre en général d'assez bons résultats. Il est positif pour l'ensemble des stations et supérieur ou égal à 0,5 pour plus de la moitié d'entre elles. L'analyse des Biais montre que dans la plupart des cas, les estimations satellitaires sont légèrement sous-estimées par rapport aux pluies observées, à l'exception de Yaoundé et Ebolowa pour lesquels on note une légère surestimation (*Tableau 1*). Les sous-estimations les plus importantes sont observées pour les zones escarpées (Dschang) et côtières (Kribi et Douala). Le cycle annuel des estimations satellitaires est pratiquement identique à celui des précipitations observées pour la plupart des stations (Figure 2). Cela confirme que les données TRMM reproduisent correctement les réaimes saisonniers dans l'espace concerné. Pour les stations situées en milieu équatorial et sub-équatorial, plus précisément sur le plateau sudcamerounais (Yaoundé, Ebolowa, Akonolinga, Sangmélima, etc.), on observe pour chacun des jeux de données comparés des régimes bimodaux à 04 temps, avec 02 saisons humides (mars-juin et septembre-novembre) et 02 sèches (juillet-août et décembre-février). Pour celles situées à l'Ouest et au littoral, c'est un régime unimodal, avec une crue unique centrée sur août et septembre qui prévaut pour chacun des jeux de données analysés (Figure 2). La comparaison entre les cumuls annuels moyens (sur 11 ans) des deux jeux de données montre qu'ils sont quasi-équivalents dans plus de 70 % de cas. On note cependant une légère sous-estimation pour la plupart des stations, à l'exception de Douala, Kribi et Dschang, pour lesquelles la sous-estimation est relativement importante (Tableau 2). Cela soulève la problématique de l'effet de la côte et du relief sur les estimations de pluie TRMM en région équatoriale. Ces erreurs proviennent a priori des biais et artefacts liés à la nébulosité présente même en saison sèche dans cette région, facteur prépondérant qui interfère dans le

calage des algorithmes d'estimation pluviométrique, où la nébulosité est souvent interprétée systématiquement comme source de précipitations. En comparant les tendances évolutives des deux séries de données annuelles sur les 11 années d'étude, il ressort qu'elles sont très similaires dans la majeure partie des cas *(Figure 3)*. Elles sont pratiquement identiques pour le cas des stations situées sur le plateau Sudcamerounais (Yaoundé, Ebolowa, Akonolinga, Bertoua, etc.). Les données SIEREM et TRMM 3B42 V7 sont assez proches des observations en région équatoriale. Il convient à présent de vérifier s'il est possible d'associer ces deux sources de données en les comparant entre elles.

#### 3-3. Evaluation des données TRMM par bassin à l'échelle mensuelle

Le **Tableau 4** met en évidence une bonne relation linéaire au plan mensuel entre pluies SIEREM et TRMM sur la période 1998-1999 pour l'ensemble des trois bassins étudiés. Les coefficients de corrélation qu'il affiche sont en effet compris entre 0,80 (Kienké) et 0,93 (Nyong). Malgré cette linéarité appréciable, les écarts entre ces deux sources sont parfois considérables pour une association directe. L'analyse des biais révèle une sousestimation des pluies TRMM dans la plupart des cas (*Tableau 4*), qui semble concerner les mois essentiellement compris entre juin et septembre (*Figure 4*). Cette sous-estimation est accompagnée d'erreurs considérables, dont la plus importante atteint 40 mm dans le cas de la Kienké. D'une manière générale, si l'on considère les indices de Nash, les pluies SIEREM et TRMM sont assez proches sur tous les bassins, mais les ajustements semblent nécessaires pour certains mois pour lesquels les écarts entre ces deux sources de données sont assez importants (*Tableau 4*).

	Critères statistiques								
Stations	Coefficient de Corrélation		Bi	ais	RMSE		Indice de Nash		
	Avant	Après	Avant	Après	Avant	Après	Avant	Après	
Ntem	0,92	0,95	-11	-4	24,4	13	0,8	0,91	
Nyong	0,93	0,97	-14	-7	25,6	15,1	0,81	0,93	
Kienké	0,88	0.93	4.3	3.7	40	26	0,62	0.84	

 Tableau 4 : Statistiques (Coefficient de corrélation, Biais, RMSE, Indice de Nash) relatives à la comparaison entre pluies SIEREM et TRMM, avant et après la correction



Figure 4 : Comparaison des cycles pluviométriques annuels moyens (1998-1999) des pluies SIEREM (en noir) et TRMM (en gris)

#### 3-4. Correction des données TRMM par bassin à l'échelle mensuelle

204

Le *Tableau 5* présente les facteurs de correction calculés pour les mois dont les écarts moyens mensuels entre pluies SIEREM et TRMM sont considérables. Le bassin côtier de la Kienké et celui du Nyong sont respectivement ceux pour lesquels il est noté le plus important (06 au total) et le plus petit (seulement 02) nombre de mois à ajuster (*Tableau 5)*. En plus d'être les seuls pour lesquels les corrections s'imposent sur l'ensemble des bassins étudiés, les mois de juillet et août sont également ceux ayant les facteurs correctifs les plus importants (Tableau 5). L'application des facteurs correctifs calculés entraîne une concordance nettement meilleure entre les deux sources de données. Cela se vérifie à travers une amélioration considérable des indices calculés pour chaque bassin après l'ajustement. Les coefficients de corrélation compris entre 0,88 et 0,93 avant la correction, passent tous à plus de 0,91 après. Le Nyong affiche la meilleure corrélation avec un coefficient de 0,97 (Tableau 4). Le biais et le RMSE relatent une diminution des écarts pour tous les bassins. Cet écart devient quasiinexistant pour le Ntem. Son biais passe de -11,4 avant la correction à -4 après. Il résulte de cette amélioration de la linéarité et de cette réduction des écarts, une proximité plus accrue entre les deux sources de données, qui se traduit par une amélioration des indices de Nash. Avant la correction, le Nyong est le seul bassin pour lequel cet indice atteint 0,81. Après, l'indice le plus faible est de 0,84 (*Tableau 4)*. Il est certes vrai que l'établissement des facteurs de correction à partir d'un nombre d'années réduit comme tel est le cas dans cette étude, peut parfois conduire à une sous-estimation ou à une surestimation des données à corriger selon que les années utilisées correspondent à période humide ou sèche, et n'intègrent donc pas toutes les séquences de variabilité de la période à corriger qui peut parfois être étendue. Dans le cas d'espèce, les facteurs correctifs établis semblent très cohérents, ce d'autant plus qu'ils entraînent une amélioration nette des indices qui évaluent les écarts et la relation linéaire entre les deux sources de données.

Mois	Ntem			Nyong			Kienké		
	SIEREM	TRMM	F،	SIEREM	TRMM	F،	SIEREM	TRMM	F،
Janvier	48,2	41,1	-	19,7	17,6	-	57,2	45,8	-
février	76,7	62,8	-	56,9	47	-	72,7	82,7	0,88
Mars	122,2	114,7	-	89,8	83,7	-	118,05	104,4	-
Avril	189,5	201,2	-	143,3	160	-	215,6	200,7	-
Mai	181 <i>,</i> 9	167	-	206	189,5	-	227,5	257,5	0,88
Juin	174	163,8	1,63	177,8	162,8	-	201,65	171,6	1,17
Juillet	208	128,4	1,4	181 <i>,</i> 1	151,1	1, <b>2</b>	230,75	102	2,29
Août	208,8	150	1,28	203,6	173,6	1,17	258,7	160	1,63
Septembre	274,3	214,8	-	212,5	198,6	-	299,4	310,5	-
Octobre	283,9	301	-	291,6	280	-	292	302,7	-
Novembre	189,1	177	-	142,9	124	-	198 <i>,</i> 9	177,6	0,87
Décembre	52	63	-	22,1	18	-	35,6	50	0,7

 Tableau 5 : Moyennes intermensuelles des pluies SIEREM et TRMM, ainsi que les facteurs de correction

 calculés pour les mois présentant des écarts importants

# 3-5. Analyse des séries de pluies obtenues et comparaison des évolutions observées à celle des écoulements

L'analyse des séries de pluies obtenues relate une légère diminution des pluies annuelles sur la période d'étude *(Figure 5).* Cette baisse est certes non significative d'après le test de Pettitt, mais les écarts décennaux relatent plusieurs séquences sèches sur l'intervalle d'étude, dont les plus importantes jamais enregistrées ont été observées au cours des décennies 2000 pour le Nyong et 2010 pour les deux autres bassins *(Tableau 6).* Cela atteste donc d'une diminution récente importante des pluies en région équatoriale. Les cumuls précipités durant les saisons des pluies (printemps et automne) présentent des évolutions semblables à celle des totaux annuels sur les bassins du Nyong et du Ntem *(Figure 5).* Le test de Pettitt n'indique pas de rupture dans leurs séries, bien que quelques périodes déficitaires soient observées, notamment au cours des trois dernières décennies. Les écarts observés sont légèrement plus prononcés au printemps, surtout au courant de la décennie 2010 (Tableau 6). Sur le bassin de la Kienké, les pluies d'automne évoluent différemment de celles du printemps pour lesquelles il est à peu près observé la même tendance que les pluies annuelles (Figure 5). Elles enregistrent une rupture à la baisse (-3,3 %) que le test de Pettitt situe en 1971-72 (Figure 5). Les précipitations des saisons sèches évoluent en tendances opposées sur les trois bassins (*Figure 5*). Si pour celles d'été on note une augmentation, il est par contre relevé pour celles d'hiver une diminution. Le test de Pettitt met en évidence dans les séries chronologiques respectives des précipitations d'été du Nyong, du Ntem et de la Kienké, des ruptures en 1964-65, 1968-69 et 1980-81. Les excédents qui en découlent sont respectivement de +5,8 % ; + 10,5 % et +14 % (*Figure 5*). Bien qu'il soit noté sur ces bassins une augmentation générale des précipitations durant cette saison à partir de la décennie 1960, on constate tout de même une stabilisation ayant débuté au cours de la décennie 2000, qui s'est renforcée tout au long de la décennie 2010 (*Tableau 6)*. Pour les pluies d'hiver, des ruptures marquant des baisses ont été détectées dans les séries du Nyong, du Ntem et de la Kienké, respectivement en 1976-77, 1977-78 et 1968-69, avec des déficits de -16,1 % ; -9,7 % et -7,3 % (Figure 5). Pourtant à la baisse depuis la décennie 1970, les précipitations hivernales semblent augmenter de nouveau légèrement depuis le début des années 2000 sur les bassins étudiés (*Tableau 6*).



Figure 5 : Evolution des pluies et débits des bassins du Nyong (en noir), du Ntem (en gris) et de la Kienké (en marron) aux pas de temps annuel et saisonnier d'après le test de Pettitt

Bassins versants	Décennies	s Ecarts à la moyenne interannuelle (%)							
		Annuel	Printemps	Eté	Automne	Hiver			
			Pluies						
Nyong	1950-59	0,2	3,2	-20,3	3,2	19,9			
	1960-69	2,2	0,9	-3,1	1,4	32			
	1970-79	-1	-1,8	-2,9	-0,1	3,6			
	1980-89	1,5	0,8	10,5	2,1	-24			
	1990-99	4,5	2,1	23,8	2,9	-16,1			
	2000-09	-5,1	-3,4	-0,3	-8,6	-10,5			
	2010-16	-3,1	-3,7	-9,4	0,9	-7,3			
Ntem	1950-59	-0,2	3,8	-30,5	3,5	12			
	1960-69	-1,7	2,2	-14,9	-5,6	15,9			
	1970-79	2,3	0,6	1.9	5,9	-4,6			
	1980-89	0,5	2.3	15,9	-0,6	-23.7			
	1990-99	2.5	-1.2	30.2	-0.2	-14.5			
	2000-09	0.1	-2.8	6.8	-2.1	13.8			
	2010-15	-5.9	-7.7	-12.7	-2.2	-4.7			
		-,-	- /-	,.	-/-	.,.			
Kienké	1950-59	2.6	7.1	-22.2	8.9	11.1			
	1960-69	3.3	5.4	-7.3	3.6	20.9			
	1970-79	-8.4	-8.2	-17.5	-2.6	-12.4			
	1980-86	-0.6	-0.2	9.2	0.9	-24.8			
	1990-99	24	-22	29 5	-1.8	-10.7			
	2000-09	39	6	15.4	-6	7 2			
	2000-07	-5.4	-129	-12.3	-47	15.4			
	2010 15	5,1	Déhits	12,0	1,7	13/1			
Nvona	1950-59	-4 8	10.2	13	-14	-4.3			
Nyong	1960-69	177	27.3	22.5	131	14.9			
	1970-79	-26	01	-12,5	0.9	-6			
	1980-88	-0.7	-8.8	-11	81	-36			
	1990	-	-	-	-	-			
	2000-09	-6 5	-14 7	0.8	_4	-78			
	2000 07	-5 7	-14 3	-81	-74	7.4			
	2010 10	,,	17,0	0,1		г, <b>т</b>			
Ntem	1950-59	-4 4	0 2	-27.6	-7.6	34			
mom	1960-69	27.8	38 1	34.4	171	29.3			
	1970-79	_27.7	-3 5	-81	-0.4	-5.2			
	1980-89	-97	-17.4	-0.4	115	-121			
	1990	- -	-	-	-	-			
	2000	_	_	_	_	_			
	2000	-01	0 2	-129	-15.7	-10.4			
	2010-15	-7,1	0,2	-12,7	-13,7	-10,7			
Kienké	1955-59	-5 2	22.0	13	-74 8	20.5			
NICHING	1960-69	_5 7	-7 4	-28 1	27,0 [] ?	_14.4			
	1970-77	8 2	7	-0.6	128	_4 ?			
	1980-84	9.6	1.8	6,0 60 0	6.8	Δ7			
	100-00	-	-	-	-				
	2000	_	_	-	-	-			
	2010-15	-17.3	-14.5	-16.7	-7.8	15			

 

 Tableau 6 : Ecarts (%) des moyennes décennales annuelles et saisonnières des pluies et débits par rapport à leurs moyennes interannuelles sur les bassins étudiés

L'impact de la pluviométrie est perceptible dans l'évolution des écoulements des bassins étudiés. Les stationnarités des régimes des écoulements et des précipitations de ces bassins diffèrent parfois à ce pas de temps, mais l'analyse des écarts à la moyenne interannuelle des deux variables comparées montre une évolution synchrone entre elles au cours des deux récentes décennies. On note pour ces décennies une diminution conjointe des pluies et des débits qui semblent d'ailleurs les plus importantes jamais enregistrées sur ces bassins (*Tableau 6)*. Les écoulements des saisons pluvieuses (printemps et automne) ont enregistré les modifications les plus importantes, suite aux variations des régimes pluviométriques des saisons sèches (hiver et été) qui les précèdent. La saison sèche d'hiver a connu entre les décennies 1970-1990 une diminution importante des précipitations qui a provoqué une chute des écoulements du printemps. Leur rehaussement entamé depuis la décennie 2000 s'accompagne également d'un relèvement des écoulements du printemps, qui semble quand même assez timide dans le cas du Nyong (*Tableau 6)*. A l'inverse, entre les décennies 1970-1990, il a été noté une hausse conjointe des pluies d'été et des écoulements d'automne. La flexion des pluies d'été noté une hausse conjointe des pluies d'été et des écoulements d'automne (*Tableau 6*).

# 4. Discussion

### 4-1. Validation des données pluviométriques

Les résultats obtenus dans cette étude présentent plusieurs points communs avec des travaux similaires déjà réalisés ailleurs. Dans l'ensemble, les grilles de pluies SIEREM montrent de très bonnes corrélations avec les données ponctuelles dans cette étude. Le même constat a été fait par d'autres auteurs [1, 3]. Au pas de temps journalier, les résultats de ce travail montrent une différence importante entre les données TRMM et observées, avec des coefficients de corrélation inférieurs à 0,5 et des indices de Nash négatifs aux six stations étudiées. Ces résultats corroborent plusieurs autres [15, 33]. Comparativement à l'échelle journalière, il est observé aux échelles mensuelle et annuelle une concordance nettement meilleure entre pluies TRMM et observées dans le présent travail. Cette amélioration des estimations aux échelles temporelles plus importantes (mensuelle et annuelle) serait probablement liée à ce que, les estimations TRMM sont calibrées en utilisant les données mensuelles observées. Cela est concordant avec les résultats de certaines études traitant de ces mêmes aspects [15, 30]. Certains auteurs [29, 34 - 37] soulignaient déjà l'impact d'une topographie accidentée et de l'effet de la côte sur la précision des estimations de précipitations par les satellites. Ils ont tous mis en évidence dans leurs études une mauvaise concordance entre les précipitations observées et estimées en régions d'altitude et côtière. Bien que reproduisant correctement le cycle de la variabilité intra-annuelle en zone montagnarde au même titre que sur le plateau Sud-camerounais, il a également été mis en évidence dans cette étude sous-estimation importante des pluies TRMM, comparativement aux observations dans les régions escarpée et côtière. Les mois de juillet et août ont enregistré les sous-estimations les plus importantes dans les limites des bassins étudiés. Un constat similaire a déjà été fait ailleurs [15].

### 4-2. Evolution récente de la pluviométrie en Afrique centrale

Les séries des totaux annuels et les cumuls des saisons de pluies des bassins étudiés évoluent très modestement à la baisse, sans pour autant qu'une rupture soit mise en évidence dans leurs séries respectives, sauf dans le cas de la Kienké où on note une rupture à la baisse pour les pluies d'automne en 1971-72. Les cumuls des saisons sèches évoluent en tendances opposées, pendant qu'il est noté une augmentation statistiquement significative pour celles d'été dans les différents bassins depuis les décennies 1960 et 1980, on enregistre par contre des diminutions d'intensités variées pour celles d'hiver.

Le même constat avait déjà été fait dans une autre étude sur certains de ces bassins (Nyong, Ntem et Kienké), mais avec des séries de données s'étalant de 1950 à 2000 [38]. Ces résultats corroborent également ceux d'autres auteurs effectués dans la région [39]. Le présent travail met en évidence un rehaussement général des précipitations au cours de la décennie 1990, suite à la sécheresse des décennies 1970 et 1980. Cette observation est similaire à celle postulée dans d'autres travaux [40] qui précisent qu'à partir de la décennie 1990, la tendance déficitaire semble s'inverser, et des années plus humides sont observées, sans toutefois atteindre les valeurs enregistrées avant 1970. Ce retour à des conditions plus humides se confirme actuellement partout en Afrique de l'ouest comme au Bénin [41], au Burkina Faso [42], au Niger [43] et au niveau du bassin du fleuve Niger [44]. La décennie 2010 se caractérise par une rechute des pluies généralisée dans les bassins étudiés, laquelle semble être la plus importante jamais observée pour ces bassins. Cette récente évolution diffère avec ce qui est observé en Afrique de l'ouest, où la tendance excédentaire entamée depuis la décennie 1990 demeure jusqu'à présent [45].

### 4-3. Impact de la variabilité des précipitations sur les écoulements

Certains auteurs [38] ont souligné l'impact des précipitations des saisons sèches sur les écoulements des saisons de pluies qui les suivent directement en région équatoriale. Cela est concordant avec les résultats de cette étude.

# 5. Conclusion

Les données SIEREM ont été évaluées en comparant les valeurs des pluies de chaque poste à celles de la maille correspondante sur les périodes 1950-1999, et ce, aux pas de temps mensuel et annuel. Pour toutes les stations, les coefficients de corrélations obtenus au pas de temps mensuel oscillent généralement autour de 0,9. Cela confirme une très bonne relation linéaire entre les variables comparées. Les écarts entre elles sont aussi faibles, au regard des valeurs du biais, du RMSE et de l'indice de Nash. A l'échelle annuelle, les régressions montrent des évolutions globalement similaires et les écarts moyens interannuels calculés sont négligeables dans la majorité des cas. L'ensemble de ces résultats confirment le caractère conforme des pluies SIEREM aux observations. L'évaluation des données TRMM a été faite dans un premier temps à l'échelle stationnelle, en comparant directement comme dans le cas des pluies SIEREM, les données ponctuelles observées au sol à celles des pixels TRMM correspondants. Dans un second temps, les comparaisons ont été faites entre données SIEREM et TRMM dans les limites de trois bassins versants équatoriaux (Ntem, Nyong et Kienké). A l'échelle stationnelle et au pas de temps journalier, les résultats montrent une différence importante entre les données TRMM et observées, avec des coefficients de corrélation inférieurs à 0,5 et des indices de Nash négatifs aux six stations analysées. A l'échelle mensuelle et annuelle, les données TRMM et observées montre une concordance nettement meilleure, relativement à ce qui est observé à l'échelle journalière, malgré la sous-estimation des pluies TRMM en zones escarpées et côtières. A ce pas de temps mensuel, les coefficients de corrélation obtenus oscillent entre 0,69 et 0,81 aux stations étudiés. Au pas de temps annuel, on note des tendances évolutives similaires entre les deux jeux de données à la plupart des stations. Dans les limites des bassins étudiés, les données SIEREM et TRMM montrent de bonnes relations linéaires, mais des écarts parfois importants dans le cas de certains mois pour lesquels il était nécessaire d'apporter des corrections. Les facteurs correctifs établis pour ces derniers améliorent de façon considérable la proximité entre les deux jeux de données comparés. Les évolutions notées à partir des séries de pluies obtenues concordent avec celles des écoulements des collecteurs principaux que drainent lesdits bassins.

# Références

- [1] V. DUBREUIL, A. JALLET, J. RONCHAIL et G. MAITELLI, *Annales de l'Association Internationale de Climatologie*, 1 (2004) 133 156
- [2] B. COLLISCHONN, D. ALLASIA, W. COLLSISCHONN et C. E. TUCCI, *Revista Brasileira de Cartografia,* 59 (2007) 93 99
- [3] J. PATUREL, I. BOUBACAR, A. CRES and G. MAHE, Journal of Water Science, 23 (2010a) 325 333
- [4] M. NEW, M. HULME and P. JONES, J. Clim., 12 (2000a) 829 856
- [5] M. NEW, M. HULME and P. JONES, J. Clim., 13 (2000b) 2217 2238
- [6] G. MAHE, S. GIRARD, M. NEW, J. E. PATUREL, A. CRES, A. DEZETTER, C. DIEULIN, J. F. BOYER, N. ROUCHE and E. SERVAT, *Water SA*, 34 (2008) 529 - 536
- [7] C. DIEULIN, G. MAHE, J. E. PATUREL, S. EJJIYAR, Y. TRAMBLAY, N. ROUCHE and B. E. MANSOURI, *Water*, 11 (2019) 1 17
- [8] J. E. PATUREL, M. OUEDRAOGO, G. MAHE, E. SERVAT, A. DEZETTER and S. ARDOIN, *Hydrological Sciences Journal*, 48 (2003a) 881 890
- [9] J. E. PATUREL, I. BOUBACAR, A. L'AOUR et G. MAHE, *Hydrological Sciences Journal*, 55 (2010b) 1281 1288
- [10] S. BIGOT, N. PHILIPPON, V. GOND, V. MORON, W. POKAM, N. BAYOL, F. BOYEMBA, B. KAHINDO, G. SAMBA, A. NGOMANDA, M. GAPIA, O. D. YONGO, J. P. LAURENT, S. GOURLET-FLEURY, C. DOUMENGE, E. FORNI, P. CAMBERLIN, N. MARTINY, V. DUBREUIL et T. BROU, Etat actuel des réseaux de mesure éco-climatiques en Afrique centrale : Les ambitions du projet de recherche internationale FORGREENE. XXIXe Colloque de l'Association Internationale de Climatologie, Lausanne - Besançon, Suisse, (2016)
- [11] B. GUILLOT, Problèmes de validation des méthodes d'estimation des précipitations par satellite en Afrique Intertropicale, *ORSTOM*, (1996)
- [12] M. GOSSET, J. VIARRE, G. QUANTIN and M. ALCOBA, Q. J. R. Meteorol. Soc., 139 (2013) 923 940
- [13] F. DELAHAYE, "Analyse Comparative Des Différents Produits Satellitaires D'estimation Des Précipitations En Amazonie Brésilienne", Thèse de Doctorat, Université Rennes 2, (2013)
- [14] B. SARRAND, Evaluation du produit satellitaire de précipitations TRMM-3B42 en méditerranée avec un focus sur les épisodes de transport de particules sahariennes, gif-sur-Yvette : LSCE, (2011)
- [15] O. HAMZA, R. A. BOUDHA, Y. TRAMBLAY, L. JARLAN, L. TARIK, L. HANICH, E. L. RACHID, M. MESLOUHI and A. CHEHBOUNI, *Climate*, 5 (2017) 1 - 17
- [16] M. L. SCHEEL, M. ROHRER, C. HUGGEL, V. D. SANTOS, E. SILVESTRE and G. J. HUFFMAN, *Hydrology and Earth System Sciences*, 15 (2011) 2649 2663
- [17] J. SIMPSON, C. KUMMEROW, W. K. TAO and R. F. ADLER, *Meteorology and Atmospheric Physics*, 60 (1996) 19 36
- [18] P. CAMBERLIN, G. BARRAUD, S. BIGOT, O. DEWITTE, F. MAKANZU IMWANGANA, J. C. MAKI MATESO, N. M MORON, T. PELLARIN, N. PHILIPPON, M. SAHANI and G. SAMBA, *Q. J. R. Meteorol. Soc.*, 145 (2019) 2115 - 2138
- [19] R. BINDLISH, T. J. JACKSON, E. WOOD, H. GAO, P. STARKS, D. BOSCH and V. LAKSHMI, *Remote Sens. Environ.*, 85 (2003) 507 - 515
- [20] A. K. MITRA, I. M. MOMIN, E. N. RAJAGOPAL, S. BASU, M. N. RAJEEVAN and T. N. KRISHNAMURTI, *J. Earth Syst. Sci.*, 122 (2013) 1173 1182
- [21] N. ROUCHE, G. MAHE, S. ARDOIN-BARDIN, B. BRISSAUD, J. F. BOYER, A. CRES, C. DIEULIN, G. BARDIN, G. COMMELARD, A. DEZETTER, J. E. PATUREL and E. SERVAT, *Sécheresse*, 21 (2010) 336 338
- [22] G. J. HUFFMAN, R. F. ADLER, D. T. BOLVIN, G. GU, E. J. NELKIN, K. J. BOWMAN, Y. HONG, E. F. STOCKER and D. B. WOLFF, *Journal of hydrometorology*, 8 (2007) 38 - 55
- [23] H. LAURENT, I. JOBARD and A. TOMA, Atmospheric Research, 47 (1998) 651 670

- [24] S. SHIMIZU, R. OKI and T. IGARASHI, Advances in Space Research, 28 (2001) 143 148
- [25] D. I. GRIMES, E. PARDO-IGUZQUIZA and R. BONIFACIO, Journal of Hydrology, 222 (1999) 93 108
- [26] S. MOAZAMI, S. GOLIAN, M. R. KAVIANPOUR and Y. HONG, Int. J. Remote Sens., 34 (2013) 8156 8171
- [27] Y. CAI, C. JIN, A. WANG, D. GUAN, J. WU, F. YUAN and L. XU, *PLoSONE*, 10 (2015) 1 22
- [28] P. T. NASTOS, J. KAPSOMENAKIS and K. M. PHILANDRAS, Atmos. Res., 169 (2016) 497 514
- [29] T. DINKU, S. CHIDZAMBWA, P. S. CECCATO, J. CONNOR and C. F. ROPELEWSKI, Int. J. Remote Sens., 29 (2008) 4097 - 4110
- [30] V. DUBREUIL, J. RONCHAIL et D. AVOR, Potentialités des données TRMM pour la spatialisation des précipitations au Mato Grosso. XXe Colloque de l'Association Internationale de Climatologie, Carthage, Tunisie, (2008)
- [31] Y. DAKING and O. TETSUO, Journal of hydrometeorology, 2 (2000) 122 139
- [32] H. LUBES, J. M. MASSON, E. SERVAT, J. E. PATUREL, B. KOUAME et J. F. BOYER, Caractérisation des fluctuations dans une série chronologique par applications de tests statistiques. Etudes bibliographiques UR2-CEC, Orstom, Montpellier, (1994)
- [33] M. TURKO, "Validation des données TRMM dans la région du Parapeti-Rio Grande (Chaco bolivien, sudouest du bassin de l'Amazone)", Mémoire de Master 2, Université Pierre et Marie Curie, France, (2014)
- [34] D. AVOR, V. DUBREUIL, J. RONCHAIL et M. SIMÕES PENELLO, *Climatologie*, 5 (2008) 49 69
- [35] M. ALMAZROUI, Atmos. Res., 99 (2011) 400 414
- [36] V. M. MANTAS, Z. LIU, C. CARO and A. J. PEREIRA, Atmos. Res., 163 (2015) 132 145
- [37] A. MILEWSKI, R. ELKADIRI and M. DURHAM, *Remote Sens.*, 7 (2015) 5697 5717
- [38] G. LIENOU, G. MAHE, J. E. PATUREL, E. SERVAT, D. SIGHOMNOU, G. E. EKODECK, A. DEZETTER et C. DIEULIN, *Journal des Sciences Hydrologiques*, 53 (2008) 789 800
- [39] M. TSALEFAC, F. HIOL HIOL, G. MAHE, A. LARAQUE, D. SONWA, P. SHOLTE, W. POKAM, A. HAENSLER, T. BEYENE, F. LUDWIG, F. K. MKANKAM, V. M. DJOUFACK, M. NDJATSANA and C. DOUMENGE, In "The forests of the Congo basin. Forests and climate change", Eds. C. WASSEIGE, M. TADOUM, A. EBA'A and C. DOUMENGE, Weyrich, Belgium, Vol. 2, (2015) 37 52
- [40] P. OZER, C. BODART et B. TYCHON, Revue européenne de géographie, 38 (2005) 1 24
- [41] A. ALHASSANE, S. SALACK, M. LY, I. LONA, S. B. TRAORE et B. SARR, Sécheresse, 24 (2013) 282 93
- [42] T. LODOUN, A. GIANNINI, P. S. TRAORE, L. SOME, S. MOUSSA, M. VAKSMANN and J. M. RASOLODIMBY, Environmental Development, 5 (2013) 96 - 108
- [43] P. OZER, Y. C. HOUNTONDJI et M. O. LAMINOU, Geo-Eco-Trop., 33 (2009) 11 30
- [44] L. DESCROIX, A. DIONGUE, A. NIANG, H. DACOSTA, G. PANTHOU et G. QUANTIN, *Climatologie*, 10 (2013) 37 - 49
- [45] L. DESCROIX, Y. SANE, T. MAMADOU, S. P. MANGA, D. BOUBACAR, J. MINGOU, V. MENDY, S. COLY, A. DIEYE, A. BADIANE, M. J. SENGHOR, A. B. DIEDHIOU, S. DJIBY, Y. BOUAITA, S. SOUMARÉ, A. DIOP, F. BAKARY, A. BAMOL, E. MACHU, J. P. MONTOROI, J. ANDRIEU and J. P. VANDERVAERE, *Water*, 12 (2020) 1 26