

Analyse en Composantes Principales des Interactions Rayonnement-Aérosols-Nuages-Couvert végétal dans la région de l'Equateur en République Démocratique du Congo

MINGA MILOLO Stéphane¹, KABASELE YENGA-YENGA Albert¹,
LUMBUENAMO SINZI Raymond²

¹Département de physique et des sciences appliquées, Université Pédagogique Nationale (UPN), RD.
Congo

²Faculté des Sciences Agronomiques, Université de Kinshasa (UNIKIN), RD. Congo

Résumé :

Contexte : L'ensemble du système climatique est en interaction avec l'extérieur par l'intermédiaire du seul rayonnement électromagnétique. Entre les composantes du système climatique, il existe des relations plus ou moins fortes, des couplages, réciproques ou non. Dans le premier cas, on parle d'**interactions**. Les interactions sont caractérisées par un transfert d'énergie d'une composante vers une autre, soit par l'action du vent à la surface, soit par un transfert de chaleur par rayonnement électromagnétique, soit par évaporation, soit par précipitations (Fouquart, Y. 2003).

De treize variables climatiques choisies : l'épaisseur optique des aérosols (AOD) et celle de nuages (COD), les irradiances (Ird), les infrarouges diffusés (OLR), les ondes courtes diffusées (OSR), le rayonnement net (Rnet), l'albédo (Alb), l'indice de végétation par différence normalisée (NDVI), les précipitations (PPmm), l'évapotranspiration potentielle (ETP), la vitesse du vent (V_{vent}), la température maximum (T_x) et la température minimum de l'air (T_n), lesquelles expliqueront mieux les interactions entre le rayonnement, les aérosols, les nuages et le couvert végétal dans la région de l'Equateur en RD. Congo ?

Matériels et méthodes : Les données climatiques sont généralement plus accessibles dans les pays industrialisés que dans les pays en voie de développement (Bokoye, A.I., 2009). Toutefois, pour notre étude, les données des variables d'étude in situ et satellitaires ont été disponibles. Treize variables climatiques et prognostiques sont retenues et suivies au pas de temps mensuel et annuel, de 1990 à 2021, soit 32 ans ou 384 mois (Directives OMM, 2017). Les stations météorologiques de la METTELSAT (Agence Nationale de Météorologie et de Télédétection par Satellite) et de la RVA (Régie des Voies Aériennes) ont fourni certaines données in situ du milieu d'étude : la zone de l'Equateur en République Démocratique du Congo. La RD. Congo ne dispose pas assez des stations météorologiques au sol. Ces données in situ ont été consolidées avec celles fournies par les capteurs laser PA-II_SD du réseau PurpleAir, installées à Bangui, capitale de la République Centrafricaine. Les produits satellitaires utilisés sont décrits ci-dessous. Les données MODIS, fournies deux fois par jour, sont accessibles au public depuis : le site web du Centre d'archives actives distribuées (DAAC) de la NASA Level-1-2-3 and Atmosphere Archive and Distribution System (LAADS) (<https://ladsweb.modaps.eosdis.nasa.gov/>). On a utilisé aussi les produits CERES dans notre étude.

Résultats : Les treize variables de l'étude sont explicatives, y compris le COD qui présente les faibles coefficients à l'ACP de Basankusu et Businga. Elles expliquent en moyenne à **65,786 %** les interactions entre le rayonnement, les aérosols, les nuages et le couvert végétal dans la zone de l'Equateur en République Démocratique du Congo. Il reste donc en moyenne 34,214 % de la variance du modèle inexpliquée dans la région.

Conclusion : En modèle factoriel, toutes les variables de l'étude « expliquent » des interactions Rayonnement-Aérosols-Nuages et Végétation à **62,593 %** à Basankusu ; **62,632 %** à Bikoro ; à **65,520 %** à Boyakori (où la température minimum explique seule à **8,760 %**) ; à **69,734 %** à Businga ; à **67,264 %** à Bwamandema ; à **64,521 %** à Mondingiri ; à **67,676 %** à Monkoto ; à **63,235 %** à Yakoma ; à **68,899 %** à Yundji. En particulier, la température minimum et la température maximum expliquent seules les interactions : **10,991%** à Basankusu, **10,760%** avec l'irradiance à Bikoro, **8,760%** (T_n) à Boyakori ; à Businga elles sont dans les 2 premières composantes à **47,513%** et **14,091%**, à Bwamandema **12,116%** T_n et le Rayonnement net, **10,430%** à Mondingiri, **28,273%** avec l'irradiance à Monkoto, **16,647%** T_n et le Rayonnement net à Yakoma, enfin **21,046%** à Yundji.

Mots clés : ACP, Indice KMO et Test de Barlet, interaction, variance

Date of Submission: 02-04-2023

Date of Acceptance: 13-04-2023

avec celles fournies par les capteurs laser PA-II_SD du réseau PurpleAir, installées à Bangui, capitale de la République Centrafricaine.

Enfin, toutes les données météorologiques des stations au sol ont été testées pour en vérifier la cohérence temporelle et spatiale.

b) Données satellitaires

Les produits satellitaires offrent aujourd’hui de nouveaux outils pour étudier l’évolution spatiale et temporelle des variables de l’étude. Ils assurent une vision horizontale en 2D et verticale en 3D des aérosols et des nuages, et offrent une couverture spatiale maximale. Dans cette étude, les produits satellitaires suivants sont utilisés :

1. Produits MODIS

Les données MODIS, fournies deux fois par jour, sont accessibles au public depuis :

✓ le site web du Centre d’archives actives distribuées (DAAC) de la NASA Level-1-2-3 and Atmosphere Archive and Distribution System (LAADS) (<https://ladsweb.modaps.eosdis.nasa.gov/>) ;

✓ les sites de la NASA : <https://aeronet.gsfc.nasa.gov/>, ou modis.gsfc.gov/data/ et disponibles en trois niveaux : L₁, L₂, L₃ et L₄.

Elles sont distribuées sous forme de fichiers correspondant à 5 minutes d’enregistrement (Kacenenbogen, M. 2004).

2. Produits CERES

L’instrument CERES à bord de nombreux satellites en orbite autour de la Terre enregistre le flux de rayonnement solaire réfléchi et le rayonnement à ondes longues utilisé dans le bilan radiatif de la Terre. Ainsi, on trouve :

- Aqua/CERES/Rayonnement solaire entrant : irradiances ;
- Terra/CERES/Rayonnement sortant à ondes longues : infrarouges diffusés ;
- Terra/CERES/Rayonnement solaire réfléchi ;
- Terra/CERES/Rayonnement à ondes courtes.

C. Création des centroïdes

Les observations faites dans cette étude portent sur la zone de l’Equateur dont neufs centroïdes ont été créés et associés aux localités respectives (Tableau 1) ; ils deviendront dans la suite des stations virtuelles d’observation (Christine, 2012).

Tableau 1. Centroïdes créés

N°	Latitude	Longitude	Nom des centroïdes	Sigle
1	1,2499	19,8499	Basankusu	Bsu
2	-0,75	18,15	Bikoro	Bro
3	2,8965	19,4005	Boyakori	Bri
4	3,3499	20,8499	Businga	Bga
5	4,1499	18,75	Bwamandema	Bma
6	2,1671	21,3723	Mondingiri	Mri
7	-1,65	20,65	Monkoto	Mto
8	4,1499	22,4499	Yakoma	Yma
9	-0,02432	21,5716	Yundji	Yji

Les neufs centroïdes repris dans le tableau 1 ci-dessus, sont de part et d’autre de la latitude nulle : six sont situées aux latitudes nord et trois aux latitudes sud, comme indiqué sur la carte de la figure 3.



Figure 3.

Centroïdes créés

D. Variables de l'étude

Treize variables climatiques et prognostiques sont retenues et suivies au pas de temps mensuel et annuel, de 1990 à 2021, soit 32 ans ou 384 mois (Directives OMM, 2017) : l'Indice de Végétation par Différence Normalisée (NDVI), l'Evapotranspiration Potentielle (ETP), les Précipitations Mensuelles (PP), les Irradiances (IRD), le Rayonnement Net (Ray_Net), le Rayonnement Infrarouge diffusé (OLR), le Rayonnement diffusé ondes courtes (OSR), l'albédo de simple diffusion (Alb), la vitesse du vent (V_vent), l'épaisseur Optique des aérosols (AOD), l'épaisseur Optique des nuages (COD), la température minimum de l'air (T_n), la température maximum de l'air (T_x).

E. Statistiques descriptives des variables

Tableau 2. Statistiques descriptives des variables

Statistiques descriptives des variables						
Variabes	N	Minimum	Maximum	Moyenne	Ecart type	Variance
1. AOD	3456	,008	,988	,35304	,184064	,034
1. COD	3453	,590	42,320	12,03289	6,397728	40,931
2. IRD_W/m ²	3456	137,842	265,333	202,45736	28,096014	789,386
3. Ray_Net_W/m ²	3454	30,870	127,870	82,07222	17,221358	296,575
4. OLR_W/m ²	3454	139,790	276,970	218,14222	15,151957	229,582
5. OSR_W/m ²	3454	61,910	162,300	119,59462	18,513906	342,765
6. Albédo_%	3456	10,611	15,301	12,98027	1,064451	1,133
7. ETP_mm_mois	3456	4,000	154,300	96,80741	23,343515	544,920
8. NDVI	3456	,459	,896	,76219	,075276	,006
9. PP_mm_mois	3456	,000	440,600	141,35506	70,595436	4983,716
10. V_vent_m/s	3456	,400	1,800	,96136	,193648	,037
11. Tx_°C	3456	27,510	39,600	30,63050	1,382912	1,912
12. Tn_°C	3456	16,430	24,070	20,16730	,883128	,780
N valide (liste)	3451					

Sur une période de 32 ans, soit de 1990 à 2021, par variables, 3456 observations en moyenne, sont effectuées. Les valeurs extrêmes, la moyenne, l'écart type et la variance de chaque variable sont indiqués (Tableau 2).

III. Méthodes

La méthodologie adoptée s'articule autour de trois étapes essentielles suivantes :

- ✓ Générer et créer les centroïdes d'observations. Extraire des images satellitaires MODIS et Sentinel-2, les données relatives aux variables choisies et à la zone de l'étude. Faire le monitoring de treize variables ainsi que leurs anomalies standardisées, aux pas mensuel et annuel.
- ✓ Procéder à l'Analyse en Composantes Principales (ACP) de neuf centroïdes pour en dégager les variables les plus explicatives quant aux interactions Rayonnements-Aérosols-Nuages et Végétation.
- ✓ Test de Kaiser-Meyer-Olkin (KMO)

Mesure généralisée de la corrélation partielle entre les variables de l'étude, le test de Kaiser-Meyer-Olkin (KMO) est une mesure basée sur la moyenne des coefficients de corrélation situés dans la diagonale de la matrice anti-image, et définie par (Stafford, J. et al, 2006) :

$$KMO = \frac{\sum_{i \neq j} r_{ij}^2}{\sum_{i \neq j} r_{ij}^2 + \sum_{i \neq j} a_{ij}^2}$$

La lecture du test KMO, sur la validité de l'échantillon, est expliquée dans le tableau 3 ci-dessous.

Tableau 3 Lecture du test KMO

Indice KMO	Validité de l'échantillon
≥ 0.90	Très grande validité
0.80 – 0.89	Grande validité
0.70 – 0.79	Validité moyenne
0.60 – 0.69	Validité faible
0.50 – 0.59	Validité au seuil limite
≤ 0.49	Invalide

Il donne des indications sur la validité de l'échantillon. Plusieurs échantillons, in situ et issus de différents satellites, sont présentés et exploités dans notre étude. Le test KMO sur la validité leur est appliqué.

IV. Résultats

1. Centroïde de Basankusu

A. Indice KMO et Test de Barlett

Tableau 3. Indice KMO et test de Bartlett

Indice KMO et test de Bartlett ^a		
Indice de Kaiser-Meyer-Olkin pour la mesure de la qualité d'échantillonnage.		,806
Test de sphéricité de Bartlett	Khi-carré approx.	2739,159
	ddl	78
	Signification	,000
a. Seules les observations pour lesquelles Station = Bsu sont utilisées pendant la phase d'analyse.		

Le tableau 3 nous renseigne sur le test de Kaiser-Meyer-Olkin et le test de sphéricité de Bartlett. Le premier, sur la qualité d'échantillonnage de Basankusu, est de **0,806** (échantillon de grande validité) et le second est de **0,000** (très satisfaisant) : la recherche des composantes est donc justifiée.

B. Variance totale expliquée

Tableau 4. Variance totale expliquée

Composante	Variance totale expliquée ^a								
	Valeurs propres initiales			Sommes extraites du carré des chargements			Sommes de rotation du carré des chargements		
	Total	% de la variance	% cumulé	Total	% de la variance	% cumulé	Total	% de la variance	% cumulé
1	4,449	34,225	34,225	4,449	34,225	34,225	3,885	29,881	29,881
2	2,259	17,377	51,603	2,259	17,377	51,603	2,618	20,138	50,019
3	1,429	10,991	62,593	1,429	10,991	62,593	1,635	12,574	62,593
4	,986	7,583	70,176						

Méthode d'extraction : Analyse en composantes principales.
a. Seules les observations pour lesquelles Station = Bsu sont utilisées pendant la phase d'analyse.

Le tableau 4 présente les poids de trois (3) composantes essentielles :

- ✓ la première composante exprime 34,225 % de la variance expliquée
- ✓ la deuxième composante, 17,377 % de cette variance ;
- ✓ et la dernière composante, 10,991 % de la variance.

Ce modèle factoriel « explique » **62,593 %** des interactions Rayonnement-Aérosols-Nuages et Végétation. Il reste donc 37,407 % de la variance du modèle inexpliqué.

C. Présentation des résultats

Les résultats de la structure factorielle finale sont repris dans le tableau 5 ci-dessous.

Tableau 5. Présentation des résultats de l'ACP des interactions à Basankusu

Composantes	Variables	Coefficients	Variance	
			Réelle	Interne
I	1. Albédo	0.913	34.225 %	54.68 %
	2. Rayonnement net	0.897		
	3. Irradiance	0.761		
	4. Vitesse_vent	0.656		
	5. NDVI	0.533		
II	1. OLR	0.763	17.377 %	27.76 %
	2. ETP	0.719		
	3. PPmm	0.712		
	4. OSR	0.619		
	5. AOD	0.511		
III	1. Température min	0.955	10.991 %	17.56 %
	2. Température max	0.695		
TOTAL			62,593 %	100 %

Le tableau 5 dresse le bilan final de l'analyse en composantes principales des interactions Rayonnement-Aérosols-Nuages-Végétation à Basankusu conformément aux exigences de l'ACP (Stafford et al. 2005). On remarque que la variable COD ne pèse pas assez et que les douze restantes expliquent à **62,593 %** les interactions à Basankusu.

2. Centroïde de Bikoro

A. Indice KMO et Test de Barlett

Tableau 6. Indice KMO et test de Bartlett

Indice KMO et test de Bartlett ^a	
Indice de Kaiser-Meyer-Olkin pour la mesure de la qualité d'échantillonnage.	,823

Test de sphéricité de Bartlett	Khi-carré approx.	2667,584
	ddl	78
	Signification	,000

a. Seules les observations pour lesquelles Station = Bro sont utilisées pendant la phase d'analyse.

Le test de Kaiser-Meyer-Olkin sur la qualité d'échantillonnage de Bikoro, est de **0,823** (échantillon de grande validité) et le test de sphéricité de Bartlett est de **0,000** (très satisfaisant) : ce qui justifie la recherche des composantes (Tableau 6).

B. Variance totale expliquée

Tableau 7 Variance totale expliquée

Composante	Variance totale expliquée ^a								
	Valeurs propres initiales			Sommes extraites du carré des chargements			Sommes de rotation du carré des chargements		
	Total	% de la variance	% cumulé	Total	% de la variance	% cumulé	Total	% de la variance	% cumulé
1	4,180	32,157	32,157	4,180	32,157	32,157	2,778	21,368	21,368
2	2,563	19,715	51,872	2,563	19,715	51,872	2,697	20,743	42,110
3	1,399	10,760	62,632	1,399	10,760	62,632	2,668	20,522	62,632
4	,989	7,605	70,236						

Méthode d'extraction : Analyse en composantes principales.

a. Seules les observations pour lesquelles Station = Bro sont utilisées pendant la phase d'analyse.

Le tableau 7 présente les poids de trois (3) composantes essentielles :

- ✓ la première composante exprime 32,157 % de la variance expliquée
- ✓ la deuxième composante, 19,715 % de cette variance ;
- ✓ et la dernière composante, 10,760 % de la variance.

Le modèle factoriel « explique » 62,632 % des interactions Rayonnement-Aérosols-Nuages et Végétation à Bikoro. Il reste donc 37,368 % de la variance du modèle inexpliqué.

C. Présentation des résultats

Tableau 8 Présentation des résultats de l'ACP des interactions à Bikoro

Composantes	Variables	Coefficients	Variance	
			Réelle	Interne
I	1. NDVI	0.851	32.157 %	51.34 %
	2. OSR	0.714		
	3. COD	0.544		
	4. Vitesse_vent	-0.542		
II	1. PPmm	0.789	19.715 %	31.48 %
	2. ETP	0.749		
	3. Ray_Net	0.663		
	4. Albédo	-0.626		
	5. AOD	-0.551		
	6. OLR	-0.467		
III	1. Température min.	0.885	10.760 %	17.18 %
	2. Température max	0.872		
	3. Irradiance	0.680		
TOTAL			62,632 %	100 %

Ce tableau dresse le bilan final de l'analyse en composantes principales des interactions Rayonnement-Aérosols-Nuages-Végétation à Bikoro. Toutes les variables de l'étude expliquent à **62,632 %** les interactions à Bikoro.

3. Centroïde de Boyakori

A. Indice KMO et Test de Bartlett

Tableau 9 Indice KMO et test de Bartlett

Indice KMO et test de Bartlett ^a		
Indice de Kaiser-Meyer-Olkin pour la mesure de la qualité d'échantillonnage.		,804
Test de sphéricité de Bartlett	Khi-carré approx.	3118,688
	ddl	78
	Signification	,000

a. Seules les observations pour lesquelles Station = Bri sont utilisées pendant la phase d'analyse.

Le test de Kaiser-Meyer-Olkin sur la qualité d'échantillonnage de Boyakori, est de **0,804** (échantillon de grande validité) et le test de sphéricité de Bartlett est de **0,000** (très satisfaisant) : la recherche des composantes est donc justifiée.

B. Variance totale expliquée

Tableau 10 Variance totale expliquée

Composante	Variance totale expliquée ^a								
	Valeurs propres initiales			Sommes extraites du carré des chargements			Sommes de rotation du carré des chargements		
	Total	% de la variance	% cumulé	Total	% de la variance	% cumulé	Total	% de la variance	% cumulé
1	5,233	40,251	40,251	5,233	40,251	40,251	3,523	27,098	27,098
2	2,146	16,509	56,760	2,146	16,509	56,760	3,377	25,975	53,073
3	1,139	8,760	65,520	1,139	8,760	65,520	1,618	12,447	65,520
4	,848	6,523	72,043						

Méthode d'extraction : Analyse en composantes principales.
a. Seules les observations pour lesquelles Station = Bri sont utilisées pendant la phase d'analyse.

Le tableau 10 présente les poids de trois (3) composantes essentielles :

- ✓ la première composante exprime 40,251 % de la variance expliquée
- ✓ la deuxième composante, 16,509 % de cette variance ;
- ✓ et la dernière composante, 8,760 % de la variance.

Ce modèle factoriel « explique » **65,520 %** des interactions Rayonnement-Aérosols-Nuages et Végétation à Boyakori. Il reste donc 34,480 % de la variance du modèle inexpliqué.

C. Présentation des résultats

Tableau 11 Présentation des résultats de l'ACP des interactions à Boyakori

Composantes	Variables	Coefficients	Variance	
			Réelle	Interne
I	1. OLR	0.856	40.251 %	61.43 %
	2. PPmm	0.786		
	3. OSR	0.739		
	4. ETP	0.656		
	5. AOD	0.582		
	6. NDVI	0.431		
II	1. Rayonnement net	0.789	16.509 %	25.20 %
	2. IRD	0.749		
	3. Température max	0.663		
	4. Albédo	0.626		
	5. Vitesse_vent	0.551		
	6. COD	0.415		
III	1. Température min	0.903	8.760 %	13.37 %
TOTAL			65,520 %	100 %

Le tableau 11 dresse le bilan final de l'analyse en composantes principales des interactions Rayonnement-Aérosols-Nuages-Végétation à Boyakori, conformément aux exigences dans la présentation de rapport de recherche en ce qui concerne l'analyse en composantes principales (Stafford et al. 2005). A Boyakori, la température minimum explique seule à **8,760 %** et le reste des variables de l'étude à **56,760 %** les interactions.

4. Centroïde de Businga

A. Indice KMO et Test de Barlett

Tableau 12 Indice KMO et test de Bartlett

Indice KMO et test de Bartlett ^a		
Indice de Kaiser-Meyer-Olkin pour la mesure de la qualité d'échantillonnage.		,838
Test de sphéricité de Bartlett	Khi-carré approx.	3512,562
	ddl	78
	Signification	,000

a. Seules les observations pour lesquelles Station = Bga sont utilisées pendant la phase d'analyse.

Le tableau 13 nous renseigne sur le test de Kaiser-Meyer-Olkin et le test de sphéricité de Bartlett. Le premier, sur la qualité d'échantillonnage de Businga, est de **0,838** (échantillon de grande validité) et le second est de **0,000** (très satisfaisant) : la recherche des composantes est donc justifiée.

B. Variance totale expliquée

Tableau 14 Variance totale expliquée

Composante	Variance totale expliquée ^a								
	Valeurs propres initiales			Sommes extraites du carré des chargements			Sommes de rotation du carré des chargements		
	Total	% de la variance	% cumulé	Total	% de la variance	% cumulé	Total	% de la variance	% cumulé
1	6,177	47,513	47,513	6,177	47,513	47,513	3,455	26,575	26,575
2	1,832	14,091	61,604	1,832	14,091	61,604	3,187	24,519	51,093
3	1,057	8,130	69,734	1,057	8,130	69,734	2,423	18,641	69,734
4	,919	7,071	76,805						

Méthode d'extraction : Analyse en composantes principales.
 a. Seules les observations pour lesquelles Station = Bga sont utilisées pendant la phase d'analyse.

Les poids de trois (3) composantes essentielles sont présentés dans le tableau 14 ci-dessus :

- ✓ la première composante exprime 47,513 % de la variance expliquée ;
- ✓ la deuxième composante, 14,091 % de cette variance ;
- ✓ et la dernière composante, 8,130 % de la variance.

On remarque que le modèle factoriel « explique » **69,734 %** des interactions Rayonnement-Aérosols-Nuages et Végétation à Businga. Il reste donc 30,266 % de la variance du modèle inexpliqué.

C. Présentation des résultats

Tableau 15 Présentation des résultats de l'ACP des interactions à Businga

Composantes	Variables	Coefficients	Variance	
			Réelle	Interne
I	1. ETP	0.790	47.513 %	68.14 %
	2. Température min.	0.763		
	3. PPmm	0.697		
	4. OSR	0.659		
	5. Albédo	0.647		
	6. AOD	0.552		
II	1. OLR	0.835	14.091 %	20.21 %
	2. IRD	0.737		
	3. Température max	0.710		
	4. Vitesse_vent	0.589		
III	1. Rayonnement net	0.926	8.130 %	11.66 %
	2. NDVI	0.700		
TOTAL			69,734 %	100 %

Le bilan final de l'analyse en composantes principales des interactions Rayonnement-Aérosols-Nuages-Végétation à Businga est dressé dans le tableau 15, comme souvent exigé dans la présentation de rapport de recherche en ce qui concerne l'analyse en composantes principales (Stafford et al. 2005). A Businga, douze variables de l'étude expliquent à **69,734 %** les interactions.

5. Centroïde de Bwamandema

A. Indice KMO et Test de Barlett

Tableau 16 Indice KMO et test de Bartlett

Indice KMO et test de Bartlett ^a		
Indice de Kaiser-Meyer-Olkin pour la mesure de la qualité d'échantillonnage.		,796
Test de sphéricité de Bartlett	Khi-carré approx.	3561,355
	ddl	78
	Signification	,000

a. Seules les observations pour lesquelles Station = Bma sont utilisées pendant la phase d'analyse.

Le test de Kaiser-Meyer-Olkin sur la qualité d'échantillonnage de Businga, est de **0,796** (échantillon à la limite de grande validité) et le test de sphéricité de Bartlett est de **0,000** (très satisfaisant) : la recherche des composantes est donc justifiée.

B. Variance totale expliquée

Tableau 17 Variance totale expliquée

Composante	Variance totale expliquée ^a								
	Valeurs propres initiales			Sommes extraites du carré des chargements			Sommes de rotation du carré des chargements		
	Total	% de la variance	% cumulé	Total	% de la variance	% cumulé	Total	% de la variance	% cumulé
1	5,066	38,967	38,967	5,066	38,967	38,967	4,983	38,331	38,331
2	2,103	16,180	55,147	2,103	16,180	55,147	1,929	14,842	53,172
3	1,575	12,116	67,264	1,575	12,116	67,264	1,832	14,091	67,264
4	,976	7,508	74,772						

Méthode d'extraction : Analyse en composantes principales.
 a. Seules les observations pour lesquelles Station = Bma sont utilisées pendant la phase d'analyse.

L'analyse en composantes principales a dégagé trois facteurs (composantes) dont les poids respectifs sont repris dans le tableau 17 :

- ✓ la première composante exprime 38,967 % de la variance expliquée ;
- ✓ la deuxième composante, 16,180 % de cette variance ;
- ✓ et la dernière composante, 12,116 % de la variance.

Ce modèle factoriel « explique » **67,264 %** des interactions Rayonnement-Aérosols-Nuages et Végétation à Bwamandema. Il reste donc 32,736 % de la variance du modèle inexpliqué.

C. Présentation des résultats

Tableau 18 Présentation des résultats de l'ACP des interactions à Bwamandema

Composantes	Variables	Coefficients	Variance	
			Réelle	Interne
I	1. Albédo	0.885	38.967 %	57.93 %
	2. NDVI	0.847		
	3. PPmm	0.832		
	4. ETP	0.730		
	5. Température max	0.718		
	6. Vitesse_vent	0.693		
	7. IRD	0.680		
	8. COD	0.612		
	9. AOD	0.591		
II	1. OSR	0.978	16.180 %	24.05 %
	2. OLR	0.951		
III	1. Température min.	0.789	12.116 %	18.02 %
	2. Rayonnement net	0.526		
TOTAL			67,264 %	100 %

Ce tableau dresse le bilan final de l'analyse en composantes principales des interactions Rayonnement-Aérosols-Nuages-Végétation à Bwamandema (Stafford et al. 2005). A Bwamandema, toutes les variables de l'étude expliquent à **67,264 %** les interactions.

6. Centroïde de Mondingiri

A. Indice KMO et Test de Barlett

Tableau 19 Indice KMO et test de Bartlett

Indice KMO et test de Bartlett ^a		
Indice de Kaiser-Meyer-Olkin pour la mesure de la qualité d'échantillonnage.	,823	
Test de sphéricité de Bartlett	Khi-carré approx.	2823,510
	ddl	78
	Signification	,000

a. Seules les observations pour lesquelles Station = Mri sont utilisées pendant la phase d'analyse.

Le tableau 19 nous renseigne sur le test de Kaiser-Meyer-Olkin et le test de sphéricité de Bartlett. Le premier, sur la qualité d'échantillonnage de Mondingiri, est de **0,823** (échantillon de grande validité) et le second est de **0,000** (très satisfaisant) : la recherche des composantes est donc justifiée.

B. Variance totale expliquée

Tableau 20 Variance totale expliquée

Composante	Variance totale expliquée ^a								
	Valeurs propres initiales			Sommes extraites du carré des chargements			Sommes de rotation du carré des chargements		
	Total	% de la variance	% cumulé	Total	% de la variance	% cumulé	Total	% de la variance	% cumulé
1	5,003	38,481	38,481	5,003	38,481	38,481	3,508	26,987	26,987
2	2,029	15,610	54,091	2,029	15,610	54,091	3,017	23,209	50,196
3	1,356	10,430	64,521	1,356	10,430	64,521	1,862	14,325	64,521
4	,913	7,024	71,545						

Méthode d'extraction : Analyse en composantes principales.
a. Seules les observations pour lesquelles Station = Mri sont utilisées pendant la phase d'analyse.

L'analyse en composantes principales a dégagé trois facteurs (composantes) dont les poids respectifs sont (Tableau 20) :

- ✓ la première composante exprime 38,481 % de la variance expliquée ;
- ✓ la deuxième composante, 15,610 % de cette variance ;
- ✓ et la dernière composante, 10,430 % de la variance.

Ce modèle factoriel « explique » **64,521 %** des interactions Rayonnement-Aérosols-Nuages et Végétation à Mondingiri. Il reste donc 35,479 % de la variance du modèle inexpliqué.

C. Présentation des résultats

Tableau 21 Présentation des résultats de l'ACP des interactions à Mondingiri

Composantes	Variables	Coefficients	Variance	
			Réelle	Interne
I	1. OLR	0.800	38.481 %	59.64 %
	2. OSR	0.781		
	3. PPmm	0.742		
	4. ETP	0.670		
	5. AOD	0.625		
	6. NDVI	0.592		
	7. COD	0.408		

II	1. Rayonnement net	0.828	15.610 %	24.19 %
	2. Vitesse_vent	0.724		
	3. Albédo	0.700		
	4. IRD	0.695		
III	1. Température min.	0.928	10.430 %	16.17 %
	2. Température max.	0.766		
TOTAL			64,521 %	100 %

Ce tableau dresse le bilan final de l'analyse en composantes principales des interactions Rayonnement-Aérosols-Nuages-Végétation à Mondingiri, comme souvent exigé dans la présentation de rapport de recherche en ce qui concerne l'analyse en composantes principales (Stafford et al. 2005). A Mondingiri, toutes les variables de l'étude expliquent à **64,521 %** les interactions.

7. Centroïde Monkoto

A. Indice KMO et Test de Bartlett

Tableau 22. Indice KMO et test de Bartlett

Indice KMO et test de Bartlett ^a		
Indice de Kaiser-Meyer-Olkin pour la mesure de la qualité d'échantillonnage.		,671
Test de sphéricité de Bartlett	Khi-carré approx.	2579,765
	ddl	78
	Signification	,000

a. Seules les observations pour lesquelles Station = Mto sont utilisées pendant la phase d'analyse.

Le tableau 22 nous renseigne sur le test de Kaiser-Meyer-Olkin et le test de sphéricité de Bartlett. Le premier, sur la qualité d'échantillonnage de Monkoto, est de **0,671** (échantillon de faible validité) et le second est de **0,000** (très satisfaisant) : la recherche des composantes est donc justifiée avec davantage d'attention.

B. Variance totale expliquée

Tableau 23 Variance totale expliquée

Composante	Variance totale expliquée ^a								
	Valeurs propres initiales			Sommes extraites du carré des chargements			Sommes de rotation du carré des chargements		
	Total	% de la variance	% cumulé	Total	% de la variance	% cumulé	Total	% de la variance	% cumulé
1	3,675	28,273	28,273	3,675	28,273	28,273	2,621	20,158	20,158
2	2,473	19,023	47,295	2,473	19,023	47,295	2,384	18,339	38,497
3	1,541	11,857	59,153	1,541	11,857	59,153	1,937	14,899	53,396
4	1,108	8,523	67,676	1,108	8,523	67,676	1,856	14,280	67,676
5	,959	7,378	75,054						

Méthode d'extraction : Analyse en composantes principales.

a. Seules les observations pour lesquelles Station = Mto sont utilisées pendant la phase d'analyse.

L'analyse en composantes principales a dégagé quatre facteurs (composantes) dont les poids respectifs sont repris dans le tableau 23 ci-dessus :

- ✓ la première composante exprime 28,273 % de la variance expliquée ;
- ✓ la deuxième composante, 19,023 % de cette variance ;
- ✓ la troisième composante, 11,857 % de la variance ;
- ✓ et la dernière composante, 8,523 % de la variance.

Ce modèle factoriel « explique » **67,676 %** des interactions Rayonnement-Aérosols-Nuages et Végétation à Monkoto. Il reste donc 32,324 % de la variance du modèle inexpliqué.

C. Présentation des résultats

Tableau 24 Présentation des résultats de l'ACP des interactions à Monkoto

Composantes	Variables	Coefficients	Variance	
			Réelle	Interne
I	1. Température min.	0.905	28.273 %	41.78 %
	2. Température max.	0.904		
	3. IRD	0.685		
II	1. Rayonnement net	0.747	19.023 %	28.11 %
	2. NDVI	0.692		
	3. Albédo	0.612		
	4. AOD	0.550		
	5. Vitesse_vent	0.492		
	6. COD	0.387		
III	1. PPmm	0.883	11.857 %	17.52 %
	2. ETP	0.801		
IV	1. OLR	0.940	8.523 %	12.59 %
	2. OSR	0.781		
TOTAL			67,676 %	100 %

Ce tableau dresse le bilan final de l'analyse en composantes principales des interactions Rayonnement-Aérosols-Nuages-Végétation à Monkoto. A Monkoto, toutes les variables de l'étude expliquent à **67,676 %** les interactions.

8. Centroïde de Yakoma

A. Indice KMO et Test de Barlett

Tableau 25 Indice KMO et test de Bartlett

Indice KMO et test de Bartlett ^a		
Indice de Kaiser-Meyer-Olkin pour la mesure de la qualité d'échantillonnage.		,811
Test de sphéricité de Bartlett	Khi-carré approx.	3613,498
	ddl	78
	Signification	,000

a. Seules les observations pour lesquelles Station = Yma sont utilisées pendant la phase d'analyse.

Le tableau 25 nous renseigne sur le test de Kaiser-Meyer-Olkin et le test de sphéricité de Bartlett. Le premier, sur la qualité d'échantillonnage de Yakoma, est de **0,811** (échantillon de grande validité) et le second est de **0,000** (très satisfaisant) : la recherche des composantes est donc justifiée.

B. Variance totale expliquée

Tableau 26 Variance totale expliquée

Composante	Variance totale expliquée ^a								
	Valeurs propres initiales			Sommes extraites du carré des chargements			Sommes de rotation du carré des chargements		
	Total	% de la variance	% cumulé	Total	% de la variance	% cumulé	Total	% de la variance	% cumulé
1	6,057	46,589	46,589	6,057	46,589	46,589	5,390	41,464	41,464
2	2,164	16,647	63,235	2,164	16,647	63,235	2,830	21,772	63,235
3	,863	6,639	69,874						

Méthode d'extraction : Analyse en composantes principales.
a. Seules les observations pour lesquelles Station = Yma sont utilisées pendant la phase d'analyse.

L'analyse en composantes principales a dégagé deux facteurs (composantes) dont les poids respectifs sont repris dans le tableau 26 ci-dessus :

- ✓ la première composante exprime 46,589 % de la variance expliquée ;
- ✓ et la dernière composante, 16,647 % de la variance.

Ce modèle factoriel « explique » **63,235 %** des interactions Rayonnement-Aérosols-Nuages et Végétation à Yakoma. Il reste donc 36,765 % de la variance du modèle inexpliqué.

C. Présentation des résultats

Tableau 27 Présentation des résultats de l'ACP des interactions à Yakoma

Composantes	Variables	Coefficients	Variance	
			Réelle	Interne
I	1. PPmm	0.874	46.589 %	73.68 %
	2. NDVI	0.847		
	3. OSR	0.791		
	4. Albédo	0.783		
	5. ETP	0.748		
	6. V_vent	0.725		
	7. OLR	0.723		
	8. Température max.	0.698		
	9. IRD	0.687		
	10. AOD	0.662		
	11. COD	0.482		
II	1. Rayonnement net	0.767	16.647 %	26.32 %
	2. Température min.	0.756		
TOTAL			63,235 %	100 %

Le tableau 27 dresse le bilan final de l'analyse en composantes principales des interactions Rayonnement-Aérosols-Nuages-Végétation à Yakoma. A Yakoma, toutes les variables de l'étude expliquent à **63,235 %** les interactions.

9. Centroïde de Yundji

A. Indice KMO et Test de Barlett

Tableau 28 Indice KMO et test de Bartlett

Indice KMO et test de Bartlett ^a		
Indice de Kaiser-Meyer-Olkin pour la mesure de la qualité d'échantillonnage.		,724
Test de sphéricité de Bartlett	Khi-carré approx.	2390,392
	ddl	78

	Signification	,000
--	---------------	------

a. Seules les observations pour lesquelles Station = Yji sont utilisées pendant la phase d'analyse.

Le tableau 28 nous renseigne sur le test de Kaiser-Meyer-Olkin et le test de sphéricité de Bartlett. Le premier, sur la qualité d'échantillonnage de Yundji, est de **0,724** (échantillon de validité moyenne) et le second est de **0,000** (très satisfaisant) : la recherche des composantes est donc justifiée.

B. Variance totale expliquée

Tableau 29 Variance totale expliquée

Composante	Variance totale expliquée ^a								
	Valeurs propres initiales			Sommes extraites du carré des chargements			Sommes de rotation du carré des chargements		
	Total	% de la variance	% cumulé	Total	% de la variance	% cumulé	Total	% de la variance	% cumulé
1	3,581	27,547	27,547	3,581	27,547	27,547	2,871	22,082	22,082
2	2,736	21,046	48,593	2,736	21,046	48,593	2,293	17,635	39,717
3	1,557	11,978	60,572	1,557	11,978	60,572	1,978	15,214	54,931
4	1,083	8,327	68,899	1,083	8,327	68,899	1,816	13,968	68,899
5	,852	6,550	75,450						

Méthode d'extraction : Analyse en composantes principales.

a. Seules les observations pour lesquelles Station = Yji sont utilisées pendant la phase d'analyse.

L'analyse en composantes principales a dégagé quatre facteurs (composantes) dont les poids respectifs, supérieurs à 1, sont repris dans le tableau 29 ci-dessus :

- ✓ la première composante exprime 27,547 % de la variance expliquée ;
- ✓ la deuxième, 21,046 % ;
- ✓ la troisième, 11,978 % ;
- ✓ et la dernière composante, 8,327 % de la variance.

Ce modèle factoriel « explique » **68,899 %** des interactions Rayonnement-Aérosols-Nuages et Végétation à Yundji. Il reste donc 31,101 % de la variance du modèle inexpliqué.

C. Présentation des résultats

Tableau 30 Présentation des résultats de l'ACP des interactions à Yundji

Composantes	Variables	Coefficients	Variance	
			Réelle	Interne
I	1. Albédo	0.818	27.547 %	39.98 %
	2. Rayonnement net	0.797		
	3. V_vent	0.750		
	4. NDVI	0.621		
	5. IRD	0.588		
II	1. Température min.	0.915	21.046 %	30.55 %
	2. Température max.	0.848		
III	1. OLR	0.888	11.978 %	17.38 %
	2. OSR	0.744		
	3. AOD	0.520		
IV	1. ETP	0.825	8.327 %	12.09 %
	2. PPmm	0.707		
	3. COD	0.553		
TOTAL			68,899 %	100 %

Ce tableau dresse le bilan final de l'analyse en composantes principales des interactions Rayonnement-Aérosols-Nuages-Végétation à Yundji, comme souvent exigé (Stafford et al. 2005). A Yundji, toutes les variables de l'étude expliquent à **68,899 %** les interactions.

V. Discussion

Les principaux résultats de l'ACP, sur les interactions Rayonnement-Aérosols-Nuages et Végétation dans la région sont les suivants :

- Le déterminant de la matrice de corrélation, premier test à considérer, est le plus petit possible, sans être égal à zéro, dans toutes les stations.
- Les échantillons de toutes les stations sont de grande validité, hormis ceux des stations de Bwamandema, Yundji et Monkoto, le confirme l'indice KMO. Toutefois, avec un nombre élevé d'itérations (11), la dernière station (Monkoto) présente l'un des meilleurs pourcentages d'explication (67.676 %) des interactions en étude.
- La signification du test de Bartlett, qui doit être inférieure ou égale à 0.05, est très bonne dans toutes les stations : 0.000. L'ACP validée.
- Toutes les variables de l'étude sont explicatives, y compris le COD qui présente les faibles coefficients à l'ACP de Basankusu et Businga.

Conclusion

En modèle factoriel, toutes les variables de l'étude « expliquent » des interactions Rayonnement-Aérosols-Nuages et Végétation à **62,593 %** à Basankusu ; **62,632 %** à Bikoro ; à **65,520 %** à Boyakori (où la température minimum explique seule à **8,760 %**) ; à **69,734 %** à Businga ; à **67,264 %** à Bwamandema ; à **64,521 %** à Mondingiri ; à **67,676 %** à Monkoto ; à **63,235 %** à Yakoma ; à **68,899 %** à Yundji. Il reste donc en moyenne 34,214 % de la variance du modèle inexpliquée dans la région.

Bref, les treize variables expliquent en moyenne à **65,786 %** les interactions entre le rayonnement, les aérosols, les nuages et le couvert végétal dans la zone de l'Equateur en République Démocratique du Congo. En particulier, la température minimum et la température maximum expliquent seules les interactions : **10,991%** à Basankusu, **10,760%** avec l'irradiance à Bikoro, **8,760%** avec la T_n à Boyakori ; à Businga elles sont dans les 2 premières composantes à **47,513%** et **14,091%** ; à Bwamandema **12,116%** avec le Rayonnement net ; **10,430%** à Mondingiri, **28,273%** avec l'irradiance à Monkoto ; **16,647%** avec la T_n et le Rayonnement net à Yakoma, enfin **21,046%** à Yundji.

Références Bibliographiques

- [1]. Avram, F. 2012. Séries temporelles : régression, et modélisation ARIMA(p,d,q). Université de Pau
- [2]. Cattiaux, J. 2014. Utilisation des statistiques en climat : un panorama. GAME | CNRS/Météo-France Toulouse
- [3]. Christine Thomas-Agnan 2012. Analyse statistique des données spatiales I. Toulouse School of Economics
- [4]. Doucouré, B.F. 2021. Analyse des séries temporelles : Etudier la dynamique d'une variable. Université Cheik Anta Diop de Dakar. Sénégal
- [5]. Dufresne J.L. (2000) La Physique du climat. Editions Le Pommier, Paris
- [6]. Dufresne J.L. (2002) La Physique de l'atmosphère. Editions Le Pommier, Paris
- [7]. Dufresne, J.L. 2007. Bilan énergétique de la Terre et rôle de l'effet de serre. CNRS/Université Pierre Marie Curie
- [8]. È. Janodet et F. Blasco, Cartes écologiques de la végétation et télédétection satellitaire. Les Presses de l'Université du Québec. © 1993. p. 247-261
- [9]. E. Youhao, W. Jihe, G. Shangyu, Y. Ping, and Y. Zihui. NDVI value classification for vegetation density. IEEE Int. Geosci. Remote Sens. Symp. Barcelona 3448 (2007)
- [10]. Elias, T. 2000. Restitution des Propriétés Optiques et Microphysiques des Aérosols à partir d'observations Sol des Luminances totale et polarisée dans le Visible et le Proche Infrarouge (Thèse de doctorat). Université des Sciences et Technologies de Lille
- [11]. Fouquart, Y. 2003. Le climat de la Terre. Presses universitaires du Septentrion
- [12]. GIEC : Bilan 2007 des changements climatiques : Rapport de synthèse, 2008
- [13]. GIEC : Synthèse du rapport AR6,2022
- [14]. Jacquemoud S., (2006), Physique de l'atmosphère, Télédétection et Géophysique spatiale, L3 Géosciences fondamentales, Université Paris 7- Denis Diderot
- [15]. Ménégos, M. 2009. Modélisation globale des interactions atmosphère-aérosols (Thèse de doctorat). Université de Toulouse
- [16]. Nabat, P. 2016. Interactions aérosols-rayonnement-nuages et variabilité climatique en Méditerranée (Thèse de doctorat). Université de Toulouse
- [17]. Stafford, J. et Bodson, P. 2006. L'analyse multivariée avec SPSS. Presses de l'Université du Québec