



VERS UNE TYPOLOGIE CLIMATIQUE ET ENVIRONNEMENTALE POUR L'ADAPTATION: APPLICATION DE L'ACP ET DE LA HCPC AUX 22 RÉGIONS DE MADAGASCAR

¹RASOANAIVO Tovoheri Christy, ²RATRIMOARISONINA Hasina Tahina,
²RAZAFIARISERA Ralay Tiana, ¹RANDRIAMBOLOLONA Tovoherizo

1-EDPA -Ecole Doctorale en PHYSIQUE ET APPLICATIONS-UNIVERSITE D'ANTANANARIVO

2-Ecole Doctorale en INGENIERIE ET GEOSCIENCE

Digital Object Identifier (DOI): <https://doi.org/10.5281/zenodo.23064688>

Résumé : L'approche avec l'Analyse en Composantes Principales (ACP) et de la Classification Ascendante Hiérarchique (HCPC) des 22 régions de Madagascar avec 8 paramètres climatiques (températures moyenne, minimale et maximale, précipitations, déficit hydrique, indice de végétation NDVI, indice de sécheresse SPI, évapotranspiration) fournissent une typologie climatique robuste. Elle met en évidence les contrastes géographiques majeurs et constitue un outil d'aide à la décision pour l'agriculture, la gestion durable de l'eau et l'adaptation au changement climatique. Les résultats montrent que les deux premiers axes de l'ACP expliquent 96 % de la variance totale, révélant un gradient humidité/sécheresse, d'une part et un gradient thermique d'autre part. La HCPC, basée sur ces axes, regroupe les régions en quatre classes principales dont la première classe est composée des régions humides (Atsinanana, Analanjirofo, Sava, Vatovavy, Atsimo-Atsinanana), les régions arides du Sud et Ouest (Androy, Atsimo-Andrefana, Menabe, Melaky) forment la seconde classe, les régions intermédiaires des Hautes Terres (Analamanga, Vakinankaratra, Itasy, Amoron'i Mania, Haute Matsiatra) la 3^e classe, et la dernière classe est formée par les régions chaudes du Nord-Ouest (Boeny, Sofia, Betsiboka, Diana).

Mots clés : Analyse en composantes principales, Classification Hiérarchique, Climat de Madagascar, Typologie régionale, Adaptation au changement climatique.

Abstract : This study applies Principal Component Analysis (PCA) and Hierarchical Clustering on Principal Components (HCPC) to the 22 regions of Madagascar, using eight climatic parameters (mean, minimum and maximum temperatures, precipitation, water deficit, NDVI vegetation index, SPI drought index, and evapotranspiration). The combined approach provides a robust climatic typology, highlighting major geographical contrasts and offering a decision-support tool for agriculture, sustainable water management, and climate change adaptation.

The first two PCA axes explain 96% of the total variance, revealing a humidity–drought gradient and a thermal gradient. Based on these axes, HCPC groups the regions into four main classes:

- Humid regions of the East (Atsinanana, Analanjirofo, Sava, Vatovavy, Atsimo-Atsinanana),
- Arid regions of the South and West (Androy, Atsimo-Andrefana, Menabe, Melaky),
- Intermediate regions of the Highlands (Analamanga, Vakinankaratra, Itasy, Amoron'i Mania, Haute Matsiatra),
- Hot regions of the Northwest (Boeny, Sofia, Betsiboka, Diana).

This typology underscores the climatic diversity of Madagascar and provides a scientific basis for regional planning and adaptation strategies in the face of increasing climate variability.

Abstract : Principal Component Analysis, Hierarchical Clustering, Madagascar Climate, Regional Typology, Climate Change Adaptation

1. Introduction

La diversité climatique de Madagascar, allant des zones humides de la côte Est aux régions arides du Sud, nécessite des méthodes statistiques robustes pour identifier des typologies régionales. L'Analyse en Composantes Principales (ACP) permet de réduire la dimensionnalité des données climatiques. Touaïbia et al. (2006) ont montré l'intérêt du couplage ACP-géostatistique pour cartographier la pluviométrie en Algérie, illustrant la pertinence de l'ACP dans l'étude des gradients climatiques. Manté (2008) a discuté de l'application de l'ACP aux chroniques environnementales, soulignant son rôle dans la détection des structures cachées dans les séries climatiques. Akewa Izandji Miha Batsola Kekeya (2026) a utilisé l'ACP pour identifier des zones climatiques homogènes à Madagascar, en lien avec les flux océaniques et la variabilité des précipitations. Ramarovahoaka et al. (2023) ont appliqué ACP et classification aux exploitations agricoles des Hautes Terres, montrant la capacité de ces méthodes à révéler des typologies socio-économiques et environnementales. La Classification Ascendante Hiérarchique sur Composantes Principales (HCPC) regroupe les régions en classes homogènes selon leurs profils, facilitant la mise en évidence de typologies climatiques. Des travaux publiés sur ScienceDirect (2019) ont utilisé la HCPC pour définir des zones climatiques à partir de données géographiques et météorologiques, confirmant la robustesse de cette approche pour le zonage environnemental. Le CIRAD et Agritrop (2023) ont mobilisé ACP/HCPC pour analyser la structure des exploitations agricoles et leur gestion des ressources, ce qui illustre l'applicabilité de ces méthodes dans des contextes tropicaux.

2. Méthodologies

La première étape commence par regrouper les données dans une base de données et ensuite de structurer les données sous formes de matrice. Ces données sont composées de 8 paramètres climatiques (températures moyenne, minimale et maximale, précipitations, déficit hydrique, indice de végétation NDVI, indice de sécheresse SPI, évapotranspiration) des 22 régions de Madagascar. Ces données proviennent de stations météorologiques nationales et de bases satellitaires (MODIS, CHIRPS).

2.1. Centrage -réduction

Ces données doivent être prétraitées avant utilisation, pour cela les variables climatiques ont été soumises à un centrage-réduction avant l'application de l'Analyse en Composantes Principales (ACP). Le centrage consiste à soustraire la moyenne de chaque variable afin d'obtenir une distribution de moyenne nulle, tandis que la réduction divise chaque valeur par l'écart-type de la variable, ce qui normalise la variance à l'unité. Cette étape est indispensable car les paramètres étudiés sont exprimés dans des unités différentes (millimètres pour les précipitations et le déficit hydrique, degrés Celsius pour les températures, indices adimensionnels pour le NDVI et le SPI). Sans ce traitement, les variables à grande amplitude numérique domineraient artificiellement l'analyse. Le centrage-réduction garantit que toutes les variables contribuent équitablement à la construction des axes factoriels et que l'ACP reflète avant tout les corrélations structurelles entre paramètres climatiques, plutôt que leurs différences d'échelle.

Ainsi, pour une variable X à n observations, on a :

$$Z_i = \frac{X_i - \bar{X}}{\sigma}$$

Où Z_i la valeur centrée réduite; X_i la valeur de l'observation i , $\bar{X}$ sa valeur moyenne et σ l'écart type correspondant.

2.2. Analyse par composantes principales (ACP)

Elle consiste à compresser l'information sans perte majeure. Chaque région sera considérée comme individu et chaque paramètre climatique comme variable.

- On cherche ensuite la matrice de corrélation pour des unités différentes pour les variables, sinon la matrice de covariance (unité homogène). Cette matrice sera à son tour diagonalisée, on obtient alors les valeurs propres λ ou encore le taux de variance expliqué par chaque axe. Les valeurs propres seront déterminées à son tour, il s'agit des coefficients de combinaison linéaire ou encore les axes principaux. Ces axes sont orthogonaux.
- Pour déterminer les composantes principales, les valeurs propres devront classer par ordre décroissant et en utilisant le critère de Kaiser (valeur propre > 1), on connaît ensuite le pourcentage de variance cumulée résumé par ces axes.
- L'étape suivante est la méthode de « scree plot » ou « éboulis » qui consiste à visualiser le « coude » (graphique des valeurs propres décroissantes), ainsi la variance expliquée devient

marginale. La méthode de contribution souligne l'importance relative d'une variable pour un axe donné. Elle permet d'identifier les variables dominantes sur les axes principaux.

- La méthode de $\cos^2$ à son tour mesure la qualité de représentation d'une variable ou d'un individu sur un axe ; plus le $\cos^2$ est élevé, meilleure est la projection. En d'autre mot, elle sert à sélectionner les variables bien représentées.
- Finalement, on utilise la méthode de corrélations qui détermine la corrélation entre les variables initiales et les axes. Cette méthode permet d'interpréter les axes comme des combinaisons linéaires de ces variables.

2.3. Analyse par Classification Ascendante Hiérarchique (HCPC)

La classification ascendante hiérarchique (HCPC) est une méthode de regroupement statistique qui construit une hiérarchie de classes à partir de données multidimensionnelles. Différentes démarches sont à suivre :

En premier lieu, chaque individu est considéré comme une classe distincte ; ainsi, selon une distance choisie, les classes les plus proches sont regroupées en minimisant la variance intragroupe. C'est la méthode de Ward, son avantage est l'obtention des classes homogènes et équilibrées. Ensuite, nous passons au dendrogramme, c'est-à-dire la représentation graphique montrant les regroupements successifs. Et finalement, l'étape de découpage qui consiste à choisir le nombre de classes en fonction de la hauteur des branches ou de critères statistiques.

3. Résultats

3.1. Matrice de corrélation des différentes variables

Les variables liées à la sécheresse et à la chaleur (ETP, déficit hydrique, températures) sont positivement corrélées avec la variable cible numéro 1. Les indicateurs d'humidité et de végétation (précipitations, NDVI, SPI12) sont négativement corrélés. Les p-values très faibles (<0.01) confirment la significativité statistique de toutes ces corrélations.

Tableau 1 : Corrélation avec la variable cible n°1

	corrélation	p.value
ETP_mm_an	0.9357171	1.665170e-10
Deficit_hydrique_mm	0.9248314	7.602309e-10
Temp_max_C	0.8227432	2.600275e-06
Temp_moy_C	0.6970686	3.120174e-04
Temp_min_C	0.5549073	7.351196e-03
Precipitation_mm_an	-0.7260412	1.306458e-04
NDVI_moyen	-0.8512038	5.119107e-07
SPI12_moyen	-0.9051061	7.188055e-09

Les températures minimales et moyennes ressortent comme les facteurs climatiques les plus fortement corrélés. Les précipitations annuelles jouent aussi un rôle important, avec une corrélation positive significative. Les températures maximales et le NDVI ont une influence plus modérée mais restent statistiquement significatives. Contrairement au tableau précédent (où précipitations et NDVI étaient négativement corrélés), ici les corrélations sont positives; cela peut indiquer que la variable cible a changé.

Tableau 2: Corrélation avec la variable cible n°2

	corrélation	p.value
Temp_min_C	0.8221103	2.687089e-06
Temp_moy_C	0.7139350	1.903434e-04
Precipitation_mm_an	0.6596947	8.371024e-04
Temp_max_C	0.5536258	7.517218e-03
NDVI_moyen	0.5114013	1.498948e-02

Les deux premiers axes (variable 1 et variable 2) suffisent à expliquer 96.4 % de la variance totale, ils concentrent l'essentiel de l'information. La troisième variable peut être explorée pour voir si elle révèle un signal secondaire (par ex. une variable spécifique qui n'apparaît pas clairement sur les deux premiers axes). Mais d'un point de vue statistique, elle est faible et non prioritaire dans l'interprétation globale.

3.2. Résultats pour les valeurs propres

Le tableau suivant affiche les valeurs propres pour chaque axe. L'axe 1 a pour valeur propre très élevée (5.27), ceci explique 65.9 % de la variance totale. Il s'agit donc de l'Axe principal qui concentre l'essentiel de l'information.

Quant à l'axe 2, sa valeur propre (2.44) est encore significative. Ceci explique 30.5 % de la variance. Avec l'axe 1, on atteint 96.4 % de variance cumulée.

Quant au reste des axes, (valeurs propres < 1) : chacune explique une variance < 4. Leur apport est marginal, donc peu utile pour l'interprétation.

Tableau 3: Valeurs propres correspondantes à chaque axe

	Valeur propre	Variance en %	Variance cumulée en %
Axe 1	5.272513511	65.90641889	65.90642
Axe 2	2.441942202	30.52427752	96.43070
Axe 3	0.164612955	2.05766193	98.48836
Axe 4	0.081936131	1.02420164	99.51256
Axe 5	0.021578305	0.26972881	99.78229
Axe 6	0.014146952	0.17683690	99.95913
Axe 7	0.002059222	0.02574027	99.98487
Axe 8	0.001210722	0.01513403	100.00000

En appliquant le critère de Kaizer, seules les deux premiers axes (Axe 1 et Axe 2) suffisent à résumer presque toute l'information (96.4 %). Les autres axes n'apportent que des détails mineurs (< 4 %). Les régions se regroupent visuellement selon leurs coordonnées sur ces deux axes, ce qui permet une lecture géographique et climatique cohérente.

Le graphique d'éboulis correspondant est affiché dans la figure qui suit :

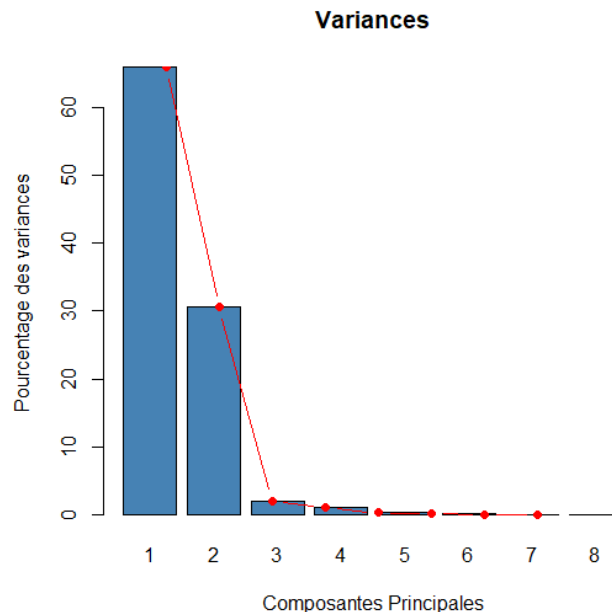


Figure 1: Graphique des éboulis

- En ce qui concerne les corrélations entre les variables initiales et les axes principaux de l'ACP, nous obtenons le tableau de corrélation suivante. Les valeurs indiquent la **corrélation linéaire** entre chaque variable et les dimensions. Plus la valeur est proche de ± 1 , plus la variable est fortement associée à l'axe. Le signe (+ ou -) indique le sens de la relation. Ainsi pour l'axe 1 (65.9% de variance), les valeurs positifs forts sont ceux de ETP, Déficit hydrique, Temp_max, Temp_moy, Temp_min. tandisque les valeurs négatives fortes sont ceux de SPI12, NDVI, Précipitations. En d'autre terme, l'Axe 1 oppose sécheresse et chaleur d'humidité et de végétation. Quant à l'Axe 2 (30.5% de la variance), les valeurs positives fortes sont celle de Temp_moy (0.71), Temp_min (0.82), Précipitations (0.66), NDVI (0.51) et les valeurs négatives fortes sont celle du Déficit hydrique (-0.25). Cet axe oppose les conditions tempérées et humides (pluie, végétation, températures modérées) des conditions sèches. Les autres axes ont des apports limités.

Tableau 4: corrélation linéaire entre chaque variable et les axes

Variable	Axe.1	Axe.2	Axe.3	Axe.4	Axe.5
<u>Precipitation mm an</u>	-0.7260412	0.6596947	0.028508473	0.18380973	0.025231016
<u>Deficit hydrique mm</u>	0.9248314	-0.2539024	0.241064872	0.14607891	0.015632314
<u>NDVI moyen</u>	-0.8512038	0.5114013	0.055651011	0.02388100	-0.002876456
<u>Temp moy C</u>	0.6970686	0.7139350	0.024466800	-0.05268828	0.004850358
<u>Temp min C</u>	0.5549073	0.8221103	0.072240387	-0.03132146	-0.097241795
<u>Temp max C</u>	0.8227432	0.5536258	0.008028089	-0.07584786	0.102504229
<u>SPI12 moyen</u>	-0.9051061	0.4161702	-0.071373042	-0.01677520	0.023908638
<u>ETP mm an</u>	0.9357171	0.1244167	-0.302679790	0.12825510	-0.011437862

- Pour apporter plus de précision sur les variables, en voici une interprétation détaillée de $\cos^2$ des variables sur les axes principaux de l'ACP: ETP (0.88), Déficit hydrique (0.86), SPI12 (0.82), NDVI (0.72), Temp_max (0.68), Précipitations (0.53) structurent fortement dans l'Axe 1 (sécheresse vs humidité). L'Axe 2 est représentée par les températures (min, moy, max) et les précipitations.

Tableau : $\cos^2$ (cos2) des variables sur les axes principaux de l'ACP.

Tableau 5 : Valeurs de cos2 des variables sur chaque axe

Variable	Axe1	Axe2	Axe3	Axe4	Axe5
<u>Precipitation mm an</u>	0.5271358	0.43519710	0.000812733	0.033786016	0.000636604
<u>Deficit hydrique mm</u>	0.8553131	0.06446644	0.058112270	0.021339049	0.000244369
<u>NDVI moyen</u>	0.7245479	0.26153134	0.003097035	0.000570302	0.000008274
<u>Temp moy C</u>	0.4859047	0.50970323	0.000598624	0.002776055	0.000023526
<u>Temp min C</u>	0.3079221	0.67586542	0.005218674	0.000981034	0.009455967
<u>Temp max C</u>	0.6769064	0.30650148	0.000064450	0.005752898	0.010507120
<u>SPI12 moyen</u>	0.8192171	0.17319767	0.005094111	0.000281407	0.000571623
<u>ETP mm an</u>	0.8755666	0.01547952	0.091615060	0.016449371	0.001308247

- La contribution indique dans quelle mesure une variable participe à la formation d'un axe. Plus la contribution est élevée, plus la variable est importante pour définir la dimension. On compare souvent à une valeur moyenne (ici, $100\% / 8 \approx 12.5\%$). Une variable qui dépasse ce seuil est considérée comme structurante pour l'axe. Le tableau suivant décrit en premier lieu que l'Axe 1 avec 65.9% de la variance possèdent beaucoup de variables structurantes comme: ETP (16.6 %), Déficit hydrique (16.2 %), SPI12 (15.5 %), NDVI (13.7 %), Temp_max (12.8 %). Il est structuré par les variables liées à la sécheresse vs humidité. L'axe 2 est dominé par les variables Temp_min (27.7 %), Temp_moy (20.9 %), Précipitations (17.8 %), NDVI (10.7 %), Temp_max (12.6 %). Les axes 3 et 4 précisent la variabilité hydrique (ETP, déficit, pluie). L'axe 5 met en évidence surtout les températures extrêmes (min vs max).

Tableau 6: Contribution des variables

Variable	Axe1	Axe2	Axe3	Axe4	Axe5
<u>Precipitation mm an</u>	9.997808	17.8217607	0.49372363	41.2345752	2.95020479
<u>Deficit hydrique mm</u>	16.222113	2.6399658	35.30236881	26.0435153	1.13247649
<u>NDVI moyen</u>	13.741983	10.7099726	1.88140417	0.6960327	0.03834406
<u>Temp moy C</u>	9.215807	20.8728621	0.36365564	3.3880721	0.10902604
<u>Temp min C</u>	5.840138	27.6773718	3.17026906	1.1973150	43.82163877
<u>Temp max C</u>	12.838400	12.5515453	0.03915258	7.0211977	48.69296774
<u>SPI12 moyen</u>	15.537505	7.0926196	3.09459921	0.3434470	2.64906332
<u>ETP mm an</u>	16.606246	0.6339022	55.65482691	20.0758449	0.60627879

Utilisant la méthode de contribution, la figure 2 montre la répartition de ces variables sur les 2 axes :

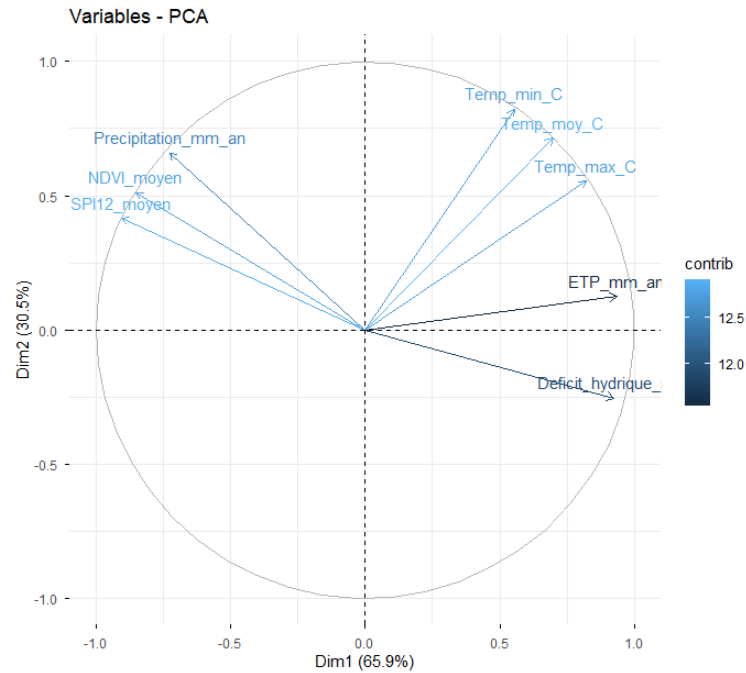


Figure 2: Répartition des variables sur les axes

3.3. Coordonnées des individus sur les axes principaux

Trois grands pôles régionaux apparaissent dont le Centre/hautes terres (Analamanga, Vakinankaratra, Itasy, Haute Matsiatra, Amoron'i Mania) ou les profils similaires, sont regroupés par valeurs négatives sur Axe1 et Axe2. Ensuite, les côtes Est/Nord (Atsinanana, Analanjirofo, Diana, Sava, Vatovavy) ou les profils positifs sur Axe2, reflétant humidité et végétation. Enfin, les parties Ouest/Sud arides (Menabe, Atsimo-Andrefana, Androy, Anosy) ou les valeurs positives fortes sur Axe1, traduisant un climat sec et chaud. Les axes 1 et 2 suffisent à expliquer la quasi-totalité de la variance ($\approx 96\%$). Le reste n'apporte qu'un raffinement secondaire.

Tableau 7: Coordonnées des individus sur chaque axe

	Axe1	Axe2	Axe3	Axe4	Axe5
Analamanga	-1.61754	-1.77030	0.093211	-0.050655	-0.41422
Vakinankaratra	-2.31601	-2.25825	-0.01778	0.1979993	-0.07638
Itasy	-1.85368	-1.87193	0.019740	0.004104	-0.04509
Bongolava	-0.63618	-1.25903	-0.03682	-0.15894	-0.04131
Haute Matsiatra	-1.95553	-2.17365	0.024848	0.081713	0.026612
Amoron'i Mania	-1.60427	-2.05025	-0.00505	-0.03331	0.102416
Ihorombe	-0.04210	-2.08990	-0.22040	0.133427	0.372957
Atsinanana	-2.52261	2.294643	0.210396	0.509967	-0.03199
Analanjirofo	-2.73360	2.731921	0.259945	0.555667	0.094740
Alaotra-Mangoro	-1.39771	-0.00312	-0.05487	-0.32126	0.268672
Boeny	1.574789	1.028945	-0.78692	-0.01851	-0.08417
Sofia	0.872424	0.722364	-1.06765	0.325769	-0.01408
Betsiboka	1.506026	0.625158	-0.64125	-0.07787	-0.03327
Melaky	2.174121	0.664932	-0.23917	-0.36341	0.068971
Diana	0.128447	2.067398	-0.24185	-0.12330	-0.10588
Sava	-1.68749	2.124216	0.507322	-0.36615	0.113997
Menabe	3.065731	0.232505	0.331476	-0.42207	-0.00886
Atsimo-Andrefana	4.413578	-0.03937	0.354112	0.111324	-0.00471
Androy	4.881210	-0.61679	0.637446	0.5335865	0.031622
Anosy	3.192579	-0.55530	0.343718	0.0289662	-0.086454
Atsimo-Atsinanana	-1.54327	0.998715	0.224508	-0.369236	-0.01088
Vatovavy	-1.89885	1.197135	0.305095	-0.177763	-0.122640

- Pour améliorer la qualité de représentation d'un individu sur un axe, la méthode de $\cos^2$ a été utilisée. Cela nous permet d'effectuer le classement suivant : Les régions du Sud et Ouest : Menabe (0.962), Atsimo-Andrefana (0.993), Androy (0.956), Anosy (0.957), Melaky (0.875), Alaotra-Mangoro (0.902) sont fortement structurées par l'axe1. Les régions du Haut Plateau (Analamanga, Vakinankaratra, Itasy, Haute Matsiatra, Amoron'i Mania) sont représentées conjointement par Axe1 et Axe2. Les régions de l'Est et Nord-Est (Diana, Ihorombe, Sava, Atsinanana, Analanjirofo) sont surtout portées par Axe2. Néanmoins, quelques régions (Boeny, Sofia, Betsiboka) nécessitent parfois l'examen de l'Axe.3 pour une meilleure lecture.

- Pour savoir dans quelle mesure un individu (ici une région) participe à la formation d'un axe, nous avons utilisé la méthode de contribution ; plus la contribution est élevée, plus la région est importante pour définir la dimension. Le plus souvent, on compare les contributions à une valeur moyenne (ici, $100\% / 22 \approx 4.5\%$). Une région qui dépasse largement ce seuil est considérée comme structurante pour l'axe.

Ainsi, pour l'axe principal (65.9 % de variance), les contributions fortes sont ceux Androy (20.5 %), Atsimo-Andrefana (16.8 %), Menabe (8.1 %), Anosy (8.8 %), Analanjirofo (6.4 %), Atsinanana (5.5 %). Ces régions structurent fortement l'opposition sur l'Axe1 (Sud/Ouest vs Haut Plateau).

Pour l'axe secondaire (30.5 % de variance), les contributions fortes sont ceux d'Analanjirofo (13.9 %), Atsinanana (9.8 %), Vakinankaratra (9.5 %), Haute Matsiatra (8.8 %), Amoron'i Mania (7.8 %), Ihorombe (8.1 %), Diana (7.9 %), Sava (8.4 %). Cet axe est surtout porté par les régions de l'Est et du Haut Plateau.

On trouve des contributions notables pour le troisième axe même si c'est un axe mineur (2.0 % de variance) : Sofia (31.4 %), Boeny (17.1 %), Betsiboka (11.3 %), Androy (11.2 %). Ces régions expliquent la variabilité résiduelle sur cet axe.

En résumé, les deux premiers axes concentrent l'essentiel de l'information et sont structurés par des pôles régionaux clairs (Haut Plateau vs Sud/Ouest vs Est). Les autres axes affinent mais n'apportent que des détails.

L'Axe1 oppose les régions arides du Sud/Ouest (fortes contributions, $\cos^2$ proches de 1) aux hautes terres (valeurs négatives). L'Axe2 oppose les régions côtières humides de l'Est/Nord aux hautes terres intérieures. L'Axe3 révèle un contraste secondaire entre le Nord-Ouest (Boeny, Sofia, Betsiboka) et certaines régions du Sud (Androy).

- La distance mesure l'inertie individuelle : plus elle est grande, plus la région est éloignée du centre et donc plus elle contribue à la différenciation. Ainsi, il y en a des régions très différenciées classées à distances fortes (>3) : Androy (4.99), Atsimo-Andrefana (4.43), Analanjirofo (3.92), Atsinanana (3.45), Menabe (3.12), Anosy (3.26). Ce sont des pôles structurants, très éloignés du centre, donc fortement distinctifs. Elles structurent la carte factorielle. Ensuite, des régions avec des distances moyennes ($\approx 2-3$) ; ces régions sont différenciées mais moins extrêmes : Analamanga (2.43), Vakinankaratra (3.24), Haute Matsiatra (2.92), Amoron'i Mania (2.60), Sava (2.78), Vatovavy (2.28), Melaky (2.32), Diana (2.10), Ihorombe (2.13). Ces régions participent à l'opposition mais moins extrêmes. Finalement, il y en a également des régions à distances faibles (<2) : elles sont proches du centre, donc moins discriminantes : Bongolava (1.42), Alaotra-Mangoro (1.47), Sofia (1.59), Betsiboka (1.75), Atsimo-Atsinanana (1.89), Boeny (2.04). Ces régions sont plus "centrales", donc moins spécifiques.

Tableau 8: Inertie individuelle

Région	Distance
Analamanga	2.436875
Vakinankaratra	3.243795
Itasy	2.635141
Bongolava	1.421219
Haute Matsiatra	2.926658
Amoron'i Mania	2.605865
Ihorombe	2.139400
Atsinanana	3.456323
Analanjorofo	3.919973
Alaotra-Mangoro	1.472033
Boeny	2.041917
Sofia	1.595071
Betsiboka	1.756785
Melaky	2.324344
Diana	2.106512
Sava	2.787650
Menabe	3.125930
Atsimo-Andrefana	4.429901
Androy	4.993475
Anosy	3.262674
Atsimo-Atsinanana	1.890845
Vatovavy	2.280778

Les graphiques qui suivent représentent d'une part le nuage de points des individus répartis sur les deux axes utilisant la méthode de cos2 et d'autre part la répartition des individus et des variables sur les deux axes. L'axe 1 révèle une fracture fondamentale entre aridité et humidité tandis que l'axe 2 agit comme un détecteur de déficit en eau.

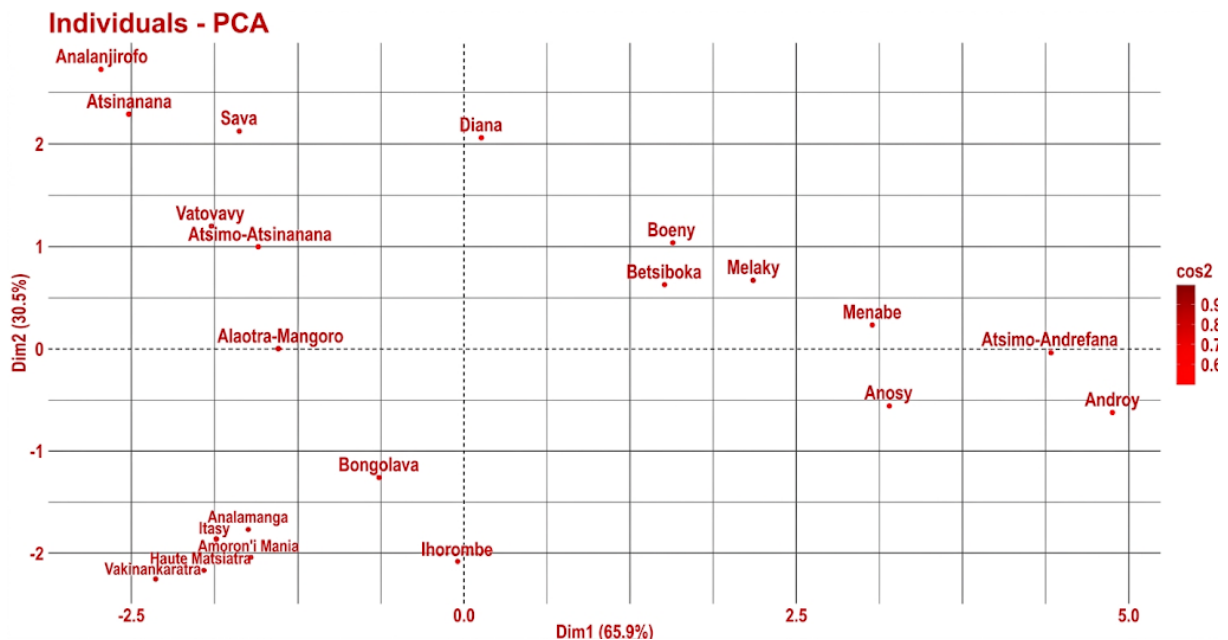


Figure 3: Nuage des individus

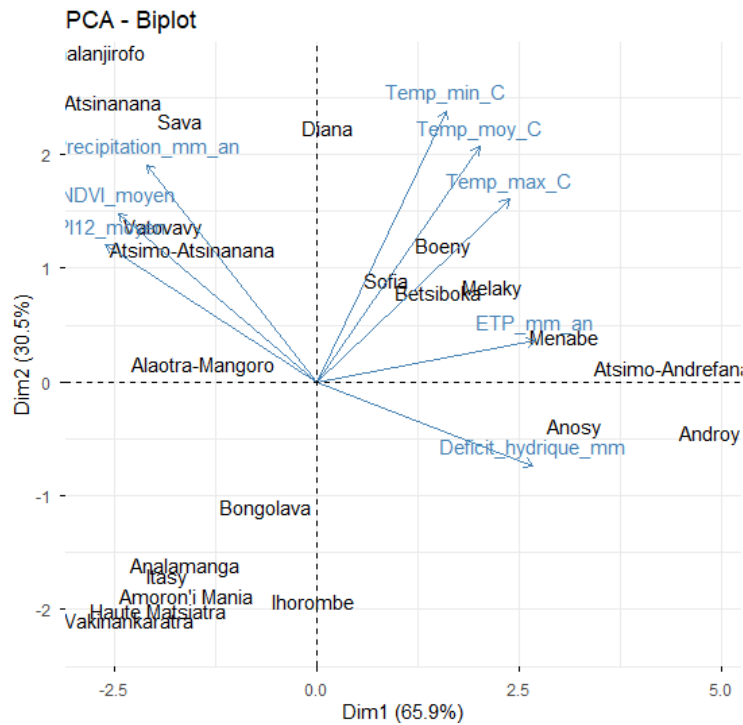


Figure 4: Répartition des individus et des variables dans les deux axes

3.4. Typologie HCPC

L'analyse de clustering hiérarchique trace des frontières nettes, transformant 22 profils météorologiques en 5 catégories distinctes pour l'aménagement du territoire. La façade Est possède deux caractéristiques : Hyper-humidité et densité végétale maximale. Elle est composée de cluster 1 (Analanjirofo-Sava-Atsinanana) et cluster 2 (Vatovavy – Atsimo Atsinanana et Alaotra Mangoro). Le cluster 3 et le cluster 4 composés respectivement du haute-terre et de la partie Nord-Ouest possèdent d'équilibre thermique et pluviométrique. Elles regroupent 12 parmi les 22 régions. Le cluster 5 est totalement isolé sur le cadran droit inférieur de l'ACP, il nécessite une approche d'ingénierie fondamentalement différente, axée sur la résilience et la survie hydrique. Le schéma correspondant est montré à la figure 5 et le résumé des paramètres de chaque classe se trouve dans le tableau de la matrice de diagnostique climatique.

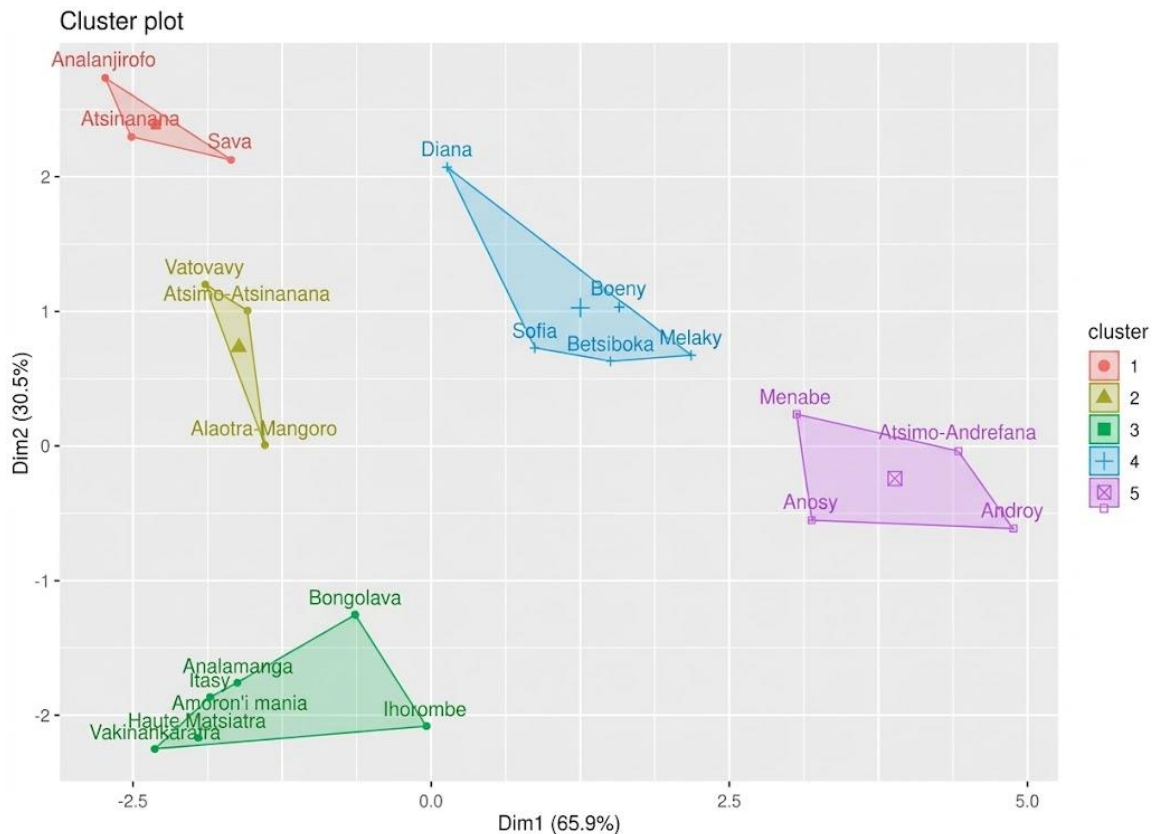


Figure 5: Classification Hiérarchique sur Composantes Principales

Tableau 9: Matrice de diagnostique climatique

Catégorie	C1 –	C2 –	C3 –	C4 –	C5 –
Régions représentatives	Sava	Vatovavy	Analamanga	Diana	Androy
NDVI Moyen (Végétation)	> 0,6	0,5 – 0,6	0,4	0,3 – 0,5	< 0,2
Précipitations annuelles	> 2200 mm	1500 – 2000 mm	~1200 mm	1000 – 1800 mm	< 700 mm
Déficit hydrique	Faible (20–60mm)	Modéré	150 – 220 mm	150 – 350 mm	Critique (> 500 mm)
Température Max	30 – 31 °C	29 – 30 °C	Douces (24 – 25 °C)	32–34 °C	Extrêmes (35 – 36 °C)

4. Discussions

4.1. Synthèse des résultats ACP

L'Analyse en Composantes Principales (ACP) a permis de réduire la complexité des variables climatiques (précipitations, déficit hydrique, NDVI, températures, SPI, ETP) en quelques axes principaux.

- Le premier axe oppose les régions humides (fortes précipitations, NDVI élevé, SPI positif) aux régions sèches (faibles précipitations, déficit hydrique élevé, SPI négatif).
- Le second axe traduit un gradient thermique, distinguant les Hautes Terres tempérées des zones côtières chaudes. Ces résultats confirment la structuration climatique bipolaire de Madagascar, avec une transition nette entre l'Est humide et le Sud-Ouest aride.

4.2. Résultats HCPC

La Classification Hiérarchique sur Composantes Principales (HCPC) a regroupé les régions en 5 classes homogènes. Le dendrogramme montre une séparation nette entre les zones côtières humides et les zones intérieures arides, avec les Hautes Terres occupant une position intermédiaire.

Les résultats obtenus révèlent une typologie climatique cohérente avec les réalités agro-écologiques de Madagascar :

- Les régions humides de l'Est sont favorables à la riziculture et aux cultures tropicales.
- Les Hautes Terres présentent un climat tempéré propice aux cultures maraîchères et aux systèmes agroforestiers.
- Les régions arides du Sud et de l'Ouest sont vulnérables à la sécheresse, nécessitant des stratégies d'adaptation (irrigation, cultures résistantes, gestion de l'eau).
- Les régions du Nord combinent chaleur et humidité modérée, offrant un potentiel agricole diversifié.

Cette typologie est essentielle pour la planification territoriale, la gestion durable des ressources naturelles, et l'anticipation des impacts du changement climatique.

5. Conclusion

En conclusion, on peut dire d'une part que l'ACP révèle deux gradients majeurs : humidité vs sécheresse et fraîcheur vs chaleur. D'autre part, la HCPC confirme une typologie climatique régionale ou on peut distinguer clairement les zones littorales humides avec excédent hydrique et forte productivité végétale, les hautes terres tempérées où il y a un équilibre fragile avec dépendance aux pluies, de l'Ouest semi-aride avec déficit hydrique chronique et finalement du Sud aride avec conditions extrêmes, vulnérabilité écologique et agricole. Ces résultats mettent en évidence une polarisation climatique de Madagascar, avec un contraste fort entre le Nord-Est humide et le Sud-Ouest aride, ce qui a des implications directes pour la gestion des ressources en eau, la planification agricole et la résilience face au changement climatique.

REFERENCES

- [1] Jolliffe, I.T. (2002). Principal Component Analysis. Springer.
- [2] Husson, F., Josse, J., Le, S., Mazet, J. (2020). FactoMineR: Multivariate Exploratory Data Analysis. R package.
- [3] World Bank Climate Data (2025). Madagascar Climate Profiles.
- [4] MODIS & CHIRPS datasets (NASA, UC Santa Barbara).
- [5] Akewa Izandji Miha Batsola Kekeya (2026) – Variabilité spatio-temporelle et influence des flux turbulents de l'Océan Indien et du Canal du Mozambique sur les précipitations et la température du nord de Madagascar (1990–2020). Thèse de Master, Université d'Antananarivo.
- [6] Ramarovahoaka Noelly et al. (2023) – Relations entre structure des exploitations et gestion des effluents d'élevage sur les Hautes Terres de Madagascar. Cahiers Agricultures, 32:20.
- [7] Touaïbia Bénina, Inegliz Souhila, Ould Amara Arezki (2006) – Couplage d'une analyse en composantes principales et d'une approche géostatistique pour l'élaboration de cartes pluviométriques du Centre de l'Algérie du Nord. Revue des sciences de l'eau, 19(3), 213–219.
- [8] Manté Claude (2008) – De la nature de quelques types de chroniques environnementales. Conséquences pour leur traitement statistique. TEL (Thèses en ligne).
- [9] ScienceDirect (2019) – GIS-based approach to identify climatic zoning: A hierarchical clustering on principal component analysis.
- [10] African Centre of Meteorological Applications for Development (ISACIP/AFRICLIMSERV) – Procédure de traitement des données d'observation, de simulation et de projection du climat.
- [11] Agritrop – CIRAD (2023) – Relations entre structure des exploitations et gestion des effluents d'élevage sur les Hautes Terres de Madagascar.
- [12] BRL Ingénierie (2023) – Étude sur la situation nationale de l'agroécologie à Madagascar.