

# *Analyse Spatio-Temporelle De L'aridité Et De La Demande En Eau Dans La Région Androy (Madagascar) : Indices De Sécheresse, Projections Hydriques Et Stratégies Agronomiques Adaptées (1995 - 2030)*

Raharinieràna Hantaniaina<sup>1</sup>, Ravaliniaina Kantonieràna Miravo Finaritra Tafitasoa<sup>2</sup>, Raveloalison Haja Nirina<sup>3</sup>, Ramaroson Jean de Dieu<sup>4</sup>

- <sup>1</sup>. Ecole Doctorale Sciences et Techniques de l'Ingénierie et de l'Innovation (ED-STII), Equipe d'Accueil Doctorale Valorisation des Ressources Propres, Université d'Antananarivo ;
- <sup>2</sup>. Ecole Doctorale Ingénierie et Géosciences (ED-INGE), Equipe d'Accueil Doctorale Génie Civil et Aménagement du Territoire, Université d'Antananarivo
- <sup>3</sup>. Ecole Doctorale Ingénierie et Géosciences (ED-INGE), Equipe d'Accueil Doctorale Hydraulique et environnement, Université d'Antananarivo
- <sup>4</sup>. Département Matériaux et Génie civil, Centre National des Recherches Industrielle et Technologie

Auteur correspondant : RAVALINIAINA Kantonieràna Miravo Finaritra Tafitasoa, ravaliniaina1510@gmail.com



**Résumé** : Cet article constitue le troisième volet d'une série de recherches sur la sécurité alimentaire dans la Région Androy, au Sud de Madagascar. Le premier article a établi la caractérisation physico-chimique du sol du District Ambovombe, identifiant ses propriétés structurelles et ses limites agronomiques naturelles. Le deuxième article a ensuite démontré, par analyse comparative, que l'amendement des sols par la terre rouge améliorerait significativement leurs propriétés physico-chimiques et leur capacité de rétention en eau, en intégrant déjà les données météorologiques locales pour contextualiser cette intervention. Le présent travail s'appuie sur ces mêmes données climatiques pour aller plus loin : en appliquant des indices de sécheresse reconnus : z-score, SPI, indice empirique de stress climatique sur la période 1995-2024, il démontre rigoureusement que le climat de l'Androy est structurellement aride, que les années 1997, 2012 et 2023 ont constitué des épisodes de déficit hydrique particulièrement sévères, et que la demande en eau augmentera de 41,7 % à l'horizon 2030. Fort de ces constats, l'article intègre également une recommandation et une analyse de deux cultures adaptées à la sécheresse : le sorgho (*Sorghum bicolor*) et le pois d'Angole (*Cajanus cajan*), en démontrant leur synergie directe avec l'amendement déjà validé. Si la caractérisation physico-chimique et l'amendement ont été conduits à l'échelle du District d'Ambovombe, District le plus peuplé et le plus représentatif de la Région, l'analyse climatique et la

modélisation de la demande en eau sont menées à l'échelle de la Région Androy dans son ensemble, dont Ambovombe concentre près de 47 % des besoins hydriques. Les solutions agronomiques proposées sont également applicables à tout territoire présentant des caractéristiques pédologiques similaires. Les aménagements hydrauliques adaptés feront l'objet de publications ultérieures.

**Mots-clés** : sécheresse, indices climatiques, SPI, z-score, demande en eau, adaptation agricole, sorgho, pois d'Angole.

## 1. Introduction

La Région Androy, située à l'extrême Sud de Madagascar, est l'une des zones les plus vulnérables du pays sur le plan alimentaire et hydrique. Sa position géographique l'expose à un régime pluviométrique sévère, marqué par une faible pluviométrie annuelle, une grande variabilité interannuelle et des épisodes de sécheresse récurrents. Ces conditions, combinées à une pression démographique croissante, engendrent une insécurité alimentaire chronique qui affecte des centaines de milliers d'habitants dans ses quatre Districts.

Le premier article de cette série a posé les fondations de la démarche en réalisant une caractérisation physico-chimique détaillée du sol du District Ambovombe<sup>1</sup> : texture, pH, teneur en matière organique, capacité d'échange cationique, structure et propriétés hydrodynamiques. Cette caractérisation a révélé les limites naturelles de ce sol, qui présente une faible capacité de rétention d'eau ainsi qu'une pauvreté en matière organique, posant ainsi des contraintes pour l'agriculture. Le deuxième article a ensuite démontré, par analyse comparative rigoureuse, que l'amendement de ces sols par apport de terre rouge ferrallitique améliorerait significativement leurs propriétés physico-chimiques et leur capacité de rétention en eau<sup>2</sup>. Les données météorologiques de la Région y avaient déjà été mobilisées pour situer les essais dans leur contexte climatique et justifier l'intérêt de l'intervention. L'amendement demeure une réponse agronomique valide et nécessaire.

Cependant, les mêmes données climatiques mobilisées dans le deuxième article portent en elles une information plus large, qui mérite d'être analysée pour elle-même : elles permettent de caractériser et de quantifier l'aridité structurelle de l'Androy, d'en identifier les années les plus critiques, et de projeter l'évolution des besoins en eau de la Région. C'est précisément l'objet du présent article, qui exploite ces données à travers des indices climatiques formalisés pour

répondre à une question centrale : l'amendement du sol par apport de terre rouge étant acquis, est-il suffisant face à l'ampleur et à la persistance du déficit hydrique de l'Androy ?

Le présent article poursuit trois objectifs complémentaires :

- (1) Démontrer formellement, par l'analyse de quatre indices climatiques reconnus, que le climat de l'Androy est aride à semi-aride sur la période 1995-2024.
- (2) Identifier et caractériser les années de sécheresse les plus critiques, en mesurant l'intensité du déficit hydrique pour chacune.
- (3) Modéliser l'évolution de la demande en eau dans les quatre Districts de l'Androy à l'horizon 2030, afin d'anticiper l'aggravation des pressions hydriques futures.

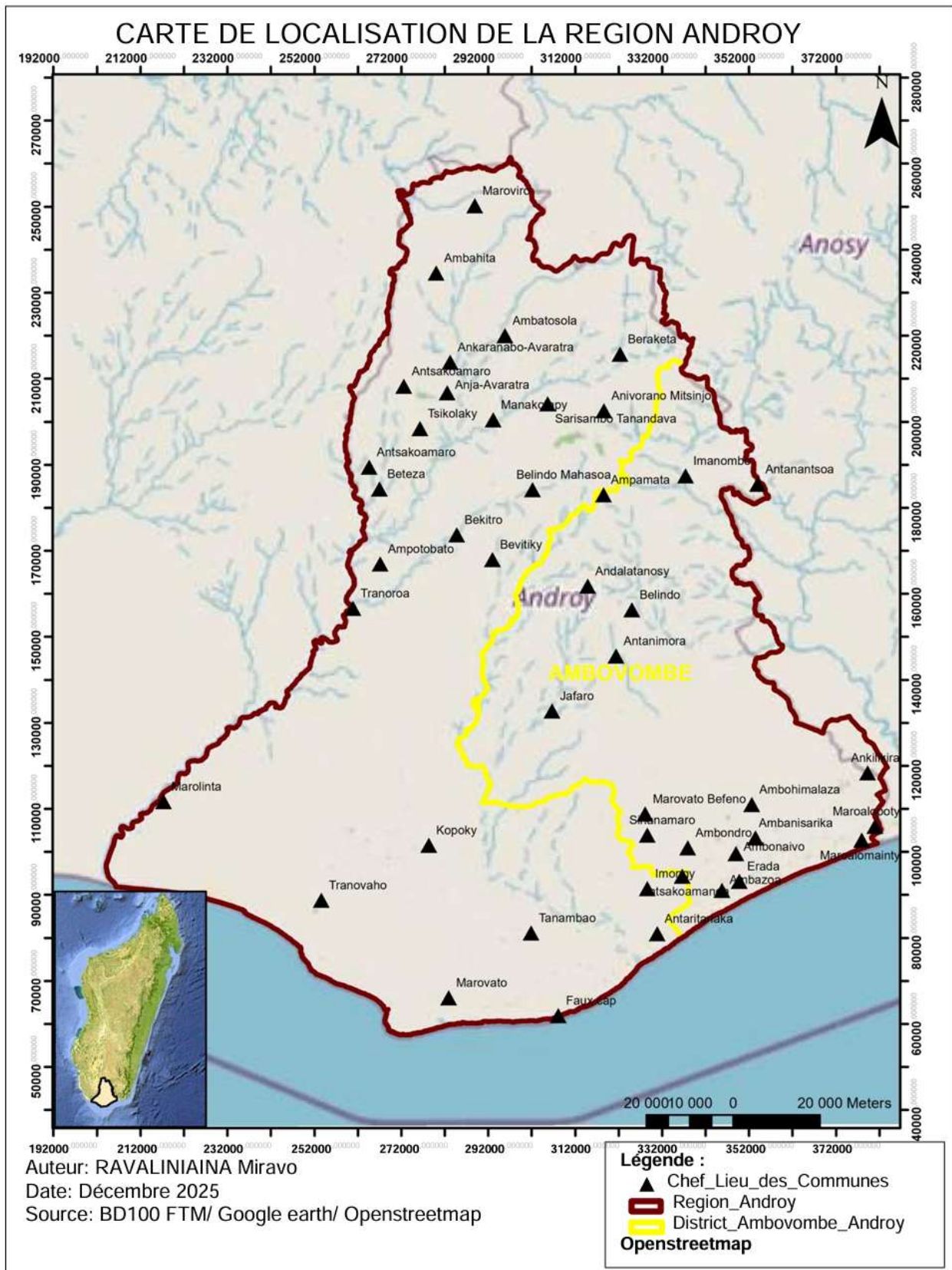
La conclusion de cet article établira que l'amendement du sol par apport de terre rouge, bien que validé et indispensable, doit être accompagné d'une adaptation des systèmes de culture. C'est pourquoi le présent article intègre également une analyse et une recommandation des cultures adaptées à la sécheresse, en démontrant leur interaction directe avec l'amendement des terres rouges proposé dans le deuxième article. À noter que si l'amendement a été validé à l'échelle du District d'Ambovombe, les solutions proposées sont applicables à tout territoire présentant des caractéristiques pédologiques similaires. Le quatrième article de la série sera quant à lui consacré aux aménagements hydrauliques adaptés, comme prolongement naturel de l'ensemble des analyses conduites jusqu'ici.

## 2. Contexte géographique et climatique de l'Androy

### • Présentation de la Région Androy

La Région Androy est l'une des 22 régions de Madagascar. Elle est délimitée au Nord par la Région Anosy, à l'Ouest par la Région Atsimo-Andrefana, et au Sud et à l'Est par l'Océan Indien. Elle est composée de quatre Districts : Ambovombe-Androy (chef-lieu régional), Bekily, Beloha et Tsihombe. En 2015, sa population était estimée à environ 768 000 habitants, avec un taux de croissance annuel d'environ 2,54 %.

Le paysage est dominé par un écosystème de type xérophytique, le fameux « bush épineux » ou forêt de Didieracées, parfaitement adapté aux conditions arides. Les sols, présentent une faible rétention en eau naturelle, ce qui aggrave l'impact des sécheresses sur l'agriculture vivrière locale, principalement fondée sur la culture du maïs, du manioc et de l'élevage bovin extensif.



## 2.2 Données climatiques de référence (1995 - 2024)

Les données climatiques utilisées dans cette étude ont été compilées à partir de la base de données de la World Bank Climate Data et des archives de la Direction Générale de la Météorologie de Madagascar. L'ensemble des données annuelles : températures minimales et maximales, précipitations et jours de pluie, pour la période 1995-2024 est présenté en intégralité en Annexe 1 du présent article. Des projections climatiques estimatives pour la période 2025-2045, établies sur ces mêmes données et publiées initialement en annexe du deuxième article de cette série, sont également reproduites en Annexe 2 à titre prospectif.

Ces données révèlent une stabilité des températures sur l'ensemble de la période (17,5-17,7°C en minima, 31,5-31,7°C en maxima), tandis que les précipitations annuelles oscillent entre 410 mm et 460 mm, un niveau largement inférieur à la moyenne nationale de Madagascar. L'année 2023 enregistre la plus faible pluviométrie (410 mm) et le plus petit nombre de jours de pluie (29), signalant une intensification de la sécheresse. La stagnation, voire la légère baisse des précipitations sur les dernières années, renforce la vulnérabilité hydrique structurelle de la Région. Les projections estimatives 2025-2045 (Annexe 2) confirment cette trajectoire défavorable : les précipitations pourraient poursuivre leur baisse de 460 mm en 2025 jusqu'à 290 mm en 2045, soit une réduction supplémentaire de 37 %, accompagnée d'une légère hausse des températures maximales (31,7°C à 31,9°C), ce qui renforce l'urgence des adaptations agronomiques recommandées dans le présent article.

## 3. Analyse des indices de sécheresse

### 3.1 Méthodologie

Pour caractériser la sécheresse dans l'Androy et identifier les années les plus critiques, quatre indices climatiques complémentaires ont été calculés à partir des données disponibles, à l'aide du logiciel R. Ces indices permettent d'appréhender la sécheresse sous des angles différents et de recouper leurs résultats pour une conclusion robuste.

- **Z-score des précipitations (z\_prec)**

Le z-score des précipitations mesure l'écart d'une année donnée par rapport à la moyenne à long terme, en unités d'écart-type. Un z-score négatif indique que les précipitations sont inférieures à la moyenne, c'est-à-dire une condition de sécheresse météorologique. Cet indice est particulièrement utile pour détecter les anomalies climatiques (sécheresse ou excès de pluie) et identifier les années critiques pour l'agriculture ou les ressources en eau. La règle d'interprétation est la suivante :  $z < 0 \rightarrow$  précipitation inférieure à la moyenne.

- **Z-score des jours de pluie (z\_pluie)**

Cet indice mesure non pas la quantité totale de pluie, mais la fréquence des événements pluvieux, ce qui renseigne sur la répartition temporelle de la pluie dans l'année. La disponibilité effective de l'eau

pour les cultures ou le bétail dépend en effet aussi bien du volume que de la régularité des pluies. Règle d'interprétation :  $z < 0 \rightarrow$  moins de jours de pluie que la normale.

- **Standardized Precipitation Index (SPI)**

Le SPI est une méthode standardisée, reconnue internationalement, développée par McKee et al. (1993). Elle mesure la sévérité des sécheresses à différentes échelles de temps (1 mois, 3 mois, 12 mois, etc.) en se basant uniquement sur les précipitations. Les seuils d'interprétation sont les suivants :

$SPI < -1,0$  = sécheresse modérée ;  $SPI < -1,5$  = sécheresse sévère ;  $SPI < -2,0$  = sécheresse extrême.

- **Indice empirique de stress climatique**

Cet indice a été construit sur la base du principe suivant : des conditions favorables à l'agriculture correspondent à des précipitations importantes, réparties sur de nombreux jours, et accompagnées de températures moins extrêmes. L'indice

combine ainsi trois dimensions : quantité de pluie, fréquence des pluies, et niveau de température, pour produire un indicateur intégré de stress climatique. Il s'agit donc d'un outil complémentaire et pertinent pour l'évaluation des conditions agricoles en milieu aride.

### 3.2 Résultats des indices de sécheresse

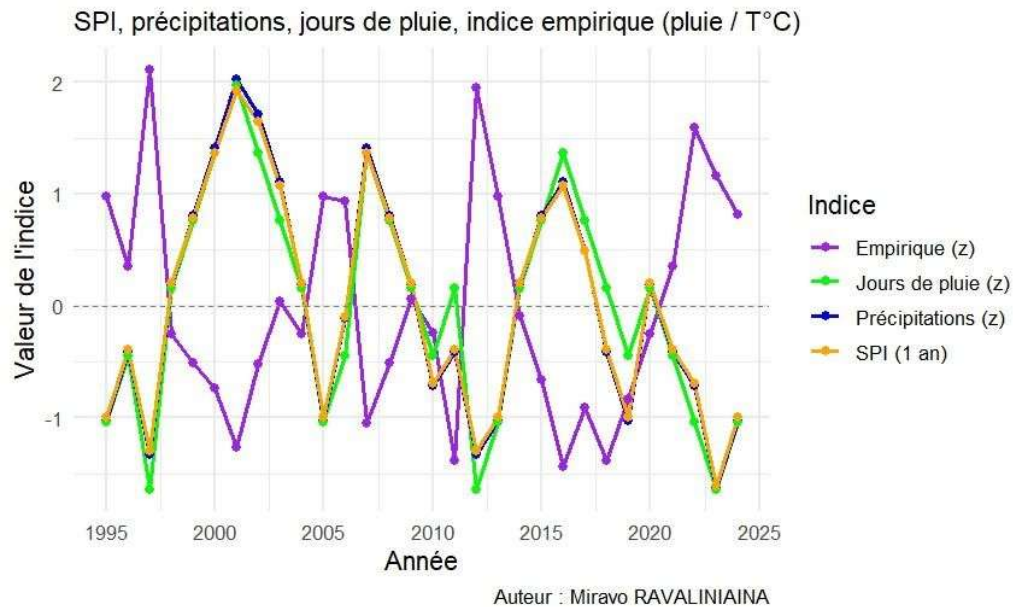


Figure 1 : Comparaison des 4 indices de sécheresse dans la région Androy (1995–2024) (Source : Miravo RAVALINIAINA, traitement R)

La figure 1 présente la comparaison des quatre indices de sécheresse calculés pour la Région Androy sur la période 1995-2024. La lecture croisée de la figure 1 fait ressortir trois années particulièrement sèches, identifiées de manière convergente par l'ensemble des quatre indices : 1997, 2012 et 2023. Le tableau 1 ci-dessous récapitule les valeurs de chaque indice pour ces années critiques.

Tableau 1: Résultats des 3 années les plus sèches selon les 4 indices climatiques

| Année | z_prec | z_pluie | SPI   | z_temp | Conclusion  |
|-------|--------|---------|-------|--------|---|
| 1997  | -1,33  | -1,65   | -1,30 | +2,12  | Sécheresse nette, moins critique qu'en 2023 grâce à une chaleur plus extrême      |
| 2012  | -1,33  | -1,65   | -1,30 | +1,95  | Sécheresse prononcée : faibles pluies conjuguées à une chaleur importante         |
| 2023  | -1,63  | -1,65   | -1,30 | +1,61  | Sécheresse sévère : déficit sur tous les plans, année la plus aride de la période |

Source : Miravo RAVALINIAINA

L'analyse croisée des quatre indices confirme sans ambiguïté que la sécheresse est une réalité structurelle dans la Région d'Androy. Les années 1997, 2012 et 2023 se distinguent par la conjonction d'un faible volume de précipitations, d'un nombre réduit de jours de pluie et de températures élevées. L'année 2023 apparaît comme la plus sévère sur l'ensemble des dimensions mesurées. Le SPI, calculé sur données annuelles, confirme la modération à la sévérité des sécheresses enregistrées (SPI autour de -1,30), sans toutefois atteindre le seuil d'extrême (-2,0), ce qui s'explique en partie par la granularité annuelle des données disponibles.

#### 4. Analyse de la demande en eau

##### 4.1 Contexte et objectifs

Face à un climat sec dont la tendance ne s'améliore pas, la question de la demande en eau dans la Région Androy est cruciale. Cette section présente une estimation de l'évolution des besoins en eau potable à l'horizon 2030, en s'appuyant sur les projections démographiques disponibles et sur les normes de consommation observées dans la région.

Les données démographiques et les estimations de consommation utilisées sont issues des sources suivantes : études démographiques de l'INSTAT et du PNUD (2010), Recensement Général de la Population et de l'Habitat (1993), et estimations du PAEAR (Programme d'Appui à l'Eau et à l'Assainissement Rural).

##### 4.2 Méthodologie

- **Estimation de la population à desservir**

Un taux de croissance annuel de 2,54 % a été retenu pour les projections, sur la base des données de référence de 2010. Le tableau 2 présente l'évolution de la population estimée par District aux horizons 2015, 2020, 2025 et 2030.

Tableau 2 : Démographie par Districts aux horizons 2015, 2020, 2025 et 2030 (habitants)

| District     | 2015    | 2020    | 2025    | 2030      |
|--------------|---------|---------|---------|-----------|
| Ambovombe    | 365 709 | 414 734 | 470 351 | 533 397   |
| Bekily       | 172 298 | 195 400 | 221 606 | 251 317   |
| Beloha       | 114 367 | 129 708 | 147 102 | 166 817   |
| Tsihombe     | 115 203 | 130 643 | 148 150 | 168 016   |
| Total Androy | 767 577 | 870 485 | 987 209 | 1 119 547 |

Source : Estimations PAEAR

La figure 2 illustre cette progression démographique sous forme de courbe d'évolution.

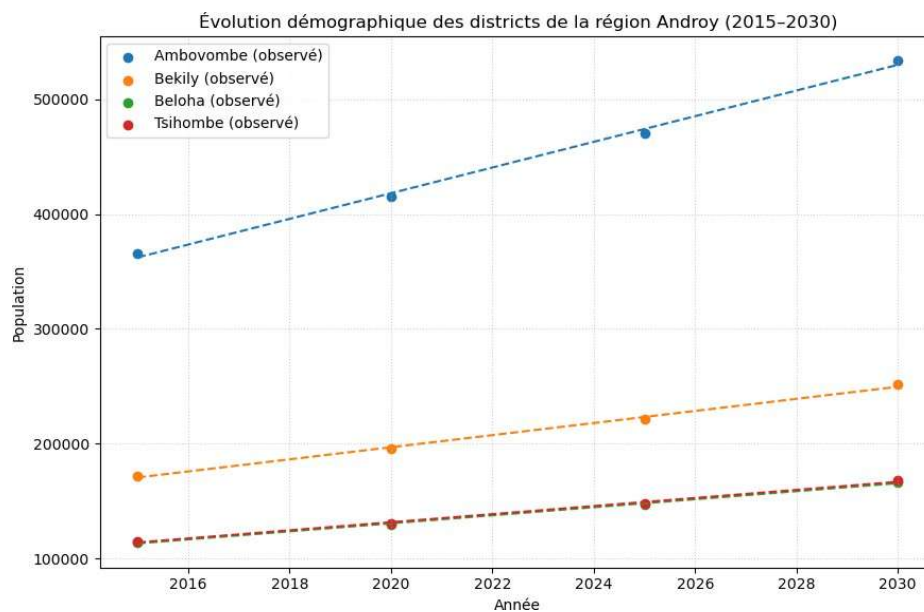


Figure 2 : Évolution de la population de la Région Androy de 2015 à l'horizon 2030 (Source : PAEAR)

- **Normes de consommation retenues**

L'enquête menée dans la Région a permis d'établir les normes de consommation journalière suivantes :

- Consommation domestique (borne-fontaine et branchements particuliers) : 30 litres par personne par jour.
- Écoles primaires et secondaires : 3 litres par élève par jour ; lycées : 3 000 litres par lycée par jour.
- Infrastructures de santé : 2 000 litres/jour par CSB1 ; 3 000 litres/jour par CSB2.
- Autres infrastructures (bâtiments administratifs, hôtels, etc.) : 3 % de la consommation totale.

- **Modélisation de la demande**

La demande en eau a été estimée par la méthode de régression linéaire multiple (RLM), combinant les variables suivantes : population, consommation moyenne par habitant, disponibilité hydrique et variable temporelle capturant les effets du changement climatique. La formule du modèle utilisé est :

$$Y = \beta_0 + \beta_1 X_1 + \beta_2 X_2 + \beta_3 X_3 + \dots + \beta_n X_n + \varepsilon$$

où

$Y$  = Dépenses journalières en eau (Ariary/jour)

$X_1, X_2, X_3, \dots, X_n$  = Variables explicatives (revenu, taille du ménage, distance à la source, qualité du sol, pluviométrie, etc.)

$\beta_i$  = Coefficients de régression estimés

$\varepsilon$  = Terme d'erreur aléatoire

Les valeurs prédites par le modèle ont ensuite été interpolées spatialement pour générer des représentations 2D et 3D de la demande en eau, permettant d'identifier les zones à forte pression hydrique.

### 4.3 Résultats : Demande en eau par District

Le tableau 3 présente les estimations de demande en eau journalière (en m<sup>3</sup>/j) pour les quatre Districts de l'Androy aux horizons 2015 à 2030.

Tableau 3 : Demande en eau par District aux horizons 2015-2030 (m<sup>3</sup>/j)

| District     | Demande 2015 | Demande 2020 | Demande 2025 | Demande 2030 |
|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|
| Ambovombe    | 12 657       | 14 210       | 15 974       | 17 981       |
| Bekily       | 6 145        | 6 876        | 7 719        | 8 661        |
| Beloha       | 3 971        | 4 455        | 5 004        | 5 631        |
| Tsihombe     | 4 032        | 4 511        | 5 070        | 5 702        |
| Total Androy | 26 805       | 30 052       | 33 767       | 37 975       |

Source : Estimations PAEAR

La figure 3 présente l'évolution de cette demande sous forme de graphique temporel.

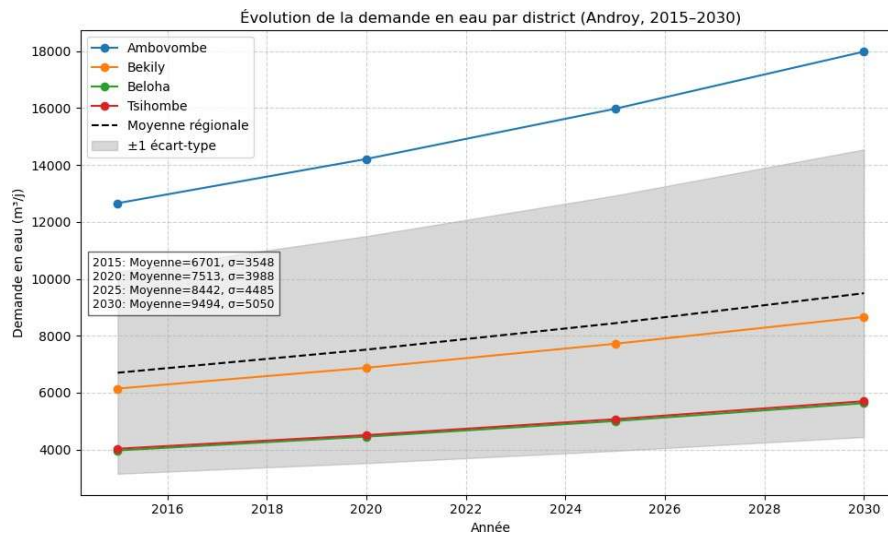


Figure 3 : Évolution de la demande en eau de la Région Androy (2015-2030, en m<sup>3</sup>/j) (Source : PAEAR)

### 4.4 Résultats : Analyse spatio-temporelle de la demande en eau

- **Visualisation 2D : carte thermique (heatmap)**

La figure 4 présente, sous forme de carte thermique, la demande en eau journalière projetée pour les quatre districts de l'Androy aux horizons 2015 à 2030. Cette représentation met en évidence à la fois la progression temporelle des besoins en eau et leur répartition spatiale, en lien avec la croissance démographique et l'intensification des usages agricoles.

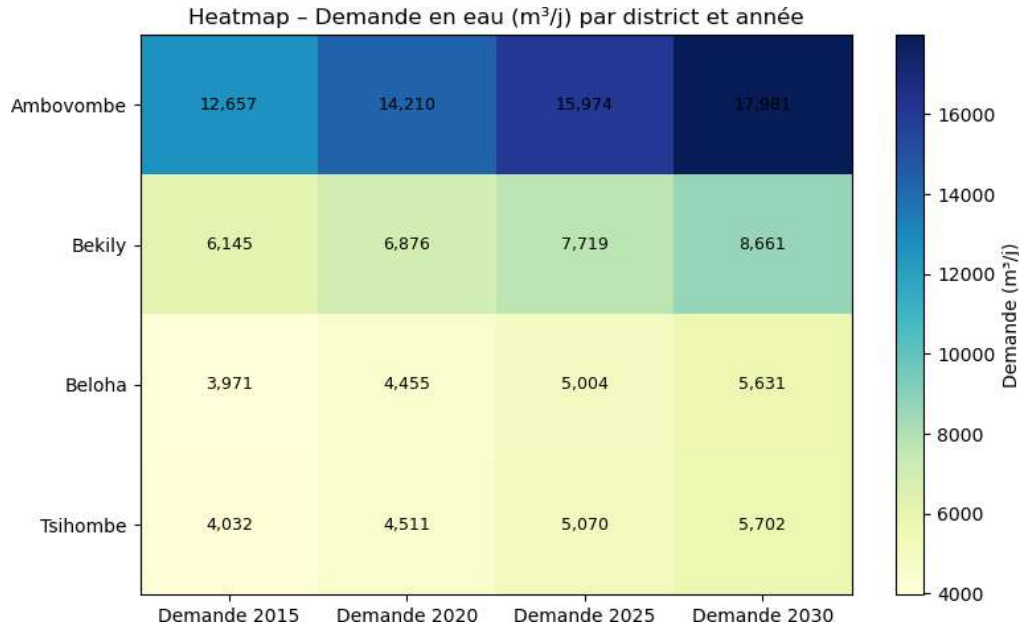


Figure 4 : Évolution spatio-temporelle de la demande en eau dans les districts de l'Androy (2015-2030, heatmap) (Source : Miravo RAVALINIAINA, Python/matplotlib)

On observe que la demande totale régionale passe de 26 805 m<sup>3</sup>/j en 2015 à 37 975 m<sup>3</sup>/j en 2030, soit une augmentation de 41,7 % sur la période. Ambovombe apparaît comme le principal pôle de demande, représentant près de 47 % de la demande régionale tout au long de la période, passant de 12 657 m<sup>3</sup>/j à 17 981 m<sup>3</sup>/j. Les districts de Bekily (23 %), Beloha et Tsihombe (chacun environ 15 %) suivent une tendance similaire avec des croissances de l'ordre de 41 à 42 %. La part relative de chaque district dans la demande totale reste stable, ce qui traduit une dynamique de croissance parallèle et homogène à l'échelle régionale.

- **Visualisation 3D : surface d'évolution**

Afin de rendre plus lisible la triple dimension temporelle, spatiale et quantitative de l'évolution de la demande, une modélisation tridimensionnelle a été réalisée en Python avec la bibliothèque matplotlib. L'équation de régression linéaire multiple a permis d'estimer la tendance d'évolution de la demande pour chaque District, en tenant compte des dynamiques démographiques et environnementales observées.

- Modèle mathématique appliqué :

$$D_{i,t} = \alpha + \beta_1 P_{i,t} + \beta_2 C_{i,t} + \beta_3 R_{i,t} + \beta_4 T_t + \varepsilon_{i,t}$$

où :

$D_{i,t}$  = Demande en eau du district  $i$  à l'année  $t$  (m<sup>3</sup>/j)

$P_{i,t}$  = Population du district  $i$  à l'année  $t$

$C_{i,t}$  = Consommation moyenne par habitant

$R_{i,t}$  = Disponibilité hydrique locale (sources, nappes, pluviométrie)

$T_t$  = Tendance temporelle liée au changement climatique

$\varepsilon_{i,t}$  = Terme d'erreur (variations aléatoires non expliquées)

La figure 5 illustre les résultats de cette modélisation sous forme de surface 3D.

Évolution 3D de la demande en eau (Androy, 2015–2030)

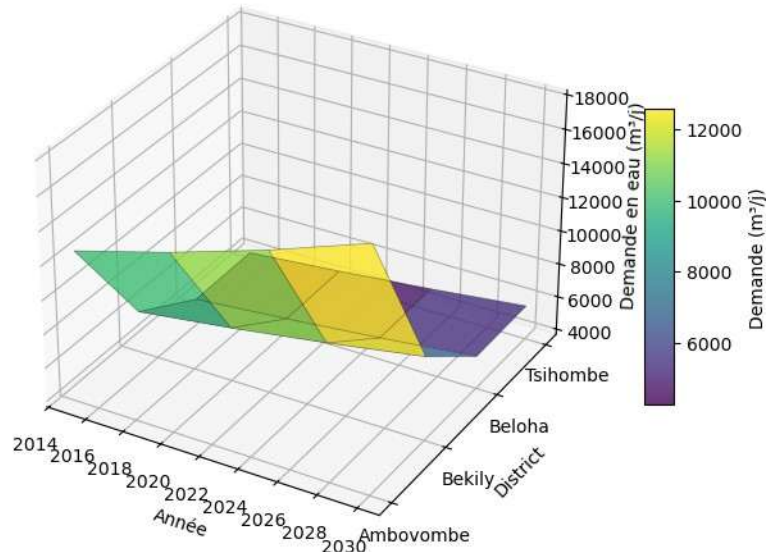


Figure 5 : Visualisation tridimensionnelle de l'évolution de la demande en eau dans les districts de l'Androy (2015–2030)  
(Source : Miravo RAVALINIAINA, Python/matplotlib)

La visualisation 3D confirme une croissance quasi linéaire et homogène de la demande en eau dans l'ensemble des Districts, avec un gradient particulièrement marqué pour le district d'Ambovombe. Ces résultats soulignent l'importance de planifier la gestion et la mobilisation des ressources en eau à l'échelle Régionale, en accordant une priorité au District le plus peuplé tout en intégrant les besoins croissants des Districts voisins.

## 5. Discussion

Les résultats de cette étude convergent vers un constat clair et préoccupant : la Région Androy souffre d'un déficit hydrique structurel que la dynamique démographique et climatique est en train d'aggraver. Trois grandes conclusions méritent d'être discutées.

Premièrement, l'analyse des indices climatiques démontre que le caractère aride à semi-aride de l'Androy n'est pas une simple perception locale : il est quantifiable et mesurable. Les quatre indices utilisés : z-scores des précipitations et des jours de pluie, SPI, indice empirique, s'accordent pour signaler les mêmes années critiques (1997, 2012, 2023). La convergence de ces indicateurs renforce la robustesse des conclusions et valide l'approche multi-indices comme méthodologie pertinente pour des Régions aux données limitées.

Deuxièmement, la tendance à la stagnation, voire à la légère baisse des précipitations sur les dernières années, combinée à l'élévation des températures, laisse présager une aggravation du stress hydrique dans les prochaines décennies. Cette perspective est cohérente avec les projections climatiques régionales pour l'Afrique sub-saharienne, qui prévoient une intensification des sécheresses dans le Sud de Madagascar.

Troisièmement, les projections de la demande en eau révèlent un besoin croissant : +41,7 % entre 2015 et 2030. Face à une ressource stagnante ou déclinante, cet écart croissant entre offre et demande constitue un signal d'alarme majeur pour les décideurs locaux et les acteurs du développement rural. L'amendement des sols par la terre rouge, bien que nécessaire pour

améliorer la rétention en eau et la fertilité<sup>1</sup>, ne peut à lui seul résoudre ce déséquilibre. Une adaptation plus large du système agricole s'impose.

## 6. Cultures adaptées à la sécheresse : sorgho et pois d'Angole

### 6.1 Pourquoi l'amendement des sols par la terre rouge ne suffit-il pas seul ?

L'amendement des sols par la terre rouge améliore significativement la capacité de rétention en eau des sols et leur fertilité, comme démontré dans le deuxième article de cette série. Cependant, face à un climat structurellement aride, avec moins de 470 mm de précipitations annuelles, des épisodes de sécheresse récurrents et une demande en eau croissante de 41,7 % à l'horizon 2030, l'amélioration du sol seul ne garantit pas la sécurité alimentaire. La caractérisation physico-chimique réalisée dans le premier article a d'ailleurs mis en évidence à quel point ces sols sont naturellement contraints : un sol mieux amendé ne peut compenser un déficit pluviométrique chronique si les espèces cultivées elles-mêmes ne sont pas adaptées à la sécheresse.

La logique est donc la suivante : l'amendement optimise la disponibilité de l'eau dans le sol ; les cultures adaptées maximisent l'utilisation de cette eau disponible. Ces deux leviers sont complémentaires et leur

association produit un effet synergique supérieur à la somme de chaque intervention prise séparément. C'est cette synergie que la présente section documente.

### 6.2 Le sorgho (*Sorghum bicolor*) : atouts et interaction avec l'amendement

- **Caractéristiques agronomiques et adaptation à l'aridité**

Le sorgho (*Sorghum bicolor*) est l'une des céréales les plus résistantes à la sécheresse au monde. Il dispose de plusieurs mécanismes biologiques qui lui permettent de survivre et de produire dans des conditions où d'autres cultures échoueraient. Sa capacité à entrer en dormance lors des périodes de stress hydrique, puis à reprendre sa croissance dès que l'humidité revient, lui confère une résilience exceptionnelle. Son système racinaire profond et étendu lui permet d'exploiter les réserves d'eau du sol sur une plus grande profondeur. Enfin, ses stomates régulent efficacement la transpiration, limitant les pertes en eau par évapotranspiration. Le sorgho peut produire dans des zones recevant entre 300 et 600 mm de précipitations annuelles, ce qui correspond exactement aux conditions de l'Androy (410-470 mm).

Sur le plan nutritionnel, le sorgho constitue une excellente source de glucides complexes, de protéines (9-11 %), de fer et de fibres. Sa culture ne nécessite pas de décorticage préalable pour la consommation locale, ce qui en simplifie la transformation post-récolte. Il s'intègre naturellement dans les habitudes alimentaires des communautés du Sud de Madagascar.

- **Synergie avec l'amendement des sols par la terre rouge**

L'interaction entre le sorgho et l'amendement des sols par la terre rouge est directe et mutuellement bénéfique. Les sols de l'Androy, naturellement pauvres en matière organique et à faible capacité de rétention en eau, bénéficient de l'apport de la terre rouge qui augmentent leur porosité et leur capacité d'échange cationique. Dans ce sol amélioré, le sorgho peut exploiter plus efficacement chaque millimètre de pluie stocké, car l'eau reste disponible plus longtemps dans la zone racinaire. En retour, les résidus de tiges et de racines de sorgho, culture dont la biomasse est importante, contribuent à alimenter la matière organique du sol à long terme, renforçant l'effet de l'amendement d'une saison à l'autre.

Concrètement, des études en Afrique subsaharienne dans des conditions similaires montrent que la combinaison amendement organique + sorgho peut augmenter les rendements de 40 à 80 % par rapport à une culture de sorgho sur sol non amendé, et de 200 à 300 % par rapport à la culture traditionnelle de maïs sur sol non traité dans des conditions arides comparables. Cette synergie rend l'investissement dans l'amendement des sols encore plus rentable lorsqu'il est couplé à des cultures adaptées.

### 6.3 Le pois d'Angole (*Cajanus cajan*) : atouts et interaction avec l'amendement

- **Caractéristiques agronomiques et adaptation à l'aridité**

Le pois d'Angole (*Cajanus cajan*), est une légumineuse arbustive pérenne particulièrement bien adaptée aux zones semi-arides. Son système racinaire pivotant peut atteindre deux mètres de profondeur, lui permettant d'accéder aux eaux profondes du sol inaccessibles aux cultures annuelles. Il tolère des précipitations aussi faibles que 250 mm par an et supporte des températures élevées allant jusqu'à 35°C, deux caractéristiques parfaitement alignées avec les conditions de l'Androy.

Sur le plan nutritionnel, le pois d'Angole est une source exceptionnelle de protéines végétales (20-22

%), d'acides aminés essentiels, de fer et de zinc, des nutriments particulièrement déficitaires dans l'alimentation des populations de l'Androy. Sa production peut être répartie entre la consommation humaine (graines fraîches ou sèches), l'alimentation animale (feuilles et tiges) et la production de bois de chauffe (tiges ligneuses), ce qui en fait une culture multifonctionnelle à haute valeur ajoutée pour les ménages ruraux.

- **Synergie avec l'amendement des sols par la terre rouge**

La synergie entre le pois d'Angole et l'amendement des sols par la terre rouge est particulièrement remarquable, car le pois d'Angole est lui-même un agent naturel d'amélioration du sol. En tant que légumineuse, il fixe l'azote atmosphérique via ses nodosités racinaires, enrichissant le sol en cet élément essentiel à la nutrition des plantes. Cette fixation biologique de l'azote peut atteindre 40 à 200 kg N/ha/an, réduisant considérablement les besoins en engrais azotés. Associé à l'amendement organique déjà apporté, cet apport d'azote biologique crée un environnement pédologique particulièrement fertile pour les cultures qui suivront dans la rotation.

De plus, son système racinaire pivotant profond ameublisse mécaniquement les horizons compacts des sols, améliorant leur perméabilité et facilitant l'infiltration des eaux de pluie, ce qui renforce directement l'effet de l'amendement sur la rétention hydrique. La litière de feuilles produite par le pois d'Angole (couverture du sol importante) protège la surface du sol de l'érosion et réduit l'évaporation, limitant ainsi les pertes en eau dans un contexte de fortes chaleurs.

### 6.4 Association sorgho-pois d'Angole : une stratégie de culture intégrée

L'association en culture intercalaire du sorgho et du pois d'Angole constitue une pratique agronomique bien documentée en Afrique sub-saharienne aride, et particulièrement recommandée pour les conditions de l'Androy. Les deux espèces se complètent idéalement : le sorgho, culture annuelle à croissance rapide, fournit des glucides et des calories ; le pois d'Angole, culture pérenne à installation lente, fournit des protéines et améliore le sol sur plusieurs années. Cultivés ensemble sur une terre amendée, ils maximisent l'utilisation de l'espace, de la lumière et de l'eau disponible, tout en diversifiant la

production et en réduisant les risques de perte totale en cas d'épisode de sécheresse particulièrement sévère.

Sur sol amendé, cette association présente un triple avantage : (1) la meilleure rétention en eau du sol profite aux deux cultures qui, grâce à leurs systèmes racinaires complémentaires (sorgho en surface, pois d'Angole en profondeur), exploitent l'ensemble du profil hydrique ; (2) l'azote fixé par le pois d'Angole est partiellement disponible pour le sorgho voisin, réduisant la concurrence nutritive ; (3) la diversité de la production garantit que même lors d'une année aussi sèche que 2023, au moins l'une des deux cultures produit suffisamment pour assurer la subsistance du ménage.

## 7. Conclusion et perspectives

Cette étude confirme que le climat de la Région Androy est structurellement aride, et que les ressources en eau y seront soumises à une pression croissante et inexorable à l'horizon 2030. La demande en eau de la Région augmentera de plus de 41,7 % en quinze ans, dans un contexte où les précipitations stagnent ou diminuent légèrement et où les épisodes de sécheresse sévère comme 1997, 2012 et 2023 sont récurrents.

Face à ce constat, une stratégie de réponse en trois niveaux complémentaires se dessine clairement à travers les travaux de cette

série de recherches :

1. Au niveau pédologique : la caractérisation physico-chimique du sol d'Ambovombe (premier article) a mis en évidence les contraintes naturelles des sols, dont l'amendement par terre rouge (deuxième article) a ensuite permis d'améliorer significativement la rétention en eau et la fertilité, créant un environnement de croissance plus favorable même en période de déficit pluviométrique.
2. Au niveau agronomique : l'introduction du sorgho (*Sorghum bicolor*) et du pois d'Angole (*Cajanus cajan*), cultivés en association sur sol amendé, maximise l'utilisation des ressources hydriques disponibles, enrichit le sol en azote biologique et diversifie la production alimentaire, réduisant la vulnérabilité des ménages face aux épisodes de sécheresse (troisième article, présent travail).
3. Au niveau hydraulique : les analyses climatiques et démographiques présentées dans cet article, conjuguées aux résultats des deux premiers articles, démontrent la nécessité d'aménagements hydrauliques structurants pour optimiser l'utilisation de chaque mètre cube d'eau disponible. Ces solutions feront l'objet du quatrième article de la série.

Cette approche intégrée : amendement des sols par la terre rouge, adaptation des cultures, aménagements hydrauliques, constitue une réponse cohérente, progressive et scientifiquement fondée aux défis de l'insécurité alimentaire et hydrique dans l'Androy. Chacun de ces trois leviers se renforce mutuellement : un sol mieux amendé valorise mieux l'eau apportée par irrigation ; des cultures adaptées réduisent la demande en eau par hectare ; et des aménagements hydrauliques rendent ces stratégies viables même lors des années les plus sèches, comme 1997, 2012 ou 2023.

#### Références bibliographiques :

- [1]. <sup>1</sup> Ravaliniaina Kantonieràna Miravo Finaritra Tafitsoa, Caractérisations physico-chimique des sols dans la Région tropical comme le Sud de Madagascar, IJPSAT Vol 38, No 2 (2023), première article de la série.
- [2]. <sup>2</sup> Ravaliniaina Kantonieràna Miravo Finaritra Tafitsoa, Modélisation et simulation de l'impact de l'amendement par terres rouges sur les propriétés physico-chimiques des Sols : Analyse comparative dans le District d'Ambovombe, Région Androy, Madagascar, Vol. 56 No. 1 March 2026, pp. 129-142 (2026), deuxième article de la série.
- [3]. <sup>3</sup> Ravaliniaina Kantonieràna Miravo Finaritra Tafitsoa, Approche intégrée d'aménagement et de valorisation agricole des sols dans le Sud de Madagascar : cas du District d'Ambovombe Androy, Bibliothèques de l'Université d'Antananarivo, (2025)

### Annexe 1 : Données météorologiques réelles (1995-2024)

Les données ci-dessous constituent la base observationnelle de l'analyse climatique conduite dans le présent article (section III). Elles ont été compilées à partir de la base de données de la World Bank Climate Data et des archives de la Direction Générale de la Météorologie de Madagascar.

| Année | Temp. Min (°C) | Temp. Max (°C) | Précipitations (mm) | Jours de pluie |
|-------|----------------|----------------|---------------------|----------------|
| 1995  | 17.6           | 31.6           | 455                 | 38             |
| 1996  | 17.5           | 31.5           | 448                 | 36             |
| 1997  | 17.7           | 31.7           | 418                 | 31             |
| 1998  | 17.6           | 31.6           | 460                 | 39             |
| 1999  | 17.5           | 31.5           | 452                 | 37             |
| 2000  | 17.6           | 31.6           | 445                 | 36             |
| 2001  | 17.5           | 31.6           | 458                 | 38             |
| 2002  | 17.6           | 31.7           | 442                 | 35             |
| 2003  | 17.5           | 31.5           | 450                 | 37             |
| 2004  | 17.6           | 31.6           | 460                 | 39             |
| 2005  | 17.6           | 31.6           | 455                 | 38             |
| 2006  | 17.5           | 31.6           | 448                 | 36             |
| 2007  | 17.6           | 31.6           | 452                 | 37             |
| 2008  | 17.5           | 31.5           | 445                 | 36             |
| 2009  | 17.6           | 31.7           | 460                 | 38             |
| 2010  | 17.6           | 31.6           | 453                 | 37             |
| 2011  | 17.5           | 31.6           | 447                 | 36             |
| 2012  | 17.7           | 31.7           | 422                 | 32             |
| 2013  | 17.5           | 31.5           | 455                 | 38             |
| 2014  | 17.6           | 31.6           | 450                 | 37             |
| 2015  | 17.6           | 31.6           | 448                 | 36             |
| 2016  | 17.5           | 31.6           | 455                 | 37             |
| 2017  | 17.6           | 31.6           | 452                 | 37             |
| 2018  | 17.5           | 31.5           | 445                 | 36             |
| 2019  | 17.6           | 31.6           | 442                 | 35             |
| 2020  | 17.6           | 31.7           | 438                 | 35             |

|      |      |      |     |    |
|------|------|------|-----|----|
| 2021 | 17.5 | 31.6 | 435 | 34 |
| 2022 | 17.6 | 31.6 | 428 | 33 |
| 2023 | 17.7 | 31.7 | 410 | 29 |
| 2024 | 17.6 | 31.6 | 420 | 31 |

Tableau 1 : Données météorologiques réelles 1995–2024 — Source : World Bank Climate Data ; Direction Générale de la Météorologie de Madagascar.

## Annexe 2 : Projections climatiques estimatives (2025-2045)

Projections établies par régression linéaire sur les données observées 1995-2024 et publiées en annexe du deuxième article de cette série (RAVALINIAINA, M., 2024). Ces données sont reproduites ici à titre prospectif et indicatif. Elles ne constituent pas la base de l'analyse climatique du présent article, qui repose exclusivement sur les données réelles 1995-2024 (Annexe 1).

| Année | Temp. Min (°C) | Temp. Max (°C) | Précipitations (mm) | Jours de pluie |
|-------|----------------|----------------|---------------------|----------------|
| 2025  | 17.8           | 31.7           | 460                 | 37             |
| 2026  | 17.8           | 31.7           | 452                 | 36             |
| 2027  | 17.8           | 31.7           | 443                 | 36             |
| 2028  | 17.8           | 31.7           | 434                 | 35             |
| 2029  | 17.8           | 31.7           | 426                 | 34             |
| 2030  | 17.8           | 31.8           | 418                 | 33             |
| 2031  | 17.8           | 31.8           | 409                 | 32             |
| 2032  | 17.9           | 31.8           | 400                 | 32             |
| 2033  | 17.9           | 31.8           | 392                 | 31             |
| 2034  | 17.9           | 31.8           | 384                 | 30             |
| 2035  | 17.9           | 31.8           | 375                 | 30             |
| 2036  | 17.9           | 31.8           | 366                 | 29             |
| 2037  | 17.9           | 31.8           | 358                 | 28             |
| 2038  | 17.9           | 31.8           | 350                 | 27             |
| 2039  | 17.9           | 31.8           | 341                 | 26             |
| 2040  | 17.9           | 31.8           | 332                 | 26             |
| 2041  | 18.0           | 31.9           | 324                 | 25             |
| 2042  | 18.0           | 31.9           | 316                 | 24             |
| 2043  | 18.0           | 31.9           | 307                 | 24             |

---

|      |      |      |     |    |
|------|------|------|-----|----|
| 2044 | 18.0 | 31.9 | 298 | 23 |
| 2045 | 18.0 | 31.9 | 290 | 22 |

Tableau 2 : Projections climatiques estimatives 2025–2045 — Source : RAVALINIAINA, M. (2024), deuxième article de la série, Annexe.