



IDENTIFICATION DES ZONES POTENTIELLES DE CULTURE DU RIZ À SAKÉ À MADAGASCAR

¹RASAMIMANANA Onja Vola, ²RAVAOARINORO Rondro Nirina, ³RAKOTOSON Tolontsoa,
⁴TOVONIRINA Mamiharizo Jackie, ⁵ROKIMAN Letsara

1- ECOLE DOCTORALE GENIE DES PROCÉDES ET DES SYSTÈMES INDUSTRIELS, AGRICOLES ET ALIMENTAIRES

2- UNIVERSITÉ D'ANTANANARIVO

RESUME : Madagascar présente une forte diversité géologique, topographique et agroclimatique susceptible d'influencer l'implantation de nouvelles cultures spécialisées, notamment le riz destiné à la production de saké. Cette étude vise à identifier et hiérarchiser les zones potentielles de culture du riz à saké à partir d'une approche spatiale et statistique combinant critères géologiques et agroclimatiques. Le potentiel géologique a été exprimé par un score de 1 à 5, mettant en évidence une forte hétérogénéité régionale. À Ambatondrazaka, sur la base de données agroclimatiques synthétiques de démonstration, l'indice moyen atteint 94,7/100 ; 95,6 % de la surface analysée présente une aptitude ≥ 75 et 84,2 % une aptitude ≥ 85 . Les relations statistiques montrent une forte association entre altitude et température ($R^2=0,922$), ainsi qu'entre aptitude et altitude ($R^2=0,792$), température ($R^2=0,767$) et pluviométrie ($R^2=0,621$). L'analyse en composantes principales explique 96,5 % de la variance sur les deux premiers axes, dont 85,2 % pour PC1. La heatmap standardisée distingue notamment Menabe, Boeny, Atsimo-Andrefana et Melaky par des profils géologiques supérieurs à la moyenne. L'ensemble fournit une base de présélection spatiale pour orienter les investigations de terrain, lesquelles devront intégrer des validations pédologiques, hydrologiques, climatiques et agronomiques avant toute implantation expérimentale.

Mots-clés : Riz à saké ; aptitude agroclimatique ; potentiel géologique ; analyse spatiale ; Madagascar.

ABSTRACT: Madagascar exhibits substantial geological, topographic, and agroclimatic diversity, which may influence the establishment of new specialized crops, particularly rice intended for sake production. This study aims to identify and prioritize potential areas for sake-rice cultivation using an integrated spatial and statistical approach combining geological and agroclimatic criteria. Geological potential was expressed on a score ranging from 1 to 5, revealing marked regional heterogeneity. In Ambatondrazaka, based on synthetic agroclimatic data generated for demonstration purposes, the mean suitability index reached 94.7/100; 95.6% of the analyzed area showed a suitability score ≥ 75 , while 84.2% reached a score ≥ 85 . Statistical relationships indicated a strong association between altitude and temperature ($R^2 = 0.922$), as well as between overall suitability and altitude ($R^2 = 0.792$), temperature ($R^2 = 0.767$), and precipitation ($R^2 = 0.621$). Principal Component Analysis (PCA) explained 96.5% of the total variance on the first two components, with 85.2% accounted for by PC1 alone. The standardized heatmap notably distinguished Menabe, Boeny, Atsimo-Andrefana, and Melaky as regions displaying above-average geological profiles. Overall, the approach provides a spatial pre-screening framework for guiding field investigations; however, pedological, hydrological, climatic, and agronomic validation will be required before any experimental cultivation is established.

Keywords: Sake rice; agroclimatic suitability; geological potential; spatial analysis; Madagascar.

Digital Object Identifier (DOI): <https://doi.org/10.5281/zenodo.23063810>

1 Introduction

Le saké est une boisson fermentée japonaise dont la qualité dépend fortement des caractéristiques du riz utilisé. Les variétés destinées au brassage, appelées shuzō-kōtekimai, se distinguent généralement des riz de consommation par des grains plus gros, un shinpaku bien développé, une faible teneur en protéines et lipides, ainsi qu'une bonne capacité d'absorption de l'eau et de digestibilité après cuisson [1]. Ces propriétés influencent directement le polissage, la saccharification et, in fine, la qualité du saké. Au-delà du génotype, les conditions environnementales jouent un rôle déterminant. La température au cours du remplissage des grains peut modifier la structure de l'amidon, la gélatinisation et la digestibilité du riz [2,3]. L'altitude, la pluviométrie, la disponibilité en eau, la nature des sols et le substrat géologique constituent également des facteurs majeurs pour identifier des terroirs potentiellement favorables. Les approches fondées sur les systèmes d'information géographique et l'analyse multicritère permettent d'intégrer ces variables et de hiérarchiser spatialement les zones d'intérêt [4,5]. Madagascar présente une forte diversité géologique, topographique et agroclimatique, ainsi qu'une longue tradition rizicole. Les Hautes Terres ont notamment montré la capacité de certaines variétés de riz à s'adapter à des altitudes élevées et à des températures relativement basses [6], tandis que des bassins comme Alaotra-Mangoro constituent d'importantes zones de production irriguée [7]. Toutefois, le potentiel spécifique du territoire malgache pour la culture du riz à saké reste peu documenté. Cette étude vise donc à identifier et hiérarchiser les zones potentielles de culture du riz à saké à Madagascar par une approche spatiale et statistique combinant critères géologiques et agroclimatiques, afin d'orienter les futures investigations pédologiques, hydrologiques et agronomiques.

2 Matériels et méthodes

2.1 Matériels

Les matériels et sources de données mobilisés dans cette étude reposent sur une combinaison de données géospatiales, climatiques, observations de terrain et outils de traitement numérique. Les données SIG de référence, notamment les limites administratives et les couches cartographiques nécessaires à l'analyse spatiale, ont été obtenues auprès du Foiben-Taosarintanin'i Madagasikara (FTM/FTMM), reconnu comme l'autorité nationale malgache en information géospatiale [8]. Les données climatologiques, comprenant principalement les températures et les précipitations, proviennent de la Direction Générale de la Météorologie – Météo Madagascar, organisme public chargé notamment des services météorologiques, climatologiques et hydrologiques [9]. Ces informations ont été complétées par des données issues des descentes sur le terrain, utilisées pour la vérification des conditions locales, le géoréférencement des sites et la confrontation des résultats cartographiques avec les réalités observées. Le traitement, l'analyse statistique et la représentation graphique ont été réalisés sous Python, en mobilisant principalement GeoPandas pour les données vectorielles et opérations spatiales [10], pandas pour la structuration des données [11], NumPy pour les calculs numériques [12], SciPy pour les analyses statistiques et interpolations [13], Matplotlib pour la production des figures scientifiques [14] et scikit-learn pour les analyses multivariées, notamment l'analyse en composantes principales [15]. Ces outils ont permis d'assurer un traitement reproductible et une intégration cohérente des différentes sources de données.

2.2 Méthodes

Les données issues des différentes sources ont d'abord fait l'objet d'un prétraitement visant à vérifier leur cohérence, à harmoniser les formats, les systèmes de coordonnées, les noms de variables et les unités, puis à identifier les valeurs manquantes, doublons et géométries invalides. Les couches vectorielles ont été contrôlées et, lorsque nécessaire, les polygones défectueux ont été réparés avant toute analyse spatiale, conformément aux principes généraux de nettoyage et d'intégration des données hétérogènes [16]. Les variables géologiques ont ensuite été reclassées selon un score ordinal de favorabilité allant de faible à très favorable, puis intégrées dans un environnement SIG. Les valeurs ponctuelles ou représentatives des unités géologiques et agroclimatiques ont été transformées en surfaces continues par interpolation IDW (Inverse Distance Weighting), méthode qui estime une valeur locale en donnant davantage de poids aux observations spatialement proches [17]. L'aptitude globale a été évaluée par une approche d'analyse multicritère spatiale, combinant les critères géologiques et agroclimatiques après harmonisation de leurs échelles. Les variables retenues, notamment l'altitude, la température, la pluviométrie et les classes géologiques, ont été pondérées puis superposées afin d'obtenir un indice synthétique de favorabilité

et de hiérarchiser les zones potentielles [18]. Pour comparer les régions, les indicateurs ont été standardisés sous forme de scores-z avant la construction des heatmaps et des profils radar. Les relations entre variables ont été étudiées à l'aide des coefficients de corrélation de Pearson, Spearman et Kendall, permettant respectivement d'examiner les associations linéaires, monotones et ordinales [19]. Des modèles de régression linéaire et quadratique ont été utilisés pour analyser les relations entre altitude, température, pluviométrie et indice d'aptitude, tandis que l'analyse en composantes principales (ACP/PCA) a permis de résumer la variabilité multivariée et d'identifier les principaux gradients différenciant les régions [20].

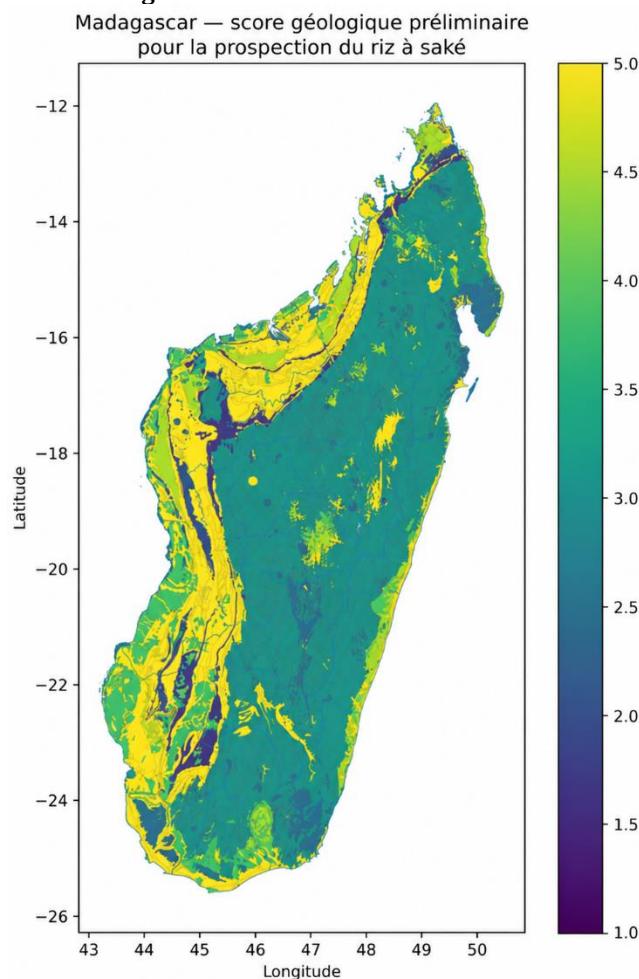
3 Résultats et discussions

3.1 Résultats

3.1.1 Répartition spatiale du score géologique préliminaire pour la prospection des zones potentielles de culture du riz à saké à Madagascar

La Figure 1 suivante présente la distribution spatiale du score géologique préliminaire établi pour identifier les secteurs présentant des conditions géologiques potentiellement favorables à une expérimentation du riz à saké à Madagascar. Le score, exprimé sur une échelle continue allant de 1,0 à 5,0, traduit le niveau de favorabilité attribué aux différentes formations géologiques : les valeurs élevées correspondent aux contextes géologiques jugés les plus intéressants pour une prospection ultérieure, tandis que les valeurs faibles indiquent des secteurs présentant a priori davantage de contraintes.

Figure 1: Répartition spatiale du score géologique préliminaire pour la prospection des zones potentielles de culture du riz à saké à Madagascar



Source: Auteur 2026

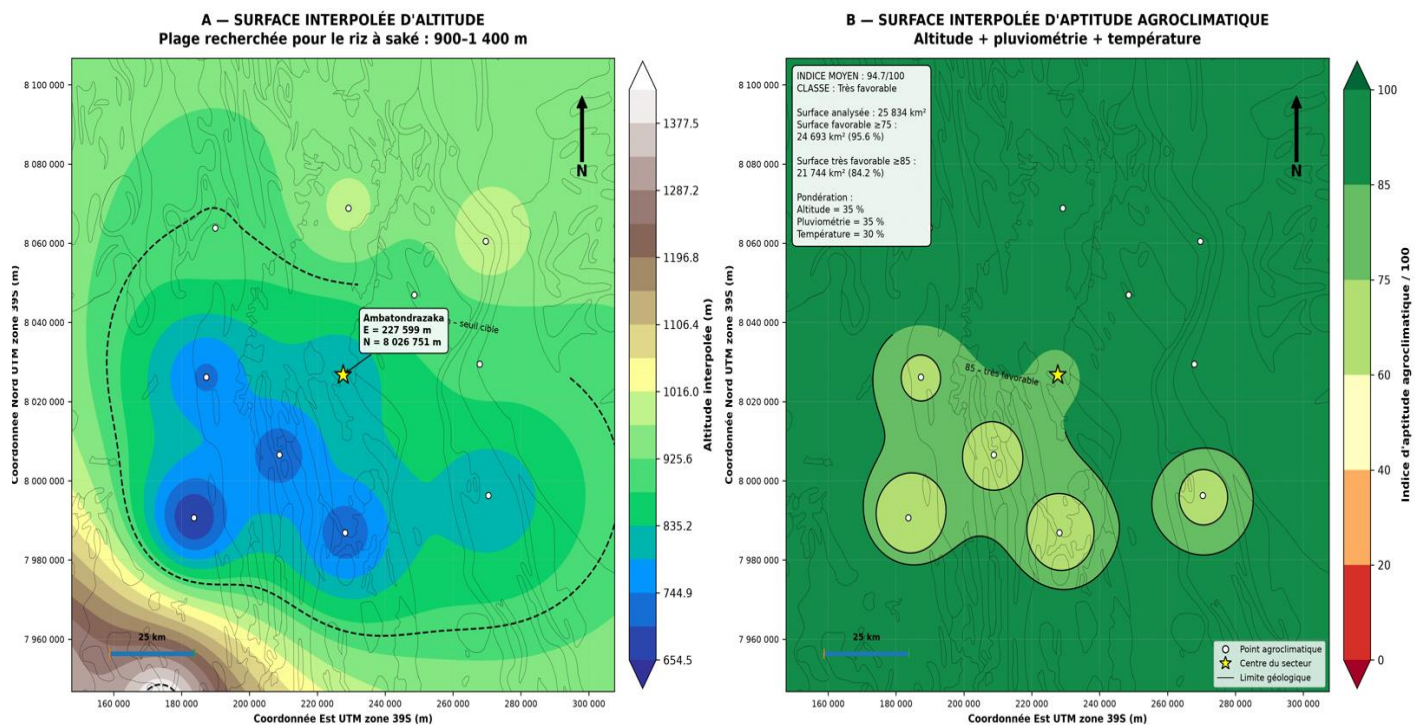
Interprétation

Cette carte montre une forte hétérogénéité spatiale du potentiel géologique à l'échelle de Madagascar. Une grande partie du domaine central et oriental présente principalement des scores intermédiaires, généralement compris autour de 3,0 à 3,5, indiquant un potentiel géologique modéré à relativement favorable. Ces secteurs constituent ainsi des zones de second niveau de priorité, pour lesquelles la géologie ne représente pas nécessairement une contrainte majeure, mais où d'autres facteurs pédologiques et agroclimatiques devront être examinés avant toute sélection définitive. Les valeurs les plus élevées, comprises approximativement entre 4,0 et 5,0, apparaissent de manière particulièrement marquée dans plusieurs secteurs de la façade occidentale et nord-occidentale, ainsi que localement dans le Sud et le Sud-Ouest. Les zones atteignant des scores proches de 4,5–5,0 constituent les secteurs géologiquement les plus favorables selon le modèle de présélection utilisé. Dans la logique du classement appliqué, ces valeurs élevées correspondent notamment aux formations auxquelles ont été attribuées les meilleures caractéristiques potentielles pour le développement de sols à bonne rétention hydrique, telles que certains dépôts alluviaux, fluvio-lacustres ou formations volcaniques favorables. À l'inverse, les scores faibles, généralement compris entre 1,0 et 2,5, sont spatialement plus discontinus. Ils se rencontrent principalement sous forme de bandes ou de noyaux localisés dans certaines parties de l'Ouest, du Sud-Ouest et ponctuellement du Nord. Ces faibles valeurs signalent des contextes géologiques considérés comme moins prioritaires dans le cadre de la prospection, notamment lorsque le substrat est susceptible de générer des sols plus grossiers, plus drainants ou présentant certaines contraintes géochimiques. La distribution observée montre également que le potentiel ne suit pas une organisation uniforme à l'échelle nationale : des secteurs à score élevé peuvent être directement juxtaposés à des unités présentant des valeurs nettement plus faibles. Cette variabilité traduit l'importance de la nature lithologique et du matériau parental dans la présélection des zones. Elle justifie donc une approche spatiale détaillée plutôt qu'une sélection reposant uniquement sur de grandes divisions administratives.

3.1.2 Potentiel agroclimatique interpolé pour la culture du riz à saké dans le secteur d'Ambatondrazaka, région Alaotra-Mangoro

La Figure 2 suivante présente la distribution spatiale de l'altitude et de l'indice d'aptitude agroclimatique obtenus pour le secteur d'Ambatondrazaka. L'évaluation combine trois critères pondérés : altitude (35 %), pluviométrie (35 %) et température (30 %), avec une plage altitudinale recherchée de 900 à 1 400 m.

Figure 2: Potentiel agroclimatique interpolé pour la culture du riz à saké dans le secteur d'Ambatondrazaka, région Alaotra-Mangoro



Source : Auteur 2026

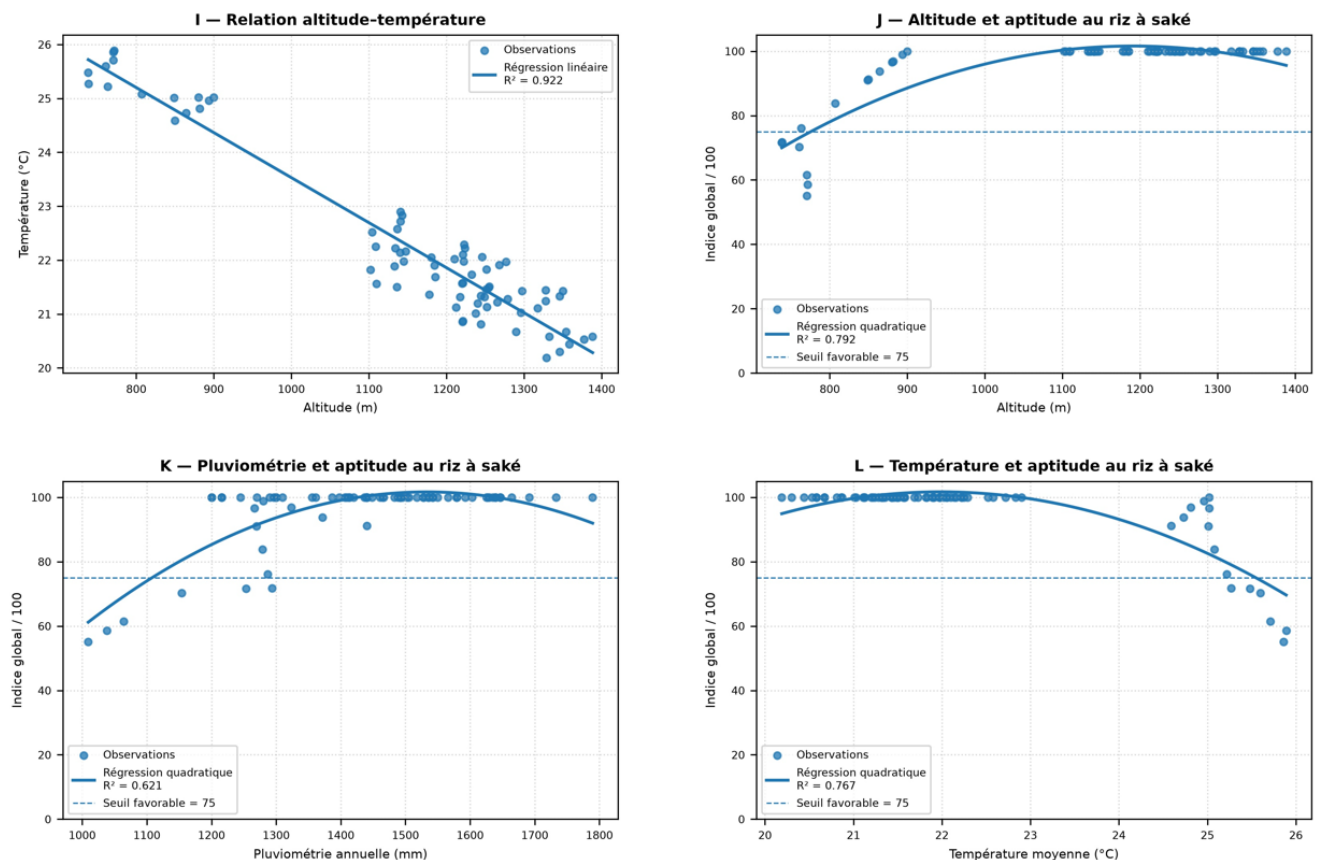
Interprétation

Les résultats indiquent un potentiel agroclimatique globalement très favorable, avec un indice moyen de 94,7/100. Sur une superficie analysée de 25 834 km², environ 24 693 km² (95,6 %) présentent un indice d'aptitude ≥ 75 , tandis que 21 744 km² (84,2 %) atteignent le seuil de très forte aptitude, fixé à ≥ 85 . La surface d'altitude interpolée montre toutefois une variabilité spatiale importante, avec des valeurs comprises approximativement entre 655 et 1 378 m. Les secteurs correspondant ou se rapprochant de la plage cible de 900–1 400 m, associés à des conditions pluviométriques et thermiques favorables, expliquent la prédominance des classes de forte aptitude. Le centre d'Ambatondrazaka se situe lui-même dans un environnement classé très favorable. Ces résultats montrent que le secteur d'Ambatondrazaka constitue une zone prioritaire pour des essais expérimentaux de riz à saké.

3.1.3 Relations entre l'altitude, la pluviométrie, la température et l'indice d'aptitude agroclimatique

La Figure 3 suivante analyse les principales relations statistiques entre les variables agroclimatiques et l'indice global d'aptitude à la culture du riz à saké. Le seuil d'aptitude favorable est fixé à 75/100, et les ajustements linéaires ou quadratiques permettent d'identifier les plages environnementales associées aux niveaux d'aptitude les plus élevés.

Figure 3: Relations entre l'altitude, la pluviométrie, la température et l'indice d'aptitude agroclimatique



Source : Auteur 2026

Interprétation

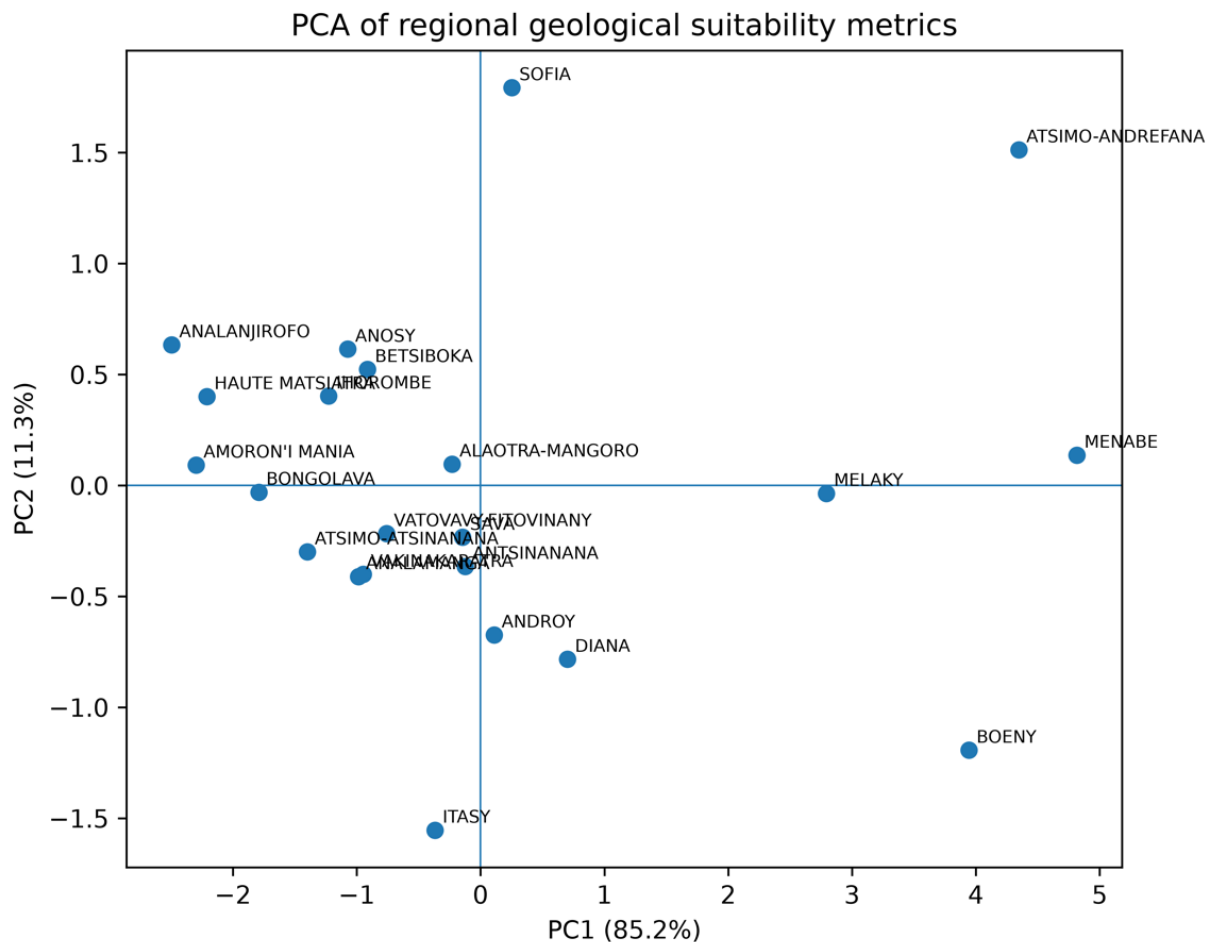
La relation altitude-température (I) montre une diminution nette de la température lorsque l'altitude augmente, avec un coefficient de détermination très élevé ($R^2 = 0,922$). Entre environ 750 et 1 400 m, la température moyenne passe approximativement de 25,8 à 20,3 °C, confirmant l'importance de l'altitude dans la définition des conditions thermiques. L'altitude présente également une relation quadratique avec l'indice d'aptitude ($R^2 = 0,792$; J). Les altitudes les plus basses, autour de 750–780 m, peuvent présenter des indices inférieurs au seuil de 75/100, tandis que l'aptitude augmente fortement à partir d'environ 800–900 m. Les valeurs maximales, proches de 100/100, sont principalement observées entre environ 1 100 et 1 300 m. La pluviométrie annuelle explique une part plus modérée de la variation de l'aptitude ($R^2 = 0,621$; K). Les conditions deviennent généralement favorables au-delà d'environ 1 150–1 200 mm/an, tandis que la plage d'environ 1 400 à 1 650 mm/an correspond aux indices les plus élevés, souvent proches de 100/100. Une légère diminution apparaît ensuite lorsque les précipitations approchent 1 800 mm/an. Enfin, la température moyenne présente une relation quadratique relativement forte avec l'aptitude ($R^2 = 0,767$; L). Les meilleurs niveaux d'aptitude sont observés autour de 21–23 °C, avec des indices proches de

100/100. Au-delà d'environ 24–25 °C, l'aptitude diminue progressivement et peut passer sous le seuil de 75/100 lorsque les températures approchent 25,5–26 °C. pour la culture du riz à saké à Madagascar.

3.1.4 Analyse en composantes principales des indicateurs régionaux de potentiel géologique

La Figure 4 ci-dessous présente la projection des régions de Madagascar selon les deux premières composantes principales de l'analyse en composantes principales (ACP), réalisée à partir des indicateurs régionaux de potentiel géologique. Les axes PC1 et PC2 expliquent respectivement 85,2 % et 11,3 % de la variance totale, soit 96,5 % cumulés, ce qui permet de résumer l'essentiel de la variabilité entre les régions sur un plan bidimensionnel.

Figure 4: Analyse en composantes principales des indicateurs régionaux de potentiel géologique



Source : Auteur 2026

Interprétation

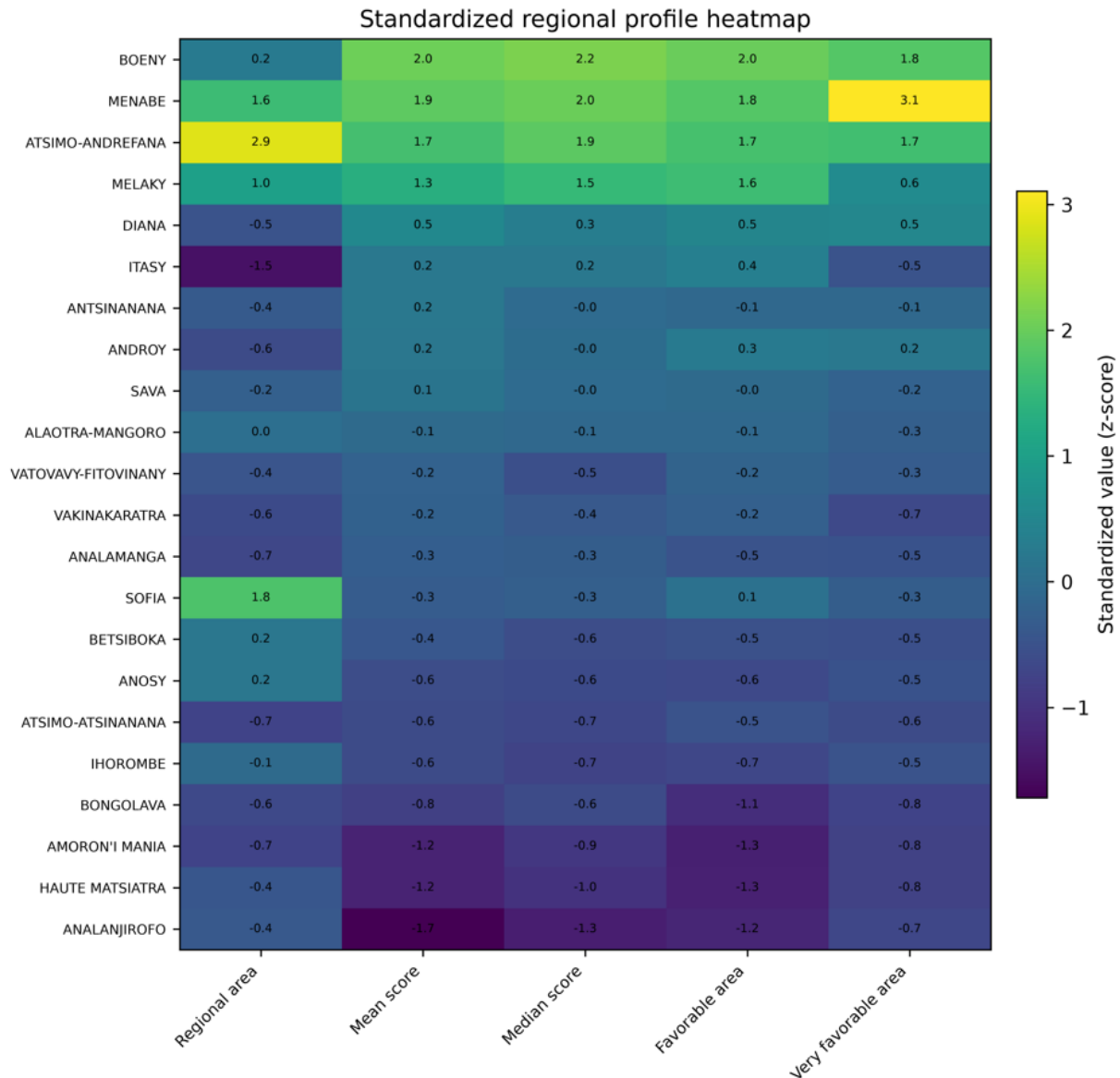
L'axe PC1 (85,2 %) constitue le principal facteur de différenciation des régions. Menabe, Atsimo-Andrefana et Boeny se distinguent nettement par leurs coordonnées fortement positives sur cet axe, avec des valeurs approximatives comprises entre +4 et +5 pour Menabe et Atsimo-Andrefana et autour de +4 pour Boeny. Ces régions présentent donc des profils géologiques nettement différents de la majorité des autres régions analysées. Melaky, située autour de PC1 $\approx +2,8$, constitue également un groupe relativement distinct, mais moins extrême. À l'opposé, plusieurs régions se positionnent du côté négatif de PC1, notamment Analanjirofo, Haute Matsiatra, Bongolava, Amoron'i Mania, Anosy et Ihorombe, avec des coordonnées comprises approximativement entre -2,5 et -1,0. Leur proximité dans l'espace factoriel suggère des profils relativement similaires pour les variables ayant servi à construire l'ACP. L'axe PC2 (11,3 %) apporte une différenciation complémentaire. Sofia se caractérise par la valeur positive la plus élevée (PC2 $\approx +1,8$), tandis qu'Itasy présente la valeur négative la plus marquée (PC2 $\approx -1,6$). Atsimo-Andrefana combine par ailleurs des coordonnées fortement positives sur PC1 et PC2 ($\approx +4,4$; $+1,5$), alors que Boeny se distingue par un PC1 fortement positif mais un PC2 négatif ($\approx +4,0$; $-1,2$). Ces oppositions indiquent que ces régions ne se différencient pas uniquement par l'intensité globale de leurs indicateurs, mais également par leur structure relative. Plusieurs régions, dont Alaotra-Mangoro, Vatovavy-Fitovinany, Atsinanana

et Analamanga, sont situées relativement près du centre du graphique. Alaotra-Mangoro, en particulier, présente des coordonnées proches de $PC1 \approx -0,2$ et $PC2 \approx +0,1$, indiquant un profil proche de la tendance moyenne de l'ensemble des régions pour les variables considérées.

3.1.5 Profil standardisé des indicateurs régionaux de potentiel géologique

La Figure 5 ci-après présente une carte thermique des principaux indicateurs régionaux après standardisation en scores-z : superficie régionale, score géologique moyen, score médian, proportion de surface favorable et proportion de surface très favorable. Une valeur $z > 0$ indique une valeur supérieure à la moyenne nationale, tandis qu'une valeur $z < 0$ traduit une valeur inférieure à cette moyenne.

Figure 5: Profil standardisé des indicateurs régionaux de potentiel géologique



Source : Auteur 2026

Interprétation

La heatmap met en évidence un groupe de régions présentant des profils géologiques nettement supérieurs à la moyenne. Boeny, Menabe, Atsimo-Andrefana et Melaky se distinguent particulièrement. Menabe présente notamment la valeur standardisée la plus élevée pour la surface très favorable ($z = 3,1$), associée à des scores élevés pour le score moyen ($z = 1,9$), le score médian ($z = 2,0$) et la surface favorable ($z = 1,8$). Boeny montre également un profil très favorable, avec $z = 2,0$ pour le score moyen, $2,2$ pour le score médian et $2,0$ pour la surface favorable.

Atsimo-Andrefana se caractérise surtout par sa très grande superficie relative ($z = 2,9$), tout en conservant des valeurs élevées pour le score moyen (1,7), le score médian (1,9) et les surfaces favorable et très favorable (1,7 chacune). Melaky présente un profil positif mais moins extrême, avec des valeurs comprises approximativement entre $z = 0,6$ et $1,6$. À l'inverse, Analanjirofo, Haute Matsiatra et Amoron'i Mania présentent les profils les plus faibles pour plusieurs indicateurs. Analanjirofo atteint notamment $z = -1,7$ pour le score moyen, $-1,3$ pour le score médian et $-1,2$ pour la surface favorable. Haute Matsiatra et Amoron'i Mania présentent également des valeurs comprises approximativement entre $-0,8$ et $-1,3$ pour les principaux indicateurs de favorabilité. Enfin, Alaotra-Mangoro se situe très près de la moyenne nationale, avec des scores standardisés compris entre environ $0,0$ et $-0,3$. Son profil apparaît donc intermédiaire dans cette comparaison géologique régionale.

3.2 Discussions

Les résultats mettent en évidence une forte différenciation spatiale du potentiel de culture du riz à saké à Madagascar. Sur le plan géologique, les scores varient de 1 à 5, avec plusieurs secteurs de l'Ouest et du Sud-Ouest atteignant des valeurs de 4 à 5, tandis que d'autres zones présentent des niveaux plus faibles, généralement inférieurs à 2,5. Cette variabilité confirme que la favorabilité dépend fortement du contexte lithologique et de la distribution spatiale des formations géologiques. L'analyse agroclimatique réalisée dans le secteur d'Ambatondrazaka montre un potentiel particulièrement élevé, avec un indice moyen d'aptitude de 94,7/100. Environ 95,6 % de la surface étudiée atteint un niveau d'aptitude supérieur ou égal à 75, et 84,2 % dépasse le seuil de 85, traduisant une prédominance des conditions considérées comme très favorables. Les relations entre variables confirment également l'importance des facteurs environnementaux : la relation altitude-température présente un R^2 de 0,922, tandis que les relations entre l'aptitude et l'altitude, la température et la pluviométrie atteignent respectivement $R^2 = 0,792$, $0,767$ et $0,621$. Les meilleures conditions se situent globalement autour de 900–1 400 m d'altitude, avec des températures proches de 21–23 °C et des précipitations annuelles d'environ 1 200–1 700 mm. L'analyse multivariée renforce cette différenciation régionale. Les deux premiers axes de l'ACP expliquent 96,5 % de la variance totale, dont 85,2 % pour PC1 et 11,3 % pour PC2, indiquant que l'essentiel des contrastes entre régions est résumé par ces deux dimensions. La heatmap standardisée distingue notamment Menabe, Boeny, Atsimo-Andrefana et Melaky, qui présentent plusieurs indicateurs au-dessus de la moyenne, avec par exemple un score- z atteignant 3,1 pour la surface très favorable au Menabe.

4 Conclusion

Cette étude a permis d'identifier et de hiérarchiser les zones potentielles de culture du riz à saké à Madagascar à partir de critères géologiques et agroclimatiques. Les résultats montrent une forte variabilité spatiale, avec des secteurs présentant des scores géologiques élevés de 4 à 5 et, à Ambatondrazaka, un indice moyen d'aptitude de 94,7/100, dont 95,6 % de la surface atteint un niveau favorable. Les analyses statistiques et multivariées confirment l'importance de l'altitude, de la température et de la pluviométrie dans la différenciation des zones. Ces résultats constituent une base pertinente de présélection, mais devront être confirmés par des analyses de sol, de l'eau et par des essais agronomiques de terrain avant toute implantation à grande échelle.

REFERENCES

- [1] Aalae Bazkiaee, P., Kamkar, B., Amiri, E., Kazemi, H., Rezaei, M. and Ahmadzadeh Araj, H. (2024) 'Multi-criteria GIS-based land suitability analysis for rice cultivation: A case study in Guilan Province, Iran', *Environmental Monitoring and Assessment*, 196, 680. <https://doi.org/10.1007/s10661-024-12811-y>
- [2] FAO/WFP (2010) Mission FAO/PAM d'évaluation des récoltes et de la sécurité alimentaire à Madagascar. Rome: Food and Agriculture Organization of the United Nations and World Food Programme.
- [3] Kihoro, J., Bosco, N.J. and Murage, H. (2013) 'Suitability analysis for rice growing sites using a multicriteria evaluation and GIS approach in Great Mwea Region, Kenya', *SpringerPlus*, 2, 265. <https://doi.org/10.1186/2193-1801-2-265>
- [4] Koseki, T., Okuda, M., Yonehara, Y., Hachida, K., Iwata, H., Aramaki, I. and Hashizume, K. (2004) 'Effects of high temperature during grain-filling on characteristics of rice for sake brewing',

- Journal of the Brewing Society of Japan, 99(8), pp. 591–596.
<https://doi.org/10.6013/jbrewsocjapan1988.99.591>
- [5] Raboin, L.M., Randriambololona, T., Radanielina, T., Ramanantsoanirina, A., Ahmadi, N. and Dusserre, J. (2014) 'Upland rice varieties for smallholder farming in the cold conditions in Madagascar's tropical highlands', *Field Crops Research*, 169, pp. 11–20.
<https://doi.org/10.1016/j.fcr.2014.09.006>
- [6] Yonehara, Y., Koseki, T., Okuda, M., Aramaki, I. and Hashizume, K. (2005) 'Effects of low temperatures during grain-filling on characteristics of rice for sake brewing', *Journal of the Brewing Society of Japan*, 100, pp. 650–657.
- [7] Zhang, K., Wu, W. and Yan, Q. (2020) 'Research advances on sake rice, koji, and sake yeast: A review', *Food Science & Nutrition*, 8(7), pp. 2995–3003. <https://doi.org/10.1002/fsn3.1625>
- [8] United Nations Statistics Division (2024) Madagascar: Second Administrative Level Boundaries – National Geospatial Information Authority, Institut Géographique et Hydrographique National (Foiben-Taosarintanin'i Madagasikara). United Nations.
- [9] Direction Générale de la Météorologie (2026) Présentation et organisation de Météo Madagascar. Antananarivo: Ministère des Transports et de la Météorologie.
- [10] Fleischmann, M. et al. (2026) 'GeoPandas: Fundamental data structures for vector spatial data in Python', *Computers, Environment and Urban Systems*, 130, 102495.
<https://doi.org/10.1016/j.compenvurbsys.2026.102495>
- [11] McKinney, W. (2010) 'Data structures for statistical computing in Python', *Proceedings of the 9th Python in Science Conference*, pp. 51–56. <https://doi.org/10.25080/majora-92bf1922-00a>
- [12] Harris, C.R. et al. (2020) 'Array programming with NumPy', *Nature*, 585, pp. 357–362.
<https://doi.org/10.1038/s41586-020-2649-2>
- [13] Virtanen, P. et al. (2020) 'SciPy 1.0: Fundamental algorithms for scientific computing in Python', *Nature Methods*, 17, pp. 261–272. <https://doi.org/10.1038/s41592-019-0686-2>
- [14] Hunter, J.D. (2007) 'Matplotlib: A 2D graphics environment', *Computing in Science & Engineering*, 9(3), pp. 90–95. <https://doi.org/10.1109/MCSE.2007.55>
- [15] Pedregosa, F. et al. (2011) 'Scikit-learn: Machine learning in Python', *Journal of Machine Learning Research*, 12, pp. 2825–2830.
- [16] Rahm, E. and Do, H.H. (2000) 'Data Cleaning: Problems and Current Approaches', *IEEE Data Engineering Bulletin*, 23(4), pp. 3–13.
- [17] Shepard, D. (1968) 'A two-dimensional interpolation function for irregularly-spaced data', *Proceedings of the 23rd ACM National Conference*, pp. 517–524.
<https://doi.org/10.1145/800186.810616>
- [18] Malczewski, J. (1999) *GIS and Multicriteria Decision Analysis*. New York: John Wiley & Sons.
- [19] Schober, P., Boer, C. and Schwarte, L.A. (2018) 'Correlation coefficients: Appropriate use and interpretation', *Anesthesia & Analgesia*, 126(5), pp. 1763–1768.
<https://doi.org/10.1213/ANE.0000000000002864>
- [20] Jolliffe, I.T. and Cadima, J. (2016) 'Principal component analysis: A review and recent developments', *Philosophical Transactions of the Royal Society A*, 374, 20150202.
<https://doi.org/10.1098/rsta.2015.0202>