



Analyse économétrique des déterminants de l'innovation dans les PME malgaches

¹ Fidihiery Toky Tantely, ² Rahajamanana Jasmin, ³ ANDRIAMASIMANANA Origène Olivier

⁴ RAKOTOSON Andriatiana Tolontsoa, ⁵ TOVONIRINA Mamiharizo Jackie

¹Ecole Doctorale Ingénierie et Géosciences - Université d'Antananarivo

RESUME : Dans un contexte où l'innovation constitue un levier essentiel de compétitivité et d'adaptation des PME, cette étude analyse économétriquement les principaux déterminants de l'innovation dans les PME malgaches. L'objectif est d'identifier les facteurs qui influencent la probabilité d'innover, d'évaluer leur intensité, leur robustesse et leurs variations sectorielles. L'analyse porte sur 118 PME et mobilise principalement des modèles Logit et Probit, complétés par des effets marginaux moyens, des tests de multicollinéarité, des diagnostics de robustesse et des comparaisons de spécifications. Les résultats montrent que les compétences humaines exercent l'effet marginal moyen le plus élevé, avec environ 10,3 points de pourcentage, suivies du partenariat (9,6), de l'orientation entrepreneuriale (8,3) et de la R&D (7,0). Les ressources financières et la pression concurrentielle présentent également des effets positifs mais plus modérés. Le modèle affiche une capacité discriminante satisfaisante, avec une AUC de 0,777, tandis que le pseudo-R² de McFadden atteint environ 0,198 pour la spécification M4. La comparaison des spécifications indique également un Brier score proche de 0,159 pour M4, confirmant une précision probabiliste globalement satisfaisante. Les diagnostics indiquent une faible multicollinéarité et une robustesse globale des estimations, malgré certaines hétérogénéités sectorielles et quelques observations influentes.

Mots-clés : Innovation ; PME malgaches ; Logit ; Déterminants ; Économétrie.

ABSTRACT: In a context where innovation represents an essential driver of competitiveness and adaptation for small and medium-sized enterprises (SMEs), this study econometrically analyzes the main determinants of innovation among Malagasy SMEs. The objective is to identify the factors influencing the probability of innovating and to assess their magnitude, robustness, and sectoral variations. The analysis is based on a sample of 118 SMEs and primarily employs Logit and Probit models, complemented by average marginal effects, multicollinearity tests, robustness diagnostics, and comparisons across model specifications. The results show that human skills have the highest average marginal effect, at approximately 10.3 percentage points, followed by partnerships (9.6), entrepreneurial orientation (8.3), and R&D activities (7.0). Financial resources and competitive pressure also exhibit positive effects, although their magnitude is more moderate. The model demonstrates satisfactory discriminatory power, with an AUC of 0.777, while McFadden's pseudo-R² reaches approximately 0.198 for specification M4. Comparison of the different specifications also yields a Brier score of approximately 0.159 for M4, confirming overall satisfactory probabilistic accuracy. Diagnostic tests indicate low multicollinearity and overall robustness of the estimates, despite some sectoral heterogeneity and the presence of a few influential observations.

Keywords: Innovation; Malagasy SMEs; Logit; Determinants; Econometrics.

1 Introduction

L'innovation constitue aujourd'hui un levier majeur de compétitivité, d'adaptation et de pérennité des entreprises, notamment dans un environnement marqué par l'évolution des technologies, l'intensification de la concurrence et la transformation des besoins des marchés. Selon le Manuel d'Oslo, l'innovation d'entreprise correspond à l'introduction d'un produit ou d'un processus d'affaires nouveau ou significativement amélioré par rapport aux pratiques antérieures de l'entreprise [1]. Elle ne se limite donc pas à la recherche et développement, mais intègre également différentes activités liées aux compétences, à l'organisation, aux investissements, aux technologies et aux relations avec l'environnement économique. Cette problématique revêt une importance particulière pour les petites et moyennes entreprises (PME), dont la capacité à innover dépend généralement d'une combinaison de ressources internes et externes. Parmi ces ressources, le capital humain occupe une place importante. McGuirk, Lenihan et Hart [2] montrent que les caractéristiques innovantes du capital humain augmentent la propension des petites entreprises à développer des activités d'innovation. Les connaissances, les compétences et la capacité des individus à identifier et exploiter de nouvelles opportunités peuvent ainsi constituer des éléments essentiels du processus innovant, particulièrement dans les entreprises disposant de ressources organisationnelles relativement limitées. Au-delà des compétences internes, l'ouverture de l'entreprise à son environnement constitue également une dimension importante. La collaboration avec des partenaires permet aux PME d'accéder à des connaissances, des compétences et des ressources qu'elles ne possèdent pas nécessairement en interne. Audretsch et al. [3] mettent ainsi en évidence le rôle des stratégies de collaboration dans la performance d'innovation des PME, en soulignant l'importance des relations externes dans l'acquisition et la combinaison de nouvelles connaissances. Les partenariats peuvent dès lors constituer un mécanisme permettant aux entreprises de compléter leurs capacités internes et de soutenir leurs projets innovants. Les contraintes financières constituent parallèlement un enjeu déterminant pour les PME, dans la mesure où l'innovation nécessite souvent des investissements dans les équipements, les compétences, la technologie ou les activités de R&D. García-Pérez-de-Lema, Ruiz-Palomo et Diéguez-Soto [4] montrent que les contraintes financières peuvent affecter la capacité d'innovation technologique des PME et que les capacités financières des dirigeants jouent un rôle dans la réduction de ces obstacles. Ainsi, l'accès aux ressources financières ne représente pas uniquement une condition de fonctionnement de l'entreprise, mais peut également conditionner sa capacité à transformer une idée ou une opportunité en innovation effectivement mise en œuvre. Dans le contexte malgache, ces problématiques apparaissent particulièrement importantes. Les données récentes de la Banque mondiale indiquent qu'en 2022, seulement 26 % des entreprises malgaches avaient introduit de nouveaux produits ou services, contre environ 39 % en moyenne en Afrique subsaharienne. L'accès aux ressources reste également contraignant : 26 % des entreprises interrogées considéraient l'accès au financement comme une contrainte majeure ou très sévère, tandis que seulement 8 % disposaient d'un prêt bancaire ou d'une ligne de crédit. Pour les petites entreprises, cette dernière proportion ne représentait qu'environ 5 % [5]. Ces éléments illustrent les difficultés auxquelles sont confrontées les entreprises malgaches pour financer leurs investissements et renforcer leurs capacités productives et innovantes. Dans ce contexte, l'innovation des PME malgaches ne peut être expliquée par un seul facteur. Elle peut dépendre simultanément des compétences humaines, des ressources financières, des activités de R&D, de l'orientation entrepreneuriale, des partenariats, de la pression concurrentielle, mais également des caractéristiques propres à l'entreprise et à son secteur d'activité. La prise en compte simultanée de ces dimensions nécessite une approche économétrique permettant d'isoler leur contribution respective et d'apprécier leur influence sur la probabilité qu'une PME adopte un comportement innovant. La présente étude vise ainsi à répondre à la question suivante : quels sont les principaux facteurs qui déterminent la probabilité d'innovation dans les PME malgaches et dans quelle mesure leurs effets varient-ils selon les caractéristiques des entreprises et les secteurs d'activité ? L'objectif général est d'analyser économétriquement les déterminants de l'innovation dans les PME malgaches, en évaluant notamment le sens et l'intensité des effets associés aux compétences humaines, aux partenariats, à l'orientation entrepreneuriale, à la R&D, à la pression concurrentielle et aux ressources financières. À partir d'un échantillon

de 118 PME, l'étude mobilise principalement des modèles Logit et Probit, des effets marginaux moyens, différentes spécifications économétriques ainsi que des tests de robustesse et de performance prédictive. Cette démarche vise non seulement à identifier les déterminants les plus importants, mais également à examiner leur stabilité, les éventuelles non-linéarités et l'hétérogénéité de leurs effets entre les secteurs.

2 Matériels et méthodes

2.1 Matériels

La réalisation de cette étude économétrique s'est appuyée sur des matériels de collecte, de traitement statistique et de visualisation adaptés à l'analyse des déterminants de l'innovation. Les données primaires ont été obtenues à partir d'un questionnaire structuré administré auprès de 118 PME malgaches. Cet instrument a permis de recueillir les informations relatives aux caractéristiques des entreprises et de leurs responsables, ainsi qu'aux principales dimensions susceptibles d'influencer leur comportement d'innovation, notamment les compétences humaines, les ressources financières, la recherche et développement (R&D), l'orientation entrepreneuriale, les partenariats et la pression concurrentielle. Après la collecte, les réponses ont été codées et organisées dans une base de données numérique afin d'assurer leur contrôle, leur nettoyage et leur préparation avant les estimations économétriques. Le traitement de la base de données a été réalisé dans un environnement informatique Python. La bibliothèque Pandas a été mobilisée pour l'importation, la structuration, le recodage et la manipulation des données sous forme tabulaire. Elle offre des structures particulièrement adaptées au traitement de données utilisées en statistique et en économétrie [6]. La base ainsi préparée a permis de construire les variables dépendantes et explicatives nécessaires à l'estimation des différentes spécifications économétriques. Les estimations des modèles ont principalement reposé sur la bibliothèque Statsmodels, conçue pour les analyses statistiques et économétriques sous Python [7]. Elle a servi de support aux estimations des modèles Logit et Probit, à l'obtention des coefficients et erreurs-types, ainsi qu'à plusieurs indicateurs nécessaires à l'évaluation des spécifications. La bibliothèque Scikit-learn a complété ces traitements pour les procédures d'évaluation prédictive, notamment la construction de la courbe ROC, l'appréciation de la discrimination et le calcul de différents indicateurs de performance des modèles. Scikit-learn met à disposition un large ensemble d'algorithmes et d'outils d'évaluation pour les analyses supervisées [8]. Les opérations scientifiques et statistiques complémentaires ont été appuyées par SciPy, qui fournit des routines numériques pour l'optimisation, les statistiques et différents calculs scientifiques [9]. Enfin, les résultats ont été représentés graphiquement à l'aide de Matplotlib, bibliothèque dédiée à la production de visualisations scientifiques et de graphiques de qualité adaptée à la publication [10]. Elle a notamment permis de construire les graphiques des effets marginaux, les courbes ROC et de calibration, les comparaisons entre spécifications, les représentations des probabilités prédites ainsi que les graphiques de diagnostic portant sur les résidus, le levier et la distance de Cook. L'association de ces différents outils a ainsi permis d'assurer une chaîne de traitement allant de la préparation des données jusqu'à l'estimation, au diagnostic, à la comparaison et à la représentation des modèles économétriques.

2.2 Méthodes

L'analyse économétrique des déterminants de l'innovation a été réalisée à partir des données recueillies auprès de 118 PME malgaches. La variable dépendante correspond au comportement d'innovation de l'entreprise et distingue les PME innovantes des PME non innovantes. En raison de son caractère binaire, le modèle Logit binaire a été retenu comme méthode principale d'estimation. Il permet d'analyser la probabilité qu'une PME innove en fonction de plusieurs facteurs relatifs aux compétences humaines, à l'orientation entrepreneuriale, à la recherche et développement (R&D), aux partenariats, aux ressources financières et à la pression concurrentielle, tout en tenant compte de certaines caractéristiques propres aux entreprises. Afin d'examiner la stabilité des résultats, plusieurs spécifications successives, notées M1 à M4, ont été estimées. Les variables explicatives et les variables de contrôle ont été introduites progressivement afin d'évaluer l'évolution du pouvoir explicatif du modèle et la stabilité des principaux déterminants de l'innovation [11]. Un modèle Probit a ensuite été estimé comme spécification alternative afin de vérifier que les principaux résultats ne dépendaient pas exclusivement du choix du modèle Logit. Comme le Logit, le Probit est adapté à une variable dépendante binaire, mais repose sur une hypothèse différente concernant la distribution de la probabilité sous-jacente [12]. La robustesse des résultats a ainsi été appréciée à partir de la concordance du signe, de l'importance relative et des effets marginaux des principaux déterminants dans les deux modèles. L'interprétation économique des résultats a principalement reposé

sur les effets marginaux moyens, plus directement interprétables que les coefficients bruts des modèles binaires. Ils ont permis d'apprécier dans quelle mesure les compétences humaines, les partenariats, l'orientation entrepreneuriale, la R&D, la pression concurrentielle et les ressources financières sont associés à une augmentation ou à une diminution de la probabilité d'innovation. Cette approche facilite également la traduction des résultats économétriques en enseignements managériaux, en permettant d'identifier les facteurs sur lesquels les dirigeants de PME peuvent potentiellement agir en priorité. Des probabilités prédites ont également été calculées afin d'examiner plus précisément les relations associées à la pression concurrentielle et aux ressources financières. L'éventuelle hétérogénéité des effets selon les caractéristiques des entreprises a été étudiée au moyen de termes d'interaction, notamment entre le secteur d'activité et les partenariats ainsi qu'entre le secteur et la R&D. Ces interactions ont été interprétées à partir des probabilités prédites et de leurs représentations graphiques, particulièrement adaptées à l'interprétation des modèles non linéaires [13]. La qualité des différentes spécifications a été évaluée à partir de plusieurs indicateurs complémentaires. Le pseudo- R^2 de McFadden a été mobilisé pour apprécier le pouvoir explicatif relatif des modèles, tandis que le critère d'information d'Akaike (AIC) a permis de comparer leur qualité d'ajustement en tenant compte de leur complexité. La capacité du modèle à distinguer les PME innovantes des PME non innovantes a été évaluée au moyen de la courbe ROC et de l'aire sous la courbe (AUC). La qualité des probabilités prédites a parallèlement été examinée à travers le Brier score et la courbe de calibration. L'utilisation conjointe de ces indicateurs permet d'évaluer à la fois la discrimination et la calibration du modèle, qui constituent deux dimensions distinctes et complémentaires de sa performance prédictive [14]. Des diagnostics complémentaires ont enfin été réalisés afin d'évaluer la stabilité et la fiabilité des estimations. La multicollinéarité entre les variables explicatives a été examinée à partir des Variance Inflation Factors (VIF) et des erreurs-types robustes ont été utilisées pour apprécier la précision des estimations. Les observations potentiellement atypiques ou influentes ont été examinées à l'aide des résidus de Pearson, des résidus de déviance, des résidus studentisés, du levier et de la distance de Cook, cette dernière permettant notamment d'identifier les observations susceptibles d'exercer une influence importante sur les résultats du modèle [15]. Enfin, les résultats sont interprétés en tenant compte de deux limites méthodologiques importantes. Premièrement, la taille de l'échantillon, limitée à 118 PME, conduit à privilégier des modèles relativement parcimonieux et invite à la prudence dans la généralisation des résultats à l'ensemble des PME malgaches, notamment lors de l'analyse des interactions et des sous-groupes sectoriels. Deuxièmement, le caractère transversal des données permet d'identifier des associations statistiques entre les caractéristiques des PME et leur probabilité d'innovation, mais ne permet pas d'établir formellement des relations causales ni d'observer leur évolution dans le temps. Les résultats doivent donc être considérés comme des éléments explicatifs et prédictifs permettant d'identifier des facteurs associés à l'innovation et d'orienter les décisions managériales, plutôt que comme une démonstration définitive de causalité.

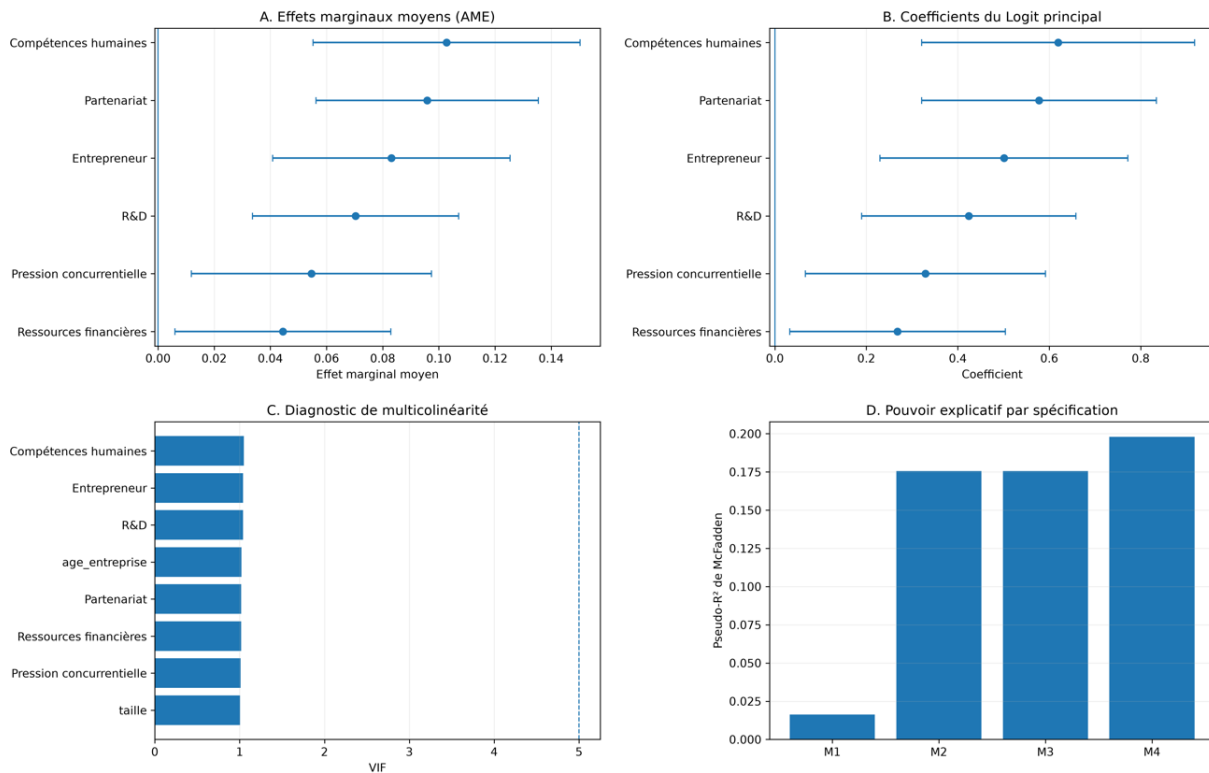
3 Résultats et discussions

3.1 Résultats

3.1.1 Effets des principaux déterminants de l'innovation et qualité du modèle Logit appliqué aux PME malgaches

La Figure suivante présente les résultats du modèle Logit mobilisé pour identifier les principaux facteurs associés à l'innovation dans les PME malgaches. Elle met conjointement en évidence les effets marginaux moyens des variables explicatives, les coefficients estimés du modèle principal, le diagnostic de multicollinéarité ainsi que l'évolution du pouvoir explicatif selon les différentes spécifications retenues. Cette représentation permet ainsi d'apprécier non seulement le sens et l'importance relative des déterminants de l'innovation, mais également la qualité statistique et la robustesse générale du modèle estimé.

Figure 1: Effets des principaux déterminants de l'innovation et qualité du modèle Logit appliqué aux PME malgaches



Source : Auteur 2026

Interprétation

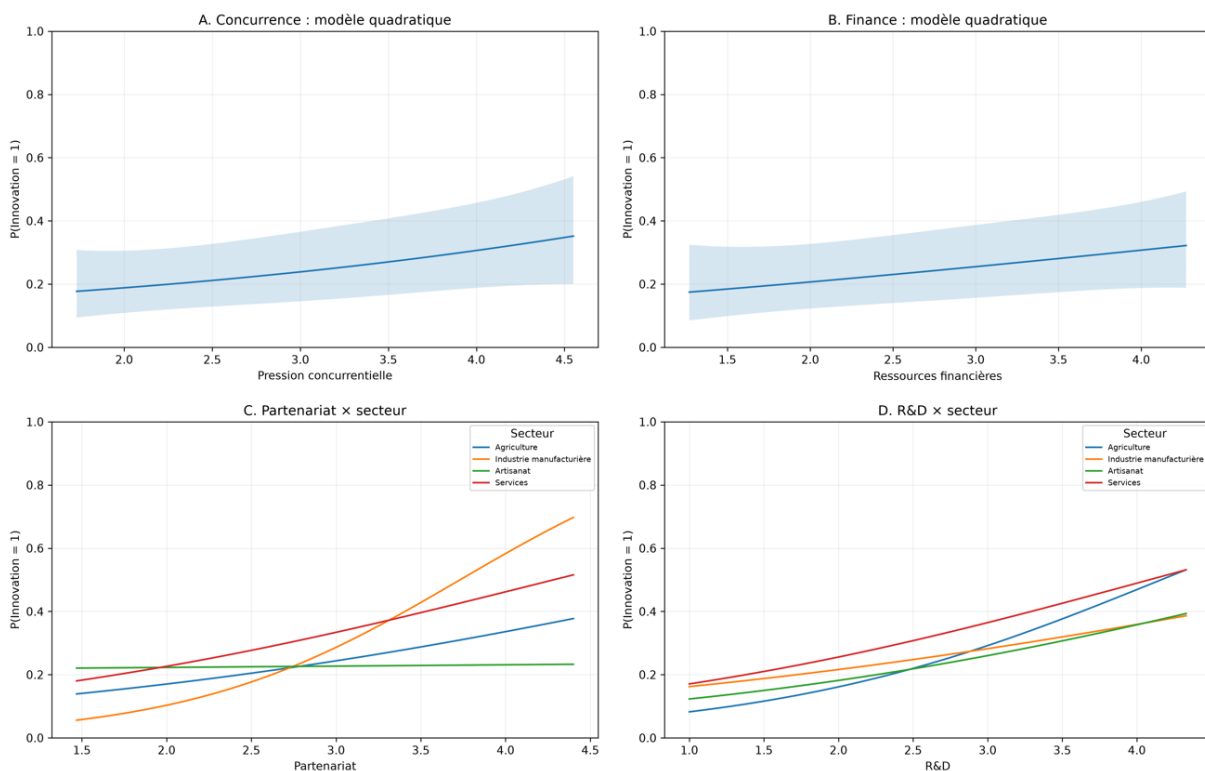
Les résultats indiquent que l'ensemble des facteurs considérés exerce un effet positif sur la probabilité d'innovation, avec toutefois des intensités différentes. Les compétences humaines constituent le facteur présentant l'effet marginal moyen le plus élevé, proche de 0,103, ce qui signifie qu'une amélioration de cette dimension est associée, toutes choses égales par ailleurs, à une augmentation moyenne d'environ 10,3 points de pourcentage de la probabilité d'innovation. Elles sont suivies par le partenariat, dont l'effet marginal atteint environ 0,096, puis par le profil entrepreneurial, avec près de 0,083. La R&D présente également un effet positif estimé à environ 0,070, tandis que la pression concurrentielle et les ressources financières affichent des effets plus modérés, respectivement proches de 0,055 et 0,045. Les intervalles de confiance représentés restent globalement du côté positif, ce qui renforce l'idée d'associations favorables entre ces dimensions et la probabilité d'innovation. Les coefficients du modèle Logit principal confirment cette hiérarchie. Les compétences humaines présentent le coefficient positif le plus important, proche de 0,62, suivies du partenariat avec environ 0,58, du facteur entrepreneurial avec près de 0,50 et de la R&D avec approximativement 0,42. La pression concurrentielle et les ressources financières présentent des coefficients respectifs d'environ 0,33 et 0,27. Ces résultats suggèrent que, dans l'échantillon étudié, les dimensions liées aux compétences internes, à l'ouverture partenariale et à l'orientation entrepreneuriale semblent davantage différencier les PME innovantes que les seuls moyens financiers. Ils ne signifient cependant pas que les ressources financières sont sans importance, mais indiquent que leur contribution estimée est relativement moins élevée que celle des autres déterminants intégrés au modèle. Le diagnostic de multicollinéarité montre par ailleurs des VIF très proches de 1 pour l'ensemble des variables, notamment les compétences humaines, le profil entrepreneurial, la R&D, l'âge de l'entreprise, le partenariat, les ressources financières, la pression concurrentielle et la taille. Ces valeurs sont très inférieures au seuil de référence de 5 indiqué sur la figure, ce qui suggère l'absence de problème préoccupant de multicollinéarité entre les variables explicatives. Les coefficients peuvent donc être interprétés sans craindre qu'une forte redondance entre prédicteurs ne déstabilise substantiellement les estimations. Enfin, le pseudo- R^2 de McFadden montre une amélioration progressive du pouvoir explicatif selon les spécifications. Il passe d'environ 0,016 pour M1 à près de 0,175 pour M2 et M3, puis atteint approximativement 0,198 pour M4. La quatrième spécification présente ainsi le meilleur pouvoir explicatif parmi les modèles comparés. Dans l'ensemble, les résultats montrent que l'innovation dans les PME malgaches est principalement associée aux compétences humaines, aux partenariats, à l'orientation entrepreneuriale et à la R&D, tandis que la pression concurrentielle et les ressources financières jouent également

un rôle positif mais relativement plus modéré. La faible multicollinéarité et l'amélioration du pseudo- (R^2) dans les spécifications enrichies renforcent la cohérence du modèle et soutiennent l'existence d'une combinaison de facteurs internes et externes dans l'explication de la propension à innover.

3.1.2 Non-linéarités des déterminants et hétérogénéité sectorielle de la probabilité d'innovation des PME

La Figure 2 ci-après approfondit l'analyse des déterminants de l'innovation en examinant, d'une part, l'existence de relations non linéaires entre la pression concurrentielle, les ressources financières et la probabilité d'innover et, d'autre part, les différences sectorielles associées aux partenariats et aux activités de recherche et développement. Cette représentation permet ainsi de dépasser l'hypothèse d'effets identiques et constants pour toutes les entreprises et de mettre en évidence la manière dont l'intensité de certains déterminants peut évoluer selon leur niveau et selon le secteur d'activité considéré.

Figure 2: Non-linéarités des déterminants et hétérogénéité sectorielle de la probabilité d'innovation des PME



Source : Auteur 2026

Interprétation

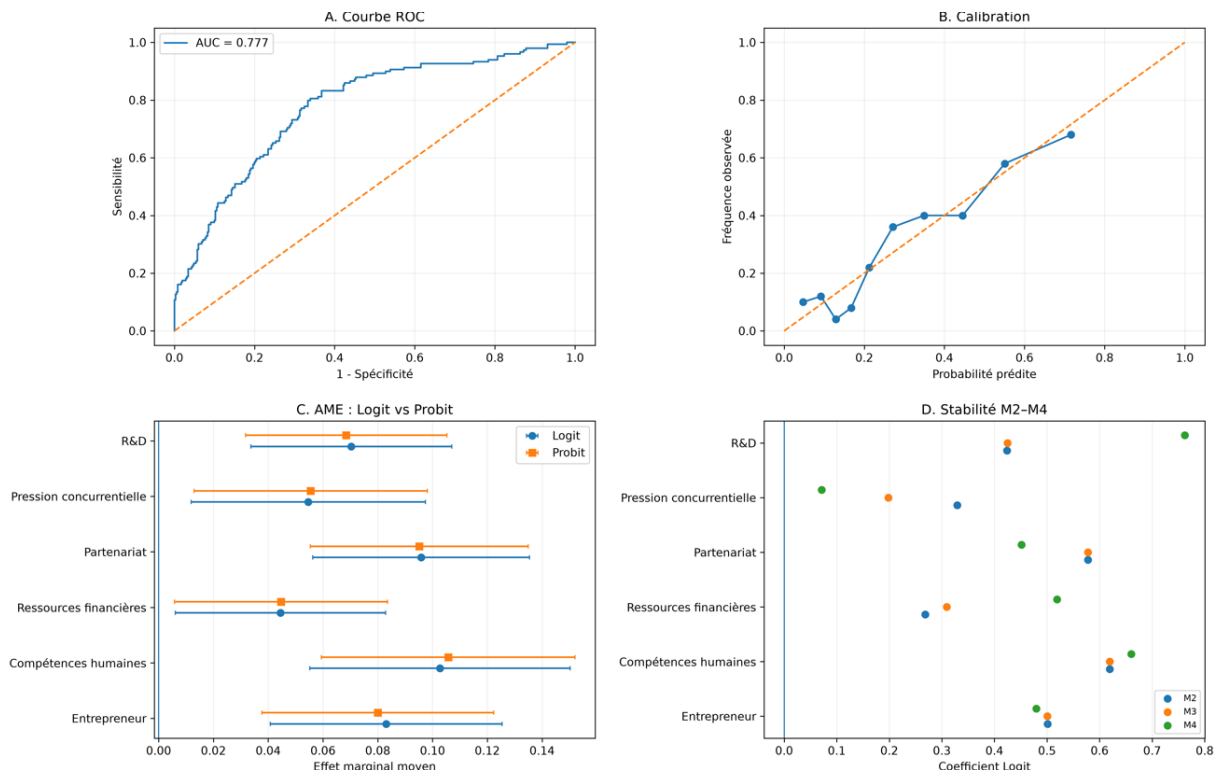
Les résultats relatifs à la pression concurrentielle montrent une relation globalement positive avec la probabilité d'innovation. Lorsque l'indicateur de concurrence passe approximativement de 1,8 à 4,5, la probabilité prédite d'innover progresse d'environ 0,18 à 0,35, soit de 18 % à 35 %. La courbure légèrement ascendante suggère que l'effet de la concurrence pourrait se renforcer lorsque la pression concurrentielle devient plus élevée. Toutefois, l'élargissement de l'intervalle d'incertitude aux valeurs extrêmes invite à interpréter cette évolution avec prudence. Un comportement comparable apparaît pour les ressources financières : lorsque leur niveau augmente d'environ 1,2 à 4,2, la probabilité prédite d'innovation passe approximativement de 0,18 à 0,32. L'amélioration de l'accès ou de la disponibilité des ressources financières semble donc associée à une progression de la propension à innover, avec une évolution légèrement plus marquée aux niveaux élevés. L'analyse des interactions entre partenariat et secteur révèle en revanche des différences beaucoup plus prononcées. Dans l'industrie manufacturière, la probabilité prédite d'innovation augmente fortement, passant d'environ 0,05 à 0,70 lorsque le niveau de partenariat progresse. Les services présentent également une évolution importante, de près de 0,18 à 0,52, tandis que l'agriculture connaît une progression plus modérée, d'environ 0,14 à 0,38. À l'inverse, le profil de l'artisanat reste pratiquement stable autour de 0,22–0,23, ce qui suggère que les partenariats ne sont pas associés de la même manière à l'innovation dans tous les secteurs. Ils semblent notamment constituer un levier plus important dans l'industrie manufacturière et les services que dans l'artisanat. Les activités de R&D présentent également une relation positive avec l'innovation dans les quatre secteurs, mais avec des intensités différentes. Dans l'agriculture, la probabilité estimée passe approximativement de 0,08 à 0,53 lorsque le niveau de R&D augmente, tandis que

dans les services elle progresse d'environ 0,17 à 0,53. L'industrie manufacturière affiche une progression de près de 0,15 à 0,39, et l'artisanat d'environ 0,12 à 0,40. Les écarts entre secteurs apparaissent relativement modestes aux niveaux intermédiaires de R&D, mais deviennent plus visibles lorsque l'intensité de cette activité augmente.

3.1.3 Robustesse, calibration et performance prédictive du modèle d'innovation

La modélisation numérique constitue un outil complémentaire pour apprécier la manière dont un mur en terre La Figure ci-dessous évalue la robustesse et la qualité prédictive du modèle utilisé pour expliquer la probabilité d'innovation des PME malgaches. L'analyse repose sur quatre éléments complémentaires : la capacité discriminante mesurée par la courbe ROC, la calibration entre probabilités prédites et fréquences observées, la comparaison des effets marginaux moyens obtenus avec les modèles Logit et Probit, ainsi que la stabilité des coefficients entre les spécifications M2, M3 et M4. Cette démarche permet de vérifier si les déterminants précédemment identifiés conservent globalement leur importance lorsque la méthode d'estimation ou la spécification du modèle est modifiée.

Figure 3: Robustesse, calibration et performance prédictive du modèle d'innovation



Source : Auteur 2026

Interprétation

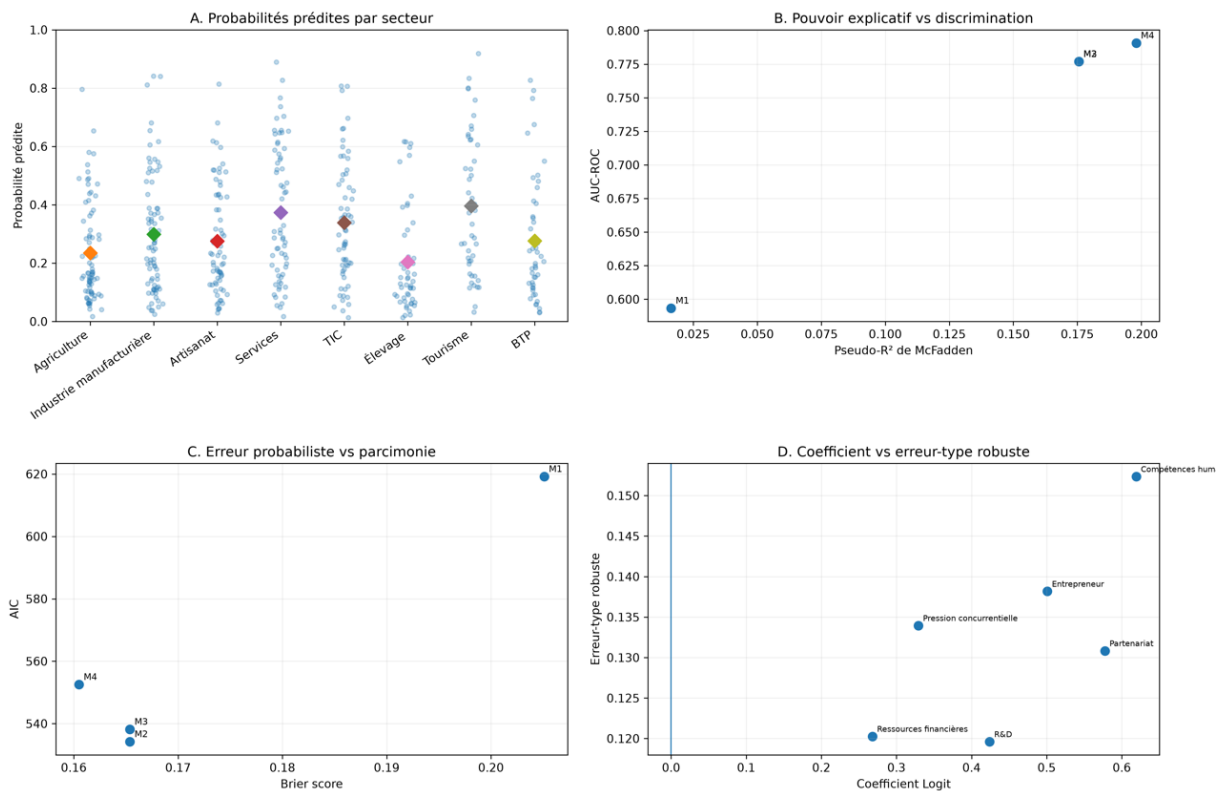
La courbe ROC indique une capacité de discrimination satisfaisante du modèle, avec une aire sous la courbe (AUC) égale à 0,777. Cette valeur, nettement supérieure au niveau de 0,50 correspondant à une classification aléatoire, montre que le modèle dispose d'une capacité appréciable à distinguer les PME innovantes des PME non innovantes. Il ne s'agit toutefois pas d'une discrimination parfaite, ce qui signifie qu'une partie de l'innovation reste liée à des facteurs non intégrés dans le modèle. La courbe de calibration complète ce diagnostic en montrant que les probabilités prédites sont globalement proches des fréquences effectivement observées. Pour des probabilités prédites situées autour de 0,20, 0,30, 0,40, 0,55 et 0,70, les fréquences observées demeurent relativement proches de la diagonale de calibration idéale. Quelques écarts apparaissent surtout pour les faibles probabilités, mais aucune divergence systématique majeure n'est visible. Le modèle présente ainsi une calibration globalement acceptable. La comparaison entre les modèles Logit et Probit fournit également un résultat favorable en matière de robustesse. Les effets marginaux moyens obtenus avec les deux spécifications sont très proches. Pour la R&D, ils se situent autour de 0,07 dans les deux modèles ; pour la pression concurrentielle, autour de 0,055 ; pour le partenariat, autour de 0,10 ; et pour les ressources financières, près de 0,045. Les compétences humaines présentent l'effet le plus élevé, proche de 0,11, tandis que la dimension entrepreneuriale se situe autour de 0,08.

La proximité des estimations et le chevauchement important des intervalles de confiance indiquent que les conclusions sur l'importance relative de ces déterminants dépendent peu du choix entre Logit et Probit. Les compétences humaines et le partenariat apparaissent ainsi de manière constante parmi les facteurs les plus fortement associés à l'innovation. L'examen de la stabilité des coefficients entre les modèles M2, M3 et M4 apporte toutefois une lecture plus nuancée. Les compétences humaines restent particulièrement stables, avec des coefficients proches de 0,62 dans M2 et M3, puis autour de 0,66 dans M4. La dimension entrepreneuriale présente également une stabilité importante, autour de 0,50 dans M2 et M3 et approximativement 0,48 dans M4. Le partenariat conserve un effet positif relativement élevé, proche de 0,58 dans M2 et M3, même s'il diminue autour de 0,45 dans M4. En revanche, certains déterminants sont davantage sensibles à la spécification. Le coefficient de la R&D passe d'environ 0,42 dans M2 et M3 à près de 0,77 dans M4, alors que celui de la pression concurrentielle diminue d'environ 0,33 à 0,20, puis à moins de 0,10. Les ressources financières connaissent au contraire une progression, passant approximativement de 0,27 à 0,31, puis à environ 0,52.

3.1.4 Comparaison des performances économétriques et de la stabilité des déterminants de l'innovation

La Figure ci-dessous propose une comparaison synthétique des différentes spécifications économétriques utilisées pour expliquer la probabilité d'innovation des PME malgaches. Elle met en perspective les probabilités prédites selon les secteurs d'activité, le pouvoir explicatif et discriminant des modèles M1 à M4, leur performance en matière d'erreur probabiliste et de parcimonie, ainsi que l'importance des coefficients du modèle Logit principal au regard de leurs erreurs-types robustes. Cette comparaison permet ainsi d'identifier la spécification offrant le meilleur compromis entre capacité explicative, qualité prédictive et stabilité des estimations.

Figure 4: Comparaison des performances économétriques et de la stabilité des déterminants de l'innovation



Source : Auteur 2026

Interprétation

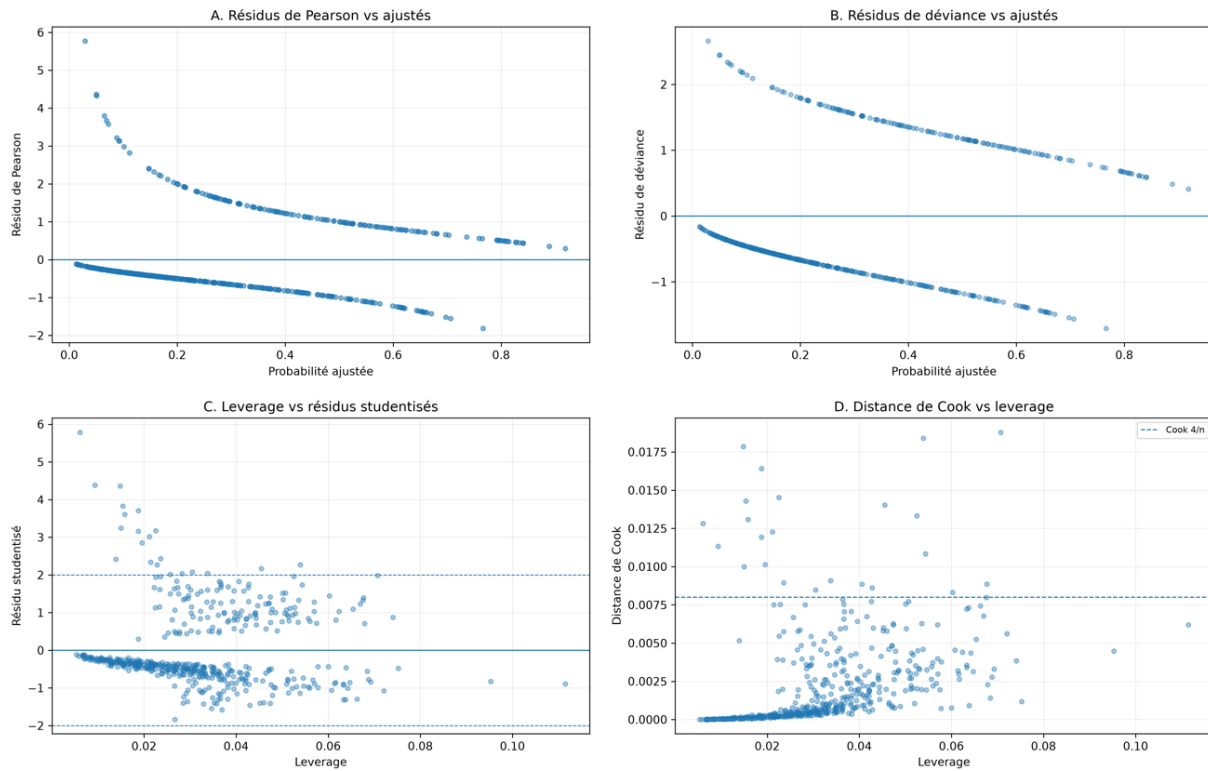
Les probabilités prédites font apparaître une hétérogénéité entre les secteurs. Le tourisme présente la probabilité moyenne d'innovation la plus élevée, proche de 0,39, suivi des services, autour de 0,37, et des TIC, avec environ 0,34. L'industrie manufacturière se situe autour de 0,30, tandis que l'artisanat et le BTP affichent des probabilités moyennes proches de 0,27–0,28. L'agriculture, avec environ 0,23, et surtout l'élevage, autour de 0,20, présentent les niveaux moyens les plus faibles. La forte dispersion des probabilités individuelles au sein de chaque secteur montre cependant qu'il existe une hétérogénéité importante entre les entreprises d'une même branche et que

l'appartenance sectorielle ne suffit pas à expliquer à elle seule leur propension à innover. La comparaison du pouvoir explicatif et de la discrimination montre une amélioration très nette entre le modèle initial et les spécifications enrichies. Le modèle M1 présente un pseudo- R^2 de McFadden d'environ 0,016 et une AUC proche de 0,59, traduisant une capacité explicative et discriminante relativement faible. Les modèles M2 et M3 atteignent un pseudo- R^2 voisin de 0,175 et une AUC d'environ 0,777, tandis que M4 obtient les valeurs les plus élevées, avec un pseudo- R^2 proche de 0,198 et une AUC avoisinant 0,79. L'introduction progressive des déterminants de l'innovation améliore donc sensiblement la capacité du modèle à différencier les PME innovantes des non-innovantes. L'examen conjoint du Brier score et de l'AIC apporte toutefois une appréciation plus nuancée du choix de la meilleure spécification. M1 présente les performances les plus faibles, avec un Brier score proche de 0,205 et un AIC d'environ 619. M2 et M3 affichent un Brier score voisin de 0,165, mais M2 obtient l'AIC le plus faible, proche de 534, contre environ 538 pour M3. Le modèle M4 présente le meilleur Brier score, autour de 0,159, indiquant des probabilités prédites légèrement plus précises, mais son AIC remonte à environ 552. Ainsi, M4 semble offrir la meilleure performance prédictive, tandis que M2 apparaît plus parcimonieux au regard du critère d'information. Le choix du modèle dépend donc de l'objectif privilégié : précision prédictive ou simplicité de spécification. La confrontation des coefficients Logit avec leurs erreurs-types robustes confirme le rôle différencié des principaux déterminants. Les compétences humaines présentent le coefficient le plus élevé, proche de 0,62, avec une erreur-type robuste d'environ 0,15. Elles sont suivies du partenariat, avec un coefficient voisin de 0,58 et une erreur-type d'environ 0,13, puis du facteur entrepreneurial, autour de 0,50 pour une erreur-type proche de 0,14. La R&D présente un coefficient d'environ 0,42 avec l'une des erreurs-types les plus faibles, proche de 0,12, tandis que la pression concurrentielle et les ressources financières affichent respectivement des coefficients proches de 0,33 et 0,27. Dans l'ensemble, ces résultats confirment que les compétences humaines, le partenariat, l'orientation entrepreneuriale et la R&D constituent les déterminants les plus substantiels du comportement innovant. La comparaison des modèles montre parallèlement qu'une spécification enrichie améliore fortement la discrimination et la qualité des probabilités prédites, tout en soulignant l'existence d'un compromis entre performance prédictive et parcimonie économétrique.

3.1.5 Diagnostic des résidus, du levier et de l'influence des observations du modèle Logit d'innovation

La Figure ci-dessous présente les principaux diagnostics économétriques du modèle Logit utilisé pour expliquer la probabilité d'innovation des PME malgaches. Elle examine conjointement les résidus de Pearson, les résidus de déviance, les résidus studentisés associés au levier ainsi que la distance de Cook. L'objectif est d'identifier d'éventuelles observations atypiques ou influentes susceptibles d'affecter les estimations et de vérifier si la structure générale des résidus reste compatible avec une utilisation satisfaisante du modèle.

Figure 5: Diagnostic des résidus, du levier et de l'influence des observations du modèle Logit d'innovation



Source : Auteur 2026

Interprétation

La représentation des résidus de Pearson fait apparaître la structure attendue pour une variable dépendante binaire, avec deux ensembles distincts correspondant aux observations innovantes et non innovantes. La majorité des résidus reste relativement proche de zéro, mais quelques observations présentent des écarts importants. Le résidu positif le plus élevé approche 5,8 pour une probabilité ajustée très faible, inférieure à 0,05, tandis que les résidus négatifs les plus prononcés atteignent environ -1,8 pour des probabilités prédites proches de 0,80. Ces observations correspondent à des cas pour lesquels le comportement effectivement observé est relativement éloigné de la prédiction du modèle. Les résidus de déviance confirment cette situation, avec des valeurs positives atteignant approximativement 2,6 et des valeurs négatives pouvant descendre autour de -1,7. Malgré ces valeurs extrêmes ponctuelles, aucune dispersion totalement désordonnée des résidus n'apparaît sur l'ensemble des probabilités ajustées. L'analyse combinant le levier et les résidus studentisés permet d'identifier plus précisément les observations atypiques. La majorité des PME présente des valeurs de levier comprises approximativement entre 0,02 et 0,06, associées à des résidus studentisés généralement situés entre -2 et +2. Quelques observations dépassent toutefois le seuil supérieur de +2, certaines atteignant environ 4 à 5,8, ce qui signale des cas présentant un écart particulièrement important entre la situation observée et celle prédite. Ces valeurs extrêmes sont néanmoins principalement associées à des niveaux de levier relativement faibles, souvent inférieurs à 0,03. À l'inverse, les observations présentant les leviers les plus élevés, autour de 0,09 à 0,11, affichent des résidus relativement modérés. Ainsi, les observations les plus atypiques ne sont pas nécessairement celles qui exercent le plus grand poids dans l'estimation du modèle. La distance de Cook complète ce diagnostic en évaluant simultanément le caractère atypique et le pouvoir d'influence de chaque observation. La grande majorité des distances demeure très faible, généralement inférieure à 0,005, mais plusieurs observations dépassent le seuil indicatif représenté sur la figure, proche de 0,008. Les valeurs maximales atteignent approximativement 0,018 à 0,019, notamment pour certaines observations dont le levier se situe entre 0,01 et 0,07. Ces cas peuvent être considérés comme potentiellement influents et méritent donc une vérification individuelle. Toutefois, aucune distance de Cook n'atteint un niveau extrêmement élevé, ce qui suggère que les résultats du modèle ne semblent pas être entièrement déterminés par une seule observation.

3.2 Discussions

Les résultats économétriques montrent que l'innovation dans les PME malgaches dépend de plusieurs facteurs internes et externes dont l'importance varie sensiblement. Les compétences humaines apparaissent comme le déterminant le plus influent, avec un effet marginal moyen d'environ 10,3 points de pourcentage, suivies du partenariat (9,6 points), de l'orientation entrepreneuriale (8,3 points) et de la R&D (7,0 points). Les ressources financières et la pression concurrentielle exercent également des effets positifs, mais de plus faible intensité. Ces résultats suggèrent que la capacité des PME à innover repose davantage sur la mobilisation des compétences, l'ouverture aux partenaires et la dynamique entrepreneuriale que sur les seules ressources financières disponibles. L'analyse met également en évidence une hétérogénéité sectorielle. Les effets du partenariat et de la R&D ne sont pas identiques d'un secteur à l'autre, tandis que les probabilités prédites d'innovation apparaissent plus élevées dans le tourisme et les services que dans l'agriculture et l'élevage. Cette situation montre que les déterminants de l'innovation doivent être interprétés en fonction du contexte sectoriel et des caractéristiques propres aux entreprises. Les tests de robustesse renforcent globalement la crédibilité des estimations. La proximité des effets obtenus avec les modèles Logit et Probit, l'AUC de 0,777, la bonne calibration générale et l'absence de multicollinéarité importante indiquent une performance satisfaisante du modèle. Le pseudo-R² atteint environ 0,198 dans la spécification M4, tandis que le Brier score descend à près de 0,159, traduisant une amélioration de la qualité prédictive. Quelques observations atypiques ou influentes apparaissent toutefois dans les diagnostics de résidus, sans remettre en cause la tendance générale des résultats. Dans l'ensemble, l'innovation des PME malgaches apparaît ainsi comme un phénomène multidimensionnel, principalement soutenu par les ressources humaines, les collaborations, l'orientation entrepreneuriale et les activités de R&D, avec des effets qui varient selon les secteurs et les caractéristiques des entreprises.

4 Conclusion

L'analyse économétrique met en évidence que l'innovation dans les PME malgaches résulte de l'action combinée de plusieurs déterminants. Les compétences humaines, le partenariat, l'orientation entrepreneuriale et la R&D apparaissent comme les facteurs les plus fortement associés à la probabilité d'innover, avec des effets marginaux respectifs d'environ 10,3, 9,6, 8,3 et 7,0 points de pourcentage. Les ressources financières et la pression concurrentielle exercent également une influence positive, mais plus modérée. Les résultats montrent en outre que ces effets ne sont pas uniformes entre les secteurs, ce qui souligne l'importance de prendre en compte l'hétérogénéité des PME. Les performances du modèle, notamment une AUC de 0,777, un pseudo-R² atteignant environ 0,198 et un Brier score proche de 0,159, confirment une qualité prédictive globalement satisfaisante. Dans l'ensemble, l'étude montre que le renforcement des compétences, des collaborations, de l'initiative entrepreneuriale et des capacités de R&D constitue un levier essentiel pour soutenir l'innovation dans les PME malgaches. Les politiques d'accompagnement gagneraient ainsi à être adaptées aux spécificités sectorielles et aux profils propres des entreprises.

REFERENCES

- [1] . OECD/Eurostat. (2018). Oslo Manual 2018: Guidelines for Collecting, Reporting and Using Data on Innovation. 4th Edition. OECD Publishing, Paris/Eurostat, Luxembourg.
- [2] McGuirk, H., Lenihan, H., & Hart, M. (2015). Measuring the impact of innovative human capital on small firms' propensity to innovate. *Research Policy*, 44(4), 965–976. doi:10.1016/j.respol.2014.11.008.
- [3] Audretsch, D. B., Belitski, M., Caiazza, R., & Phan, P. (2023). Collaboration strategies and SME innovation performance. *Journal of Business Research*, 164, 114018. doi:10.1016/j.jbusres.2023.114018.
- [4] García-Pérez-de-Lema, D., Ruiz-Palomo, D., & Diéguez-Soto, J. (2021). Analysing the roles of CEO's financial literacy and financial constraints on Spanish SMEs technological innovation. *Technology in Society*, 64, 101519. doi:10.1016/j.techsoc.2020.101519.
- [5] World Bank. (2025). Madagascar Economic Update: Bridging the Productivity Divide. Washington, DC: World Bank.
- [6] McKinney, W. (2010). Data Structures for Statistical Computing in Python. *Proceedings of the 9th Python in Science Conference*, 51–56.
- [7] Seabold, S., & Perktold, J. (2010). Statsmodels: Econometric and Statistical Modeling with Python. *Proceedings of the 9th Python in Science Conference*, 92–96.

- [8] Pedregosa, F., Varoquaux, G., Gramfort, A., et al. (2011). Scikit-learn: Machine Learning in Python. *Journal of Machine Learning Research*, 12, 2825–2830.
- [9] Virtanen, P., Gommers, R., Oliphant, T. E., et al. (2020). SciPy 1.0: Fundamental algorithms for scientific computing in Python. *Nature Methods*, 17, 261–272.
- [10] Hunter, J. D. (2007). Matplotlib: A 2D Graphics Environment. *Computing in Science & Engineering*, 9(3), 90–95.
- [11] Hosmer, D. W., Lemeshow, S., & Sturdivant, R. X. (2013). *Applied Logistic Regression*. 3rd ed. John Wiley & Sons.
- [12] Finney, D. J. (1971). *Probit Analysis*. 3rd ed. Cambridge University Press.
- [13] Williams, R. (2012). Using the margins command to estimate and interpret adjusted predictions and marginal effects. *The Stata Journal*, 12(2), 308–331.
- [14] Van Calster, B., et al. (2025). Evaluation of performance measures in predictive artificial intelligence models. *The Lancet Digital Health*.
- [15] Cook, R. D. (1977). Detection of influential observation in linear regression. *Technometrics*, 19(1), 15–18.