International Journal of Progressive Sciences and Technologies (IJPSAT)
ISSN: 2509-0119.
© 2025 Scholar AI LLC.
https://ijpsat.org/
Vol. 52 No. 2 September 2025, pp. 310-329

Approche Intégrée De Formulation De Provende Et Prédiction Du Rendement Laitier Par Régression Multiple

[Integrated Approach To Feed Formulation And Milk Yield Prediction Using Multiple Regression]

HERIMANOA Rado Mihamina[1,2], RAZAIVAOVOLOLONIRINA Helinoro Diamondra[2], RAMAROSON Jean de Dieu [3]

[1,3] Ecole Doctorale Sciences et Techniques de l'Ingénierie et del'Innovation.
Ecole supérieure Polytechnique Antananarivo, Université d'Antananarivo, BP 1500 Ankatso
Antananarivo 101, Madagascar
[2] Institut Supérieur de Technologie d'Ambositra, (Dept Production Animale)
Ex-Bâtiment HODIMA, Ambositra 306, Madagascar
Auteur correspondant : HERIMANOA Rado Mihamina· E-mail: herimanoarado@yahoo.fr, (+261 34 75 101 13).

(cc) BY

Résumé : Cette étude vise à analyser les facteurs influençant la production laitière dans la région Vakinankaratra à Madagascar. L'objectif est de déterminer l'impact de l'alimentation, surtout l'administration du concentré avec les différents types d'aliments, sur la production laitière. Une enquête de terrain a été réalisée auprès de 200 éleveurs pour recueillir des données sur les modes d'alimentation, les types de races bovines, et l'impact économique de l'approvisionnement en provende. Les analyses statistiques effectuées ont permis de mettre en évidence des corrélations significatives entre l'utilisation de provende et l'amélioration des rendements laitiers. Un modèle de régression multiple a été validé (R^2 = 90,6 % ; p < 0,001), montrant l'effet positif de la quantité de provende, de la pureté de la race, des fourrages cultivés et de l'alimentation jusqu'au refus. La production journalière peut atteindre 34 litres/vache pour 10 kg de provende. L'étude propose aussi une formulation locale de provende, économiquement viable (1 500 MGA/kg), à base de matières premières disponibles. Elle met en évidence l'importance d'un soutien technique pour encourager la fabrication artisanale de provende et optimiser les performances laitières dans les systèmes tropicaux. Ces résultats peuvent orienter les politiques locales vers une intensification durable de la production laitière adaptée aux réalités économiques et agroécologiques de la région.

Mots clés : Vache laitière, Production laitière, Provende locale, Modèle de régression, Vakinankaratra

Abstract: This study aimed to analyze the factors influencing milk production in the Vakinankaratra region, in Madagascar. The objective was to determine the impact of feed, particularly the administration of concentrate with different types of feed, on milk production. A field survey was conducted among 200 farmers to collect data on feeding methods, cattle breed types, and the economic impact of feed supply. Statistical analyses revealed significant correlations between feed use and improved milk yields. A multiple regression model was validated (R^2 = 90.6%; p < 0.001), showing the positive effects of feed quantity, purebred status, cultivated fodder, and feeding until refusal. Daily production could reach 34 L/cow with 10 kg of feed. The study also proposes an economically viable local feed formulation (1,500 MGA/kg) based on available raw materials. It highlights the importance of technical support to encourage artisanal feed production and optimize dairy performance in tropical systems. These results could guide local policies towards a sustainable intensification of dairy production adapted to the economic and agroecological realities of the region.

Keywords: Dairy cow, Milk production, Local feed, Regression model, Vakinankaratra

International Journal of Progressive Sciences and Technologies (IJPSAT)
ISSN: 2509-0119.
© 2025 Scholar AI LLC.
https://ijpsat.org/
Vol. 52 No. 2 September 2025, pp. 310-329

1. INTRODUCTION

À Madagascar, l'élevage laitier constitue un pilier fondamental de l'économie rurale. Dans les zones des Hautes Terres, notamment dans la région du Vakinankaratra, cette activité joue un rôle essentiel dans l'autosuffisance alimentaire des ménages et la génération de revenus [1], [2]. En effet, les exploitations familiales, qui représentent environ 80 % des producteurs, occupent une place centrale dans les systèmes agricoles Malgaches [3]. Toutefois, malgré une forte demande en produits laitiers, la production nationale reste insuffisante pour satisfaire les besoins croissants, ce qui pose un véritable défi de productivité pour les systèmes d'élevage traditionnels [4]. Les performances laitières restent largement limitées par une conduite d'élevage peu intensifiée et une faible maîtrise de l'alimentation. La variabilité de la ration, le manque d'outils de formulation, et l'absence de standardisation des apports nutritionnels expliquent en grande partie les faibles rendements observés, surtout dans les petites exploitations [5], [6]. L'alimentation est reconnue comme l'un des principaux leviers d'amélioration de la production laitière. Elle influence directement les performances zootechniques des bovins [7], [8]. Les concentrés alimentaires, riches en énergie (Unité Fourragère Lait : UFL) et en protéines digestibles (PDIN : Protéines Digestibles dans l'Intestin limitées par l'Azote / PDIE : Protéines Digestibles dans l'Intestin limitées par l'Énergie), permettent d'augmenter significativement les rendements laitiers [9]. Toutefois, leur coût élevé et leur disponibilité limitée constituent des obstacles majeurs pour la majorité des éleveurs Malagasy [10]. En conséquence, certains producteurs optent pour des provendes locales, souvent artisanales, mais sans formulation nutritionnelle rigoureuse, ce qui entraîne des performances inconstantes [11].

Face à ces constats, une problématique centrale se dégage : Quelle est l'influence réelle de l'administration des concentrés et des différents types des provendes sur la production laitière dans les élevages du Vakinankaratra ? Dans cette étude, nous cherchons avant tout à comprendre comment l'alimentation influence réellement la production laitière dans les élevages de la région du Vakinankaratra.

Pour cela, notre démarche s'articule autour de deux objectifs. D'une part, il s'agit d'évaluer l'effet concret de la ration alimentaire sur le rendement laitier des vaches. D'autre part, nous nous intéressons aux types d'aliment utilisés au quotidien par les éleveurs pour formuler des concentrés appropriés pouvant être fabriqués localement.

Ces objectifs nous amènent à formuler deux hypothèses principales. La première stipule que l'introduction de concentrés alimentaires dans la ration, qu'ils soient achetés ou fabriqués sur place, permet d'augmenter significativement la production de lait. La seconde stipule que certaines provendes locales, à condition d'être bien formulées, pourraient partiellement remplacer les concentrés du commerce, tout en maintenant un bon niveau de performance, et cela à moindre coût.

2. MATERIELS ET METHODES

2.1. Zone d'étude

La région du Vakinankaratra se trouve dans la partie centrale des Hautes Terres Malgaches à 19°00' et 20°30' Sud de latitude et 46°30' et 47°30' Est de longitude à une altitude moyenne comprise entre 1 200 et 2 000 mètres [12]. Le chef-lieu de la région, la ville d'Antsirabe, est située à environ 170 kilomètres au Sud d'Antananarivo, la capitale du pays, plus précisément, à environ 19°52′ Sud, et 47°02′ Est, à une altitude d'environ 1 500 mètres [12]. Elle est limitée au nord par la région Analamanga, à l'est par la région Alaotra-Mangoro, au sud par la région Amoron'i Mania, et à l'ouest par la région Itasy. La région bénéficie d'un climat tempéré de type subtropical d'altitude, ce qui constitue un atout majeur pour son agriculture. La région connaît deux saisons principales :

- Une saison sèche et fraîche de mai à septembre,
- Une saison humide et chaude d'octobre à avril.

Les températures varient en fonction de l'altitude : les zones les plus élevées comme Faratsiho peuvent enregistrer des températures nocturnes inférieures à 5 °C pendant l'hiver austral, tandis que les plaines d'Antsirabe bénéficient d'un climat plus modéré. [13]

International Journal of Progressive Sciences and Technologies (IJPSAT)
ISSN: 2509-0119.
© 2025 Scholar AI LLC.
https://ijpsat.org/
Vol. 52 No. 2 September 2025, pp. 310-329

La pluviométrie annuelle est en moyenne de 1 200 à 1 500 mm, avec une forte concentration des précipitations entre décembre et mars. Ce climat favorable permet la culture de diverses espèces agricoles exigeantes, notamment les cultures maraîchères, les céréales, les légumineuses, et les plantes industrielles comme la pomme de terre ou le blé [13]. La Fig.1 et Fig.2 présente la localisation géographique de la région.

Figure 1 : *Localisation géographique de la région Vakinankaratra*

Source : FTM 2000

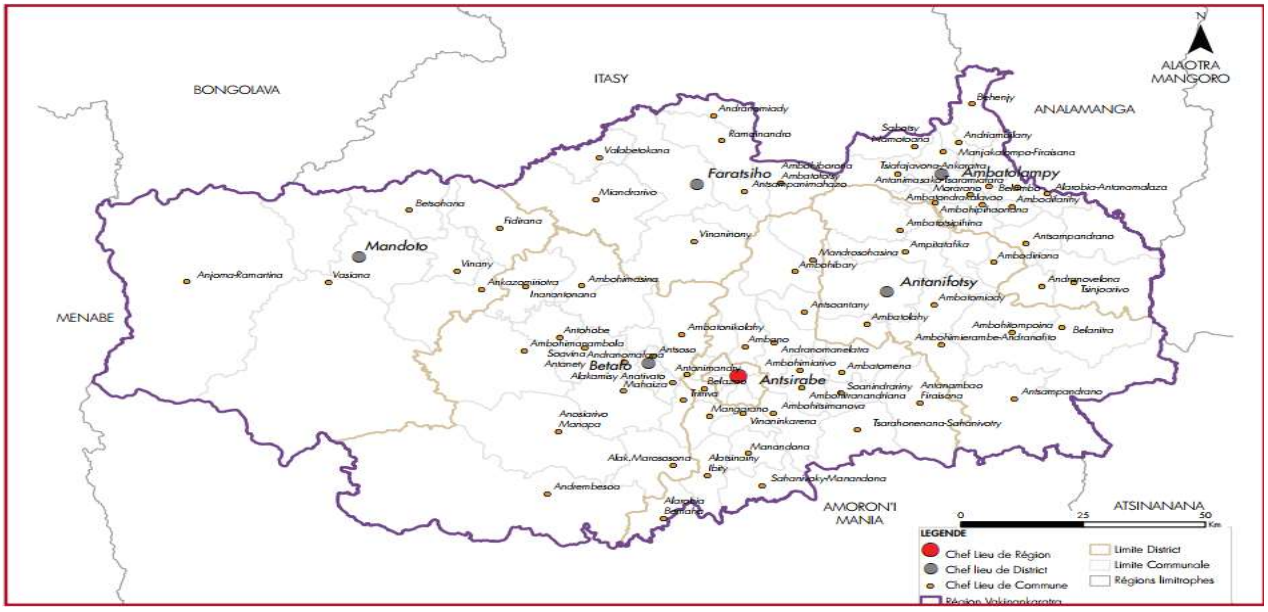

Figure 2 : *Carte administrative de la Région Vakinankaratra*

Source : FTM 2000, Monographie de la Région Vakinankaratra

International Journal of Progressive Sciences and Technologies (IJPSAT)
ISSN: 2509-0119.
© 2025 Scholar AI LLC.
https://ijpsat.org/
Vol. 52 No. 2 September 2025, pp. 310-329

Nous avons choisi la région de Vakinankaratra du fait de sa position leader dans la production de lait et ses dérivés sur les hautes terres du pays. La région dispose d'un cheptel bovin estimé à 200 000 têtes en 2014, dont 37 000 vaches laitières, soit plus de 18,5 % du cheptel bovin [4]. Concernant la filière lait, plus de 80% de la production laitière commercialisée à Madagascar provient de la Région. Il y existe environ 12.000 éleveurs expérimentés et un peu plus de 37.000 vaches laitières avec une production annuelle de 27 millions de litres [1]. Malgré tout, la production de lait reste insuffisante dans le pays face à une demande croissante.

2.2. Echantillonnage

L'étude a porté sur 200 éleveurs de vaches laitières, répartis dans les districts d'Antsirabe I et Antsirabe II, représentant deux zones agroécologiques différentes mais complémentaires. Ces exploitations ont été sélectionnées selon des critères bien définis : présence d'au moins une vache en lactation, pratiques d'alimentation régulières, enregistrement des quantités de lait produites, et utilisation déclarée de provende ou de concentrés. Au total, 288 vaches laitières ont été recensées dans l'échantillon, comprenant à la fois des races pures (essentiellement issues d'insémination artificielle) et des races croisées améliorées, représentatives de la diversité génétique locale.

2.3. Description des rations alimentaires

L'alimentation des vaches enquêtées repose sur une combinaison d'aliments de base (fourrages verts, fourrages secs, fourrages naturels et cultivés), complétés selon les cas par des concentrés commerciaux ou des provendes locales artisanales.

Ces dernières sont élaborées à partir de matières premières telles que le son de riz, le maïs, le tourteau de soja ou encore la racine de manioc [14]. Au sein des exploitations étudiées, trois grands types de rations alimentaires ont été observés.

La première catégorie regroupe les rations constituées exclusivement de fourrages naturels, principalement issus du pâturage, disponibles en abondance pendant la saison des pluies. La deuxième correspond aux rations à base de fourrages cultivés, tels que l'avoine, le penissetum, le trèfle ou encore le desmodium, souvent implantés par les éleveurs pour pallier le manque de ressources naturelles durant la saison sèche. Enfin, une troisième forme de ration, dite mixte ou « 2-en-1 », combine les deux types précédents, en associant les pâturages naturels aux cultures fourragères, ce qui permet une alimentation plus équilibrée et continue tout au long de l'année. L'administration de ces trois types d'aliments se groupe en deux durant une année. Durant la saison sèche, le premier groupe se compose d'avoines (AV), de raygrass (RG), de foin (F) et autres (Atr). Le deuxième groupe est composé de penissetum (PEN) et d'autres aliments disponibles en abondance durant la saison pluviale.

2.4. Collecte d'information

Selon le plan d'échantillonnage établi, 200 éleveurs de vache laitière possédant 288 vaches laitières de race pure et de race améliorée ont été choisis, répartis sur deux districts de la région (Antsirabe I et Antsirabe II) durant la période du mois de septembre et octobre 2024. Ces 200 exploitations privées ont été visitées en un seul passage selon l'approche adoptée par Lesnoff 2013 [15], et le plan d'échantillonnage prédéfini qui consiste à recueillir en même temps toute information utile et les renseignements nécessaires selon un questionnaire relatif à la conduite d'élevage, notamment l'alimentation des vaches laitières et les caractéristiques correspondantes. Les informations recueillies sont relatives à la structure des exploitations : Superficie agricole consacrée (SAC), Surface fourragère (SF), nombre de vaches laitières (VL), à la production laitière (PL) quotidienne moyenne et au planning alimentaire, aux matières premières cultivées sur place constituant la provende, et aux types d'aliments distribués par les éleveurs (E : ensilages, FS : fourrages secs, FV : fourrages verts, SPC : sous-produits céréaliers, CC : compléments concentrés).

2.5. Modélisation de la production laitière

2.5.1. Analyse statistique

Les données obtenues par les enquêtes ont été arrangées dans un tableur « Microsoft Excel 2013 » avec les variables en colonnes et les races des vaches en lignes. Une analyse statistique descriptive des différentes variables a été effectuée avec le logiciel « Excel 2013 » et l'analyse de correspondance multiple, des tests de corrélation entre la production laitière, l'apport nutritif et la fréquence de consommation de la provende à partir de l'analyse de composante principale se réalise avec le logiciel « R ». Et l'analyse de régression et de variance (ANOVA) a été effectuée avec le logiciel « Minitab ».

International Journal of Progressive Sciences and Technologies (IJPSAT)
ISSN: 2509-0119.
© 2025 Scholar AI LLC.
https://ijpsat.org/ Vol. 52 No. 2 September 2025, pp. 310-329

2.5.2. Modèle de régression

L'objectif de cette analyse est de modéliser la production laitière (PL) en fonction de plusieurs facteurs explicatifs liés à l'alimentation et aux pratiques d'élevage, surtout la démonstration de l'utilisation du concentré alimentaire afin de convaincre l'éleveur de fabriquer localement la provende. Les variables explicatives prises en compte incluent :

- **QP** : Quantité de provende : c'est la quantité de provende donnée aux vaches laitières par jour en kg.
- **Rc** : Race des vaches laitières : Race des vaches laitières des éleveurs enquêtés contenant deux modalités de races pures et de races croisées améliorées avec les inséminations artificielles.
- **MCB** : Mode de consommation des aliments de base qui est constitué par la consommation jusqu'au refus et non.
- **TA** : Type principal d'aliment utilisé composé par les fourrages naturels, les fourrages cultivés constitués par des pennisetum pendant la saison pluviale et les avoines, raygrass, trèfles accompagnés de foins pendant la saison sèche et les fourrages 2 en 1 (naturel et cultivé).

Les valeurs obtenues pour les rendements en production laitière à partir de l'enquête ont été soumises à l'analyse de régression multiple en utilisant le plan MPV fourni par le logiciel Minitab ®.

D'après Guyader (2013) : « Le modèle de régression linéaire multiple est une généralisation du modèle de régression simple lorsque les variables explicatives sont en nombre quelconque » [16]. Pour cela, les données collectées suivent le modèle suivant :

$$y_I = \beta_1 x_{i1} + \beta_2 x_{i2} + \cdots + \beta_p x_{ip} + \varepsilon_i, \qquad i = 1, \ldots, n \qquad (1)$$

Où les x_{ij} sont des nombres connus non aléatoires, les paramètres β_j du modèle sont inconnus, mais non aléatoires, les ε_i sont des variables aléatoires inconnues.

Du fait que la constante appartient généralement au modèle, l'équation de régression s'écrit sous la forme suivante de sorte que p correspond toujours au nombre de variables explicatives [16].

$$y_i = \beta_0 + \beta_1 x_{i1} + \beta_2 x_{i2} + \cdots + \beta_p x_{ip} + \varepsilon_i, \qquad i = 1, \ldots, n \qquad (2)$$

Nous supposons que le rendement de production laitière (variable à expliquer) dépend linéairement des quatre variables explicatives dans notre étude : la quantité de provende, la race des vaches, le mode de consommation des aliments de base et le type d'aliment utilisé [16]. Le modèle de régression complet est donné par l'équation 03 suivante [17], [18], [19].

$$\mathbf{Y_x = \beta_0 + \beta_1 x_1 + \beta_2^{(1)} x_2^a + \beta_2^{(2)} x_2^b + \beta_2^{(3)} x_2^c + \beta_3^{(1)} x_3^a + \beta_3^{(2)} x_3^b + \beta_4^{(1)} x_4^a + \beta_4^{(2)} x_4^b + \xi \quad (3)}$$

Y_x est la variable que l'on cherche à prédire à l'aide des variables indépendantes et qui représente les valeurs globales des réponses. x_i sont les termes linéaires des quatre composants du modèle (1 : quantité de provende, 2 : type d'aliment de base, 3 : race des vaches, 4 : Mode de consommation des aliments de base). Les exposants (a, b, c) du terme x_i différencient les modalités de chaque terme du modèle. βi sont les coefficients du modèle. L'exposant entre parenthèses du coefficient βi indique la contribution de chaque coefficient du terme x_i. Chaque coefficient βi mesure l'effet marginal d'une variation unitaire de la variable x_i sur la variable Y_x, en maintenant constantes toutes les autres variables.

2.5.3. Analyse de résultat

La fiabilité du modèle a été vérifiée par R^2, R^2 ajusté, R^2 prévisionnel et la somme des carrés de la prédiction d'erreur (Prediction Error Sum of Squares) [19]. Les valeurs de S, de R^2 et de R^2 ajusté indiquent à quel point le modèle est ajusté aux valeurs observées [20], [21]. Le R^2 prévisionnel est un indicateur d'ajustement du modèle de régression aux nouvelles observations [22]. Le modèle de régression a été validé par l'ANOVA des termes de régression ($p < 0,05$). L'effet synergétique ou antagonistique de formule et leurs interventions ont été évalués au moyen des coefficients de régression.

International Journal of Progressive Sciences and Technologies (IJPSAT)
ISSN: 2509-0119.
© 2025 Scholar AI LLC.
https://ijpsat.org/ Vol. 52 No. 2 September 2025, pp. 310-329

2.6. Détermination du prix de la provende

Une vache de race pure a été isolée avec un mode de consommation des aliments de base jusqu'au refus avec des fourrages 2 en 1 et un aliment concentré correcteur de type commercial d'un éleveur situé dans le district Antsirabe I. La production journalière de lait est de 26 litres environ, soit 27 kg de lait pour une densité moyenne de lait à 1,03kg/litre au 3ème mois de lactation. La masse vive de l'animal est de 585kg, son alimentation de base est composée en majorité de penissetum purpureum Kizozi de même qualité à l'herbe de guinée, Setaria, desmodiums et des fourrages naturels composés en saison pluviale. Le calcul de la proportion de la matière première de la provende et le prix du kilogramme a été effectué par le logiciel Microsoft Excel par l'intermédiaire du complément solveur.

Le besoin en entretien de la vache est calculé à partir de la formule suivante [23], [24], [25].

Energie : $\text{UFL} = 1{,}4 + 06 \times \frac{MV(Masse\ vive)}{100}$ (4)

Matière azotée : PDI = 100 + 0,5MV (5)

Calcium : Ca = 17,9g

Phosphore : P = 17,2g

Le besoin en production de 1kg de lait de la vache est calculé à partir de la formule suivante [23], [24], [26], [27].

Energie : UFL = 0,4 UFL/kg de lait à 4% de matière grasse

Matière azotée : PDI = 50g/kg de lait à 4% de matière grasse

Calcium : Ca = 1,25g/kg de lait

Phosphore : P = 0,9g/kg de lait

2.6.1. Valeur nutritive des aliments

Les informations sur la valeur nutritive des aliments et des ingrédients pour les animaux ont été recueillies en faisant des calculs et en consultant les tables INRA 1989, 2007 et 2018 [28], [7], [18], le document *Official Methods of Analysis* de l'AOAC International de 2006 [29], Randriatsiferana et al. 2021. in *Valeurs alimentaires des fourrages tropicaux à Madagascar. Revue Malgache de Zootechnie, 12(2), 45–52. [30]* et Rao. D et al.,2016. in *Evaluation of rice bran and its potential as feed ingredient. International Journal of Science, Environment and Technology, 5(4), 2206–2212 [31].*

2.6.2. Prix des matières premières

Le prix des matières premières de la provende a été obtenu par la collecte des prix et une analyse du marché local et national via une enquête auprès des commerçants et des collecteurs (enquête 2024).

International Journal of Progressive Sciences and Technologies (IJPSAT)
ISSN: 2509-0119.
© 2025 Scholar AI LLC.
https://ijpsat.org/
Vol. 52 No. 2 September 2025, pp. 310-329

3. RESULTATS

3.1. Typologie des enquêtés

➢ **Selon le sexe**

Les 40,5% des répondants ont déclaré être de sexe féminin, la Fig.3 ci-dessous représente la distribution des répondants par commune selon le sexe

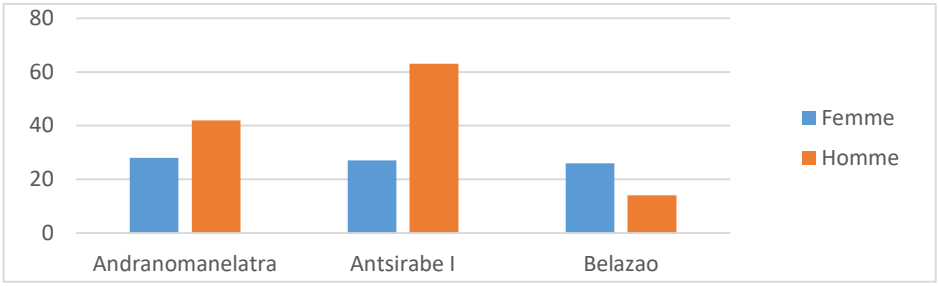

***Figure 3** : Répartition des répondants selon le sexe*

La Fig.3 ci-dessus compare la répartition des hommes et des femmes dans trois localités : Andranomanelatra, Antsirabe I, et Belazao. On constate une prédominance des hommes à Antsirabe I, avec une proportion nettement supérieure (environ 60) par rapport aux femmes (environ 30), tandis qu'à Belazao, le nombre de femmes est significativement plus élevé que celui des hommes. Ces variations pourraient s'expliquer par des facteurs socio-économiques et culturels spécifiques à chaque localité. Selon les enquêtés, Antsirabe I, étant un centre urbain, pourrait attirer davantage de main-d'œuvre masculine pour des emplois urbains. À Belazao, une zone rurale, la migration masculine pourrait expliquer la prépondérance féminine.

➢ **Selon l'âge**

Comparaison de la répartition des enquêtés ayant rempli le questionnaire selon l'âge

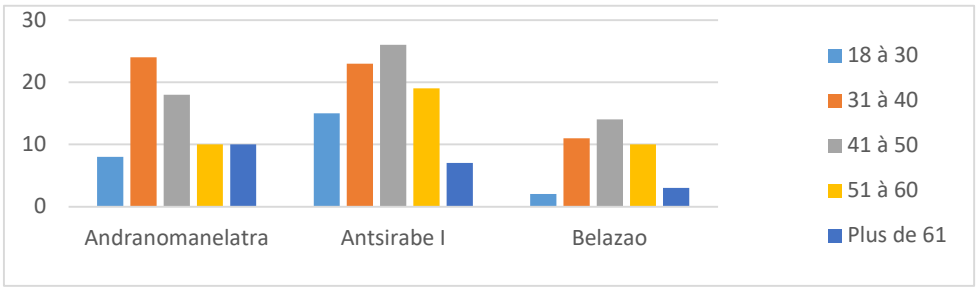

***Figure 4** : Distribution des enquêtés dans les 3 communes selon l'âge*

Ce graphique illustre la répartition par tranche d'âge dans trois localités : Andranomanelatra, Antsirabe I et Belazao. À Andranomanelatra, la tranche d'âge 31-40 ans domine, tandis que les tranches 18-30 et de plus de 61 ans sont minoritaires. À Antsirabe I, la catégorie 41-50 ans est majoritaire, suivie par les 31-40 ans et les 51-60 ans, ce qui reflète une population active plus âgée. À Belazao, la répartition est plus homogène, mais les tranches 31-40 ans et 51-60 ans restent significatives, avec une faible présence des jeunes (18-30 ans). Ces différences potentielles peuvent être liées aux dynamiques économiques : à Antsirabe I, en tant que centre-ville, les jeunes sont à la recherche et ou pratiquent une autre activité tertiaire.

International Journal of Progressive Sciences and Technologies (IJPSAT)
ISSN: 2509-0119.
© 2025 Scholar AI LLC.
https://ijpsat.org/
Vol. 52 No. 2 September 2025, pp. 310-329

3.2. Production de lait

3.2.1. Régression linéaire de la production laitière en fonction de la catégorie des aliments de base

La régression entre la production laitière (PL) et le groupe d'aliments de base administré en saison pluviale (PEN/Atr) montre que la régression est significativement positive (P<0,001, R^2 = 26,95%, R^2 ajusté = 26,69%). L'équation obtenue, (PL = 0,003 + 0,2836 × PEN/Atr), indique que chaque augmentation d'une unité du ratio PEN/Atr entraîne une élévation moyenne de la production laitière de 0,2836 unités. Bien que ce pourcentage reste modéré, la significativité du modèle est confirmée par une valeur de F élevée (F = 105,49 ; p < 0,001), ce qui atteste d'une relation linéaire robuste entre les deux variables. Le résidu standard (S = 5,90) traduit une variabilité des valeurs de PL autour de la droite de régression, suggérant que d'autres facteurs non inclus dans ce modèle contribuent également à la variation de la production. (Fig.5-1).

De même pour le groupe d'aliments en saison sèche (RG,AV,F,Atr), le résultat montre que la régression est significativement positive pour prédire la production laitière (PL). L'équation de régression obtenue, (PL = 2,174 + 0,2531 × RG/AV//F/Atr), indique qu'une unité d'augmentation de ce ratio se traduit par une élévation moyenne de 0,2531 kg de lait par vache, avec le coefficient de détermination R^2 = 22,97%, R^2 ajusté de 22,71% et une valeur de p<0,001. Tout cela confirme que près de 23 % de la variation de la production laitière est expliquée par le ratio variable et conserve un pouvoir explicatif stable (Fig.5-2). Ces résultats montrent que le ratio (PEN/Atr) et (RG, AV, F, Atr) sont des indicateurs utiles, même s'ils ne donnent qu'une partie de la performance laitière.

Ces indicateurs doivent être incorporés dans les stratégies de formulation des rations, tout en intégrant d'autres variables, afin d'optimiser le pouvoir explicatif global du modèle. (Fig.5-1 ;5-2).

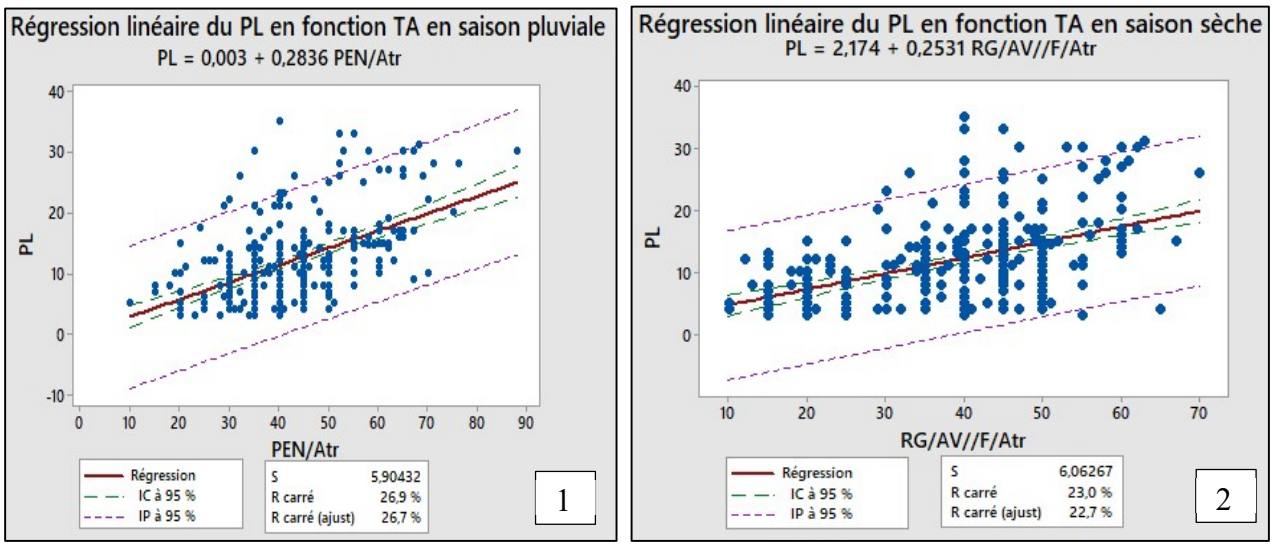

Figure 5 : *Régression linéaire entre la PL et le groupe d'aliment en saisons pluviale et sèche*

3.2.2. Production de lait en fonction de la quantité de provende (QP)

Le résultat de la production laitière des 288 échantillons en fonction de la quantité de provende est donné dans le Tableau 1 suivant. La moyenne varie entre 5,077±0,215 et 34±1 litres. Cette large variation est surtout due aux variations des quantités de provende, de la race des vaches, du type d'alimentation et du mode de consommation des aliments de base.

International Journal of Progressive Sciences and Technologies (IJPSAT)
ISSN: 2509-0119.
© 2025 Scholar AI LLC.
https://ijpsat.org/
Vol. 52 No. 2 September 2025, pp. 310-329

Tableau 1. Production laitière en fonction de la quantité de provende

Variable	QP	N	Moyenne	Ecart Type	Min	Max
PL	0	78	5,077	1,899	3	13
	1	3	7,67	2,52	5	10
	1,5	14	7,786	1,718	5	12
	2	43	10,14	2,524	6	15
	2,5	11	11,455	1,864	9	15
	3	48	12,417	2,284	9	17
	3,5	8	13,63	3,11	10	18
	4	27	14,685	2,584	11	22
	5	10	16,05	1,343	14	18
	6	17	20,97	4,45	15	28
	7	9	21,56	5,03	15	30
	8	16	26,375	3,462	21	31
	9	2	31,5	2,12	30	33
	10	2	34	1,41	33	35

La moyenne de la production laitière (PL) augmente avec la quantité de provende (QP) donnée, ce qui nous donne une relation positive entre ces deux composantes. Le rendement est faible à QP=0, la moyenne donne 5,077±0,215 litres, mais il augmente à QP=3, correspondant à la moyenne 12,417±0,33 litres ; de même, il continue à s'améliorer à QP =6 pour la moyenne de 20,97±1,08 litres, il atteint le maximum à QP=10 pour une moyenne de 34±1 litres. Les effets de l'utilisation des aliments concentrés sont très significatifs sur la production laitière.

3.2.3. Production laitière en fonction de la race, de type d'alimentation et du mode de consommation des aliments

Tableau 2. Production laitière en fonction de la race, du type d'alimentation et du mode de consommation des aliments

Variable	Race	TA	MCB	N	Moyenne	Ecart Type	Minimum	Maximum
PL	Race croisé	2en1	Jusqu'au refus	24	12,396	2,182	9	18
			NON	24	5,792	2,226	3	11
		Cultivé	Jusqu'au refus	24	13,896	2,625	8	17
			NON	24	7,708	3,29	4	14
		Naturel	Jusqu'au refus	24	8,229	3,064	3	12
			NON	24	5,125	2,328	3	12
	Race pur	2en1	Jusqu'au refus	24	20,71	8,21	10	35
			NON	24	13,92	6,48	5	23
		Cultivé	Jusqu'au refus	24	22,54	5,89	13	31
			NON	24	15,313	4,814	8	26
		Naturel	Jusqu'au refus	24	10,521	3,792	4	16
			NON	24	7,833	3,358	4	15

TA : Type d'alimentation ; MCB : Mode de consommation des aliments de base ; N : nombre d'échantillon.

Les résultats présentés montrent l'effet combiné de trois facteurs : Race, Type d'alimentation (TA), et Mode de consommation des aliments de base (MCB) sur la production laitière (PL). Globalement, les vaches de race pure produisent systématiquement plus de lait que les races croisées, quelle que soit la combinaison des autres facteurs. Pour les deux races, le système « 2 en 1 » (ration mixte : fourrages naturels + cultivés) donne les meilleures performances, suivi par les fourrages cultivés seuls, puis les fourrages naturels.

International Journal of Progressive Sciences and Technologies (IJPSAT)
ISSN: 2509-0119.
© 2025 Scholar AI LLC.
https://ijpsat.org/
Vol. 52 No. 2 September 2025, pp. 310-329

De plus, la consommation "jusqu'au refus" est toujours associée à une production plus élevée que le mode "NON", ce qui reflète l'impact positif d'un accès illimité à l'aliment.

3.2.4. Validation du modèle

Tableau 3. Indicateur de fiabilité du modèle

	F	P	R^2	R^2 ajusté	R^2 prévisionnel	Manque d'ajustement
Valeur	3250,29	<0,001	90,62%	90,45%	90,19%	0,329

Le Tableau 3 montre que le modèle est très significatif avec une valeur de probabilité ($p < 0,001$) et un coefficient F élevé (3250,29). Les coefficients de détermination R^2 proche de 100% (90,62%), R^2 ajusté de 90,45% et R^2 prévisionnel de 90,19%, indiquent la fiabilité du modèle par rapport aux données d'enquête. La probabilité de manque d'ajustement non significative (0,329) signifie que le modèle prévisionnel peut être utilisé pour l'optimisation de la production laitière. Ces valeurs ont permis d'améliorer le modèle mathématique, et les données prévues pourraient raisonnablement représenter les données expérimentales. Les coefficients du modèle de régression sont donnés dans le Tableau 4.

Tableau 4. Coefficients du model de régression

Terme de régression	Modalité du terme	Coeff	Valeur de p
Constante	-	6,2	*<0,001*
QP	-	2,1376	*<0,001*
TA	2 en 1	0	*<0,001*
	CULTIVE	1,194	*<0,001*
	NATUREL	-1,513	*<0,001*
Rc	Race pure	2,221	*<0,001*
	Race croisé	0	*<0,001*
MCB	Jusqu'au refus	0	*<0,001*
	NON	-2,265	*<0,001*

D'après le Tableau 4, les quatre termes du modèle sont tous significatifs ($p<0,001$), même si les composantes 2 en1 du terme TA, Race croisée du terme Rc et jusqu'au refus du terme MCB demeurent 0. Ces composantes étaient considérées comme une valeur de référence dans le modèle.

3.2.5. Modèle validé

$$Y_x = 6,2 + 2,137x_1 + 1,194x_2^b - 1,513x_2^c + 2,221x_3^b - 2,265x_4^b + \varepsilon \quad (6)$$

Ou X_1 = Quantité de provende, x_2^b = Type d'aliment de base (cultivé), x_2^c= Type d'aliment de base (Naturel), x_3^b = Race de vache laitière (Race pure), et x_4^b = Mode de consommation des aliments de base (NON).

Le modèle de régression validé met en évidence les facteurs déterminants de la production laitière. L'effet positif de la quantité de provende ($\beta = 2,137$) confirme le rôle essentiel des concentrés dans la performance laitière, en accord avec les travaux de l'INRA (1989) et de Sauvant et al.2004 [28], [8]. L'utilisation de fourrages cultivés améliore également la production (+1,194), probablement en raison de leur meilleure valeur nutritive. La race pure présente un effet favorable (+2,221), ce qui certifie les résultats de la FAO (2020) sur le potentiel génétique supérieur des races spécialisées en conditions contrôlées [32]. En revanche, le mode de consommation restreint (NON) est associé à une baisse significative (–2,265), soulignant l'importance de l'alimentation à volonté pour optimiser l'ingestion et la production. Ce modèle souligne l'intérêt d'intégrer des pratiques alimentaires rationnelles et des choix génétiques adaptés pour maximiser la production laitière en zone tropicale.

International Journal of Progressive Sciences and Technologies (IJPSAT)
ISSN: 2509-0119.
© 2025 Scholar AI LLC.
https://ijpsat.org/
Vol. 52 No. 2 September 2025, pp. 310-329

3.2.6. Analyse en Composantes Principales (ACP)

L'ACP des coefficients du modèle montre que le gain ou la perte de production en lait étaient associés à la quantité de la provende, le mode de consommation des aliments de base et le type d'aliment de base.

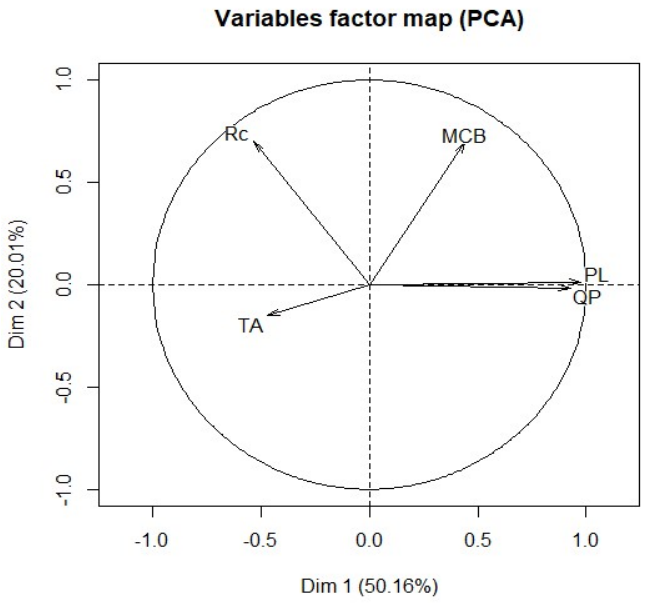

Figure 6 : *Carte factorielle des variables du modèle*

La production laitière (PL) est corrélée positivement forte avec la quantité de provende (QP). La variable MCB est principalement corrélée avec le deuxième axe (Dim2), sa position sur le graphe montre qu'elle a une certaine relation avec la production laitière, bien que moins forte que la QP. La variable Race (Rc) et le type d'alimentation de base (TA) ont une corrélation négative avec la production laitière, ce qui signifie que la variation de type d'aliment de base et la distinction de la race ont un effet sur la production donc il faut faire attention.

3.3. Formulation de la provende et du prix

Les résultats confirment que l'utilisation et la formulation de la provende peut avoir à partir de l'étude des aliments de base disponibles.

3.3.1. Valeur nutritive des aliments et prix des matières premières de la provende

Tableau 5. Valeur nutritive des aliments de base utilisés

Aliment	Stade de végétation en cm	MS en g/kg brute	UFL/kg brute	PDIN en g/kg brute	PDIE en g/kg brute	Ca en g/kg brute	P en g/kg brute
Penissetum purpureum Kizozi	50 à 100	200	0,12	16,36	12,64	1,02	0,64
Desmodium		260	0,14	18,1	16,7	1,79	0,37
Setaria		210	0,11	12,06	11,69	0,4	0,4
Fourrage naturel composé		260	0,260	18,100	19,490	1,780	1,010

International Journal of Progressive Sciences and Technologies (IJPSAT)
ISSN: 2509-0119.
© 2025 Scholar AI LLC.
https://ijpsat.org/
Vol. 52 No. 2 September 2025, pp. 310-329

Ces résultats montrent que le fourrage naturel composé présente la meilleure valeur nutritive globale (UFL, PDIN, PDIE) et une richesse en calcium et phosphore, ce qui le rend très intéressant pour l'alimentation animale. Le Kizozi et le Desmodium offrent aussi de bonnes valeurs, surtout en protéines digestibles.

Tableau 6. Valeur nutritive des matières premières de la provende utilisée [INRA 2018]

Matières premières	MS %	UFL /kg brute	PDIN g/kg brute	PDIE g/kg brute	Ca g/kg brute	P g/kg brute
Maïs	86,3	1,11	59	82	0,2	1,9
Son de riz huile< 5%, cellulose brute 5-11%	89,7	0,66	104	98	0,4	9,6
Tourteau d'Arachide huile 5-20%	92	1,15	310	190	0,7	3,9
Manioc, amidon 66-70%	87,7	0,94	18	63	0,9	0,5
Tourteau de soja huile 5à20%	93,2	1,27	320	220	1,9	4,5
Graine de soja toastée	88,5	1,35	243	158	1,7	3,8

Les résultats montrent que parmi les matières premières évaluées, le tourteau de soja et la graine de soja toastée se distinguent par leur forte valeur énergétique (1,27 et 1,35 UFL/kg respectivement) et leurs teneurs élevées en protéines digestibles (PDIN de 320 et 243 g/kg brute), ce qui les rend particulièrement adaptés aux rations destinées aux animaux en production intensive. Le tourteau d'arachide est également une excellente source de protéines (PDIN : 310 g/kg). En revanche, le manioc, bien qu'énergétique, est pauvre en protéines. Le son de riz, riche en phosphore, peut être un complément minéral intéressant.

Tableau 7. Prix de la matière première au marché local en MGA (enquête 2025)

Matière première	Prix /kg
Maïs	1500
Son de riz huile< 5% cellulose brute 5-11%	1000
Tourteau d'Arachide huile 5-20%	2000
Manioc, amidon 66-70%	1400
Tourteau de soja huile 5à20%	2400
Graine de soja toastée	2400
Provende commerciale	2400

D'après ce tableau, une enquête menée auprès des collecteurs et au niveau de différents points de vente révèle une variabilité des prix selon la disponibilité locale et la qualité. Le son de riz (1000 Ar) et le manioc (1400 Ar) restent les plus accessibles. En revanche, le tourteau de soja (2400 Ar) demeure le plus onéreux, en lien avec sa forte valeur nutritionnelle**.**

3.3.2. Besoin journalier de la vache

Tableau 8. Besoin d'entretien pour vache laitière de 600kg de masse vive

Besoin	Unité	Valeur
Energie	UFL	5
Matière Azotée	PDIE (g)	400
	PDIN (g)	400
Calcium	Gramme	17,9
Phosphore	Gramme	17,2

International Journal of Progressive Sciences and Technologies (IJPSAT)
ISSN: 2509-0119.
© 2025 Scholar AI LLC.
https://ijpsat.org/
Vol. 52 No. 2 September 2025, pp. 310-329

Pour une vache laitière de 600 kg, les besoins d'entretien sont estimés à 5 UFL/jour, nécessaires pour maintenir les fonctions vitales sans production. Les apports protéiques de 400 g/j de PDIE et PDIN soutiennent les processus métaboliques de base. Le calcium (17,9 g) et le phosphore (17,2 g) sont essentiels au maintien de l'intégrité osseuse et à l'équilibre électrolytique.

3.3.3. Encombrement des aliments de base

La capacité d'ingestion de la vache selon leur état corporel était :

CI = 15,30 UE, ce qui équivaut à 58,84 kg de fourrages verts par jour.

Les valeurs nutritives des aliments de base de la vache, sont données par le Tableau 9 suivant [14]

Tableau 9. Besoin d'entretien et production de lait permise par la ration de base

Proportion des aliments de base	Kg/j	UFL	PDIN g/kg brute	PDIE g/kg brute	Ca g/kg brute	P g/kg Brute
Kizozi	25,00	3,00	409,00	316,00	25,50	16,00
Desmodieum	10,00	1,40	181,00	167,00	17,90	3,70
Setaria	10,00	1,10	120,60	116,90	4,00	4,00
Fourrage naturel composé	10,00	2,60	181,00	194,90	17,80	10,10
Total des apports des aliments de base	**55,00**	**8,10**	**891,60**	**794,80**	**65,20**	**33,80**
Besoin d'entretien		**5,00**	**400,00**	**400,00**	**17,90**	**17,20**
Reste pour le besoin de production		**3,10**	**491,60**	**394,80**	**47,30**	**16,60**
Quantité de lait produite par les besoins de production d'1kg de lait (Permise par la ration de base)		**7,21**	**9,83**	**7,90**	**37,84**	**18,44**
Reste à produire par jour en kg de lait pour atteindre le 27 kg		**19,79**	**17,17**	**19,10**	**0**	**8,56**
Besoin de production à couvrir		**7,92**	**858,40**	**955,20**	**0**	**7,70**

Les résultats montrent que la ration de base composée de Kizozi, Desmodium, Setaria et fourrage naturel apporte 8,1 UFL, 891,6 g de PDIN et 794,8 g de PDIE, dépassant les besoins d'entretien (5 UFL, 400 g PDIN/PDIE) d'une vache laitière de 600 kg. Cette ration permet une production estimée de 7,21 kg de lait sur base énergétique, mais seulement 9,83 kg sur la base PDIE, et 7,9 kg sur la base PDIN, indiquant un déficit en protéines digestibles pour atteindre une production de 27 kg/j. Il est donc nécessaire de compléter par des concentrés riches en PDIE et PDIN [27].

Tableau 10. Besoin de production de 1 kg de lait non couvert par la ration de base

Besoin de production	UFL/kg brute	PDIN (g/kg brute)	PDIE (g/kg brute)	Ca (g/kg brute)	Phos (g/kg brute)
Pour 1 kg de provende	0,99	107,30	119,40	-	0,96

Pour produire 1 kg de lait, la provende doit fournir environ 0,99 UFL, 107,3 g de PDIN, 119,4 g de PDIE et 0,96 g de phosphore. Ces valeurs indiquent un aliment concentré équilibré et énergétique, adapté, à compléter par les fourrages pour répondre aux besoins de production.

International Journal of Progressive Sciences and Technologies (IJPSAT)
ISSN: 2509-0119.
© 2025 Scholar AI LLC.
https://ijpsat.org/
Vol. 52 No. 2 September 2025, pp. 310-329

Tableau 11. Provende type 1

Matière première	UFL /kg brute	PDIN (g/kg brute)	PDIE (g/kg brute)	Ca (g/kg brute)	P (g/kg brute)	Prix/kg de provende	Pour 1 kg de provende
Maïs	0,47	24,82	34,50	0,13	1,14	**631,13**	**0,42**
Son de riz huile< 5% cellulose brute 5-11%	0,23	36,26	34,17	0,28	5,23	**348,65**	**0,35**
Tourteau d'Arachide huile 5-20%	-	-	-	-	-	-	-
Manioc, amidon 66-70%	-	-	-	-	-	-	-
Tourteau de soja huile 5à20%	0,29	73,79	50,73	0,44	1,04	**553,42**	**0,23**
Graine de soja toastée							
Solution	**0,99**	**134,87**	**119,40**	**0,84**	**7,40**	**1 533,20**	**1,00**

Ce tableau met en évidence la contribution respective de chaque ingrédient dans la formulation d'une provende type 1. La combinaison de maïs (42 %), son de riz (35 %) et tourteau de soja (23 %) permet d'atteindre une densité énergétique de 0,99 UFL/kg et une richesse protéique de 134,87 g PDIN, et 119,4 g PDIE/kg brute, répondant aux besoins de production de 1 kg de lait non permis par la ration de base. Le phosphore est élevé (7,4 g/kg), notamment grâce au son de riz. Le coût total de la provende est estimé à 1533,20 Ar/kg. L'absence de données sur le tourteau d'arachide et le manioc pourrait limiter l'optimisation du coût et des apports.

Tableau 12. Provende type 2

Matière première	UFL /kg brute	PDIN (g/kg brute)	PDIE (g/kg brute)	Ca (g/kg brute)	P (g/kg brute)	Prix/kg de provende	Rapport pour 1 kg de provende
Maïs	0,44	23,4	32,54	0,12	1,7	**595,16**	**0,40**
Son de riz huile< 5% cellulose brute 5-11%	0,20	31,37	29,56	0,24	4,52	**301,61**	**0,30**
Tourteau d'Arachide huile 5-20%	0,35	93,50	57,31	0,36	1,78	603,22	**0,30**
Manioc, amidon 66-70%	-	-	-	-	-	-	-
Tourteau de soja huile 5à20%	-	-	-	-	-	-	-
Graine de soja toastée	-	-	-	-	-	-	-
Solution	**0,99**	**148,28**	**119,40**	**0,72**	**7,37**	**1 500**	**1**

D'après la formulation, le prix d'un kilogramme de provende de fabrication locale est aux alentours de 1500 MGA ± 300 MGA avec les divers frais (transport, main d'œuvre, prix du broyage, autre matière première nécessaire), ce qui est très abordable par rapport à la provende commerciale de 2400 MGA le kilogramme (enquête 2025). Le seul inconvénient était l'absence d'une machine de granulation de provende sur place en raison de différents facteurs.

3.4. Analyse économique de la provende fabriquée

L'alimentation des vaches laitières constitue une part majeure des charges d'exploitation. Dans ce contexte, l'évaluation économique d'une provende fabriquée localement s'impose. Cette analyse vise à comparer le coût et l'efficacité économique d'une provende artisanale par rapport à une provende commerciale largement utilisée dans les exploitations.

L'analyse a été basée sur la comparaison de deux types de provende formulés localement par rapport à la provende du commerce sur une quantité administrée de 10 kg par jour par vache.

International Journal of Progressive Sciences and Technologies (IJPSAT)
ISSN: 2509-0119.
© 2025 Scholar AI LLC.
https://ijpsat.org/ Vol. 52 No. 2 September 2025, pp. 310-329

3.4.1. Coût de revient de la provende fabriquée localement

À partir des formulations des provendes types 1 et 2, le coût de revient par kilogramme est estimé à :

- Provende type 1 : 1 533,20 MGA/kg
- Provende type 2 : 1 500 MGA/kg

Avec l'ajout des frais de transformation (± 300 MGA/kg : Transport, broyage, main-d'œuvre, pertes), le coût total est de 1 800 MGA/kg. L'économie brute par rapport à la provende commerciale (2 400 MGA/kg) donne 600 MGA/kg économisés par vache, par jour pour chaque kg de provende.

3.4.2. Économie quotidienne et mensuelle par vache

En considérant une consommation moyenne de 10 kg/jour de provende pour une vache laitière en période de lactation active, le Tableau n°13 suivant donne le résultat économique.

Tableau 13. Démonstration économique

	Provende commerciale	Provende fabriquée	Différence de prix/kg	Economie / mois (MGA)
Pour 1 kg	2 400	1 800	600	18 000
Pour 10Kg /j	24 000	18 000	6 000	180 000

Ce résultat montre qu'en remplaçant la provende commerciale (2 400 MGA/kg) par une provende fabriquée localement (1 800 MGA/kg), l'éleveur économise 600 MGA/kg. À raison de 10 kg/jour, cela représente une économie de 180 000 MGA par mois et par vache en période de lactation active, soit une économie substantielle sur un troupeau.

3.4.3. Avantage et contrainte économique et technique

La fabrication locale de provende constitue une force économique majeure, générant une économie de 600 MGA/kg, soit 180 000 MGA/mois par vache [14]. Cette solution exploite les ressources locales disponibles, améliorant la rentabilité. Toutefois, l'absence d'équipements de granulation et la variabilité du prix des intrants sont des faiblesses notables [33]. La fabrication locale représente une opportunité stratégique pour renforcer l'autonomie alimentaire rurale, mais demeure exposée à des menaces externes telles que la concurrence commerciale et le manque de formation [34].

4. DISCUSSION

4.1. Régression linéaire de la production laitière en fonction de la catégorie des aliments de base

L'analyse montre que les types de fourrages utilisés en saison pluviale (PEN/ATR) ou sèche (RG/AV/F/ATR) influencent significativement la production de lait, avec un R^2 ajusté atteignant 27 %. Ce constat s'accorde avec les travaux de Mertens (1994), qui souligne l'importance de la diversité fourragère pour optimiser l'ingestion et la digestibilité [35]. De même, Delaby et al. (2011) confirment que l'association entre pâturage naturel et fourrages cultivés permet une alimentation plus équilibrée [36].

Toutefois, le modèle reste limité avec un pouvoir explicatif modéré. La variabilité climatique, les pratiques de conservation (ensilage, séchage) ou les carences minérales ne sont pas intégrées. En ce sens, Zebeli et Metzler (2012) insistent sur la nécessité de considérer aussi la stabilité du rumen, souvent perturbée par les variations de qualité du fourrage [37].

L'approche mixte « 2 en 1 » se révèle pertinente dans le contexte Malagasy. En intégrant des espèces comme le desmodium ou la luzerne tropicale, les éleveurs peuvent améliorer la valeur azotée de leurs rations, comme le propose Rotz et al. (1989) dans leurs modèles de simulation DAFOSYM [38].

International Journal of Progressive Sciences and Technologies (IJPSAT)
ISSN: 2509-0119.
© 2025 Scholar AI LLC.
https://ijpsat.org/ Vol. 52 No. 2 September 2025, pp. 310-329

La menace climatique reste forte. Une année de sécheresse suffit à compromettre la disponibilité des fourrages cultivés, comme cela a été observé par Sourisseau et al. (2016) dans la région du Vakinankaratra [4]. La dépendance à une seule ressource (comme le penissetum) peut s'avérer risquée sans plan de résilience.

4.2. Production de lait en fonction de la quantité de provende

Le résultat révèle une nette corrélation positive entre la quantité de provende administrée et le niveau de production laitière. Cette relation linéaire est confirmée par la progression régulière du rendement, passant de 5,07 litres/jour (sans provende) à 34 litres/jour à QP = 10 kg. Cette dynamique reflète bien l'effet énergétique et protéique des concentrés alimentaires sur les performances laitières, comme démontré par Sauvant et al. (2004) et Faverdin et al. (2011), qui ont souligné que chaque kg de concentré permet une augmentation significative du lait produit, notamment en phase de lactation avancée [3], [8], [9].

Cependant, cette relation ne tient pas compte de la qualité nutritionnelle réelle de la provende. Il est possible que deux éleveurs utilisant la même quantité de provende obtiennent des résultats très différents selon la formulation et la digestibilité de leurs ingrédients [7]. De plus, la variabilité inter-individuelle des vaches et leur stade de lactation ne sont pas intégrés au modèle.

Ces résultats confirment la pertinence de développer des formulations locales de provende, tout en respectant les besoins en UFL et PDIE, comme l'ont proposé Zebeli et *al* (2012) dans un contexte tropical [37]. En intégrant des sous-produits agricoles locaux, le coût peut être réduit tout en maintenant les performances.

La dépendance à des intrants coûteux, notamment les tourteaux de soja ou les céréales importées, pourrait limiter l'accès à des provendes équilibrées. Ce phénomène, déjà observé à Madagascar [2], met en évidence le besoin urgent d'outils locaux de formulation adaptés.

4.3. Production laitière en fonction de la race, du type d'alimentation et du mode de consommation des aliments

Les résultats montrent que les vaches de race pure, alimentées avec des rations « 2 en 1 » et consommant à volonté, produisent jusqu'à 22,54 litres/jour, contre 5,79 litres/jour pour les vaches croisées mal alimentées. Cette interaction positive entre génétique, alimentation et mode de consommation rejoint les observations de la FAO (2020), qui identifie la race et le régime alimentaire comme deux facteurs majeurs de productivité [32]. Ces résultats sont également appuyés par Friggens et Newbold (2007), qui soulignent que l'ingestion illimitée des aliments optimise la partition énergétique [39].

Malgré ces performances, la variabilité observée au sein d'un même groupe (écart-type élevé) indique une hétérogénéité dans la gestion des élevages. La race pure est aussi plus exigeante en matière d'alimentation et de soins. Un modèle unique pourrait ne pas convenir à tous les éleveurs, notamment les plus modestes [16].

L'identification de ces combinaisons gagnantes ouvre des perspectives pour des programmes ciblés de sélection génétique et de transfert de technologie alimentaire. Delaby et al. (2011) préconisent ce genre de stratégie intégrée dans les milieux tropicaux à forte contrainte [36].

Le recours aux races pures sans un accompagnement technique adéquat peut s'avérer contre-productif. En cas de mauvaise alimentation ou de stress thermique, ces vaches peuvent chuter brutalement en production [24]. Il convient donc de coupler la sélection génétique et la formation pratique.

4.4. Modèle de régression

De plus, le modèle de régression linéaire multiple mis en œuvre a présenté une forte capacité prédictive avec un R^2 de 90,62%, validant ainsi la fiabilité du modèle. Les termes explicatifs tels que la race (Rc), le type d'aliment (TA), la quantité de provende (QP) et le mode de consommation (MCB) se sont tous avérés significatifs ($p < 0,001$). Cette robustesse statistique du modèle démontre la solidité de la base analytique et fournit un outil opérationnel pour la prise de décision. Ce niveau de précision est comparable à celui observé par Cornell.J (2002) et Bernard.D (2022) dans des modèles multivariés agroalimentaires [20], [22]. De plus, tous les termes du modèle (QP, TA, Rc, MCB) sont significatifs, renforçant sa robustesse statistique.

Cependant, bien que statistiquement solide, Le modèle ne tient pas compte des variations climatiques, comme l'ont souligné Delaby et al. (2011) [36], ni des effets à long terme des formulations proposées. Une expérimentation contrôlée serait nécessaire pour valider la reproductibilité des résultats [40].

4.5. Formulation et prix de la provende

Un autre atout majeur est la capacité des éleveurs à produire localement leur provende à des coûts réduits. Le prix de revient estimé à environ 1500 MGA/kg est bien inférieur au prix du marché (2400 MGA/kg), ce qui constitue un levier économique essentiel dans l'amélioration de la rentabilité des exploitations. Cette approche, en plus d'être économiquement viable, est cohérente avec la conclusion de Sprumont J (2009), qui encourage l'autoproduction locale de concentrés [6].

Malgré ces résultats encourageants, plusieurs faiblesses structurelles persistent. L'absence d'équipements adaptés, notamment de machines de granulation sur site, limite la mise en œuvre effective de la production locale de provende. Ce déficit technique est un frein à la diffusion des pratiques optimales d'alimentation, comme le souligne l'enquête sur terrain. Par ailleurs, le modèle ne prend pas en compte certains facteurs environnementaux ou sanitaires pouvant influencer la production laitière tels que les maladies, la gestion de la reproduction ou les conditions d'hygiène, ce qui limite son applicabilité généralisée. Cette limite méthodologique est d'autant plus importante à considérer dans des systèmes complexes et peu standardisés comme ceux prévalant à Madagascar [22].

Ce résultat ouvre la voie à une diffusion large de formulations locales adaptées, tout en stimulant la fabrication de provende sur place. Toutefois, le manque de matériel de granulation constitue un frein majeur, comme déjà constaté par FAO (2020) dans les zones rurales africaines [32].

5. CONCLUSION

L'étude conduite dans la région du Vakinankaratra a permis de confirmer l'hypothèse principale selon laquelle l'amélioration de la production laitière est fortement liée à la qualité et à la quantité des rations alimentaires, en particulier l'usage raisonné des concentrés. À travers l'enquête menée auprès de 200 éleveurs et l'analyse de 288 vaches, un modèle de régression multiple a été validé, avec un excellent ajustement statistique ($R^2 = 90{,}62\ \%$, $p < 0{,}001$), démontrant la fiabilité des variables explicatives : quantité de provende, race de vache, type d'aliment de base et mode de consommation.

Les résultats montrent que les vaches recevant des rations mixtes (« 2 en 1 ») et une provende adaptée produisent significativement plus de lait. Par exemple, les vaches de race pure avec une alimentation « jusqu'au refus » atteignent jusqu'à 34 litres/jour avec 10 kg de provende, tandis que celles non alimentées en concentrés plafonnent à 5 litres/jour. Cette variation confirme l'objectif de la recherche : identifier les meilleures combinaisons alimentaires pour maximiser les rendements.

Sur le plan opérationnel, l'étude recommande la fabrication locale de provende à base de matières premières disponibles sur place (maïs, son de riz, tourteaux). C'est l'intérêt de l'existence des deux prototypes de la provende correspondante et complémentaire aux apports nutritifs apportés par les aliments de base pour atteindre la production souhaitée. Cette stratégie est économiquement avantageuse (1 500 MGA/kg en moyenne) par rapport aux produits du commerce (2 400 MGA/kg). Toutefois, cette démarche nécessite un appui technique, notamment en équipement.

Dans ce contexte, la conception d'un pelletiseur à pédale, simple, robuste et accessible, est une solution prometteuse pour permettre aux petits producteurs de valoriser leurs matières premières tout en assurant la standardisation de la provende.

Enfin, des pistes de recherche futures sont nécessaires : des expérimentations contrôlées pour tester les effets des rations dans des conditions stabilisées, une analyse détaillée de la valeur nutritive des fourrages locaux, et la formulation économique de concentrés alternatifs. Un appui technique régulier et un accompagnement des éleveurs dans la planification alimentaire seront indispensables pour garantir des résultats durables et reproductibles.

RECONNAISSANCE

L'auteur remercie tout particulièrement l'Ecole Doctorale Sciences et Techniques de l'Ingénierie et de l'Innovation, Ecole Supérieure Polytechnique Anatananarivo, Université d'Antananarivo, ainsi que l'Institut Supérieur de Technologie d'Ambositra, dont le soutien institutionnel a été déterminant dans la réalisation de ce travail.

REFERENCE

[1] MAEP, UPDR, 2003, *Monographie de la région du Vakinankaratra*, Madagascar

[2] Rakotoarinosy O-M., 2012, *Diagnostic des entreprises de la filière lait, défis, opportunités et perspectives*, Mémoire d'ingénieur, Agro-management, Ecole supérieur des sciences agronomique, Université d'antananarivo, Madagascar. https://open-library.cirad.fr/files/4/2725__Rakotoarinosy_2012_Diagnostic_des_entreprises_de_la_filiere_lait.pdf

[3] FAO., 2025, *L'agriculture familiale en Afrique*, https://www.fao.org/family-farming/regions/africa/fr/, Consulté le 18/06/2025

[4] Sourisseau J.-M., Rasolofo P., Bélières J.-F., Guengant J.-P., Ramanitriniony H. K., Bourgeois R., Razafimiarantsoa T. T., Andrianantoandro V. T., Ramarijaona M., Burnod P., Rabeandriamaro H., & Bougnoux, N., 2016, *Diagnostic territorial de la région du Vakinankaratra à Madagascar*, CIRAD, France et Madagascar.

[5] Jarrige, R.,1988, *Alimentation des bovins, ovins et caprins*. INRA Editions.

[6] Sprumont J. 2009*, Alimentation du bovin laitier*, CODEART, Hombourg France.

[7] INRA, 2007., *Tables d'alimentation des bovins, ovins et caprins*., Chapitre sur les besoins d'entretien et de production et Ouvrage de référence pour les systèmes alimentaires des ruminants, Paris : Éditions Quae.

[8] Sauvant. D., Perez. J-M., Tran, G., 2004, *Tables de composition et de valeur nutritive des matières premières destinées aux animaux d'élevage*. INRA Editions.

[9] Faverdin P., Delagarde R., Delaby L., & Meschy, F.,2011, *"Feeding systems for dairy cows*: *INRA's update and perspectives*." INRA Productions Animales, vol. 24, n°3, 265–276.

[10] Rakotoarisoa, H. M., & Rasambainarivo, J. H. (2018). *Contraintes structurelles de l'élevage laitier dans les Hautes Terres malgaches*. Revue Malgache d'Agronomie, 14(1), 23–35.

[11] Randriamampianina, J. A., Rakotoarimanana, V. H., 2019, *Évaluation des systèmes d'alimentation des bovins laitiers dans les zones périurbaines d'Antananarivo*. Revue Malagasy de Sciences Agronomiques, 6(2), 45–55.

[12] CREAM, 2013, *Monographie du Vakinankaratra*, Centre de Recherches d'Études et d'Appui à l'Analyse Économique à Madagascar (CREAM), Antananarivo, Madagascar

[13] INSTAT & CREAM. 2013, *Monographie région Vakinankaratra* (p. 13–15). Antananarivo, Madagascar.

[14] INRA, 2018, *Tables de valeurs nutritionnelles des aliments pour les ruminants*. INRA éditions. Paris.

[15] Lesnoff, M. (2013). *Méthodes d'enquête pour l'estimation des taux démographiques des cheptels de ruminants domestiques tropicaux. Synthèse, limites et perspectives*. Revue d'élevage et de médecine vétérinaire des pays tropicaux, 66(2), Article 2. https://doi.org/10.19182/remvt.10142

[16] Guyader A., 2013, *Régression linéaire, cours de Master en statistique*, Université Rennes 2, France

[17] Azaïs, J.-M., & Bardet, J.-M., 2006, *Le modèle linéaire par l'exemple : Régression, analyse de la variance et plans d'expérience,* Toulouse, Dunod.

[18] Azaïs, J.-M., & Bardet, J.-M., 2012, *Le modèle linéaire par l'exemple : Régression, analyse de la variance et plans d'expérience* (2e éd.), Toulouse, Dunod.

[19] Bernard D., 2022, *Régression cours de la deuxième année du Master*, Université Rennes I, France

[20] Cornell J.A., 2002. *Experiments with Mixtures: Designs, Models, and the Analysis of Mixture Data*, John Wiley & Sons.

[21] Shuda.T., 2017, *Review of experimental design in analytical chemistry*, Indo American journal of pharmaceutical research, Vol. 7, 550-556

[22] Palm.R., 1988, *Les critère de validation des équations de régression linéaire,* Faculté des sciences agronomique, Gembloux, Belgique

[23] Djaalab I., 2018, *Nutrition des ruminant, Module d'alimentation, Polycopie pédagogique*, Institut des Sciences Vétérinaires, Algérie

[24] Sprumont J. 2009, *Alimentation du bovin laitier*, CODEART, Hombourg France.

[25] Goff, J. P., 2006., *Macromineral disorders of the transition cow*. Veterinary Clinics of North America : Food Animal Practice, 22(2), 235–249.

[26] Sauvant, D., Schmidely, P., & Baumont, R., 2007, *Alimentation des bovins, ovins et caprins*. INRA éditions.

[27] Gargouri, A., Hajji, H., & Buldgen, A, 2013, *Stratégies alimentaires pour améliorer la productivité laitière chez les ruminants en climat tropical*. Revue des Régions Arides, 32(1), 11–19.

[28] INRA, 1989., *Ruminant Nutrition: Recommended Allowances and Feed Tables*. Paris : INRA Editions.

[29] AOAC International. 2005. *Official Methods of Analysis (18th ed.)*. AOAC International, Gaithersburg, USA

[30] Randriatsiferana, H., Ralainirina, N., & Rakotondramanana, J., 2021, *Valeurs alimentaires des fourrages tropicaux à Madagascar*. Revue Malgache de Zootechnie, 12(2), 45–52.

[31] Rao, D. S., Ramesh, T., & Ramana, D. B. V., 2016, *Evaluation of rice bran and its potential as feed ingredient*. International Journal of Science, Environment and Technology, 5(4), 2206–2212.

[32] FAO., 2020, *L'agriculture familiale en Afrique*. www.fao.org

[33] FAO., 2021, *Valorisation des ressources locales pour l'alimentation des ruminants en Afrique de l'Est*, Organisation des Nations Unies pour l'Alimentation et l'Agriculture.

[34] Bertrand, S., Bastianelli, D., & Schmidely, P.,2019, *La formulation des aliments pour ruminants : principes et limites*. INRAE Productions Animales, 32(4), 291–302.

[35] Mertens D. R.,1994, *Regulation of forage intake*. In G. C. Fahey (Ed.), Forage Quality, Evaluation, and Utilization (pp. 450–493). Madison, WI : ASA, CSSA, SSSA.

[36] Delaby, L., Faverdin, P., Michel, G., Peyraud, J.-L.,2011, *Feeding strategies for dairy cows in a changing world*. INRA Productions Animales, 24(4), 363–372.

[37] Zebeli Q., Metzler B. U., 2012, *Diet-induced inflammation in dairy cattle*. Research in Veterinary Science, 93(4), 1099–1108.

[38] Rotz C. A., Buckmaster D. R., Mertens D. R., & Black J. R.,1989, DAFOSYM: *A dairy forage system model*. Journal of Dairy Science, 72(11), 3050–3063.

[39] Friggens N. C., Newbold J. R. (2007). *Towards a biological basis for predicting nutrient partitioning: the dairy cow as an example*. Animal, 1(1), 87–97.

[40] National Research Council (U.S.), 2003, *Guidelines for the Care and Use of Mammals in Neuroscience and Behavioral Research*, National Academies Press.