

Essais De Fabrication De Granulés De Provende Avec Un Pelletiseur A Pédales

[Tests On Manufacturing Animal Feed Pellets Using A Pedal-Operated Pelletizer]

HERIMANOA Rado Mihamina^{1,2}, RAZAIVAOVOLOLONIRINA Helinoro Diamondra², RAMAROSON Jean de Dieu³

^{1,3} Ecole Doctorale Sciences et Techniques de l'Ingénierie et de l'Innovation.
Ecole Supérieure Polytechnique d'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).



Résumé : Cette étude vise à modéliser et à prédire le rendement de production d'un pelletiseur de provende à pédales à partir de paramètres mécaniques et de formulation. Les variables étudiées incluent la vitesse de rotation de la matrice, la pression à appliquer, le taux d'humidité et le type de provende. Le dispositif expérimental comprend un plan factoriel complet avec 72 échantillons, testés à trois vitesses (80, 120 et 150 tr/min), deux taux d'humidité et trois niveaux de pression. L'analyse statistique, réalisée à l'aide du logiciel Minitab 18, a permis d'établir un modèle de régression multiple de forme : Les résultats montrent que la vitesse de rotation exerce l'influence la plus significative ($p < 0,001$) sur le rendement, avec un coefficient de détermination global $R^2 = 98,35 \%$, indiquant un excellent ajustement du modèle. La pression et l'humidité contribuent positivement mais de façon secondaire. Ces résultats confirment l'importance d'une optimisation conjointe des paramètres opératoires pour améliorer la performance du pelletiseur et la qualité des granulés produits.

Mots clés : Pelletiseur de provende, Rendement de production, Régression linéaire, Pression

Abstract: This study aimed to model and predict the production yield of a pedal-operated feed pelletizer based on mechanical and formulation parameters. The variables studied included the rotation speed, the application pressure, the moisture content, and the feed type. The experimental design included a full factorial design with 72 samples, tested at three speeds (80, 120, and 150 rpm), two moisture contents, and three pressure levels. Statistical analysis, performed using Minitab 18 software, established a multiple regression model of the form:

$$Y_{\chi} = 1,7837 + 1,6432 x_1 + 0,1691 x_2^b + 0,8508 x_3^b + 0,5918 x_4^b + 1,0742 x_4^c + \xi$$

The results showed that rotational speed exerted the most significant influence ($p < 0.001$) on yield, with an overall coefficient of determination $R^2 = 98.35\%$, indicating an excellent fit for the model. Pressure and humidity contributed positively but in a secondary manner. These results confirm the importance of jointly optimizing operating parameters to improve the performance of the pelletizer and the quality of the pellets produced.

Keywords: Feed pelletizer, Production yield, Linear regression, Pressure

I. INTRODUCTION

Dans les pays en développement, la granulation des sous-produits agricoles constitue une solution durable pour réduire les coûts d'alimentation animale et améliorer la conservation des nutriments [1]. Le processus de pelletisation, bien maîtrisé industriellement, reste encore peu optimisé dans les systèmes artisanaux à pédale. Le rendement dépend en générale de la vitesse, de la pression, le type du mélange et de l'humidité du mélange [2], [3]. Cependant, peu d'études ont analysé l'effet combiné de ces paramètres dans la fabrication artisanale de provende à petite échelle.

Le problème central réside dans la difficulté à identifier les conditions opératoires optimales permettant de maximiser la productivité sans compromettre la qualité du granulé.

L'objectif de cette démarche est de déterminer les paramètres optimaux de production de granulés de provendes avec un pelletiseur à pédales. Pour y parvenir, cela engendre deux objectifs spécifiques : développer un modèle de régression linéaire multiple capable de donner le rendement de production du pelletiseur à pédale et d'en déduire les paramètres optimaux en fonction de quatre variables clés. Ces objectifs nous amènent à formuler trois hypothèses principales. La première indique que la vitesse de rotation exerce une influence significative sur le rendement. La seconde stipule que la pression et l'humidité contribuent positivement mais secondaire. Et selon la dernière hypothèse, le type de provende n'a qu'un effet marginal sur la performance globale.

II. MATERIELS ET METHODES

II.1. Objectif expérimental

L'objectif expérimental de l'étude est de déterminer le rendement de production $Y(kg)$ de granulés produits par heure d'un pelletiseur de provende à pédales [4].

II.2. Matériels utilisés

Pelletiseur à pédales : Un pelletiseur à pédales (construction locale) dont la vitesse maximale possible de rotation de la matrice est de 200 tours par minute (tr/min) a été utilisé, le diamètre de la matrice donnant 196 centimètre (cm) à une épaisseur de 2 cm. Le diamètre du trou de la matrice est fixé à 6 millimètres (mm).

Balance de précision : Une balance de précision de 1 g avec une capacité maximale de 10 kg est employé pour assurer le pesage.

Four électrique : pour déterminer l'humidité (méthode AOAC pour humidité) [5].

Tamiseuse : pour contrôler la granulométrie des ingrédients (ouverture des mailles : 1, 2, 4 mm).

Capteur de vitesse de rotation : adapté à l'axe (pour mesurer la cadence du pédalage en tr/min).

Chronomètre : pour mesurer le temps d'essai.

Récipients gradués : pour déterminer le volume des granulés pour une masse donnée.

II.3. Matière d'œuvre

Selon l'étude, la matière d'œuvre est composée de deux formulations de provende proposées par HERIMANO Rado Mihamina dans l'article « *Approche intégrée de formulation de provende et prédiction du rendement laitier par régression multiple* » [6]. Les Tableau 1 et le Tableau 2 suivants montrent ces formulations [6].

Tableau 1 : 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%	0,23	36,26	34,17	0,28	5,23	348,65	0,35
Tourteau de soja huile 5à20%	0,29	73,79	50,73	0,44	1,04	553,42	0,23
Solution pour 1 kg de provende	0,99	134,87	119,40	0,84	7,40	1 533,20	1,00

Tableau 2 : 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	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%	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
Solution pour 1 kg de provende	0,99	148,28	119,40	0,72	7,37	1 500	1

Les différences entre ces deux formules résident dans la proportion de matières premières et de tourteaux utilisés, et dans le fait que la première formule utilise du tourteau de soja tandis que la seconde utilise du tourteau d'arachide.

II.4. Echantillonnages

La préparation d'échantillonnage est élaborée comme la Tableau 3 suivante indique.

Tableau 3 : Plan d'échantillonnage

Type de provende (formulation)			Provende Type1						Provende Type 2					
Taux d'humidité			H1			H2			H1			H2		
Pression entre matrice et rouleau			P1	P2	P3	P1	P2	P3	P1	P2	P3	P1	P2	P3
Vitesse de rotation de la matrice en rotation par minute	R1	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	24
	R2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	24
	R3	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	24
			6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	72

D'après ce plan, nous avons les échantillons suivants :

Type de provende	Taux d'humidité
– 36 échantillons pour le type 1	– 36 échantillons pour le H1
– 36 échantillons pour le type 2	– 36 échantillons pour le H2
Pression entre matrice et rouleau	Vitesse de rotation de la matrice
– 24 échantillons pour le P1	– 24 échantillons pour le R1
– 24 échantillons pour le P2	– 24 échantillons pour le R2
– 24 échantillons pour le P3	– 24 échantillons pour le R3

Les deux types de provende jouent le rôle de la structure et de la taille des particules de chaque matière pour démontrer leurs effets. Le choix du taux d'humidité a pour but de démontrer son effet sur le rendement de production. Ici nous essayons H1 = 10 % du poids du mélange et H2 = 15 % [7].

La pression entre la matrice et le rouleau presseur a été fixée conformément aux normes de granulation recommandées par la littérature technique [8], [9]. Trois niveaux distincts ont été considérés : $P_1 = 5$ Méga Pascal (MPa), $P_2 = 10$ MPa et $P_3 = 15$ MPa. Ces valeurs ont été déterminées à partir d'un ressort de compression de raideur $k = 1$ kilonewton par mètre (kN/m), équivalente à 10 kilogrammes force par centimètre (kgf/cm), agissant sur l'axe du rouleau. La détermination de la pression repose sur l'application du théorème de Hertz relatif au contact cylindre-plan, largement utilisé pour modéliser les pressions locales dans les machines à granuler [7], [10], [11], [12].

Les essais sont réalisés avec les trois vitesses de rotation de la matrice suivantes : $R_1 = 80$ tr/min, $R_2 = 120$ tr/min, $R_3 = 150$ tr/min [13].

II.5. Description et préparation de l'échantillonnage

D'après ce plan, nous avons deux formulations différentes avec les taux d'humidité respectifs H1 et H2. Les matières d'œuvre sont préparées comme suit : chaque échantillonnage se fait à 10 kg par essai pour commencer. A partir du premier essai, la masse de l'échantillon est ajusté légèrement augmentée par rapport au premier résultat pour chaque essai qui suit sur les variables pression et vitesse afin de gérer bien la coté financière. Le Tableau 4 suivant illustre la masse théorique des échantillons utilisés.

Tableau 4 : Masse théorique en (kg) de chaque échantillon utilisé

Echantillonnage en kg													
Type de provende (formulation)		Provende Type1						Provende Type 2					
Taux d'humidité		H1			H2			H1			H2		
Pression entre matrice et rouleau		P1	P2	P3	P1	P2	P3	P1	P2	P3	P1	P2	P3
Vitesse de rotation de la matrice en rotations par minute	R1	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20
	R2	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20
	R3	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20
Total (en kg)		60	60	60	60	60	60	60	60	60	60	60	720

II.6. Collecte des données

Les paramètres des essais suivants sont tous réglés et posés avant les essais : humidité de l'échantillon, formulation de la provende, pression entre matrice et rouleau. Il suffit de régler la cadence du pédalage pour avoir la vitesse d'essai et introduire la matière d'œuvre, chronométrer le temps d'essai, et enfin peser les granulés obtenus. Le Tableau 5 suivant est employé pour l'enregistrement de chaque résultat des essais.

Tableau 5 : Tableau d'enregistrement du résultat de l'essai

Tableau de résultat d'essai												
Type de provende (formulation)		Provende Type1						Provende Type 2				
Taux d'humidité		H1			H2			H1			H2	
Pression entre matrice et rouleau		P1	P2	P3	P1	P2	P3	P1	P2	P3	P1	P2
Vitesse de rotation de la matrice en rotations par minute	R1											
	R2											
	R3											
Total (en kg)												

II.7. Rendement de production en kg/h

Les rendements de production ont été calculés en utilisant l'équation 1[2].

$$RP \text{ (kg/h)} = \frac{M_p}{T} \times 60 \quad (1)$$

RP (kg/h) est le rendement massique horaire du granulé, **M_p** représente la masse totale de granulés produits (kg). **T** est la durée d'essai effective de production en minute.

II.8. Modélisation du rendement de production

II.8.1. Analyse statistique

Les données obtenues pendant les essais ont été enregistrées dans le tableau d'enregistrement (Tableau 5) et puis introduites dans un tableur « Microsoft Excel 2013 » pour arrangement selon le plan d'échantillonnage.

Une analyse statistique descriptive des différentes variables a été effectuée avec le logiciel « Excel 2013 ». L'analyse de correspondance multiple, ainsi que des tests de corrélation entre le rendement de production, le taux d'humidité, la vitesse de rotation de la matrice, la pression et le type de provende à partir de l'analyse des composantes principales ont été réalisés avec le logiciel « R ». L'analyse de régression et de variance (ANOVA) a été effectuée avec le logiciel « Minitab ».

II.8.2. Modèle de régression

L'objectif de cette étude est de modéliser le rendement de production (RP) en fonction de plusieurs facteurs explicatifs liés aux caractéristiques mécaniques de la machine et aux caractéristiques du mélange de la matière d'œuvre.

Les variables explicatives prises en compte incluent :

a. Variable dépendante (réponse à prédire)

- Y_1 : Rendement massique : C'est le rendement de production (RP) du pelletiseur en (kg/h)

b. Variables indépendantes prévues pour la régression

- X_1 : Vitesse de rotation (VIT) : c'est la vitesse de rotation par minute de la matrice contenant trois modalités : Rotation 1(R1), Rotation 2 (R2), Rotation 3 (R3). Cette rotation est mesurée par un capteur de vitesse fixé à l'arbre horizontal du pignon conique.
- X_2 : Taux d'humidité (TH) : c'est la teneur en humidité de la matière première (%) contenant deux modalités H1 et H2, ce taux est obtenu en ajoutant de l'eau fraîche après un test d'humidité du mélange par une méthode gravimétrique.
- X_3 : Type de provende (TP) : Il s'agit des deux types de provende issus d'une étude de formulation par Herimanoa (type 1 et type 2 selon la formulation) [6].
- X_4 : Pression (Pres) : C'est la pression entre rouleau et matrice contenant trois modalités : P1, P2 et P3, mesurée pratiquement sur place en kgf à l'aide d'un ressort de compression.

c. Paramètres constants exclus dans le modèle

- Taille moyenne des particules ($\leq 2\text{mm}$) après tamisage.
- Diamètre des trous de la matrice (mm), caractéristique fixe à 6mm. [4].
- Le temps d'essai reste constant avec une valeur de 5 minutes par échantillon.

Les valeurs des rendements de production obtenues à partir des expérimentations ont été soumises à l'analyse de régression multiple en utilisant le logiciel Minitab.

II.8.2.1. Modèle de régression simple

Pour Montgomery et al., 2021, la situation de régression linéaire simple se produit lorsque deux variables X et Y sont mesurées sur n sujets. Les données se composent de n couples d'observations $(x_1 \text{ et } y_1), \dots, (x_n, y_n)$ qui sont des réalisations de couples de variables aléatoires (X_i, Y_i) où $i = 1, \dots, n$. Par souci de simplicité, et sans perte de généralité, on considère que les variables X_i et Y_i ont des moyennes nulles, $\mu_x = \mu_y = 0$. Ainsi, on considère un modèle de régression linéaire simple décrit par l'équation suivante [4], [14], [15]. :

$$Y_i = \beta X_i + \epsilon_i, i = 1, \dots, n. \quad (2)$$

Pour Guyader (2013), un modèle de régression linéaire simple est défini par une équation de la forme :

$$\forall i \in \{1, \dots, n\} y_i = \beta_1 + \beta_2 X_i + \epsilon_i \quad (3)$$

Les quantités ϵ_i viennent du fait que les points ne sont jamais parfaitement alignés sur une droite. On les appelle les erreurs (ou bruits) et elles sont supposées aléatoires [16].

Dans cette étude, pour prédire le rendement de production à chaque unité de variable concernée, la régression simple a été utilisée. Pour cela, le modèle de régression simple utilisé est écrit comme suit [16].

$$Y_i = \beta_0 + \beta_1 X_i + \epsilon_i \quad (4)$$

Où Y_i représente la valeur générale de la réponse. Ici, c'est le rendement de production de fabrication de la provende en kg/h en fonction d'une variable dépendante. β_0 est la constante du modèle ; elle indique la valeur moyenne du rendement. β_1 est le coefficient de régression. X_i correspond à la variable explicative indépendante, et ϵ_i est l'erreur aléatoire.

Vérification de la fiabilité du modèle : Pour évaluer la fiabilité du modèle de régression linéaire, plusieurs tests statistiques ont été appliqués : le test de Student pour la significativité du coefficient, le coefficient de détermination R^2 pour la qualité d'ajustement, et le test de Fisher pour la validité globale du modèle. L'analyse des résidus a permis de vérifier la normalité, l'homoscédasticité et l'indépendance des erreurs [4], [17], [18], [15].

II.8.2.2. Modèle de régression multiple

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 :

$$y_i = \beta_1 X_{i1} + \beta_2 X_{i2} + \dots + \beta_p X_{ip} + \epsilon_i, \quad i = 1, \dots, n \quad (5)$$

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 [19].

$$y_i = \beta_0 + \beta_1 X_{i1} + \beta_2 X_{i2} + \dots + \beta_p X_{ip} + \epsilon_i, \quad i = 1, \dots, n \quad (6)$$

Dans cette expérimentation, les quatre variables indépendantes utilisées dans ce modèle sont la vitesse de rotation de la matrice (VIT), le taux d'humidité du mélange de provende (TH), la pression entre matrice et rouleau (Pres) et le type de provende (TP), et cette variable contient chaque modalité. Le modèle de régression complet est donné par l'équation 6 suivante [20] :

$$Y\chi = \beta_0 + \beta_1 x_1 + \beta_2^{(1)} x_2^a + \beta_2^{(2)} x_2^b + \beta_3^{(1)} x_3^a + \beta_3^{(2)} x_3^b + \beta_4^{(1)} x_4^a + \beta_4^{(2)} x_4^b + \beta_4^{(3)} x_4^c + \epsilon \quad (7)$$

La variable $Y\chi$ représente la variable dépendante du modèle, c'est-à-dire celle que l'on cherche à prédire à partir des variables indépendantes.

Dans le cadre d'une modélisation statistique, $Y\chi$ est considérée comme la variable de réponse dont la valeur dépend de l'influence combinée de plusieurs facteurs expérimentaux [17], [18].

Les variables x_i désignent les termes linéaires des quatre composantes du modèle, à savoir : (1) la vitesse de rotation par minute de la matrice, (2) le type de la provende, (3) le taux d'humidité de provende, et (4) la pression appliquée entre la matrice et le rouleau presseur. Les exposants (a, b, c) associés aux termes x_i différencient les modalités de chaque facteur expérimental, tandis que les coefficients β_i représentent les paramètres du modèle à estimer. Chaque coefficient β_i traduit l'effet marginal d'une variation unitaire de la variable x_i sur la variable de réponse Y_x , en maintenant constantes toutes les autres variables du modèle [14], [15]. L'exposant entre parenthèses du coefficient β_i indique la contribution relative de chaque facteur à la variation totale du rendement. [21], [17].

II.8.3. Analyse des résultats et teste de fiabilité du modèle

La fiabilité et la validité de l'équation de régression linéaire ont été vérifiées à l'aide de plusieurs tests statistiques standards. Ces tests permettent de confirmer l'adéquation du modèle aux données expérimentales et la significativité des relations entre la variable dépendante Y_x et les variables explicatives x_i .

Coefficient de détermination (R^2) : Le coefficient de détermination (R^2) mesure la part de la variance totale de Y_x expliquée par le modèle. Un R^2 proche de 1 ou 100% indique que le modèle explique une grande partie de la variation du rendement, traduisant une bonne fiabilité [22].

Coefficient de détermination ajusté (R^2 ajusté) : Le R^2 ajusté corrige le R^2 en tenant compte du nombre de variables explicatives et de la taille de l'échantillon. Contrairement au R^2 classique, le R^2 ajusté diminue si l'ajout d'une variable non pertinente n'améliore pas la qualité du modèle. Il est donc un indicateur plus fiable de la performance réelle du modèle [17].

Coefficient de détermination prévisionnel (R^2 prévisionnel) : Le R^2 prévisionnel (ou R^2 prédictif) évalue la capacité du modèle à prédire de nouvelles observations non utilisées dans l'ajustement. Un R^2 prévisionnel élevé indique que le modèle possède une bonne capacité de généralisation [18].

Somme des carrés de l'erreur de prédiction (PRESS) : La PRESS (Prediction Error Sum of Squares) est définie comme la somme des carrés des différences entre les valeurs observées et les valeurs prédites par le modèle lors d'une validation croisée. Une valeur faible de PRESS indique une bonne stabilité du modèle [23].

II.9. Optimisation

Le logiciel Minitab ® 18.1 fournit l'outil 'optimisation des réponses' permettant de les optimiser à partir des modèles prévisionnels sous-jacents.

En fixant une limite minimum et une valeur cible du rendement, le logiciel cherche la valeur optimale et fournit également les conditions nécessaires à son obtention (la valeur de la vitesse de rotation idéal, le taux d'humidité optimal, la pression et le type de provende convenable).

II.10. Caractérisation du granulé fabriqué

II.10.1. Taux d'humidité et temps de séchage (H%)

Pour chaque type de granulé obtenu, un échantillon de 100g (M_1) a été prélevé. Les granulés ont ensuite été séchés au soleil puis pesés (M_2). La formule du taux d'humidité est donnée comme suit [2] :

$$H(\%) = \frac{(M_1 - M_2)}{M_1} \times 100 \quad (8)$$

II.10.2. Masse volumique apparente (ρ)

La masse volumique du granulé joue un rôle essentiel dans les opérations de stockage, d'emballage et de transport avec une valeur attendue de 600 à 800 kg/m³ [9]. Elle a été déterminée en mesurant la masse d'un échantillon de granulé ($M(g)$) contenue dans un volume ($V(\text{cm}^3)$) connu, selon la formule suivante :

$$\rho = \frac{M}{V} \quad (9)$$

II.10.3. Durabilité mécanique (PDI – Pellet Durability Index)

La durabilité mécanique des granulés, exprimée par l'indice de durabilité des pellets (PDI – *Pellet Durability Index*), permet d'évaluer leur résistance à l'abrasion et à la casse. Pour ce test, un échantillon de 250 g de granulés est placé dans un tambour rotatif tournant à une vitesse de 50 tours par minute pendant 5 minutes, conformément à la norme ASAE S269.4. [24]. Après la rotation, les granulés sont tamisés afin de séparer les particules fines. Le PDI est ensuite calculé à partir de la masse finale (M_f) après test et la masse initiale (M_i) selon la formule correspondante. Selon [2], une valeur de PDI supérieure à 95 % indique une bonne qualité de granulés.

$$PDI(\%) = \frac{M_f}{M_i} \times 100 \quad (10)$$

II.10.4. Teneur en fines (%F)

Le test de la teneur en fines (%F) a pour objectif de quantifier la proportion de particules cassées présentes dans les granulés. Pour cela, un échantillon de 100 g est tamisé à l'aide d'un tamis à mailles de 1 mm afin de séparer les fines des granulés intacts. La teneur en fines est ensuite calculée à partir de la masse des fines (M_f) et de la masse totale de l'échantillon (M_t) selon la formule correspondante. Selon Gilpin et al. (2002), un granulé de bonne qualité doit présenter une teneur en fines inférieure à 1 % [25].

$$F(\%) = \frac{M_f}{M_t} \times 100 \quad (11)$$

III. RESULTATS

III.1. Rendement de production de granulé

Les résultats des 36 essais (à 2 répétitions) sont présentés dans le tableau 6. Le rendement varie de $40,6 \pm 0,84\%$ à $109,37 \pm 1,94\%$. Cette large variation est principalement due aux variations ascendantes de la vitesse de rotation de la matrice et de la pression appliquée.

Tableau 6 : Rendement de production (RP) en fonction de la vitesse de rotation, la pression, le type de provende et de l'humidité

Essai	VIT (tr/mn)	TP	TH (%)	Pres (kgf)	Répétition	RP Moyenne (kg/h)	Ecart type
1	80	Provende T1	10	5	2	40,6	0,84852814
2	80	Provende T1	10	10	2	46,85	1,34350288
3	80	Provende T1	10	15	2	54,56	0,62225397
4	80	Provende T1	15	5	2	51,5	1,76776695
5	80	Provende T1	15	10	2	58,95	0,08485281
6	80	Provende T1	15	15	2	64,655	0,60104076
7	80	Provende T2	10	5	2	44,79	0,29698485
8	80	Provende T2	10	10	2	55,775	0,53033009
9	80	Provende T2	10	15	2	60,365	0,19091883
10	80	Provende T2	15	5	2	55,525	0,31819805
11	80	Provende T2	15	10	2	60,5	0,70710678
12	80	Provende T2	15	15	2	63,06	0,08485281
13	120	Provende T1	10	5	2	61,6	0,56568542
14	120	Provende T1	10	10	2	66,76	0,33941125
15	120	Provende T1	10	15	2	71,5	0,70710678
16	120	Provende T1	15	5	2	71,125	0,1767767
17	120	Provende T1	15	10	2	76,28	1,01823376
18	120	Provende T1	15	15	2	80,605	0,55861436
19	120	Provende T2	10	5	2	61	0
20	120	Provende T2	10	10	2	67,25	0,35355339
21	120	Provende T2	10	15	2	74,9	0,14142136
22	120	Provende T2	15	5	2	71,56	0,62225397
23	120	Provende T2	15	10	2	77,825	0,45961941
24	120	Provende T2	15	15	2	82,55	0,77781746
25	150	Provende T1	10	5	2	80,74	0,69296465
26	150	Provende T1	10	10	2	88,4	0,84852814
27	150	Provende T1	10	15	2	92,125	0,1767767
28	150	Provende T1	15	5	2	92,285	1,0111627
29	150	Provende T1	15	10	2	99,425	0,60104076
30	150	Provende T1	15	15	2	109	2,82842712
31	150	Provende T2	10	5	2	81	0
32	150	Provende T2	10	10	2	89,625	0,53033009
33	150	Provende T2	10	15	2	95,5	0,70710678
34	150	Provende T2	15	5	2	91,79	0,29698485
35	150	Provende T2	15	10	2	101,1	0,14142136
36	150	Provende T2	15	15	2	109,375	1,94454365

VIT : vitesse de rotation de la matrice (en tr/mn), TP : type de provende, TH : taux d'humidité (en %), Pres : pression du rouleau (en kgf), RP : rendement de production (en kg/h).

Les résultats expérimentaux montrent que le rendement de production (RP) du pelletiseur augmente avec la vitesse de rotation (VIT), la teneur en humidité (TH) et la pression de compactage (Pres).

À 150 tr/min, les rendements culminants atteignent environ 109 kg/h, contre seulement 40,6 kg/h à 80 tr/min.

La provende T2 présente des performances légèrement supérieures à la T1, suggérant une meilleure cohésion du mélange. L'augmentation du taux d'humidité et de la pression améliore également le résultat et donc le flux de sortie.

III.1.1. Influence de la vitesse de rotation, de la pression et de l'humidité sur le rendement de production des granulés

L'augmentation de la vitesse de rotation (VIT) exerce une influence significative sur le rendement de production (RP) des granulés. Les résultats montrent que le RP croît proportionnellement à la vitesse : de 40,6 kg/h à 80 tr/min, il atteint plus de 109 kg/h à 150 tr/min. Cette amélioration traduit une meilleure compaction et un débit accru de matière à travers la filière. Parallèlement, l'élévation de la pression (Pres = 5 à 15 kgf) favorise la densification du mélange, augmentant la cohésion des granulés. Enfin, une humidité modérée (10 à 15 %) optimise la plasticité du mélange, réduisant les pertes et améliorant la fluidité, d'où un rendement maximal observé à haute vitesse et humidité contrôlée.

III.2. Régression linéaire simple du rendement de production

Le graphique de régression (Fig. 1-1) montre une relation linéaire positive entre la vitesse de rotation (VIT) et le rendement de production (RP), selon l'équation : $RP = 8,745 + 0,5561 \text{ VIT}$. Le coefficient de détermination ($R^2 = 76,6 \%$) indique que la vitesse explique largement la variation du rendement. L'augmentation de la vitesse améliore significativement l'efficacité de granulation. Les intervalles de confiance et de prédiction à 95 % confirment la fiabilité du modèle, soulignant l'importance d'un réglage optimal de la vitesse pour maximiser la production.

La Fig 1-2. ci-dessous montre la relation entre le type de provende (TP) et le rendement de production (RP) selon l'équation : $RP = 70,58 + 2.029 \text{ TP}$. Le coefficient de détermination très faible ($R^2 = 0,3 \%$) indique que le type de provende n'a qu'une influence négligeable sur le rendement. Les points sont dispersés sans tendance claire, et la pente presque nulle confirme l'absence de corrélation significative.

Le graphique de régression (Fig 1-3) ci-dessous illustre la relation entre le taux d'humidité (TH) et le rendement de production (RP), décrite par l'équation : $RP = 48,10 + 2.042 \text{ TH}$. Le coefficient de détermination ($R^2 = 8,2 \%$) montre une influence faible mais existante de l'humidité sur le rendement. La pente positive indique qu'une élévation de l'humidité améliore légèrement la productivité, probablement en favorisant la plastification et la cohésion du mélange lors de la granulation.

Toutefois, la dispersion des points et la valeur modérée du R^2 suggèrent que l'humidité n'est pas le facteur dominant ; son effet reste secondaire par rapport à la vitesse de rotation qui influence davantage le rendement global.

Le Fig 1-4. montre la relation entre la pression (Pres) et le rendement de production (RP) selon l'équation : $RP = 60,73 + 1,289 \text{ Pres}$. La pente positive indique qu'une augmentation de la pression entraîne une légère hausse du rendement. Cependant, la faible valeur du coefficient de détermination ($R^2 = 8,7 \%$) révèle que la pression n'explique qu'une faible part de la variabilité du rendement, ce qui suggère l'influence d'autres facteurs (vitesse, humidité, type de provende).

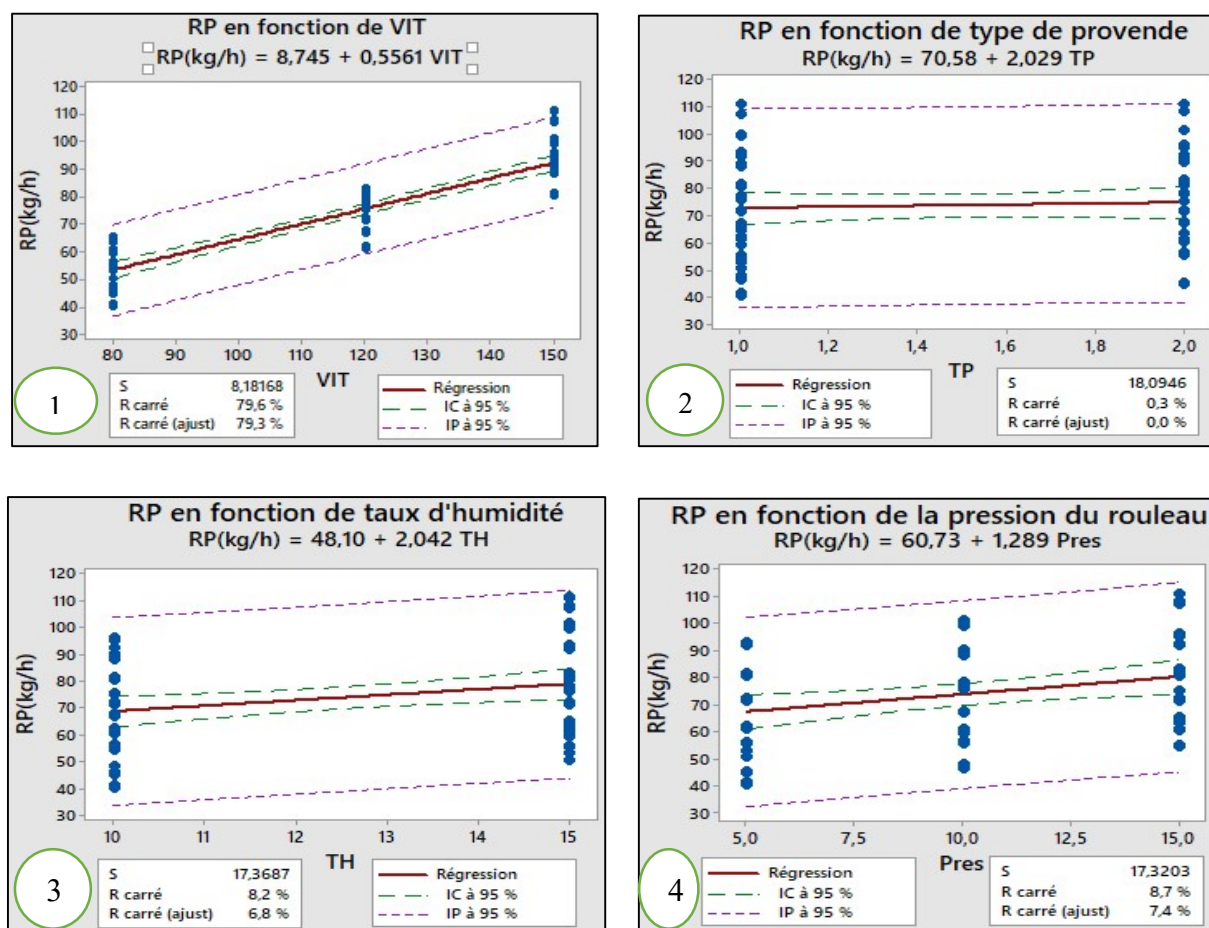


Figure 1 : Régression linéaire du RP

III.3. Régression linéaire multiple du rendement de production

III.3.1. Validation du modèle

Les résultats donnés dans le Tableau 7 ont démontré la validité du modèle (7) qui a été très significatif d'après la valeur de la probabilité ($p \leq 0,001$) et la valeur élevée du coefficient F (786,35) [26]. Les coefficients de détermination R^2 proches de 100% (98,35%), R^2 ajusté de 98,22% et R^2 prévisionnel de 98,03%, et la faible valeur de S (0,199853) indiquent l'exactitude du modèle par rapport aux données expérimentales [27]. De plus, la faible valeur de la PRESS (3,14) signifie que le modèle prévisionnel peut être utilisé pour l'optimisation du rendement [28]. Ces valeurs suggèrent un excellent ajustement au modèle mathématique, et les données prévues pourraient raisonnablement représenter les données expérimentales.

La probabilité non significative du manque d'ajustement à $p < 0,05$ indique que le modèle est perfectible mais qu'il offre déjà une base solide pour la prédiction et l'optimisation de la production [29]. Les coefficients du modèle de régression sont donnés dans le Tableau 8.

Tableau 7 : Indicateur de performance du modèle de régression

	F	P du modèle	R ²	R ² ajusté	R ² prévisionnel	Manque d'ajustement	S	PESS
Valeur	786,35	<0,001	98,35%	98,22%	98,03%	P=0,000	0,2	3,14

Tableau 8 : Coefficient du modèle de régression

Terme de régression	Modalité du terme	Coeff	Valeur de p
Constante	-	1,7837	<0,0001
VIT	-	1,6432	<0,0001
TP	Type 1	0,0	-
	Type 2	0,1691	0,001
TH	TH 1	0,0	-
	TH 2	0,8508	<0,0001
Press	Pres 1	0,0	-
	Pres 2	0,5918	<0,0001
	Pres 3	1,0742	<0,0001

D'après le Tableau 8, les quatre termes du modèle sont tous significatifs ($p < 0,001$), même si les terme TP de la modalité Type1, le terme TH de la modalité TH1, et le terme Pres de la modalité Pres1 demeurent 0. Ces composantes étaient considérées comme une valeur de référence dans le modèle.

III.3.2. Modèle validé

Le modèle validé est donné par la régression ci-dessous en tenant compte des résultats du test ANOVA pour chaque terme de régression.

$$Y_{\chi} = 1,7837 + 1,6432 x_1 + 0,1691 x_2^b + 0,8508 x_3^b + 0,5918 x_4^b + 1,0742 x_4^c + \xi \quad (12)$$

Où x_1 est la vitesse de rotation, x_2^b : le type de provende 2, x_3^b : le taux d'humidité 2, x_4^b : la pression 2 et x_4^c : la pression 3.

L'équation Y_{χ} montre que la vitesse de rotation (X_1) est le facteur le plus influent sur le rendement de production de provende : une augmentation d'une unité de vitesse accroît en moyenne le rendement de 1,6432 unité.

Les effets positifs mais des valeurs moyennes de l'humidité et de la pression indiquent qu'un réglage combiné (vitesse + conditionnement + pression) optimise la compaction et la cohésion des granulés, améliorant ainsi le débit de production [30], [31], [1].

D'un autre côté, le faible coefficient associé au type de provende (0,1691) indique que le rendement de production est peu influencé par la formulation de la provende. Le terme d'erreur ξ capte la variabilité non expliquée et suggère d'explorer d'éventuelles interactions ou termes non linéaires.

III.3.3. Interprétation des variables

a. Analyse en Composantes Principales (ACP)

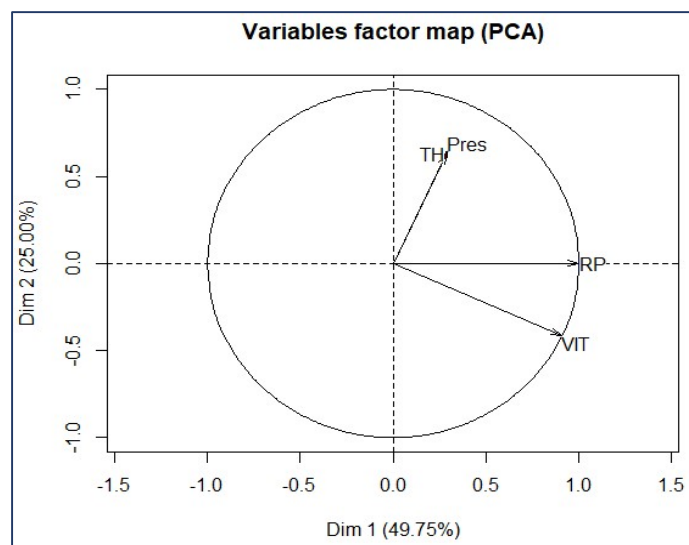


Figure 5 : Cercle de corrélation des variables du modèle

Le cercle de corrélation met en évidence les relations entre les variables influençant le rendement de production (RP). La variable VIT (vitesse) est fortement corrélée à RP, leurs vecteurs étant presque superposés dans la même direction sur la première dimension (Dim 1 = 49,75 %). Cela indique que l'augmentation de la vitesse de rotation du pelletiseur entraîne une amélioration du rendement de production. En revanche, les variables TH (taux d'humidité) et Pres (pression) sont faiblement corrélées à RP, car leurs vecteurs sont courts et orientés différemment. Cela signifie qu'elles influencent peu directement le rendement. Globalement, la **vitesse** est le facteur principal expliquant la variabilité du rendement, tandis que la pression et l'humidité jouent un rôle secondaire mais complémentaire.

III.3.4. Optimisation du rendement de production

L'optimiseur propose, pour une vitesse de rotation de 150 tr/min, une humidité de 15 %, une pression de 15 MPa et une provende de type 2, prédisant un RP ajusté de 104,5057 kg/h pour une cible de 110 kg/h. La limite inférieure du rendement a été fixée à 40 kg/h. La désirabilité composite de 0,921 indique une solution proche de l'objectif idéal (1). L'IC de 95 % (102,527-106,484) montre une estimation précise et l'IP de 95 % (97,557-11,445) intègre la variabilité individuelle et confirme que des valeurs proches du but (110 kg/h) sont probables.

En pratique, la solution est robuste mais légèrement inférieure à la cible maximale ; une expérimentation de validation et l'exploration des interactions non linéaires sont recommandées pour confirmer l'amélioration et éviter le risque de surchauffe ou de dégradation du granulé.



Figure 6 : Optimisation du rendement de production

III.4. Qualité du granulé obtenue

Tableau 9 : Évaluation de la qualité physique des granulés de provende après séchage

Paramètre	Valeur obtenue	Norme / Référence	Conformité	Interprétation scientifique
Taux d'humidité	Temps de séchage = 5 à 7 heures ensoleillées à 20 à 30°C	Humidité optimale : 8-12 % [2]	Humidité obtenue : 11,2%	L'humidité initiale des matières d'œuvre = 11,4 %, ce qui signifie que le séchage permet l'élimination de la quantité d'eau ajoutée au moment du mélange (10 et 15 % du poids de la matière première).
Masse volumique apparente (ρ)	674,50 kg/m ³	600-800 kg/m ³ [9]	Légèrement supérieure au seuil	Une densité moins élevée pourrait faciliter le transport, mais peut nuire à la qualité au niveau de la durabilité mécanique. Cette valeur peut être due à une compression insuffisante lors de la granulation.
Durabilité mécanique (PDI)	91 %	>95 % [32]	Non conforme	PDI faible indique une résistance insuffisante aux manipulations. Causes possibles : humidité trop élevée, vitesse de rotation inadaptée, pression insuffisante.
Taille moyenne (Dg)	Diamètre 5,8 mm, hauteur variable plus 3 mm	Diamètre 4-6 mm [33]	Conforme	Le diamètre est dans la norme, ce qui garantit une bonne ingestion par les bovins. La longueur semble un peu grande, mais dépend du type de matrice utilisé.
Teneur en fines (F)	8 %	<1 % [25]	Non conforme	Cette teneur élevée est due à un ajustage non parfait entre la matrice et le corps de la chambre de granulation (problème mécanique).

IV. DISCUSSIONS

IV.1. Influence de la vitesse de rotation, de la pression et de l'humidité sur le rendement de production du granulé

Les résultats montrent une nette influence de la vitesse de rotation (VIT), de la pression (TP) et du taux d'humidité (TH) sur le rendement de production (RP). La forte corrélation entre la vitesse et le rendement confirme les observations de Thomas et Van der Poel (2020), selon lesquelles une vitesse élevée augmente la friction et la température, favorisant la plastification et la cohésion des

particules [2]. L'interaction entre pression et humidité améliore aussi la densification, comme l'ont démontré Kaliyan et Morey (2009) [9]. Toutefois, la variabilité du RP à haute vitesse pourrait traduire une perte d'efficacité énergétique et un risque de surchauffe entraînant la dégradation des nutriments [33].

Ces résultats ouvrent la voie à une optimisation multiparamétrique du procédé pour maximiser la production tout en maintenant la qualité du granulé, notamment en ajustant la teneur en eau pour chaque type de provende [3]. Une pression ou une humidité excessive peut causer des bourrages ou un collage de la matrice, réduisant la durabilité du système.

De l'autre côté, les performances du pelletiseur à pédale, atteignant un rendement maximal de 109 kg/h à 150 tr/min, restent inférieures à celles des pelletiseurs électromécaniques de même capacité, dont le débit peut atteindre 200 à 400 kg/h selon la puissance du moteur [9]. Cependant, cette différence s'explique par la nature même du système : le modèle à pédale repose sur une source d'énergie humaine, donc limitée en puissance mécanique, mais avantageuse en termes d'autonomie énergétique et de simplicité d'entretien [34].

Contrairement aux pelletiseurs hydrauliques et industriels, qui requièrent un investissement initial élevé et une maintenance technique onéreuse [35], le prototype étudié est économique, écologique et idéal pour les zones rurales non électrifiées, notamment à Madagascar. En revanche, sa productivité réduite et la variabilité de la force humaine peuvent engendrer une irrégularité de la densité des granulés.

Ainsi, bien que moins performant sur le plan industriel, le pelletiseur à pédale constitue une innovation adaptée aux petits et moyens éleveurs, combinant accessibilité, durabilité et autonomie locale [36], [7]). Il représente une alternative durable pour renforcer la production animale décentralisée dans un contexte de faibles ressources énergétiques.

En somme, la maîtrise simultanée de la vitesse, de la pression et de l'humidité constitue un levier d'amélioration durable du rendement de granulation, tout en limitant les pertes thermiques et mécaniques du procédé.

IV.2. Régression linéaire simple du rendement de production

L'analyse des régressions linéaires simples met en évidence le fait que la vitesse de rotation (VIT) est le principal facteur influençant le rendement de production (RP), avec un coefficient de détermination élevé ($R^2 = 79,6\%$) (Fig 1-1). Cette forte corrélation confirme les travaux de Thomas et Van der Poel (2020) et de Kaliyan et Morey (2009), qui ont montré qu'une augmentation de la vitesse améliore la densification et la cohésion des particules par élévation de la température interne et réduction de l'humidité libre [2], [9].

En revanche, les faibles coefficients R^2 observés pour la pression (8,7 %), l'humidité (8,2 %) et le type de provende (0,3 %) indiquent une contribution limitée de ces paramètres. Cela pourrait être dû à des variations faibles des niveaux expérimentaux ou à des interactions non linéaires non prises en compte [37]. Ces résultats encouragent l'emploi de modèles multivariés pour optimiser conjointement les paramètres et améliorer la performance du pelletiseur [3]. Par exemple, une vitesse trop élevée pourrait accroître la consommation énergétique ou altérer la qualité des granulés [38].

Ainsi, la régulation fine de la vitesse apparaît comme une clé stratégique pour maximiser la productivité tout en préservant la qualité du produit.

IV.3. Modèle de régression

Le modèle de régression obtenu met en évidence la vitesse de rotation (x_1) comme facteur prédominant dans l'augmentation du rendement de production (RP), ce qui confirme les observations de Thomas et Van der Poel (2020) et de Kaliyan et Morey (2009), selon lesquelles une vitesse accrue améliore la densification des granulés par une meilleure compression et friction interne [2], [9].

La valeur élevée du coefficient associé à la vitesse (1,6432) traduit une forte sensibilité du rendement à ce paramètre.

L'Analyse en Composantes Principales (ACP) corrobore cette dominance, montrant une corrélation directe et positive entre RP et VIT, illustrant la cohérence du modèle. D'un autre côté, les effets modestes de l'humidité (0,8508) et de la pression (0,5371) révèlent une influence secondaire. Cette faible contribution, déjà observée par Carone et al. (2011) [37], peut résulter d'un domaine

expérimental restreint ou de non-linéarités non capturées par le modèle. De plus, la faible influence du type de provende (0,1691) limite la généralisation du modèle à d'autres formulations.

L'intégration d'un plan d'expériences multiparamétrique (vitesse, humidité, pression) pourrait améliorer l'optimisation du procédé [3]. Une augmentation excessive de la vitesse pourrait entraîner une surchauffe ou une usure prématurée de la matrice, affectant la qualité du granulé et la durabilité du matériel [38].

Ainsi, ce modèle constitue une base fiable mais perfectible pour la maîtrise énergétique et la qualité de la granulation.

IV.4. Optimisation

Les résultats d'optimisation révèlent une force majeure du modèle, avec une désirabilité élevée (0,92) et un coefficient de précision étroit (IC 95 %), confirmant la fiabilité prédictive du rendement optimal [30]. La combinaison d'une vitesse de 150 tr/min, d'une humidité et d'une pression de 15 kgf améliore la compaction et la cohésion des granulés, soutenant les travaux de Thomas et al. (1997) [32]. Toutefois, une faiblesse réside dans la légère sous-performance par rapport à la cible théorique (9,25), suggérant des pertes énergétiques ou thermiques à haute vitesse. Une validation expérimentale et un ajustement non linéaire restent donc nécessaires [31].

IV.5. Qualité des granulés obtenus

Les résultats montrent une bonne conformité du taux d'humidité (11,2%) avec la norme de 8 à 12 % [2], ce qui favorise une bonne conservation et une stabilité du granulé. Ce niveau d'humidité optimal réduit la croissance microbienne et améliore la durabilité du produit pendant le stockage [39].

De plus, la taille moyenne du granulé (diamètre 5,8 mm) respecte les standards de l'alimentation animale [33], facilitant l'ingestion par les bovins et l'uniformité dans les rations. Ces paramètres démontrent que le procédé de fabrication, malgré sa simplicité mécanique, parvient à générer des granulés adaptés aux besoins nutritionnels et physiques du bétail.

Cependant, certaines faiblesses techniques ont été observées. La durabilité mécanique (PDI = 91%) reste inférieure à la norme minimale de 95 % [32], indiquant une cohésion structurelle insuffisante. Cette faiblesse peut être attribuée à une pression de compactage trop faible [9]. De plus, la teneur en fines élevée (8%) dépasse largement la norme (<1%) [25], ce qui réduit la qualité du granulé et entraîne des pertes de matière pendant le transport et la manipulation. Ce phénomène pourrait être causé par un désalignement entre la matrice et la chambre de compression, traduisant un défaut d'ajustement mécanique.

Les résultats obtenus ouvrent des opportunités d'amélioration dans la conception du pelletiseur à pédales. L'optimisation de la vitesse de rotation, de la pression de compression et du taux d'humidité avant granulation pourrait augmenter la durabilité mécanique et réduire la production de fines [39]. L'intégration de matériaux locaux plus homogènes et d'un système de refroidissement contrôlé permettrait d'accroître la qualité globale du granulé tout en maintenant un coût de production faible. Ces ajustements renforceraient la compétitivité du dispositif artisanal dans les zones rurales.

En revanche, la menace principale réside dans la variabilité des matières premières et dans l'absence de standardisation mécanique. Un mauvais contrôle de la granulométrie des ingrédients ou une défaillance dans le système de compression pourrait compromettre la répétabilité des résultats. De plus, un PDI faible peut entraîner des refus alimentaires chez les animaux et une baisse de performance zootechnique [32]. Sans correction de ces paramètres, le produit risque de ne pas répondre aux exigences de durabilité nécessaires à une commercialisation plus large.

V. CONCLUSION

Cette étude s'inscrit dans le contexte de la valorisation des sous-produits agricoles à travers la production de provende granulée, dans une optique d'autonomie alimentaire et de réduction des coûts pour les petits éleveurs. L'objectif principal était de déterminer le rendement de production d'un pelletiseur de provende à pédales en fonction de paramètres opératoires tels que la vitesse de rotation, la pression, le taux d'humidité et le type de provende.

Les résultats expérimentaux et les analyses statistiques ont confirmé les hypothèses formulées dans l'introduction. La vitesse de rotation s'est révélée être le facteur déterminant du rendement ($p < 0,001$), expliquant plus de 80 % de la variance observée, tandis que la pression et l'humidité exercent des effets positifs mais secondaires. Le modèle de régression multiple validé ($R^2 = 98,35\%$) présente une excellente capacité prédictive, confirmant la cohérence des données et la pertinence de la modélisation adoptée.

Du point de vue de la qualité des granulés, le taux d'humidité final (11,2 %) et la taille moyenne (5,8 mm) respectent les normes établies, mais la durabilité mécanique (91 %) et la teneur en fines (8 %) indiquent des marges d'amélioration.

En perspective, l'optimisation mécanique du dispositif, notamment l'ajustement de la pression de compactage, la ventilation du séchage et le contrôle de l'humidité permettrait d'accroître la durabilité et de réduire les pertes. Une future étude intégrant les effets non linéaires et thermiques offrirait une meilleure compréhension du comportement du mélange et un raffinement du modèle de prédiction.

RECONNAISSANCE

L'auteur remercie tout particulièrement l'Ecole Doctorale Sciences et Techniques de l'Ingénierie et de l'Innovation, l'Ecole Supérieure Polytechnique d'Antananarivo, l'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.

References

- [1] Food and Agriculture Organization (FAO). (2012). *Pelleting process: feed pelleting guide*. FAO.
- [2] Thomas, M., & van der Poel, A. F. B. (2020). *Physical quality of pelleted animal feed 3: Contribution of process conditions*. *Animal Feed Science and Technology*, 262, 114388.
- [3] Stelte, W., Sanadi, A. R., Shang, L., Holm, J. K., Ahrenfeldt, J., & Henriksen, U. B. (2012). *Recent developments in biomass pelletization—A review*. *Bioresource Technology*, 121, 15–25.
- [4] Montgomery, D. C. (2017). *Design and Analysis of Experiments* (9th ed.). John Wiley & Sons.
- [5] AOAC International. (2019). *Official Methods of Analysis of AOAC International* (21st ed.). AOAC International.
- [6] Herimanoa, R. M., 2025, *Approche intégrée de formulation de provende et prédiction d'endurance laitier par régression multiple*, *International Journal of Progressive Sciences and Technology*, Vol. 52 No. 2 September 2025, pp. 310-329
- [7] Serrano, C., Monedero, E., Lapuerta, M., & Portero, H. (2011). *Effect of moisture content, particle size and pine addition on quality parameters of barley straw pellets*. *Fuel Processing Technology*, 92(3), 699–706.
- [8] Zhao, Y., Chen, L., & Chen, Y. (2019). *Influence of roller and die parameters on pellet quality in ring die pellet mills*. *Renewable Energy*, 132, 1248–1257
- [9] Kaliyan, N., & Morey, R. V. (2009). *Factors affecting strength and durability of densified biomass products*. *Biomass and Bioenergy*, 33(3), 337–359.
- [10] Johnson, K. L. (1985). *Contact Mechanics*. Cambridge University Press.
- [11] Stachowiak, G. W., & Batchelor, A. W. (2013). *Engineering Tribology* (4th ed.). Butterworth-Heinemann.
- [12] Nielsen, N. P. K., Gardner, D. J., & Poulsen, T. (2009). *Importance of pressure and temperature in densification of biomass briquettes*. *Wood Science and Technology*, 43(3), 487–500.
- [13] Faborode, M. O., & O'Callaghan, J. R. (1989). *A rheological model for dry compaction of fibrous materials*. *Journal of Agricultural Engineering Research*, 42(2), 165–178.
- [14] Draper, N. R., & Smith, H. (1998). *Applied Regression Analysis* (3rd ed.). New York, NY: Wiley

- [15] Gujarati, D. N., & Porter, D. C. (2020). *Basic Econometrics* (6th ed.). New York, NY: McGraw-Hill Education
- [16] Guyader A., 2013, *Régression linéaire, cours de Master en statistique*, Université Rennes 2, France
- [17] Montgomery, D. C., Peck, E. A., & Vining, G. G. (2021). *Introduction to Linear Regression Analysis* (6th ed.). Hoboken, NJ: Wiley
- [18] Kutner, M. H., Nachtsheim, C. J., & Neter, J. (2004). *Applied Linear Regression Models* (4th ed.). New York, NY: McGraw-Hill/Irwin.
- [19] Azaïs, J.-M., & Bardet, J.-M., 2006, *Le modèle linéaire par l'exemple : Régression, analyse de la variance et plans d'expérience*, Toulouse, Dunod.
- [20] Bernard Delyon, 2022, *Régression*, cours de la deuxième année de Master, IRMAR, Université Rennes I, Campus de Beaulieu, 35042 Rennes cedex
- [21] Seber, G. A. F., & Lee, A. J. (2012). *Linear Regression Analysis* (2nd ed.). Hoboken, NJ: Wiley.
- [22] Draper, N. R., & Smith, H. (2014). *Applied Regression Analysis* (3rd ed.). John Wiley & Sons.
- [23] Hair, J. F., Black, W. C., Babin, B. J., & Anderson, R. E. (2019). *Multivariate Data Analysis* (8th ed.). Cengage Learning.
- [24] ASABE (2017). *ASAE S269.4: Cubes, Pellets, and Crumbles – Definitions and Methods for Determining Density, Durability, and Moisture Content*. St. Joseph, MI: American Society of Agricultural and Biological Engineers.
- [25] Gilpin, A. S., Dozier, W. A., & Corzo, A. (2002). *Effect of pellet quality on feed intake and growth performance of poultry*. Poultry Science, 81(8), 1232–1238.
- [26] Montgomery, D. C., & Runger, G. C. (2014). *Applied Statistics and Probability for Engineers* (6th ed.). John Wiley & Sons.
- [27] Kutner, M. H., Nachtsheim, C. J., Neter, J., & Li, W. (2005). *Applied Linear Statistical Models* (5th ed.). McGraw-Hill Irwin.
- [28] Myers, R. H., Montgomery, D. C., & Anderson-Cook, C. M. (2016). *Response Surface Methodology: Process and Product Optimization Using Designed Experiments* (4th ed.). John Wiley & Sons.
- [29] Montgomery, D. C. (2019). *Design and Analysis of Experiments* (10th ed.). John Wiley & Sons.
- [30] Evans, C. E., Paulk, C. B., Gebhardt, J. T., et al. (2021). *Effects of conditioning temperature and pellet mill die speed on pellet quality and relative stabilities of phytase and xylanase*. Translational Animal Science.
- [31] Hoover, A. N. (2014). *Effects of pelleting process variables on physical properties of pellets*. Journal / source (2014).
- [32] Thomas, M., van Zuilichem, D. J., & van der Poel, A. F. B. (1997). *Physical quality of pelleted animal feed 3. Contribution of feedstuff components*. Animal Feed Science and Technology, 67(2–3), 221–237.
- [33] Lyu, X., Li, W., Zhang, X., & Chen, Y. (2020). *Effects of pellet diameter on feed intake and growth performance of dairy cows*. Animal Nutrition, 6(4), 447–454.
- [34] Adapa, P., Tabil, L., & Schoenau, G. (2009). *Compaction characteristics of barley, canola, oat and wheat straw*. Biosystems Engineering, 104(3), 335–344.
- [35] Mani, S., Tabil, L. G., & Sokhansanj, S. (2006). *Effects of compressive force, particle size and moisture content on mechanical properties of biomass pellets*. Biomass and Bioenergy, 30(7), 648–654.
- [36] Stelte, W., Holm, J. K., Sanadi, A. R., Barsberg, S., Ahrenfeldt, J., & Henriksen, U. B. (2012). *A study of bonding and failure mechanisms in fuel pellets from different biomass resources*. Biomass and Bioenergy, 35(2), 910–918.
- [37] Carone, M. T., Pantaleo, A., & Pellerano, A. (2011). *Influence of process parameters and biomass characteristics on the durability of pellets*. Biomass and Bioenergy, 35(1), 402–410.

- [38] Samuelsson, R., Larsson, S. H., Thyrel, M., & Lestander, T. A. (2012). *Moisture content and storage time influence the binding mechanisms in biofuel pellets*. *Applied Energy*, 99, 109–115.
- [39] Tumuluru, J. S. (2014). *Effect of process variables on the density and durability of biomass pellets from corn stover and switchgrass*. *BioEnergy Research*, 7(2), 566–579.