

Intégration du maïs hydroponique : effets sur la production laitière des vaches

Voninirina Fleurette RAZAFIMAMONJY^{1,2*}, Felana Avoko RAZANAMAHENINA²,
Herilalao José ANDRIARIMALALA^{3,4}, Rivo Nirina RABEARIMISA^{1,2}
et Arsène Jules Mbolatianarizao RANDRIANARIVELOSEHENO^{1,2}

¹ Université d'Antananarivo, École doctorale Agriculture, Élevage et Environnement, Équipe d'Accueil
Zootechnie et Santé Animale, Code Postal 101, BP 566, Madagascar

² Université d'Antananarivo, École Supérieure des Sciences Agronomiques, BP 175 Ambohitsaina,
Antananarivo -101, Madagascar

³ Centre de Coopération Internationale en Recherche Agronomique Pour le Développement (CIRAD),
UMR SELMET, Antsirabe 110, Madagascar

⁴ Université de Vakinankaratra, Institut Universitaire de l'Innovation Technologique (IUIT), Mention Sciences
Agronomiques, BP 105 Vatofotsy Antsirabe 110, Madagascar

(Reçu le 13 Juin 2026 ; Accepté le 21 Août 2026)

* Correspondance, courriel : rvony@gmail.com

Résumé

L'étude menée à Antananarivo (Madagascar) a évalué l'effet du fourrage vert hydroponique (FVH) de maïs sur la production laitière. Douze vaches laitières de races améliorées ont été réparties en quatre lots : T0 (témoin, sans FVH), T1 (3 kg/jour), T2 (5 kg/jour) et T3 (10 kg/jour). Les performances ont été comparées avant et après l'incorporation, avec des mesures quotidiennes de la production laitière et des analyses physico-chimiques du lait. Le maïs hydroponique a présenté un excellent profil nutritionnel avec $27,97 \pm 0,23$ % de matière sèche, $10,13 \pm 0,46$ % de protéine brute et une bonne digestibilité de $86,71 \pm 1,05$ % ; les teneurs en fibres et en minéraux ont été également excellentes. La ration a augmenté la production laitière de manière significative ($p < 0,0001$) pour T2 (+23,15 %, passant de $6,55 \pm 3,87$ L à $8,06 \pm 3,47$ L) et T3 (+28,28 %, passant de $6,70 \pm 2,59$ L à $8,59 \pm 2,23$ L). Dans le lot T1, la production est restée stable. Le lot témoin T0 a connu une baisse normale de la production laitière. Aucune variation significative ($p > 0,05$) n'a été observée dans la composition physico-chimique du lait. Ces résultats soulignent le potentiel des FVH de maïs pour améliorer le rendement laitier sans altérer la qualité, particulièrement dans le contexte de Madagascar.

Mots-clés : *fourrage hydroponique, production laitière, composition physico-chimique, vache.*

Abstract

Hydroponic maize integration : effects on milk production of cows

A study conducted in Antananarivo (Madagascar) assessed the effect of hydroponic green fodder (HGF) from maize on milk production. Twelve dairy cows of improved breeds were divided into four groups : T0 (control, without HGF), T1 (3 kg/day), T2 (5 kg/day) and T3 (10 kg/day). Performance was compared before and after incorporation, with daily measurements of milk production and milk physico-chemical analyses. The maize

HGF showed an excellent nutritional profile with $27.97 \pm 0.23\%$ dry matter, $10.13 \pm 0.46\%$ crude protein and good digestibility of $86.71 \pm 1.05\%$; fibre and mineral contents were also excellent. The ration significantly boosted milk production ($p < 0.0001$) for T2 (+23.15%, from 6.55 ± 3.87 L to 8.06 ± 3.47 L) and T3 (+28.28%, from 6.70 ± 2.59 L to 8.59 ± 2.23 L). In T1, production remained stable. The T0 control group experienced a normal decline in milk production. No significant variation ($p > 0.05$) was observed in the milk physicochemical composition. These results highlight the maize HGF potential to improve milk yield without altering quality, particularly in the context of Madagascar.

Keywords : *cows, hydroponic fodder, milk production, physicochemical composition.*

Nomenclature

ADF	: Acide Détergent Fibreux
ADL	: Acid Détergent Ligneux
CB	: Cellulose Brute
CFP	: Centre de Formation Professionnelle
dMS	: Digestibilité de la Matière Sèche
DRZVP	: Département de Recherches Zootechniques Vétérinaires et Piscicoles
ESSA	: École Supérieure des Sciences Agronomiques
FOFIFA	: Foiben'ny Fiompiana sy ny Fambolena (Centre National de la Recherche Appliquée au Développement Rural)
FVH	: Fourrage Vert Hydroponique
MB	: Matière Brute
MG	: Matière Grasse
MGA	: Madagascar Ariary (unité monétaire)
MM	: Matière Minérale
MS	: Matière sèche
NDF	: Neutre Détergent Fibre
NEC	: Note d'état corporel
ODD	: Objectifs de Développement Durable
PB	: Protéine Brute
PRN	: Pie Rouge Norvégienne
PROFI-Lait	: Projet de Renforcement et d'Organisation de la Filière Inclusive Lait
SPIR	: Spectrométrie dans le Proche Infrarouge

1. Introduction

À Madagascar, l'élevage constitue un pilier essentiel de la sécurité alimentaire et de l'économie nationale. La filière laitière repose principalement sur de petites exploitations familiales qui ne couvrent que 40% des besoins fourragers des vaches laitières, avec un rendement annuel moyen de 1 100 L par vache [1]. Ces exploitations sont confrontées à une disponibilité irrégulière et une qualité médiocre des fourrages (NDF élevé, digestibilité inférieure à 60%), limitant les productions journalières de 2 à 4 L par vache, tandis que la pression démographique réduit les pâturages (nombre de bovins par exploitation passé de 6 à moins de 4 en 20 ans) et que les sécheresses récurrentes aggravent cette situation dans les Hautes Terres [1 - 3]. Le fourrage vert hydroponique (FVH) apparaît comme une alternative stratégique [4] qui s'inscrit directement dans les Objectifs de Développement Durable (ODD), notamment l'ODD 2 (faim « zéro » et agriculture durable), l'ODD 6 (eau propre et gestion durable), l'ODD 12 (consommation et production responsables) et l'ODD 13 (lutte contre les changements climatiques) [5]. Cette pratique permet de produire pendant environ 11 jours

un fourrage nutritif à haute digestibilité, indépendante des conditions pédoclimatiques [4]. Des études ont montré que son intégration dans les rations des vaches laitières a amélioré la digestibilité de protéine brute et augmenté la production de lait d'une manière significative de 12 à 13,7 % [6, 7]. Cette étude évalue la production et le profil nutritionnel du fourrage de maïs cultivé en culture hydroponique. Elle examine en outre l'impact de l'intégration de ce fourrage dans l'alimentation des vaches laitières dans la région d'Analamanga sur les performances de production laitière soumises à des contraintes environnementales [6, 8]. Trois hypothèses ont été formulées : première hypothèse, le fourrage vert hydroponique (FVH) issu du maïs présente une excellente qualité nutritionnelle ; deuxième hypothèse, son intégration dans l'alimentation des vaches laitières améliore la production laitière ; troisième hypothèse, elle améliore également la qualité du lait. Cette approche expérimentale permettra de valider le potentiel du FVH pour des systèmes laitiers résilients et durables à Madagascar.

2. Matériel et méthodes

Les essais expérimentaux ont été conduits du 11 Mai 2025 au 27 Juillet 2025 pour une durée totale de 77 jours, c'est-à-dire, au début de la saison sèche où les fourrages sont insuffisants pour alimenter les vaches. À cette période, les éleveurs ont l'habitude d'utiliser des fourrages naturels de faible quantité et de mauvaise qualité [2].

2-1. Production des fourrages verts hydroponiques

Les FVH ont été cultivés dans deux serres de type artisanal installées à proximité de l'exploitation afin de faciliter l'alimentation et d'éviter le transport. Le premier site mesure 10 m × 2 m avec une capacité minimale de 15 kg de fourrage vert hydroponique par jour ; le second, de 12 m × 3 m, permettant une production minimale de 45 kg/jour. Chaque site comprend deux rangées de deux étagères en bois à quatre niveaux chacune, séparées par des allées d'entretien. Les étagères sont inclinées de 20 à 30% pour favoriser l'écoulement de l'eau. Les serres sont recouvertes d'un filet d'ombrage de 55 à 70%, assurant une luminosité optimale pour la germination [9]. Les semences de maïs « *Zea mays* », de type « tout venant » achetées au marché local, ont été utilisées lors de cette expérimentation. Le maïs a été choisi surtout pour sa disponibilité partout et son faible coût par rapport aux autres semences fourragères (2 000 MGA/kg contre 20 000 MGA/kg pour le *Ray-grass*). La technique de production a suivi le guide de production des fourrages verts hydroponiques [9]. Les bacs de production en plastique ont été nettoyés et désinfectés à l'eau de Javel avant chaque utilisation. Les semences ont été triées sur des plateaux, pesées pour avoir la quantité nécessaire, trempées dans l'eau dans des cuvettes, rincées à l'eau, égouttées avec des passoirs, puis soumises à une pré-germination dans des bassins après avoir emballés dans des linges et des sacs en jute. Une fois germées, elles ont été étalées dans des bacs sur le site de production de fourrage vert hydroponique et arrosées (manuellement à l'aide de pulvérisateur de 16L de la marque Agri-Plus), trois à quatre fois par jour avec de l'eau traitée. Après 11 jours de culture, les fourrages verts hydroponiques sont produits et prêts à être utilisés.

2-2. Analyse bromatologique des fourrages verts hydroponiques

Les analyses des fourrages verts hydroponiques (FVH) ont été conduites au laboratoire de nutrition animale de l'École Supérieure des Sciences Agronomiques, ainsi qu'au laboratoire du Département de Recherches Zootechniques Vétérinaires et Piscicoles DRZVP/FOFIFA à Ampandrianomby. Un échantillon de 500 g de plantes entières a été prélevé à la fin du cycle de production. La matière sèche (MS) a été déterminée en séchant les échantillons à 103 °C pendant 6 heures ; elle correspond au rapport poids sec/poids frais multiplié par 100 pour exprimer en pourcentage. Les mesures au SPIR (Spectrométrie dans le Proche Infrarouge) ont porté sur

la matière minérale (MM), la protéine brute (PB), la digestibilité in vitro, la cellulose brute (CB), l'acide détergent fibreux (ADF) et le détergent fibre neutre (NDF). Les dosages de calcium et de phosphore ont été effectués après avoir calciné les trois répétitions d'échantillon dans une capsule, à 550 °C au four à moufle pendant 6 à 8 heures. Le dosage du calcium a été réalisé par une méthode d'analyse titrimétrique basée sur la précipitation du calcium sous forme d'oxalate de calcium. Le dosage du phosphore a été effectué par colorimétrie au vanado-molybdate, dite méthode de Misson.

2-3. Protocole expérimental chez les animaux

Les fermes choisies pour les essais de FVH sont parmi les exploitations autour de la ville d'Antananarivo. Les vaches ont été sélectionnées selon les critères suivants : race laitière améliorée, en phase de lactation, du 1^{er} au 5^{ème} rang de lactation, bonne conformation, état sanitaire satisfaisant, note d'état corporel (NEC) de 2, appétence préalable aux FVH et pratique alimentaire similaire. En Europe, les phases de lactation des vaches sujettes d'expérimentation sont inférieures à 5 [8,10]. Douze vaches en lactation ont été sélectionnées pour cet essai : neuf vaches du « Centre de Formation Professionnelle » de Bevalala (latitude 18° 58' 21,66" S, longitude 47° 30' 45,72" E), et trois vaches d'une exploitation familiale privée située à Manakambahiny (latitude 18° 56' 4,69" S, longitude 47° 32' 7,70" E). Les vaches étaient toutes au stade de lactation 2 ou 3, avec une durée de lactation comprise entre 13 et 55 semaines et un rendement laitier quotidien variant de $6,55 \pm 3,87$ L à $12,17 \pm 4,14$ L et un poids vif accru par barymétrie (selon la formule Crevat $P = K T^3$, où P est le poids en kg, $K = 80$ pour les bœufs en état, et T le tour de poitrine en mètres [11]) allant de $390,30 \pm 56,14$ kg à $452,54 \pm 51,52$ kg (Tableau 1). Les vaches de la ferme privée (race Pie Rouge Norvégienne) de faible effectif (5 vaches) ont eu une bonne production laitière de $12,17 \pm 4,14$ L par jour par rapport aux vaches du CFP Bevalala (race Holstein) de quatorze vaches allaitantes avec $7,57 \pm 3,57$ L par jour. Les deux fermes ont appliqué des pratiques alimentaires similaires : rationnement par des fourrages naturels complétés par du *Ray-grass* durant la saison sèche, avec une supplémentation en provende d'environ 0,25 à 1 Kg par vache suivant la production laitière.

Les habitudes alimentaires des animaux ainsi que les pratiques habituelles de gestion au sein de la ferme n'ont pas été modifiées suivant la théorie des animaux en laboratoire [12], garantissant que les résultats obtenus soient attribuables uniquement à l'intégration du FVH. Les FVH ont été incorporés dans l'alimentation des 12 vaches à raison de 0 ; 3 ; 5 et 10 Kg par vache par jour, en complément de la ration de base habituelle de la ferme. Dans la ferme du CFP, les trois vaches témoins n'ont reçu aucun FVH (0 kg/jour), trois vaches ont été rationnées à raison de 5 kg de FVH par jour, trois autres avec 10 kg de FVH par jour. Les vaches dans la ferme privée ont été rationnées avec 3Kg de FVH par vache par jour. Cette conception en lots témoin et traités a permis une évaluation précise des impacts dose-dépendants sur la production laitière pour des données scientifiquement valides [13]. Des durées de transition et d'adaptation alimentaire ont été respectées durant la phase expérimentale. Une augmentation progressive de l'apport en FVH suivie d'une période d'adaptation alimentaire puis d'une élimination graduelle à la fin de l'essai ont été adoptées. Cette période de transition (9 jours) et d'adaptation (21 jours) a duré 30 jours, permettant aux vaches de s'adapter progressivement aux changements du régime alimentaire [14]. Le FVH a été administré en complément de l'alimentation quotidienne des vaches. L'évaluation de l'effet du FVH sur la production laitière a été réalisée après cette période d'adaptation, soit 22 jours après l'introduction de la quantité prévue de fourrage dans la ration. Avant l'observation de l'effet de FVH, les caractéristiques initiales de chaque lot ont été enregistrées. Ce qui garantit la robustesse de l'interprétation des résultats obtenus [12]. Après la période d'adaptation alimentaire, toutes les vaches des quatre lots devraient être normalement en phase descendante de lactation, ce qui constitue une base comparable pour évaluer les effets du FVH.

Tableau 1 : Caractéristiques de chaque lot avant le rationnement

Lot	Rang de lactation moy $\pm$ Et (min-max)	Période de lactation (semaine) moy $\pm$ Et (min-max)	Production laitière (L) moy $\pm$ Et (min-max)	Poids vif (kg) moy $\pm$ Et (min-max)
T0	2,0 $\pm$ 1,5 (1-4)	22 $\pm$ 3 (19-24)	9,00 $\pm$ 3,99 (3,00-17,00)	390,30 $\pm$ 56,14 (327,68-436,14)
T1	3,0 $\pm$ 1,5 (2-5)	13 $\pm$ 9 (2-20)	12,17 $\pm$ 4,14 (9,00-20,00)	443,16 $\pm$ 63,60 (379,33-506,53)
T2	3,0 $\pm$ 0,6 (2-3)	55 $\pm$ 14 (42-71)	6,55 $\pm$ 3,87 (2,00-15,00)	452,54 $\pm$ 51,52 (393,04-482,28)
T3	2,0 $\pm$ 1,5 (1-4)	13 $\pm$ 2 (11-16)	6,70 $\pm$ 2,59 (2,00-13,00)	426,90 $\pm$ 34,34 (407,07- 466,56)

moy : moyenne ; Et : Ecart-type ; min : minimum ; max : maximum.

2-4. Échantillonnage du lait et paramètres analysés

La quantité de lait produite par vache a été enregistrée 22 jours avant l'expérimentation. Des échantillons de lait de 125 ml chacun ont été également prélevés durant la traite du matin, à trois reprises, à une semaine d'intervalle, avant la mise en place du rationnement. Trois autres prélèvements ont été également réalisés durant la phase d'expérimentation. Les prélèvements ont été effectués pendant la traite du matin, avec des récipients étiquetés avec le nom de la vache. Les échantillons du lait étiquetés ont été transportés sous froid à une température de $+4^{\circ}\text{C}$ dans une glacière munie de bloc de glace, puis amenés directement au laboratoire pour l'analyse physico-chimique. Arrivés au laboratoire, les échantillons ont été ramenés à une température ambiante avant de les analyser à l'aide d'un Milkoscan de marque Master Eco. Les teneurs en matière sèche ou solide non gras, matière grasse, protéine, lactose, densité, point de congélation ont été déterminées.

2-5. Traitement des données

La comparaison des performances laitières a été réalisée en évaluant les performances du même lot dans le temps, c'est-à-dire, avant et durant le rationnement car les performances de tous les lots n'ont pas été pareilles. La comparaison avec l'évolution du lot témoin a constitué des références durant toute la période expérimentale. Les données enregistrées ont été traitées à l'aide du logiciel statistique XLSTAT2014.5.03. L'analyse descriptive a d'abord été menée, suivie de tests de normalité et d'homogénéité des variances, avant les tests de comparaison : si $p \leq 0,05$, indiquant une non-normalité des données, le test non paramétrique de Mann-Whitney a été utilisé ; si $p > 0,05$, les données ont été considérées comme normalement distribuées, un test d'homogénéité des variances a alors été réalisé ; et en cas d'homogénéité, le test t de Student (paramétrique) a été appliqué, sinon, un test non paramétrique a été retenu.

3. Résultats

3-1. Valeurs alimentaires des fourrages verts hydroponiques de maïs

Les résultats des analyses bromatologiques ont montré les valeurs alimentaires moyennes du fourrage vert hydroponique de maïs, avec les taux de : matière sèche $27,97 \pm 0,23$ % de MB ; matière minérale $8,35 \pm 0,22$ % ; matière grasse $4,03 \pm 0,29$ % ; protéine brute $10,13 \pm 0,46$ % ; digestibilité (dMS) de $86,71 \pm 1,05$ % ; cellulose brute $17,01 \pm 0,45$ % ; ADF $17,29 \pm 0,80$ % ; ADL $4,75 \pm 0,23$ % ; NDF $40,50 \pm 1,53$ % ; cendre insoluble $0,23 \pm 0,02$ % ; calcium $0,71 \pm 0,24$ % ; phosphore $2,32 \pm 1,77$ % (**Figure 1**).

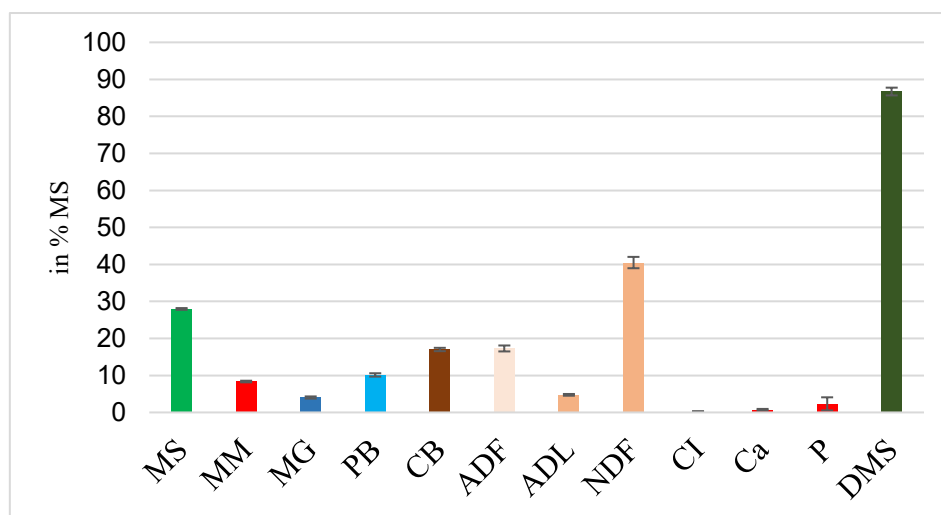


Figure 1 : Valeurs alimentaires du maïs hydroponique

3-2. Effet des fourrages verts hydroponiques sur la quantité du lait produit

L'effet des FVH a été remarqué sur l'évolution de la quantité de lait produite dans chaque lot (*Figure 2*).

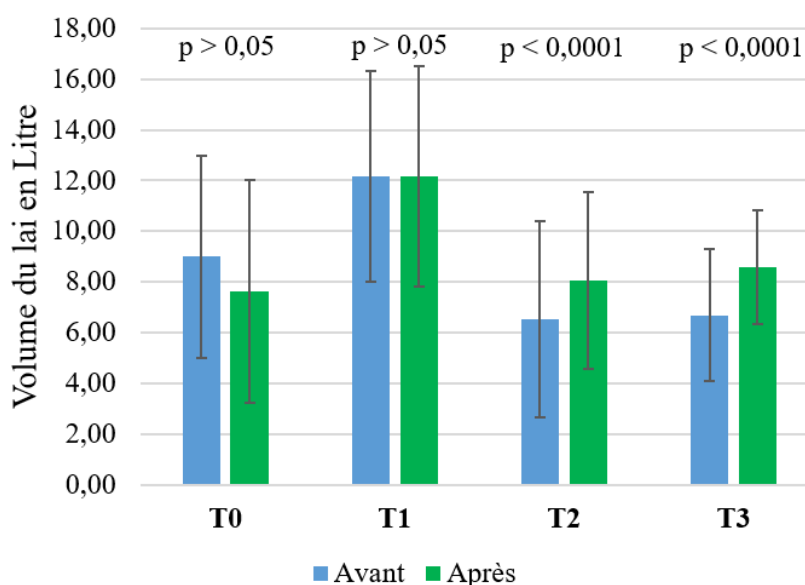


Figure 2 : Production laitière par lot

T0 : témoin ; HGF 0 ; T1 : FVH 3 Kg ; T2 : FVH 5 Kg ; T3 : FVH 10 Kg

Avant le rationnement, le témoin T0 a présenté une meilleure production par rapport aux lots T2 et T3. Pendant la phase d'observation, une diminution de 15,32 % du volume de lait a été observée chez le lot témoin (T0) passant de $9,00 \pm 3,99$ L à $7,62 \pm 4,39$ L, sans différence significative par rapport à la production antérieure ($p > 0,05$). Chez T1, la quantité de lait produite s'est maintenue malgré le fait que l'expérimentation s'est déroulée durant la phase descendante de lactation, de $12,17 \pm 4,14$ L à $12,17 \pm 4,36$ L (+13 semaines). En revanche, une augmentation de 23,15 % a été constatée chez T2 (+55 semaines) et de 28,28 % chez T3 (+13 semaines), avec des différences hautement significatives ($p < 0,0001$) par rapport aux productions antérieures dont les valeurs ont passé de $6,55 \pm 3,87$ L à $8,06 \pm 3,47$ L pour T2 et de $6,70 \pm 2,59$ L à $8,59 \pm 2,23$ L pour T3 (*Tableau 2*).

Tableau 2 : Évolution du rendement laitier par lot

	T0		T1		T2		T3	
	Avant	Après	Avant	Après	Avant	Après	Avant	Après
Moyenne	9,00	7,62	12,17	12,17	6,55	8,06	6,70	8,59
Ecart-type	3,99	4,39	4,14	4,36	3,87	3,47	2,59	2,23
Minimum	3,00	2,00	9,00	8,00	2,00	4,00	2,00	5,00
Maximum	17,00	17,00	20,00	20,00	15,00	15,00	13,00	13,00
p-value	0,1633		0,5494		< 0,0001		< 0,0001	

3-3. Effet des fourrages verts hydroponiques sur la qualité du lait

La supplémentation des rations avec du fourrage vert hydroponique de maïs induit des variations non significatives ($p > 0,05$) dans toutes les compositions physico-chimiques du lait (**Tableau 3**).

Tableau 3 : Compositions physico-chimiques du lait par lot

		T0		T1		T2		T3	
		Avant	Ration	Avant	Ration	Avant	Ration	Avant	Ration
Matière sèche	Moyenne	9,01	9,04	9,97	9,76	9,21	9,14	9,42	9,56
	Ecart-type	0,30	0,49	0,61	0,70	0,29	0,26	0,16	0,41
	Minimum	8,60	8,20	8,90	8,80	8,80	8,70	9,10	8,80
	Maximum	9,40	9,80	10,70	10,90	9,80	9,40	9,70	10,00
	p-value	1,0000		0,3755		0,8581		0,3235	
Matière grasse (%)	Moyenne	3,36	3,93	3,33	4,19	2,62	2,23	2,51	3,59
	Ecart-type	0,55	2,04	1,01	1,38	1,04	0,86	1,24	1,19
	Minimum	2,50	1,20	1,20	3,20	0,90	1,10	0,80	1,70
	Maximum	4,30	7,90	4,90	7,50	3,70	3,80	4,10	5,60
	p-value	0,8595		0,2667		0,3760		0,0922	
Protéine	Moyenne	3,29	3,22	3,53	3,47	3,29	3,27	3,39	3,42
	Ecart-type	0,14	0,19	0,23	0,22	0,12	0,09	0,06	0,15
	Minimum	3,10	2,90	3,20	3,10	3,10	3,10	3,30	3,20
	Maximum	3,50	3,50	3,80	3,90	3,50	3,40	3,50	3,60
	p-value	0,4716		0,5870		0,7756		0,7754	
Lactose	Moyenne	5,01	4,94	5,40	5,30	5,03	5,00	5,17	5,32
	Ecart-type	0,19	0,27	0,36	0,34	0,16	0,12	0,09	0,24
	Minimum	4,70	4,50	4,90	4,80	4,80	4,80	5,00	5,10
	Maximum	5,30	5,40	5,90	6,00	5,30	5,20	5,30	5,80
	p-value	0,5607		0,4770		0,7180		0,2694	
Densité	Moyenne	1,03	1,03	1,03	1,03	1,03	1,03	1,03	1,03
	Ecart-type	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
	Minimum	1,03	1,03	1,03	1,03	1,03	1,03	1,03	1,03
	Maximum	1,03	1,03	1,04	1,03	1,03	1,03	1,03	1,03
	p-value	0,4378		0,2062		0,8770		0,6664	
Point de congél.	Moyenne	0,59	0,58	0,64	0,63	0,59	0,58	0,60	0,62
	Ecart-type	0,02	0,04	0,05	0,05	0,02	0,02	0,01	0,03
	Minimum	0,55	0,52	0,57	0,56	0,56	0,54	0,59	0,57
	Maximum	0,63	0,62	0,70	0,75	0,61	0,62	0,62	0,65
	p-value	0,9647		0,5076		0,6260		0,2159	

Les compositions physico-chimique fluctuent légèrement (**Figure 3**). Les matières sèches augmentent de +0,03% et +0,14 % pour T0 et T3, diminuent de -0,21% et -0,07% pour T1 et T2. Les matières grasses augmentent aussi légèrement dans T0 (+0,57%), T1 (+0,86%), T3 (+1,08 %), mais baissent légèrement dans T2 (-0,39%). Les protéines diminuent faiblement dans les trois lots T0 (-0,07%), T1 (-0,06%), T2 (-0,02%) ; et progressent légèrement dans le lot T3 (+0,03%). Le lactose baisse modérément dans les trois lots T0 (-0,07%), T1 (-0,10%) et T2 (-0,03%) et augmente légèrement dans T3 (+0,15%). La densité et le point de congélation restent stables dans tous les lots avec de légères variations respectivement $\pm 0,001$ et $\pm 0,01^{\circ}\text{C}$.

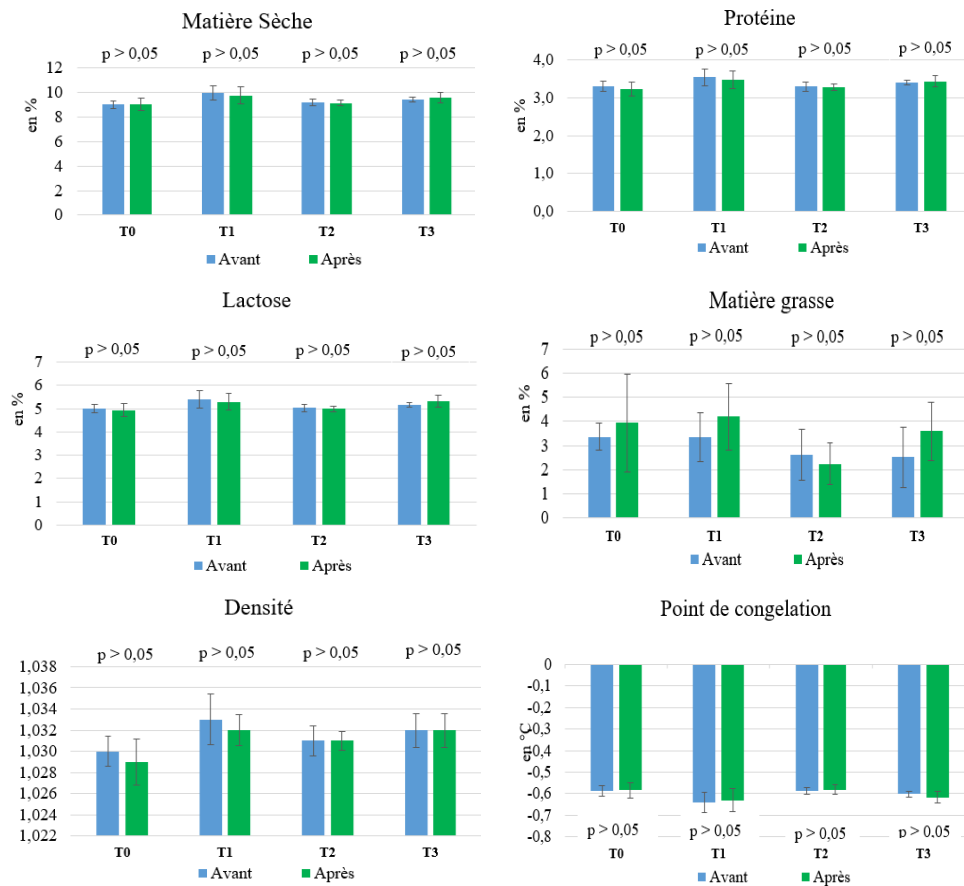


Figure 3 : Qualité nutritionnelle du lait

4. Discussion

La teneur en matière sèche (MS) du FVH de maïs, à $27,97 \pm 0,23$ %, a été nettement supérieure aux valeurs rapportées dans la littérature : 25% [15], 12 à 16% [6]. A partir de ce taux, les quantités de MS effectivement incorporées dans les lots ont été respectivement de 0 ; 0,84 kg ; 1,40 kg et 2,80 kg (T0, T1, T2, T3). La teneur en matière minérale de $8,35 \pm 0,22$ % a été supérieure au taux de 1,75 à 3,80% rapporté par d'autres auteurs en Inde [6]. De même la teneur en matière grasse de $4,03 \pm 0,29$ % a été également supérieure au taux de 2,5 à 3,5% au Nigeria [15]. Les teneurs en protéines brutes ($10,13 \pm 0,46$ %) et en digestibilité de la matière sèche ($86,71 \pm 1,05$ %) du FVH de maïs obtenu dépassent aussi les valeurs antérieurement rapportées dans le même pays par d'autres chercheurs respectivement 8,09 % et 78,28 % [16]. De même, les taux de cellulose brute ($17,01 \pm 0,45$ %), d'ADF ($17,29 \pm 0,80$ %) et de NDF ($40,50 \pm 1,53$ %) ont dépassé ceux indiqués dans la même étude (9,64 % ; 11,52 % et 35,33 %, respectivement). Cependant, ce taux de protéine de 10,13% est inférieur à ceux rapportés en Inde 13,57% et 13,3% [6,17]. Les teneurs en calcium ($0,71 \pm 0,24$ %) et en phosphore ($2,32 \pm 1,77$ %) dans cette étude ont été nettement supérieures aux valeurs en Inde qui sont respectivement 0,17 % et 0,91 % [18]. Ces analyses bromatologiques ont révélé un profil nutritionnel excellent adapté à l'alimentation des vaches laitières, confirmant l'hypothèse numéro 1. Concernant la quantité du lait produit, la diminution observée dans le lot T0 était attendue, car les vaches ont été trouvées en phase descendante de lactation (22 ± 3 semaines post-pic ; **Tableau 1**), où la production laitière diminue progressivement après un pic [19]. De plus, aucun complément alimentaire n'a été administré dans ce lot. Les lots T2 et T3 ont induit des augmentations très significatives de la production laitière

($p < 0,0001$) : +23,15% pour T2 et +28,28% pour T3 (**Figure 2**). Ces effets sont dus aux quantités des fourrages distribuées (5 kg pour T2 et 10 kg pour T3). Ces deux lots issus de la même ferme et de races identiques, ont présenté des productions initiales similaires (respectivement $6,55 \pm 3,87$ et $6,70 \pm 2,59$) ainsi que des poids vifs comparables (452 ± 51 Kg et 427 ± 34 Kg). Cependant, les vaches du lot T2 ont été trouvées en fin de lactation (55 ± 14 semaines), période caractérisée par une production laitière naturellement réduite. Les augmentations observées corroborent l'augmentation de 13% de la production laitière obtenue par substitution de concentré par du maïs hydroponique [6], ainsi que la hausse résultant de la supplémentation de 5 à 10 kg de fourrage hydroponique par jour [18]. Dans le lot T1, la distribution de 3 kg de FVH par jour n'a pas augmenté la production laitière, mais l'a stabilisée (**Figure 2**), malgré une période de lactation identique à celle de T3 (phase descendante attendue). La stabilité de la production laitière dans T1 et les augmentations significatives dans T2 et T3 confirment l'hypothèse n°2 d'une amélioration de la quantité de lait par l'intégration du FVH dans la ration, en accord avec d'autres études [6,7,18]. La réponse marginale de la production laitière au FVH de maïs (augmentation du volume laitier par kilo de FVH distribué) s'élève à 0,303 L/kg avec 5 kg FVH contre 0,189 L/kg avec 10 kg FVH, démontrant un rendement marginal décroissant et identifiant 5 kg de FVH par jour comme niveau optimal d'incorporation dans cette expérimentation. Pour la qualité du lait ; la teneur en matière sèche du lait est restée stable malgré l'apport de FVH. Cette stabilité s'explique par la faible teneur en MS du fourrage (27,96%), liée à sa haute teneur en eau. Une humidité élevée du FVH limite ses effets sur la composition du lait [20]. Cela entraîne une dilution marginale de la concentration en matière sèche du lait [6]. Ces mêmes auteurs rapportent une hausse du volume laitier avec ce fourrage sans modification significative de la teneur en matière sèche. Dans cette étude, les teneurs en matière sèche du lait de 9,01% à 9,97 sont nettement inférieures à celles rapportées par d'autres auteurs qui indiquent des valeurs de 12,5% à 13,5% [19].

Cette différence peut être due au type de rationnement de base des vaches et à la période de lactation ; cette dernière influence positivement la teneur en solide du lait [19]. Des auteurs [10] ont rapporté la stabilité de la teneur en matière grasse comme dans la présente étude suite à la substitution de l'ensilage de maïs par de l'orge hydroponique à cause de la similarité du profil nutritionnel des deux fourrage. La légère augmentation de la teneur en matière grasse du lait observée dans les lots T0, T1 et T3 s'explique par des périodes de lactation, respectivement 22 ± 3 ; 13 ± 9 et 13 ± 2 semaines, proches du moment de pic de lactation où cette teneur est plus élevée, avant de diminuer au stade intermédiaire, puis de remonter en fin de lactation [19]. Ces valeurs restent toutefois inférieures à celles rapportées dans la même étude (début 3,98% ; stade intermédiaire 3,87% ; fin de lactation 4,19%). Chez T2, la teneur en matière grasse est devenue plus faible par rapport au début de l'expérimentation (de $2,62 \pm 1,04\%$ à $2,23 \pm 0,86\%$) car cette teneur varie en sens inverse de l'augmentation de la production laitière [19,21]. L'absence de différence significative ($p > 0,05$) dans la teneur en matières grasses du lait corrobore les résultats de la littérature, qui rapportent la stabilité de cette teneur avec la supplémentation en FVH [6, 7, 18]. Les teneurs en protéines du lait, observées avant et pendant l'expérimentation, concordent avec les valeurs rapportées par d'autres auteurs de 3,2 à 3,8% [19]. Comme la teneur en matière grasse, la teneur en protéine varie inversement avec la quantité de lait produite. Les légères baisses de la teneur en protéine et en lactose du lait chez T0, T1 et T2 peuvent également être expliquées par le principe classique de la physiologie de lactation bovine dont cette teneur normale évolue de façon inverse à celle de la quantité du lait [21]. De plus, l'ajout partiel de fourrage hydroponique chez T1 et T2 n'a pas encore atteint le seuil optimal pour stimuler la synthèse de protéine et de lactose. Les légères augmentations de ces teneurs chez T3 peuvent être expliquées par sa dose de FVH un peu plus élevée. La teneur de protéine dans le FVH qui a été de 10,13% n'a pas pu soutenir la synthèse protéique du lait. La composition du lait, en protéines, lactose et lipides, a légèrement modifié sa densité (diminution en T0-T2, augmentation en T3) et son point de congélation (variation inverse), présentant des tendances dose-dépendantes cohérentes mais non significatives ($p > 0,05$). Ces résultats concordent avec la

littérature indiquant l'absence d'effet notable du fourrage vert hydroponique de maïs sur les principaux constituants laitiers (matières grasses, protéines, lactose, sels) chez les vaches [6, 8, 22], malgré des variations contextuelles signalées pour les lipides [8], liées à l'espèce, la race, le stade de lactation et les facteurs environnementaux [23]. Par conséquent, la partie de l'hypothèse 3 concernant l'amélioration de la qualité du lait par l'intégration de FVH dans la ration des vaches est rejetée.

5. Conclusion

Dans le contexte malgache marqué par des contraintes fourragères saisonnières et des coûts élevés des aliments concentrés importés, les fourrages verts hydroponiques de maïs se positionnent comme une alternative innovante et durable. Cette étude menée à Antananarivo a évalué les performances fourragères et zootechniques des fourrages verts hydroponiques (FVH) de maïs. L'objectif principal a consisté à analyser leur valeur alimentaire et les impacts d'une intégration progressive dans les rations de vaches laitières de races améliorées, et en mesurant les effets sur la quantité et la qualité du lait produit. Les FVH de maïs ont démontré une excellente valeur alimentaire, caractérisée par une richesse en protéines brutes, et une bonne teneur en fibres, favorisant une meilleure digestibilité ruminale. La supplémentation en FVH a induit un effet positif et satisfaisant sur l'amélioration du rendement laitier, avec des gains quantitatifs notables dès les doses de 5 Kg par jour. De plus, les compositions physico-chimiques du lait sous ces rationnements ont été stables, avec des variations non significatives ($p > 0,05$) pour tous les paramètres analysés : matière sèche, matières grasses, protéines, lactose, densité et point de congélation. Le FVH de maïs se positionne comme une alternative stratégique et durable aux concentrés coûteux, améliorant la rentabilité des élevages laitiers malgaches via une production fourragère autonome à faible empreinte environnementale. Ces résultats valident sa viabilité pour une production résiliente à Madagascar. Ce travail nécessite une étude approfondie comme des essais à long terme sur lactation complète et l'optimisation économique des doses.

Références

- [1] - R. RAZAFISON, Madagascar pense à relancer la filière laitière, victime de la COVID-19, Afrique Sub-Saharienne, (2020) www.scidev.net/afrique-sub-saharienne/news/madagascar-filiere-laitiere-covid-19-11062020/
- [2] - CIRAD, Etude chaîne de valeur lait et produits dérivés, (2020) agritrop.cirad.fr/595207/1/2020_CASEF_HautesTerres_%C3%89tudeCV%20Lait_Madagascar.pdf
- [3] - L. PEGORIER, Jabnde, appui à la croissance de la filière laitière à Madagascar. *Université de Liège, Faculté de Médecine Vétérinaire*, (2020) matheo.uliege.be/bitstream/2268.2/9613/8/PEGORIER_Laurine_TFE_FMV_juin2020_d%C3%A9finitif.pdf
- [4] - M. MIRALLES-BRUNEAU, C. E. BIGOT, J. L. BENARD, S. BARREIRA, D. FORGETA, D. GRANGETTE, S. GRONDIN, A. MICHON, M. PAYET, Y. PELLIER, A. M. PICARD, G. N. PICARD, J. P. PICARD, T. PICARD, J. L. REBOULE & D. VALIN, (2015), *Utilisation du fourrage vert hydroponique en production de viande bovine et ovine-libre. Association Réunionnaise Pastoralisme, Sica Révia*, arp.re/wp-content/uploads/doc_Etude_FourrageHorsSol_2015.pdf
- [5] - NATIONS UNIES, Objectifs de développement durable. Programme de développement durable à l'horizon, (2030), www.un.org/sustainabledevelopment/fr/objectifs-de-developpement-durable
- [6] - P. K. NAIK, DHURI R B, KARUNAKARAN M, B. K. SWAIN & N. P. SINGH, Effect of Feeding Hydroponics Maize Fodder on Digestibility of Nutrients and Milk Production in Lactating Cows. *Indian Journal of Animal Sciences*, 84 (8) (2014) 880 - 883 doi.org/10.56093/ijans.v84i8.43275

- [7] - S. SALO, Effects of Hydroponic Fodder Feeding on Milk Yield and Composition of Dairy Cow. *Natural Sciences Research*, 9 (8) (2019) doi.org/10.7176/JNSR
- [8] - A. AGIUS, G. PASTORELLI & E. ATTARD, Cows fed hydroponic fodder and conventional diet: effects on milk quality. *Archives Animal Breeding*, 62 (2) (2019) 517 - 525 doi.org/10.5194/aab-62-517-2019
- [9] - N. L. MAHAMANE, B. NOURI & A. A. NOUROU, Guide de production des Fourrages Verts Hydroponiques au Niger, (2020), *Manuel technique INRAN-CERRA* reca-niger.org/IMG/pdf/fourrages_hydroponiques_inran-3.pdf
- [10] - F. MASUCCI, F. SERRAPICA, M. I. CUTRIGNELLI, E. SABIA, A. BALIVO & A. DI FRANCIA, Replacing maize silage with hydroponic barley forage in lactating water buffalo diet : Impact on milk yield and composition, water and energy footprint, and economics. *Journal of Dairy Science*, 107 (11) (2024) 9426 - 9441 doi.org/10.3168/jds.2024-24902
- [11] - J. DELAGE, J. POLY & B. VISSAC, Étude de l'efficacité relative des diverses formules de barymétrie applicables aux bovins. *Ann Zootech*, 4 (3) (2020) 219 - 231 doi.org/10.1051/animres :19550305
- [12] - ANONYME, Théorie Animaux de Laboratoire, *Guide de formation / Notes de cours. Université Laval*, (2012) www.dsv.ulaval.ca/wp-content/uploads/2018/02/Théorie-Animaux-de-laboratoire-2012.pdf
- [13] - P. D. JOHNSON & D. G. BESSESEN, Practical Aspects of Experimental Design in Animal Research. *Institute for Laboratory Animal Research Journal*, 43 (4) (2002) 202 - 206 doi.org/10.1093/ilar.43.4.202
- [14] - R. S. BARDUCCI, L. M. N. SARTI, D. D. MILLEN, T. C. PUTAROV, M. C. S. FRANZÓI, F. A. RIBEIRO, A. PERDIGÃO, D. D. ESTEVAM, T. V. B. CARRARA, A. L. N. RIGUEIRO, D. H. M. WATANABE, L. L. CURSINO, C. L. MARTINS, M. C. S. PEREIRA & M. D. B. ARRIGONI, Restricted versus step-up dietary adaptation in Nellore bulls: Effects over periods of 9 and 14 days on feedlot performance, feeding behavior and rumen morphometrics. *Animal feed science and technology*, (247) (2019) 222 - 233, doi.org/10.1016/j.anifeedsci.2018.11.012
- [15] - O. A. ADEBIYI, A. T. ADEOLA, O. A. OSINOWO, D. BROWN & J. W. NG'AMBI, Effects of feeding hydroponics maize fodder on performance and nutrient digestibility of weaned pigs. *Applied Ecology And Environmental Research*, 16 (3) (2018) 2415 - 2422. doi.org/10.15666/aeer/1603_24152422
- [16] - A. RASOANOMENJANAHARY, T. D. RAZAFINARIVO, H. M. ANDRIAMBEROMANGA, H. RAKOTONIRINA & O. F. MAMINIAINA, Le fourrage hydroponique pour l'alimentation des ruminants en zone urbaine. *Recherches pour le Développement. Série Sciences Biologiques*, (30) (2021) 23 - 30. cidst.recherches.gov.mg/IMG/doc/SB_30_TI.pdf#page=23
- [17] - P. K. NAIK, Technology for production and feeding of hydroponics green fodder. *Indian Council Agricultural Research*, (45) (2011). www.academia.edu/5116703/Technology_for_production_and_feeding_of_hydroponics_green_fodder
- [18] - N. SHIT, Hydroponic Fodder Production : An Alternative Technology for Sustainable Livestock Production in India. *Explor Anim Med Res*, 9 (2) (2019) 108 - 119. animalmedicalresearch.org/Vol.9_Issue-2_December_2019/HYDROPONIC%20FODDER%20PRODUCTION.pdf
- [19] - B. ABDELAZIZ, H. E. BOURIACHE & L. FARIDA, Effect of Stage of Lactation on the Physical-Chemical Quality of Milk from Holstein Cows in the Eastern Region of Algeria. *Livestock Research for Rural Development*, 25 (7) (2013), www.lrrd.org/lrrd25/7/beny25121.htm
- [20] - M. TADILLO & N. BEYERO, Hydroponic maize fodder as a supplementary feed for livestock. *J. Livestock Sci*, 16 (3) (2025) 378 - 384 doi.org/10.33259/JLivestSci.2025.378-384
- [21] - S. KAUCHE-ADJLANE, Facteurs de variation qualitative et quantitative de la production laitière. *Revue Agriculture*, 10 (1) (2019) 43 - 54, revue-agro.univ-setif.dz/documents-agri/Volume10N1-2019/Soumeiya-KAUCHE-ADJLANE.pdf

- [22] - P. T. GNANARAJ, S. GUNASEKARAN, C. VALLI, R. KARUNAKARAN & H GOPI, Growth Potential of Hydroponic Maize and Horse Gram with Customized Nutrient Supplements for Climate Resilient Fodder Production. *Biological Forum – An International Journal*, 15 (8a) (2023) 359 - 364. www.researchtrend.net/bfij/pdf/59%20Growth%20Potential%20of%20Hydroponic%20Maize%20and%20Horse%20Gram%20with%20customized%20Nutrient%20Supplements%20for%20Climate%20Resilient%20Fodder%20Production-P%20Tensingh%20Gnanaraj.pdf
- [23] - J. GOUAIDIA, Y. DJABALLAH et A. BOUKAIL, Les facteurs influençant la composition et la qualité du lait. *Université 8 Mai 1945 Guelma, Mémoire de Master*, (2023), dspace.univ-guelma.dz/jspui/bitstream/123456789/15469/1/GOUAIDIA_JOUMANA_F4.pdf