

## **Caractérisation expérimentale et simulation d'un moulin artisanal triphasé**

**Moustapha DIOP<sup>1\*</sup>, Lamine THIAW<sup>1</sup>, Mouhamadou THIAM<sup>1</sup>, Alphousseyni NDIAYE<sup>1,2</sup>,  
Samba GUEYE<sup>1</sup>, El hadji Idrissa NDOYE<sup>1</sup>, Ndèye Seynabou GNING<sup>1</sup> et Boussef SY<sup>1</sup>**

<sup>1</sup> *Université Cheikh Anta Diop, Ecole Supérieure Polytechnique,  
Laboratoire d'Energies Renouvelables, Dakar, Sénégal*

<sup>2</sup> *Université Alioune Diop, Bambey, Sénégal*

---

\* Correspondance, courriel : [moustaphadiop1987@gmail.com](mailto:moustaphadiop1987@gmail.com)

### **Résumé**

Cet article présente la caractérisation et la simulation d'un dispositif de transformation de mil. Le dispositif de transformation est composé d'un moulin artisanal à mil et d'une machine asynchrone triphasée. Dans ce travail, il sera question d'établir les expressions générales des moulins artisanaux pour les équiper de fiches techniques. Ainsi, nous avons établi dans ce présent document, la relation entre la vitesse de rotation du moulin artisanal à mil et le débit de mil dans la chambre de broyage, mais aussi le couple de charge en fonction du débit à partir d'essais expérimentaux. Les résultats de simulation, avec les caractéristiques du moulin, sont conformes à ceux des systèmes motorisés et ont permis de valider les relations établies.

**Mots-clés :** *moulin, machine asynchrone, expérimentation, simulation, débit.*

### **Abstract**

#### **Experimental characterization and simulation of a three-phase mill craft**

This paper presents the characterization and simulation of a millet transformation device. The transformation device is composed of a craft mill of millet and a three-phase asynchronous machine. In this work, it will be a question of establishing the general expressions of characteristics of the craft mills for equip them of technical data sheets. Thus, we have established in this paper, the relationship between the rotation speed of the craft mill of millet and millet flow in the grinding chamber, but also the load torque depending on what flow from experimental tests. Simulation results, with the characteristics of the mill, are conform to the results of motorized systems and have allowed to validate the established relationships.

**Keywords :** *mill, asynchronous machine, experimentation, simulation, flow.*

### **1. Introduction**

Le mil est l'une des céréales locales qui constituent la base alimentaire au Sénégal. L'utilisation des produits céréaliers pour la consommation passe par différentes phases de transformation et de préparation. Parmi les processus pouvant aboutir à l'utilisation des céréales, la mouture est sans doute la plus importante.

Cette étape permet de transformer les grains de mil secs ou humides en farine fine ou en semoule. Pendant longtemps, ce processus de transformation des céréales se faisait avec un dispositif constitué d'un mortier et d'un pilon [1]. Cette méthode de transformation est de plus en plus rare avec la disponibilité des moulins dans la plupart des zones rurales et urbaines du territoire sénégalais, même si elle continue d'exister dans certaines zones rurales. Dans le but d'augmenter la quantité et d'améliorer la qualité du produit, la méthode moderne de transformation des céréales est développée. Cette mécanisation de la transformation des céréales locales joue un rôle essentiel sur les progrès économiques et sociaux [2]. Cependant, cette mécanisation était quasiment absente en zone rurale. Cette absence se justifiait par l'inexistence du réseau électrique dans ces zones rurales. Aujourd'hui, cette méthode moderne de transformation s'est développée surtout en zone rurale. Cependant la plupart des moulins, utilisés dans ce domaine en zone rurale, fonctionnent avec des moteurs à courant continu. Ces moulins fonctionnant avec des moteurs à courant continu, importés, sont coûteux et nécessitent beaucoup de maintenance. Avec la disponibilité des sources d'énergies d'origines renouvelables, à partir des projets d'électrification mis en place, plusieurs zones rurales sont dotées de sources d'énergies sous la forme continue ou la forme alternative. Dans le but de doter les zones rurales de postes de transformation de céréales à moindre coût, les moulins à courant continu sont aujourd'hui remplacés par des moulins artisanaux à moteurs asynchrones, moins coûteux, moins de maintenance et plus robustes [3- 5]. Cependant, l'inconvénient majeur des moulins artisanaux est le manque de données techniques, caractéristiques du moulin, qui est à l'origine des dysfonctionnements occasionnés par une inadéquation entre le moulin et le moteur accouplé. L'objectif de cette étude est d'effectuer une caractérisation du moulin afin de déterminer le profil de son couple de charge pour procéder à la simulation de ce dernier. Le travail réalisé dans ce présent article est scindé en sections : la section 2, est consacrée à la caractérisation expérimentale du moulin. La section 3 est réservée à la modélisation de la machine asynchrone. La présentation et la discussion des résultats de simulation du dispositif sont développées dans la section 4, pour finir dans la section 5 par une conclusion.

## **2. Méthodologie**

### **2-1. Caractérisation du moulin**

La transformation moderne des céréales se base sur l'utilisation de moulins motorisés. Généralement le dispositif de transformation utilisé est composé d'un moulin et d'un moteur. La plupart des moulins en zone rurale fonctionnaient à l'aide de groupe électrogène à base de diesel utilisant des moteurs à courant continus. Afin de pallier aux problèmes de maintenance et de coût, liés à l'importation de ces derniers et à l'absence de pièces de rechanges, les moulins artisanaux à marteaux sont de plus en plus utilisés. Ils sont simples à utiliser et s'adaptent avec la nature de la céréale [1]. Pour cette étude, le moulin utilisé est constitué d'une trémie d'alimentation de forme pyramidale servant le dépôt de grains, d'une valse à grains, situé en bas de la trémie, permettant de régler le débit, d'une chambre de broyage et des marteaux fixés sur l'arbre du moteur. Ces moulins locaux, à marteaux, occupent aujourd'hui une place importante dans le marché de transformation des céréales au Sénégal. Cependant, la plupart de ces moulins ne sont accouplés aux actionneurs les plus adéquats. Cette inadéquation entraîne immédiatement leur surexploitation, dont l'une des conséquences est la perte prématurée du moteur, ou leur sous-exploitation provoquant une consommation importante d'énergie pour une petite quantité. Le moulin représente la charge mécanique du moteur asynchrone, il est donc nécessaire de déterminer ces caractéristiques mécaniques pour les accoupler correctement afin d'en tirer le maximum en termes de production et de la consommation énergétique. Les caractéristiques, vitesse et couple, du moulin dépendent de la quantité de céréales à l'intérieur de la chambre de broyage. La régulation de cette quantité est assurée par la valse à grains qui gère le débit.

De par le principe de fonctionnement des moulins, la vitesse et le couple évoluent en fonction du débit de grains. Ainsi l'augmentation du débit entraîne automatiquement une diminution de la vitesse. Cette variation linéaire de la vitesse, en fonction du débit, a permis d'exprimer la **Relation (1)**.

$$N = N_o - K \times D \tag{1}$$

*Avec : N : la vitesse de rotation en charge (rd/s); No : la vitesse de rotation à vide (rd/s); K : la constante caractéristique du moulin (rd/kg); D : le débit de grains (Kg/s).*

La détermination du couple de charge du moulin est nécessaire pour sa simulation et pour le choix de son actionneur. La plupart des couples de charge trouvés sont classés en quatre catégories. Cependant, il existe des applications où la forme du couple de charge est la combinaison des formes existantes. De par la configuration des marteaux de ce moulin, responsables de l'écrasement des grains, et le principe de broyage, le couple peut être cherché suivant la forme donnée par la **Relation (2)**.

$$Cr = k_1 + k_2N + k_3N^2 + k_4N^{-1} \tag{2}$$

*Avec : Cr : le couple de charge du moulin (N.m); k<sub>1</sub>, k<sub>2</sub>, k<sub>3</sub> et k<sub>4</sub>: les constantes caractéristiques du moulin.*

Des **Relations (1) et (2)**, donnant respectivement la vitesse en fonction du débit de grains et le couple en fonction de la vitesse, on peut établir l'équation fondamentale liant le couple de charge et le débit. Cette équation est donnée par la **Relation (3)**.

$$Cr = k_3K^2 \times D^2 - K(k_2 + 2k_3No)D + k_1 + k_2No + k_3No^2 + k_4No^{-1} \left(1 - \frac{K}{No} \times D\right)^{-1} \tag{3}$$

La mouture se fasse à grande vitesse, proche de la vitesse de synchronisme, avec un débit moins important.

Ainsi l'expression  $k_4No^{-1} \left(1 - \frac{K}{No} \times D\right)^{-1}$  peut se réduire à  $k_4No^{-1}$  car  $1 \gg \frac{K}{No}$ . Par conséquent on a, après développement, la **Relation (4)**.

$$Cr = k_3K^2 \times D^2 - K(k_2 + 2k_3No)D + k_1 + k_2No + k_3No^2 + k_4No^{-1} \tag{4}$$

Les relations établies, les constantes caractéristiques seront déterminées à partir des tests expérimentaux.

## 2-2. Modélisation de la machine asynchrone

La machine asynchrone à cage constitue l'actionneur le plus utilisé dans la plupart des applications motorisées du fait de sa simplicité, sa robustesse et son coût [6, 7]. Pour simuler correctement le moulin avec la machine, il est nécessaire de procéder à sa modélisation. Modéliser la machine revient à réduire le nombre de grandeurs qu'on a besoin de connaître pour pouvoir la simuler. Le modèle présenté est celui en régime permanent. C'est à dire que la machine est supposée fonctionner en régime établi, qu'elle est alimentée avec un système triphasé équilibré de valeur efficace et de fréquence constante. Ainsi, les trois tensions sont données par **l'Equation (5)**[8, 9].

$$\begin{cases} V_a = V \sin(2\pi ft) \\ V_b = V \sin(2\pi ft + 2\pi/3) \\ V_c = V \sin(2\pi ft - 2\pi/3) \end{cases} \quad (5)$$

Avec :  $V_a$ ,  $V_b$  et  $V_c$  : les tensions des phases  $a$ ,  $b$  et  $c$ ;  $f$  : la fréquence du réseau d'alimentation ( $rd$ );  
 $V$  : l'amplitude maximale des tensions d'alimentation ( $V$ ).

Pour simplifier les **Equations**, la représentation dans le repère plan diphasé d-q est utilisée. Les équations générales, électriques, magnétiques et mécaniques, dans le référentiel d-q lié au champ tournant sont données **par les relations (6), (7) et (8)**.

$$\begin{cases} V_{sd} = R_s i_{sd} + \frac{d\phi_{sd}}{dt} - \omega_s \phi_{sq} \\ V_{sq} = R_s i_{sq} + \frac{d\phi_{sq}}{dt} + \omega_s \phi_{sd} \\ V_{rd} = 0 = R_r i_{rd} + \frac{d\phi_{rd}}{dt} - (\omega_s - \omega) \phi_{rq} \\ V_{rq} = 0 = R_r i_{rq} + \frac{d\phi_{rq}}{dt} + (\omega_s - \omega) \phi_{rd} \end{cases} \quad (6)$$

$$\begin{cases} \phi_{sd} = L_s i_{sd} + L_m i_{rd} \\ \phi_{sq} = L_s i_{sq} + L_m i_{rq} \\ \phi_{rd} = L_r i_{rd} + L_m i_{sd} \\ \phi_{rq} = L_r i_{rq} + L_m i_{sq} \end{cases} \quad (7)$$

$$\begin{cases} J \frac{d\Omega}{dt} = C_m - C_r - f_r \Omega \\ C_m = \frac{3}{2} p \frac{L_m}{L_r} (i_{sq} \phi_{rd} - i_{sd} \phi_{rq}) \end{cases} \quad (8)$$

Ainsi, le modèle de la machine, donnée par la **Relation (9)**, est obtenu en combinant **les Equations (6), (7) et (8)** et l'application de la transformée de Laplace.

$$\left\{ \begin{aligned} i_{sd} &= \frac{1}{R_s + sL_s \sigma} (V_{sd} - p \frac{L_m}{L_r} \phi_{rd} + \omega_s L_s \sigma i_{sq} + \omega_s \frac{L_m}{L_r} \phi_{rq}) \\ i_{sq} &= \frac{1}{R_s + sL_s \sigma} (V_{sq} - p \frac{L_m}{L_r} \phi_{rq} - \omega_s L_s \sigma i_{sd} - \omega_s \frac{L_m}{L_r} \phi_{rd}) \\ \phi_{rd} &= \frac{L_m}{sT_r + 1} i_{sd} + \frac{T_r}{sT_r + 1} (\omega_s - \omega) \phi_{rq} \\ \phi_{rq} &= \frac{L_m}{1 + sT_r} i_{sq} - \frac{T_r}{1 + sT_r} (\omega_s - \omega) \phi_{rd} \\ \Omega &= \frac{\frac{3}{2} p \frac{L_m}{L_r} (i_{sq} \phi_{rd} - i_{sd} \phi_{rq}) - C_m}{Js + f} \end{aligned} \right. \quad (9)$$

*Avec :  $V_{rd}, i_{rd}, \phi_{rd}$  : les composantes directes de la tension, du courant et du flux au rotor dans le plan (d, q);  
 $V_{rq}, i_{rq}, \phi_{rq}$  : les composantes en quadrature de la tension, du courant et du flux au rotor dans le plan (d, q);  
 $V_{sd}, i_{sd}, \phi_{sd}$  : les composantes directes de la tension, du courant et du flux au stator dans le plan (d, q);  
 $V_{sq}, i_{sq}, \phi_{sq}$  : les composantes en quadrature de la tension, du courant et du flux au stator dans le plan (d, q);  
 $R_s$  et  $R_r$  : les résistances dans une phase du stator et du rotor ( $\Omega$ );  $L_s, L_r$  : les inductances statorique et du rotorique (H);  $L_m$  : l'inductance mutuelle entre rotor et stator (H);  $\omega_s, \omega_r$  : les pulsations statorique et rotoriques (rd/s);  $\Omega$  : La vitesse de rotation mécanique (rd/s);  $s$  : la variable de Laplace;  $C_m$  : le couple électromagnétique (N.m);  $p$  : le nombre de paires de pôles;  $J$  : le moment d'inertie ( $kg.m^2$ );  
 $f$  : le coefficient de frottements (N.m.s/rd);  $\sigma = 1 - \frac{L_m^2}{L_s L_r}$  : Le coefficient de dispersion de Blondel;*

$T_r = L_r / R_r$  : La constante de temps rotorique.

L'implémentation de ce modèle associé au moulin a permis de procéder à la simulation, sous Matlab-Simulink, du dispositif machine-moulin.

### 2-3. Le dispositif expérimental

Le dispositif expérimental, représenté sur la **Figure 1**, est constitué de deux parties :

- La partie d'acquisition et d'enregistrement de données et de mesure, constituée principalement des appareils de mesures ou d'alimentation (variateur de vitesse, analyseur de réseau, câbles d'alimentation et schéma de câblage) placée à un endroit d'environ 10 mètre du moulin pour éviter d'éventuelles perturbations occasionnées par les vibrations.
- La seconde partie est constituée du moulin avec le moteur et le tachymètre qui permet de mesurer la vitesse de rotation de l'arbre du moteur.



Figure 1 : Dispositif expérimental pour la caractérisation du moulin artisanale

### 3. Résultats et discussion

#### 3-1. Valeurs relatives à l'expérience

La caractérisation du moulin artisanal consiste à déterminer expérimentalement les constantes  $k_1$ ,  $k_2$ ,  $k_3$ ,  $k_4$ ,  $K$  et  $N_0$ . Les mesures, enregistrées dans les différents appareils, ont permis d'avoir les **Figures 2a et 2b**.

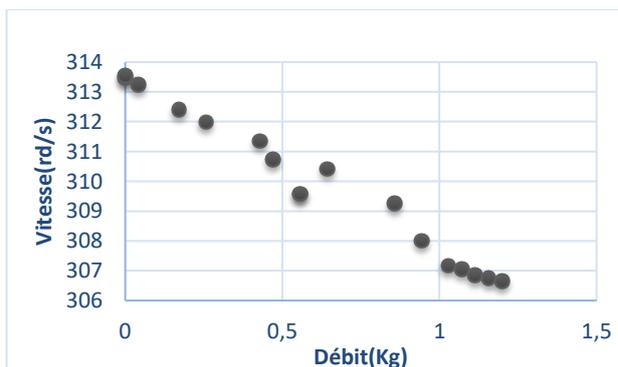


Figure 2a : La vitesse en fonction du débit

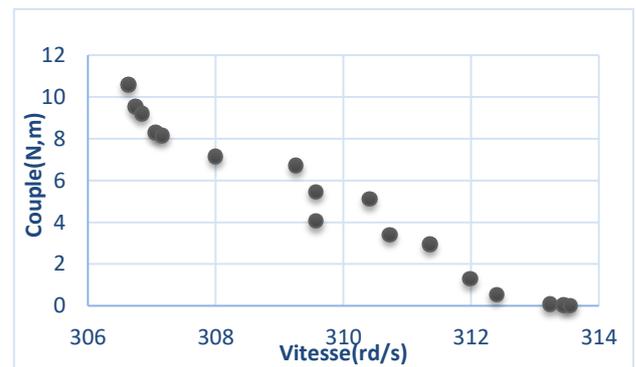


Figure 3b : Le couple en fonction de la vitesse

Les **Figures 2a et 2b** ont permis de déterminer les constantes, des équations donnant le couple et la vitesse, dont leurs valeurs sont résumées dans **le Tableau 1**.

**Tableau 1 : les grandeurs caractéristiques du moulin**

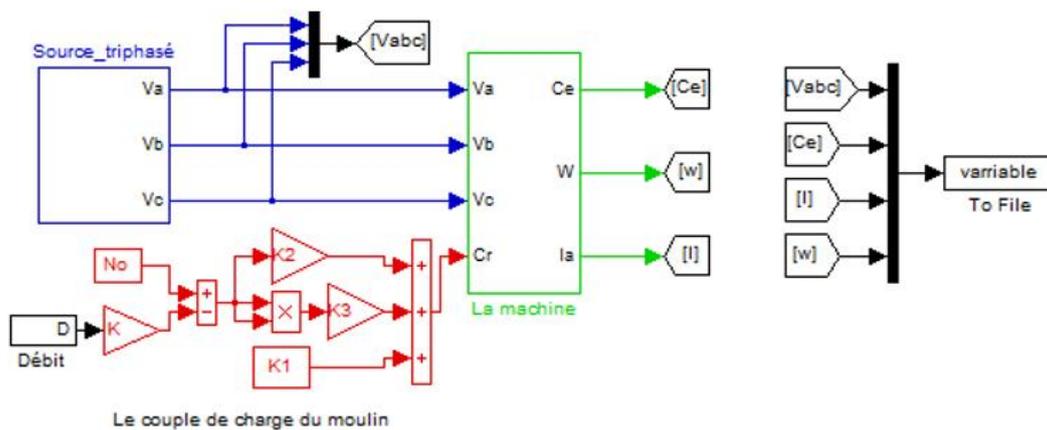
$k_1(N.m)$	$k_2(N.m.s / rd)$	$k_3(N.m.s^2 / rd^2)$	$k_4(N.m.rd.s)$	$K(rd / kg)$	$No (rd / s)$
2091.2	-12.031	0.0171	0	5,8161	313,47

A partir du **Tableau 1** donnant les valeurs des constantes, les caractéristiques mécaniques, du moulin sont obtenues. Ainsi, le couple est donné par **la Relation (10)**

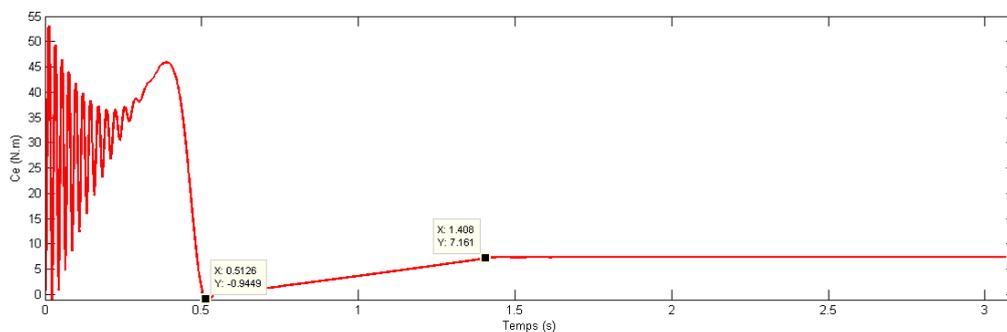
$$Cr = k_3(No - KD)^2 + k_2(No - KD) + k_1 \tag{10}$$

**3-2. Valeurs relatives à la simulation**

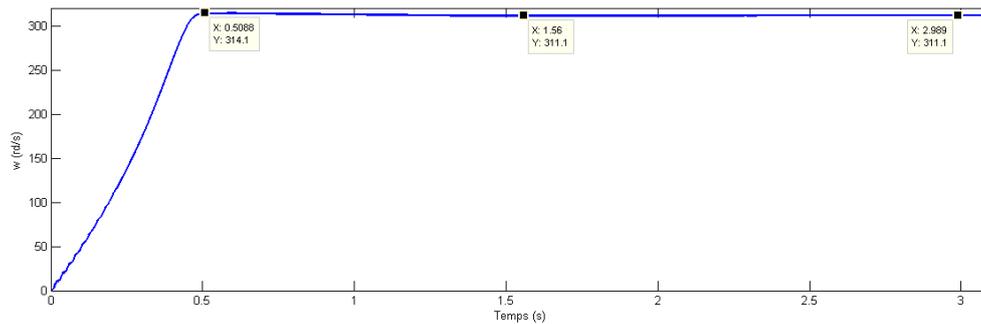
La simulation est faite sous l'environnement Matlab-Simulink, dont le modèle est représenté sur la **Figure 2**, avec les paramètres suivants :  $R_s = 7.828 \Omega$ ;  $R_r = 1.4e-7 \Omega$ ;  $L_s = 0.161 = 0.161 H$ ;  $L_m = 0.274 H$ ;  $p = 1$ ;  $J = 1.5e-4 kg.m^2$ ;  $fr = 1,5e-5 N.m.s/rd$ .



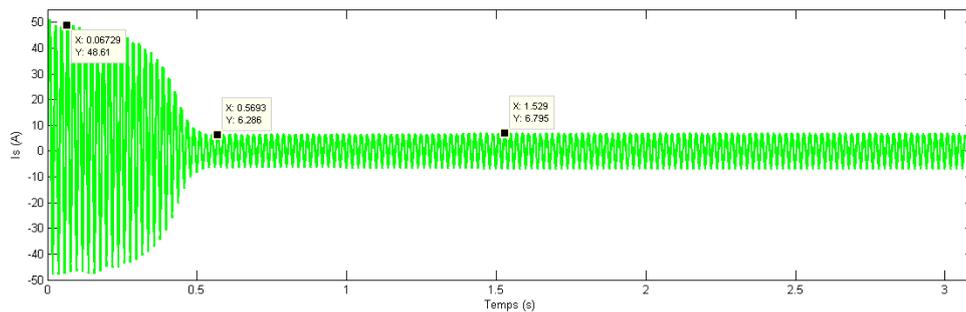
**Figure 4 : Le modèle du moteur avec le moulin sous Simulink**



**Figure 5 : Le couple électromagnétique**



**Figure 6 :** *La variation de la vitesse du moulin*



**Figure 7 :** *Le courant dans une phase du stator*

Les **Figures 4, 5 et 6** représentent respectivement la vitesse, le couple et le courant dans une phase du stator. Le processus de simulation consiste à charger le moulin de manière progressive jusqu'au plein chargement. Pour toutes les grandeurs, on observe une période transitoire, marquée par une oscillation importante, des grandeurs notamment le courant avec 50 A, soit 8 fois la valeur nominale comme représenté sur la **Figure 6**. L'application d'une charge de manière progressive et linéaire allant de 0 à 7.2 N.m, correspondant à la phase de chargement en régime permanent, fait croître le courant de 6.3A à 6.8A (**Figure 4**) et de 0 à 7.2 N.m le couple (**Figure 5**). De la même manière, on note une diminution de la vitesse de 314.1 rd/s, il passe à 311.1 rd/s (**Figure 6**). Les résultats traduisent le comportement normal des systèmes motorisés utilisant les machines asynchrones. Ils permettent de valider la forme du couple de charge des moulins, et la relation existante entre le couple, la vitesse et le débit.

#### 4. Conclusion

Dans ce papier, une brève description du moulin artisanal et de la modélisation de la machine asynchrone sont faites. La modélisation du moulin a permis d'établir les relations liant le couple, la vitesse et le débit dont les constantes sont déterminées à partir de tests expérimentaux. La simulation effectuée par les caractéristiques du moulin a donné des résultats satisfaisants. Ils ont permis de valider les caractéristiques mécaniques du moulin trouvées expérimentalement. Ce travail permet de doter aux moulins artisanaux de fiches techniques afin d'améliorer leur production et de parer aux dysfonctionnements.

**Références**

- [1] - H. M. MBENGUE, "Etude d'un décortiqueur adapté aux besoins de transformation artisanale des mils, maïs et sorgho au Sénégal", Eds John Libbey Eurotext, Paris, (1989) 255-263.
- [2] - J. C. FAVIER, "Valeur nutritive et comportement des céréales au cours de leurs transformations", Eds John Libbey Eurotext, Paris, (1989) 285-297.
- [3] - M. MATARAY and V. KAKKAR, "Asynchronous machine modeling using Simulink fed by pwm inverter", *International Journal of Advances in Engineering & Technology*, Vol. 1(2) (2011) 206 - 214.
- [4] - M. ENG and C. U. OGBUKA, "Dynamic modeling and simulation of a 3-hp asynchronous motor driving a mechanical load", *The Pacific Journal of Science and Technology*, Vol.10 (2011) 77-82.
- [5] - S. K. JAIN and al, "Modeling and simulation of an induction motor" *International Journal of Engineering Research and Development*, Vol.10 (4) (2014) 57-61.
- [6] - V. SARAC and G. CVETKOVSKI, "Transient analysis of induction motor using diferent simulation models", *Acta Technica Jaurinensis*, Vol. 6(1) (2013).
- [7] - J. KRIAUCIUNAS and al, "Self-Tuning Speed Controller of the Induction Motor Drive", *Elektronika ir Elektrotechnika*, Vol. 20 (6) (2014) 24-28.
- [8] - Y. OGUZ and M. DEDE, "Speed estimation of vector controlled squirrel cage asynchronous motor with artificial neural networks", *Energy Conversion and Management* Vol. 52 (2011)675 - 686.
- [9] - P. M. PALPANKAR and al, "A generalized dynamic model of induction motor using Simulink", *ITSI Transactions on Electrical and Electronics Engineering (ITSI-TEEE)*, Vol. 1(5) (2013) 118 - 122.