

Modélisation et analyse exergetique d'un système de gazéification des résidus de bois en vue de la production d'électricité

Tahiry Landry Razanajatovo¹, Dominique Morau², Hery Tiana Rakotondramiarana^{1*}

¹ Institut pour la Maîtrise de l'Energie (IME), BP 566, Campus universitaire d'Ambohitsaina, Antananarivo (101), Madagascar

² Laboratoire PIMENT, Université de la Réunion, 117 Rue du Général Ailleret 97430, Le Tampon Réunion, France

* auteur correspondant : rktmiarana@yahoo.fr

Résumé :

Cette étude s'est focalisée sur l'opportunité de l'utilisation des ressources renouvelables, comme le bois, dans le domaine énergétique. La modélisation de chaque étape de transformation de l'énergie des résidus bois en électricité est présentée : transformation du bois en gaz de synthèse par le biais d'un gazogène – conversion de l'énergie calorifique du syngaz en énergie mécanique par l'utilisation d'un moteur à combustion interne – conversion de l'énergie mécanique en énergie électrique avec l'aide d'un alternateur. Pour cela, des modèles pour chaque procédé ont été mis en place. Pour l'étude énergétique, le concept de l'exergie et de l'analyse exergetique ont été préférés dans ce travail. La fiabilité des modèles est validée par des comparaisons avec des données expérimentales. Une analyse de sensibilité par l'utilisation de l'algorithme automatisé de GoSAT est faite pour l'étude des paramètres des modèles.

Mots clés : *modélisation, biomasse, exergie, analyse exergetique, irréversibilité*

1. Introduction

L'incessante croissance en termes de besoins énergétiques mondiales, depuis quelques années, a contribué à la révolution des recherches scientifiques dans ce domaine à se tourner vers la biomasse. Dans les pays en voie de développement, comme le cas de Madagascar, l'utilisation des ressources renouvelables comme le bois est encore rudimentaire alors que la biochimie et la thermochimie sont d'autres alternatives de transformation [1].

Avec un pouvoir calorifique d'environ 18000kJ/kg [2], le bois présente plusieurs

avantages en termes d'énergie. La conversion thermochimique du bois ou de résidus de bois est caractérisée par la transformation de celui-ci à haute température. Ce procédé suit plusieurs étapes (pyrolyse – gazéification – combustion) ayant pour finalité la production de syngaz [1] contenant du CO, H₂, N₂, CO₂ et quelques hydrocarbures. Ce mélange gazeux généré peut être transformé en chaleur mais aussi en électricité par l'intermédiaire d'un moteur à combustion interne et d'un alternateur [3] qui est plus pratique.

Le concept de la qualité d'énergie, c'est-à-dire l'exergie [4], peut être utilisé pour l'étude énergétique du système pour chaque étape de transformation de l'énergie, conduite par une

analyse exergetique [5] du procédé ainsi que l'évaluation de l'efficacité exergetique correspondante [5]. La mise en place d'un modèle peut aussi être très utile pour ces genres d'études de transformations assez complexes.

Le présent mémoire se concentre sur la conversion de l'énergie des résidus de bois en électricité (transformation du bois en syngaz – conversion du mélange gazeux en force motrice – transformation de la force motrice en électricité). Les principaux buts de ce travail sont : (a) d'établir une modélisation pour chaque étape de transformation de l'énergie des résidus de bois en électricité, (b) de faire l'analyse exergetique de chaque étape de conversion ainsi que l'efficacité exergetique correspondante, (c) et de déterminer les sources d'irréversibilités du système ainsi que les paramètres influents de chaque modèle d'étude.

2. Matériels et méthodes

2.1. Matériels

Le pin (plus précisément des résidus de pin) a été utilisé comme biomasse d'étude avec 48.18% de C, 5.71% de H, 43.89% de O, 0.15% de N, 2.07% de Ash et 0.00% de S [3].

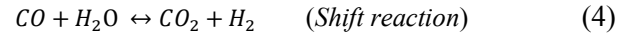
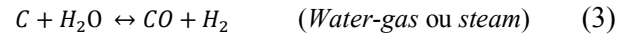
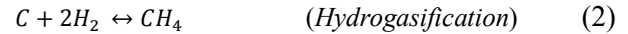
Le gazogène choisi a été un gazogène à co-courant plus pratique pour la transformation du bois en syngaz, le moteur à combustion interne utilisé a été celui d'une Nissan Dig-S 98 moteur à quatre temps et l'alternateur, une machine synchrone triphasée de Leroy Somer du type LSA371 pour faire cette étude.

Les modèles ont tous été faites sous le logiciel Matlab et GoSAT [6] a été choisi pour les analyses de sensibilité pour vérifier les paramètres influents.

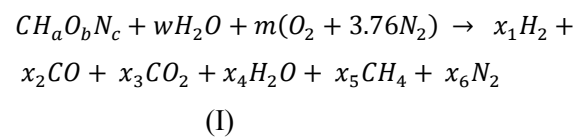
2.2. Principes et modélisation de gazéification des résidus de bois

La gazéification des résidus de bois par le gazogène à co-courant se fait dans une même

enceinte mais suivant différentes zones en fonction de la température. Les principales réactions chimiques correspondantes sont définies par :



L'équation bilan qui a traduit cette transformation est donnée par :



Avec $CH_aO_bN_c$ est la formule chimique de la biomasse [7] et m , w et x_i sont respectivement le nombre de moles d'air, l'humidité de la biomasse et les coefficients stœchiométriques du gaz de synthèse obtenu.

Il a fallu trouver 6 équations indépendantes pour la recherche des x_i caractéristiques du syngaz dont 4 paramètres ont été données par l'équilibre stœchiométrique du bilan (I) et les 2 autres en calculant les constantes d'équilibre ke des réactions (3) et (4) sachant que leur formule générale [3] est décrite par :

$$ke = \prod_i (x_i)^{v_i} \left(\frac{P}{P^0} \right)^{\sum_i v_i} \quad (5)$$

Où P et P^0 sont les pressions à un état donné et à l'état mort du système (en Pa).

La constante d'équilibre est fonction de la température de gazéification T et de l'enthalpie de Gibbs [3], [8]:

$$\ln ke(T) = - \frac{\Delta G_T}{RT} \quad (6)$$

Avec :

$$\Delta g_{f,T,i}^0 = h_{f,i}^0 - a_i' T \ln T - b_i' T^2 - \left(\frac{c_i'}{2}\right) T^3 - \left(\frac{d_i'}{3}\right) T^4 + \left(\frac{e_i'}{2T}\right) + f_i' + g_i' T \quad (7)$$

Les coefficients de l'équation (7) sont définis dans le tableau 1 et la température de gazéification du système a été déterminée par les formulations développées par Jarunghammachote et A. Dutta [3]

Le bilan exergetique qui a caractérisé ce procédé de transformation est donné par :

$$Ex_{biomasse} + Ex_{air} = Ex_{syn} + Ex_{tar} + Ex_{ash} + Ex_{char} + I \quad (8)$$

Où :

- $Ex_{biomasse}$ est l'exergie de la biomasse (kJ/kg)
- Ex_{air} est l'exergie de l'air (kJ/kg)
- Ex_{syn} est l'exergie du mélange gazeux (kJ/kg)
- Ex_{tar} est l'exergie du goudron (kJ/kg)
- Ex_{ash} est l'exergie des cendres (kJ/kg)
- Ex_{char} est l'exergie du charbon (kJ/kg)
- I représente les irréversibilités (kJ/kg)

Dont les exergies de l'agent (air), du mélange gazeux ainsi que du charbon sont déterminées par la somme de leur exergie physique et chimique [10]:

$$Ex = Ex^{ph} + Ex^{ch} \quad (9)$$

L'exergie physique et l'exergie chimique ont été exprimée respectivement par :

$$Ex^{ph} = \sum_i n_i [(h - h^0) - T^0(s - s^0)] \quad (10)$$

$$Ex^{ch} = \sum_i n_i \left[\left(ex_i^{ch} + RT^0 \ln \frac{n_i}{\sum n_i} \right) \right] \quad (11)$$

Où h et s sont respectivement l'enthalpie et l'entropie spécifique de l'élément i à une température donnée et h^0 et s^0 ceux à l'état de référence exprimés en kJ/kmol.K ; ex_i^{ch} est l'exergie chimique standard de l'élément i (en kJ/kmol) et R est la constante des gaz parfait (8.314472 kJ/kmol.K). Ces coefficients sont représentés dans le tableau 2.

L'efficacité exergetique [12] qui a résulté de ce système représenté par l'équation (8) a été exprimée par :

$$\Psi = \frac{Ex_{syn}}{Ex_{biomasse} + Ex_{air}} \quad (12)$$

Tableau 2 : Enthalpie spécifique, entropie et exergie chimique standard des éléments [9,10,11]

ELEMENTS	$h_0(kJ/kmol)$	$s_0(kJ/kmolK)$	$ex^{ch}(kJ/kmol)$
CO	8669	197,543	275,100
CO ₂	9364	213,685	19,870
CH ₄	-74,850	186,16	831,650
H ₂ O(g)	9904	188,720	9.500
H ₂ O(l)	-	69,940	900
H ₂	8468	130,574	236,100
O ₂	8682	205,033	3.970
-	-	-	-

Tableau 1 : Coefficients pour le calcul de l'enthalpie standard de Gibbs [3,9]

PRODUITS	$h_{f,i}^0$	a_i'	b_i'	c_i'	d_i'	e_i'	f_i'	g_i'
CO	-110.529	5,619.10 ⁻³	-1,190.10 ⁻⁵	6,383.10 ⁻⁹	-1,846.10 ⁻¹²	-4,891.10 ²	0,868	-0,061
CO ₂	-393.522	-1,949.10 ⁻²	3,122.10 ⁻⁵	-2,448.10 ⁻⁸	6,946.10 ⁻¹²	-4,891.10 ²	5,270	-0,121
CH ₄	-74.873	-4,620.10 ⁻²	1,130.10 ⁻⁵	1,319.10 ⁻⁸	-6,647.10 ⁻¹²	-4,891.10 ²	14,110	0,223
H ₂ O(g)	-241.827	-8,950.10 ⁻³	-3,672.10 ⁻⁶	5,209.10 ⁻⁹	-1,478.10 ⁻¹²	0	2,868	-0,017
H ₂ O(l)	-285.838	0	0	0	0	0	0	0

La modélisation de ce système s'est basée sur la résolution de l'équation bilan (I). Comme le système d'équations pour la résolution de (I) est un système non linéaire, la fonction « fsolve » a été choisi pour la détermination de la température de gazéification et la résolution du problème.

2.3. Principes et modélisation de la conversion du syngaz en énergie motrice

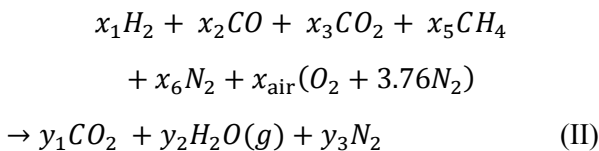
La transformation de l'énergie du syngaz en énergie mécanique par l'intermédiaire d'un moteur à combustion interne suit le principe fondamental du cycle de Beau de Rochas. Le bilan théorique de ce cycle à quatre étapes distinctes (compression du mélange air-carburant – chauffage isochore – détente isentropique – refroidissement isochore) a établi l'expression du travail utile [9] et celle de la chaleur de combustion [9] :

$$W_u = W_{cycle} = c_v T_1 (\lambda - 1) (\rho^{\gamma-1} - 1) \quad (13)$$

$$Q_{comb} = c_v T_1 (\lambda - 1) (\rho^{\gamma-1}) \quad (14)$$

Où c_v , λ , ρ et γ sont respectivement la capacité calorifique à volume constant, le rapport des pressions, le rapport volumétrique et la constante thermodynamique caractéristique de l'adiabatique.

Le bilan du procédé de transformation du syngaz obtenu en énergie motrice a été caractérisé par [3] :



Avec x_i sont les coefficients stœchiométriques des composants du syngaz obtenu par le gazogène, x_{air} est le nombre de moles d'air à l'admission du moteur et y_i représente les coefficients caractéristiques du gaz à l'échappement du moteur.

L'analyse exergetique du système traduit par (II) a montré le bilan entre l'exergie nécessaire fourni à l'entrée du moteur ainsi que l'exergie en sortie du système et les pertes exergetiques occasionnées :

$$Ex_{syn} + Ex_{air} = Ex_{comb} + Ex_{ther} + Ex_{mot} + Ex_{échap} + I \quad (15)$$

Où :

Ex_{comb} est l'exergie perdue par combustion (kJ/kg)

Ex_{syn} est l'exergie du mélange gazeux (kJ/kg)

Ex_{air} est l'exergie de l'air à l'admission (kJ/kg)

Ex_{mot} est l'exergie du moteur (kJ/kg)

$Ex_{échap}$ est l'exergie perdue à l'échappement (kJ/kg)

Ex_{ther} est l'exergie perdue par transferts thermiques (kJ/kg)

I représente les irréversibilités (kJ/kg)

L'exergie perdue par transferts thermiques a été exprimée par [13]:

$$Ex_{ther} = \sum_i Q_i \left(1 - \frac{T^0}{T_i}\right) \quad (16)$$

Le rendement exergetique [14] correspondante a été déduite par :

$$\Psi = \frac{Ex_{mot}}{Ex_{syn} + Ex_{air}} \quad (17)$$

La modélisation de cette partie s'est focalisée sur la résolution de l'équation (15) en tenant compte du bilan total (II). Les proportions de gaz ont été calculées par la résolution d'un système d'équations trouvé en faisant la balance stœchiométrique de l'équation (II) avec la fonction « fsolve ». Ces coefficients ont été ensuite introduits dans (15) pour en tirer l'efficacité exergetique du système.

2.4. Principes et modélisation de transformation de l'énergie motrice en électricité

Le principe fondamental de la conversion de l'énergie mécanique en énergie électrique est traduit par la loi de Faraday sur le magnétisme ainsi que celle de Lenz [4] :

$$e = -\frac{d\Phi}{dt} \quad (18)$$

Avec e est force électromotrice (en V), $d\Phi$ la variation de flux (en Wb) et dt la variation du temps.

La machine synchrone, de l'intérieur, est un système axial tridimensionnel et sa modélisation a nécessité l'utilisation de la transformation de Park [15] pour ramener ce système à un modèle bidimensionnel plus facile à étudier. Pour cela, des hypothèses ont été établies [3,15,16] : les pertes électriques par courants Foucault, dues aux amortisseurs, des couplages capacitifs et de l'hystérésis sont négligées ; la force magnétomotrice engendrée par les enroulements du stator est considérée comme sinusoïdale et la saturation dans les circuits magnétiques est supposée inexistante.

Le modèle mathématique de Park [3,15,17] est défini par :

$$[X_{dq0}] = P(\theta). [X_{abc}] \quad (19)$$

Où θ est l'angle statorique et avec :

$$P(\theta) = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} \cos(\theta) & \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta - \frac{4\pi}{3}) \\ -\sin(\theta) & -\sin(\theta - \frac{2\pi}{3}) & -\sin(\theta - \frac{4\pi}{3}) \\ \frac{1}{2} & \frac{1}{2} & \frac{1}{2} \end{bmatrix} \quad (20)$$

Les tensions de chaque phase, dans le système triphasé de la machine synchrone, peuvent être traduites par :

$$\begin{cases} v_{abc} = -R_s i_{abc} + \frac{d\psi_{abc}}{dt} \\ v_{fdq} = -R_r i_{fdq} + \frac{d\psi_{fdq}}{dt} \end{cases} \quad (21)$$

Où i est l'intensité de courant, $d\psi$ la variation du flux magnétique et les indices abc et fdq représentent respectivement les phases du stator et celui du rotor et R_s et R_r correspondent respectivement aux matrices diagonales des résistances de chaque phase pour le rotor et le stator.

En appliquant le modèle mathématique de Park aux expressions développées des tensions et aux flux magnétiques en jeu, on a pu trouver [15] :

$$\begin{aligned} v_q &= -R_s i_q + \frac{d\psi_q}{dt} + \omega_{rotor} \psi_d & 0 &= R_D i_D + \frac{d\psi_D}{dt} \\ v_d &= -R_s i_d + \frac{d\psi_d}{dt} - \omega_{rotor} \psi_q & 0 &= R_Q i_Q + \frac{d\psi_Q}{dt} \\ & & v_f &= R_f i_f + \frac{d\psi_f}{dt} \end{aligned} \quad (22)$$

De l'équation (22) a été tirée l'équation d'état permettant de simuler le modèle sous le logiciel Matlab :

$$\begin{bmatrix} v_d \\ v_q \\ v_f \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} = [M] \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \\ i_f \\ i_D \\ i_Q \end{bmatrix} + [Z] \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \\ i_f \\ i_D \\ i_Q \end{bmatrix} \quad (23)$$

$$[M] = \begin{bmatrix} -R_s & -l_q \omega_r & 0 & 0 & -l_{aq} \omega_r \\ -l_d \omega_r & -R_s & l_{ad} \omega_r & l_{ad} \omega_r & 0 \\ 0 & 0 & R_f & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & R_D & l_q \omega_r \\ 0 & 0 & 0 & 0 & R_Q \end{bmatrix}$$

$$[Z] = \begin{bmatrix} -l_d & 0 & l_{ad} & l_{ad} & 0 \\ 0 & -l_q & 0 & 0 & l_{aq} \\ -l_{ad} & 0 & l_f & 0 & 0 \\ -l_{ad} & 0 & 0 & l_D & 0 \\ 0 & -l_{aq} & 0 & 0 & l_Q \end{bmatrix}$$

Où $I_d = I_{ad} + I_{\sigma d}$; $I_q = I_{aq} + I_{\sigma q}$; $I_f = I_{af} + I_{\sigma f}$;
 $I_Q = I_{aq} + I_{\sigma Q}$; $I_D = I_{ad} + I_{\sigma D}$

L'équation (23) a été simulé sous Matlab en utilisant la fonction « lsim » par le concept d'équation d'état dont le but est la détermination des intensités et des tensions des phases (a,b,c) en fonction de la tension excitatrice v_f .

L'équation d'état est donnée par :

$$\begin{cases} \dot{X}^* = AX + BU \\ Y = X \end{cases} \quad (24)$$

Avec : $A = -M^{-1}Z$ et $B = -M^{-1}$

Pour une bonne simulation, une charge externe r_e de valeur élevée [16] (ordre de $10^4 \Omega$) pouvant être connectée ou déconnectée a été implantée dont le but d'obtenir des tensions dans les phases sur lesquelles des charges quelles qu'elles soient peuvent être connectées.

L'analyse exergetique du système a été caractérisée par le bilan des exergies en jeu du système :

- L'exergie à l'entrée qui n'est autre que la puissance absorbée [18] par la machine pour faire la conversion (kW) :

$$Ex_{entrée} = P_{abs} \quad (25)$$

- Les pertes par effet Joule (kW) :

$$P_{Joule} = \left[-\frac{2}{3} R_S (i_d^2 + i_q^2) + R_f i_f^2 \right] \quad (26)$$

- Les pertes exergetiques magnétique (kW) :

$$Ex_{emmag} = \left[\frac{3}{2} \left(\frac{d\Psi_d}{dt} i_d + \frac{d\Psi_q}{dt} i_q \right) + \frac{d\Psi_f}{dt} i_f \right] \quad (27)$$

- Les irréversibilités
- L'exergie utile du système qui est la puissance électrique fournie par l'alternateur en sortie (kW) :

$$Ex_{att} = U_{alt} \cdot I_{alt} \cdot \cos\varphi \quad (28)$$

3. Résultats et discussion

3.1. Résultats du modèle gazogène

Les résultats sur la proportion du syngaz obtenu ont été comparés à ceux de R. Thierry Nambinintsoa [3], qui a fait une modélisation sur la gazéification du bois (pin) et de D.T. Pedroso et al. [19] expérimentant la gazéification du pin tous deux à 9% d'humidité, comme détaillé dans la figure 2. Les autres paramètres d'entrées comme la température et le ratio d'équivalence air-carburant peuvent différer pour les trois résultats ce qui explique les écarts notables montrés sur la figure 1.

Quant aux résultats sur l'efficacité exergetique du système, ceux obtenus par le modèle présenté ont été comparés par ceux obtenus lors des expériences de Y. Zhang et al. [20] sur l'influence de l'oxydation lors de la gazéification du bois. La comparaison de ces résultats sur l'étude exergetique est décrite par la figure 2.

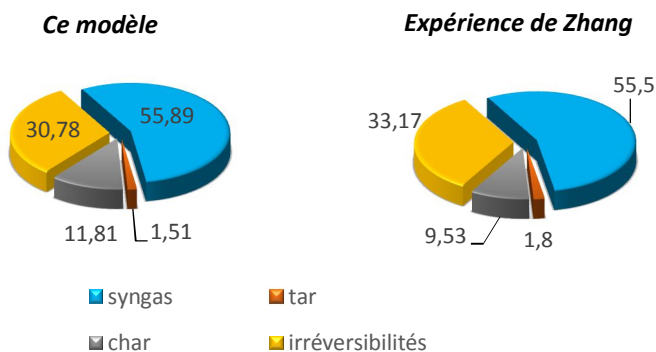


Fig. 1. Comparaison des données numériques et expérimentales [3,19] avec les résultats prédits

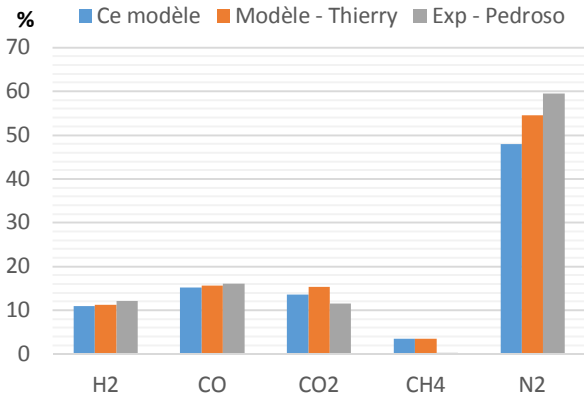


Fig. 2. Comparaison des données expérimentales [20] avec les résultats prédits sur l'efficacité exergetique (en %)

La figure 3 de l'analyse de sensibilité fournie par GoSAT montre les plus influents des paramètres d'entrées du modèle. Ces résultats montrent bien l'importance de l'humidité ainsi que du ratio d'équivalence air-carburant sur la gazéification qui affectent la difficulté des réactions chimiques, influent sur la température de gazéification (principal facteur du craquage des goudrons) et sur l'oxydation nécessaire aux différentes transformations chimiques pour l'obtention du syngaz. L'augmentation de la valeur de ces paramètres tend à améliorer le rendement exergetique tandis que sa diminution a un effet

Tableau 3 :

Caractéristique moteur type JR6 d'après constructeur [21]

Nombre de cylindres	4	en ligne
Alésage x course	88 x 82	en mm
Cylindrée	1995	en cm ³
Rapport volumétrique	9.2 :1	
Puissance maximum	74 kW	à 5500 tr/mn
Couple maximum	158 Nm	à 3000 tr/mn

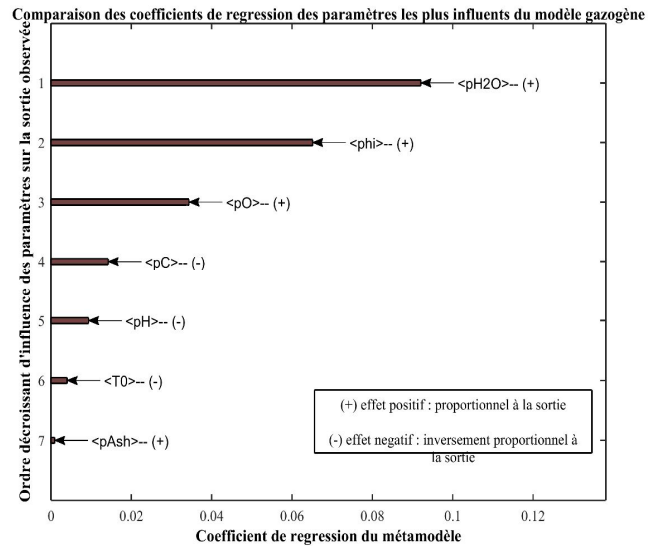


Fig. 3. Coefficients de régression du modèle gazogène

inverse. Cet effet est plutôt paradoxal pour le cas de l'humidité, toujours considéré comme facteur de difficulté du séchage, mais joue un rôle important dans les réactions de réduction (équations 3 et 4).

La figure 3 montre aussi que l'augmentation de la valeur du pourcentage en goudron entraîne une amélioration du rendement exergetique du système. Ceci est logique car le craquage du goudron (à forte température) donne naissance à des particules avec des pouvoirs calorifiques élevés fonctions de l'exergie en sortie du système.

1.1. Résultats du modèle moteur

Les travaux de recherches de M. Zhecheng LU [21] sur le bilan énergétique et exergetique d'un moteur à allumage commandé dont les caractéristiques sont détaillées dans le tableau 3 ont été pris comme références et modèles de validation du modèle.

Les comparaisons des résultats de simulation du modèle présenté sur le bilan exergetique du système avec les données expérimentales [21] sont montrées dans le tableau 4. Pour cela, les deux moteurs ont été soumis aux mêmes conditions pour en vérifier les comportements et les rendements respectifs. Il a paru que le moteur du Nissan Dig-S est moins performant que celui de Renault du type JR6 soumis à un même régime et à une même pression moyenne effective. Ceci est sûrement dû à cause de la différence des autres paramètres des

deux moteurs. De plus, la pression moyenne effective optimale de la Nissan est largement supérieure avec une pression de 13 bars contre 9,2 bars pour celui du type JR6. Cependant, par rapport au régime, le moteur du modèle présenté montre une certaine constance dans le cycle puisque ses bilans varient peu (1%) au contraire du JR6 avec une variation plus grande (plus de 2%).

Les différences entre les pertes thermiques sont les plus grandes à cause des différences entre les combustibles utilisées. En plus, les pertes en transferts thermiques par refroidissement du système lors de l'échappement des gaz faites par simulation sont englobées dans cette portion de pertes qui explique davantage cet écart.

Dans les figures 4 et 5 sont décrites les influences des paramètres d'entrées du modèle moteur présenté sur l'efficacité exergetique du système. Cette figure fournie par GoSAT montre que les deux coefficients thermodynamiques du caractère adiabatique γ et λ sont les facteurs les plus influents du modèle et présentent un effet

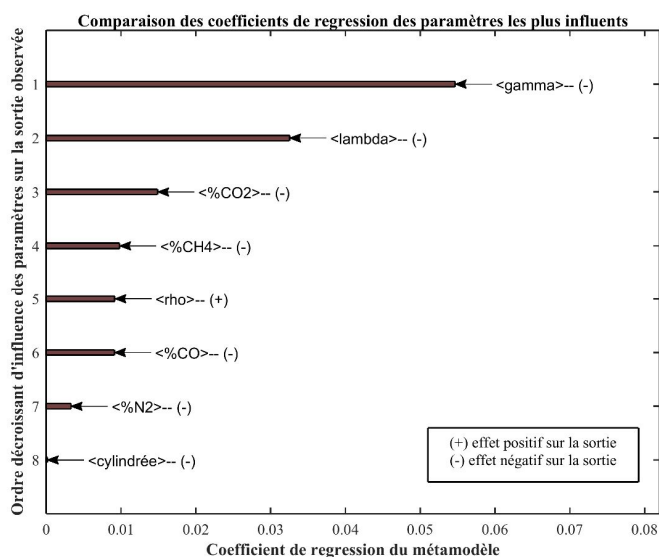


Fig. 4. Coefficients de régression du modèle moteur

Tableau 4 :

Comparaison entre les résultats des bilans exergetiques des données expérimentales [21] et du modèle donné

Conditions	PME 7.5 bars et à un régime de 3000 tr/mn		PME 7.5 bars et à un régime de 4000 tr/mn	
	JR6	Dig-S	JR6	Dig-S
Bilan exergetique (%)				
Travail utile	28.1	24.3	27.1	23.8
Pertes par échappement	26.0	22.9	28.2	22.9
Pertes dues à la combustion	20.5	17.1	20.0	17.0
Pertes dues aux parois	12.1	25.7 (transferts thermiques)	10.0	25.7 (transferts thermiques)
Pertes par les conduits	4.5		4.0	
Pertes au papillon	1.0		1.2	
Pertes aux soupapes	1.0		1.5	
Pertes dues aux imbrûlés	2.2		3.2	
Pertes par frottements	4.6	10.0	4.8	10.6
Total	100	100	100	100

inverse sur la sortie du système.

C'est plutôt logique puisque le combustible utilisé n'est pas un gaz parfait mais un mélange gazeux pauvre d'où cet effet négatif engendré par le coefficient γ . Le rapport de pressions de la chambre à combustion λ a aussi présenté ce même effet sur la sortie puisque une augmentation de sa valeur a engendré plus de pertes exergétiques causées par la combustion (température trop élevée), pertes lors de la détente et en termes de transferts thermiques par le système.

L'effet positif du rapport volumétrique de compression ρ sur la sortie est aussi montré par la figure 5. En effet, ρ influe sur le débit et la respiration du moteur puisque par définition c'est le rapport entre les volumes du point mort bas et du point mort haut du cylindre. C'est-à-dire que plus sa valeur augmente, plus il y a moins de pertes générées par les imbrûlés.

1.2. Résultats du modèle alternateur

L'alternateur utilisé pour ce modèle a été une génératrice synchrone de type LSA 371 fourni par l'entreprise Leroy Somer utilisée par Emile Mouni

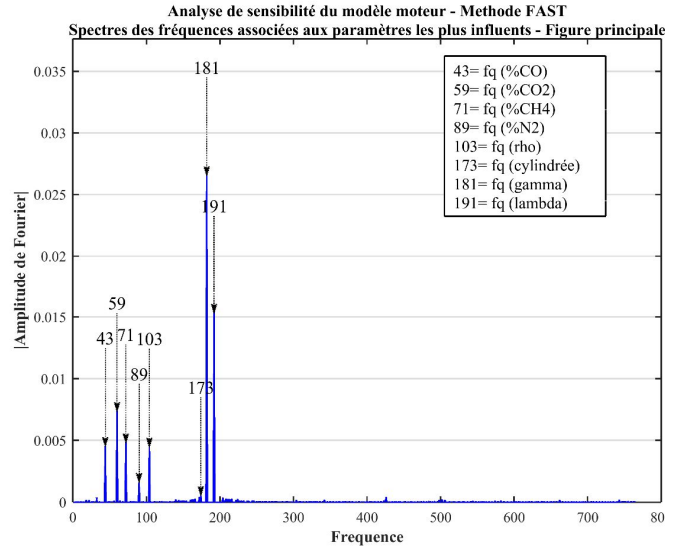


Fig. 5. Spectres de fréquences associées aux paramètres du modèle moteur

[22] pour ses travaux de thèse. Les paramètres d'entrées du modèle alternateur ont été le nombre de pôles p , le couple du moteur, la charge externe re , le couple Cpl de l'arbre, le régime de l'alternateur N , la tension Uex de départ fixée à 100V et l'intensité Iex excitatrice de 0.5A

La figure 6 montre les résultats de simulation du modèle en sortie de l'alternateur. La transformation de Park a contribué à la facilitation de la résolution de l'équation principale du modèle l'équation (23). La figure 6 montre que le régime transitoire a duré environ 0.6 secondes avant que

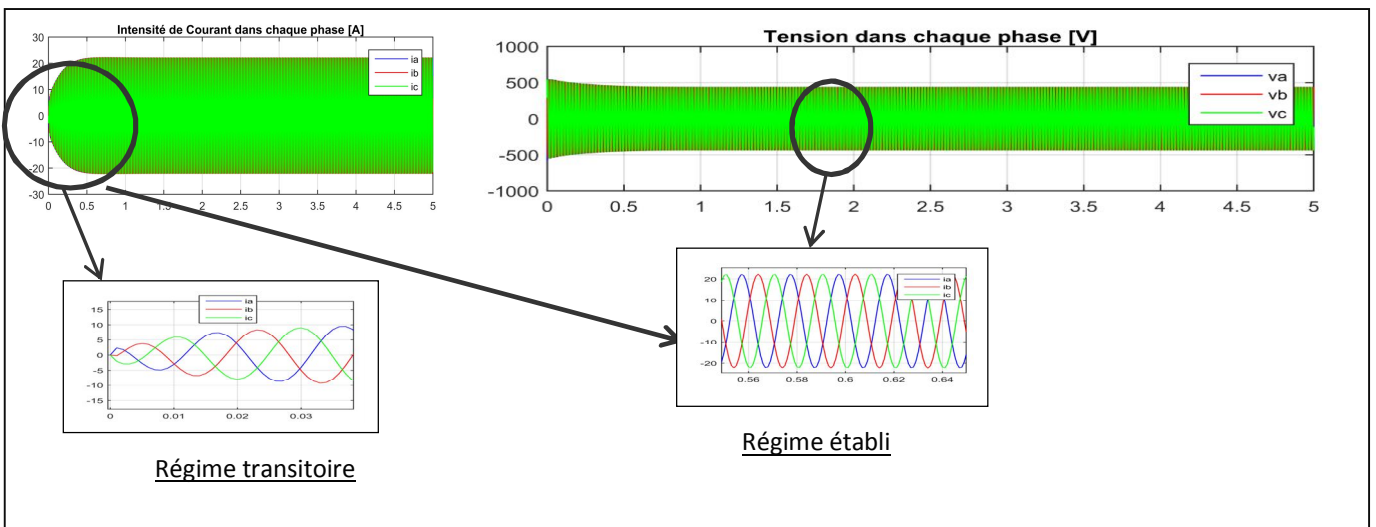


Fig. 6. Résultats de simulation du modèle alternateur

l'intensité se stabilise sur une valeur de 22 Ampères en valeur absolue. Cette valeur atteinte, le régime s'est stabilisé d'où le synchronisme des intensités i observé pendant cette période.

La figure 7 montre les effets des interactions doubles des paramètres d'entrée sur la sortie du modèle. Les influences notables du nombre de pôle p et celui de la charge externe re sont représentées dans la figure 7. D'une part, ils ont agi comme ayant des effets positifs et d'autre part les effets contraires. Comme GoSAT étudie et analyse le modèle pour différentes valeurs des paramètres d'entrée pour vérifier si un effet stationnaire du modèle est atteint, on peut déduire qu'au-delà d'une certaine valeur, ces deux paramètres ont agi dans un dans un sens contraire sur la sortie. Pour le nombre de pôle, le choix de sa valeur dépend uniquement des caractéristiques de l'alternateur utilisé, par contre le choix de la charge est plus complexe et dépend des charges internes de l'alternateur et du branchement de la charge elle-même.

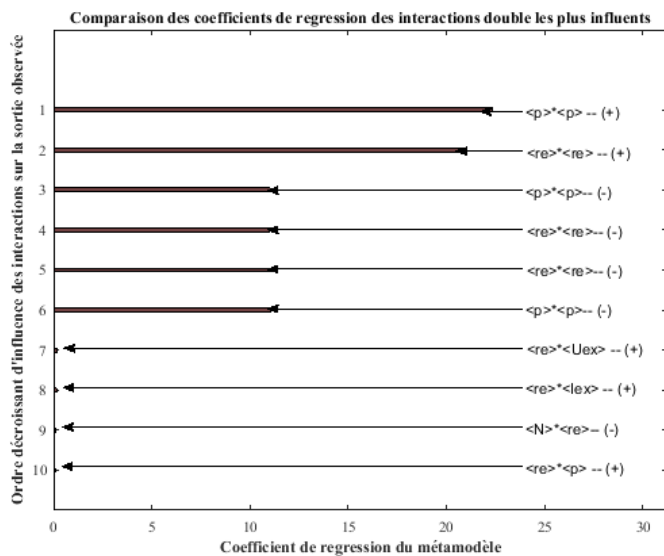


Fig. 7. Coefficients de régression des interactions double du modèle alternateur

La figure 8 représente les effets globaux des paramètres d'entrées sur la sortie. La charge externe re est toujours restée le paramètre le plus influent avec un effet positif sur le système. Ceci est en parfait accord la théorie puisqu'en général, la valeur de la charge externe est toujours préférable élevée (environ $10^5 \Omega$). Le couple Cpl , le nombre de pôle p et le régime moteur N par contre ont présenté des effets contraires puisque la machine synchrone marche avec des paramètres d'entrées bien définies : une augmentation de celles-ci peut diminuer l'efficacité de l'alternateur à bien fonctionner et voire même l'endommager (exemple au niveau du rotor : avec un régime trop élevé, l'arbre risque de se casser).

2. Conclusion

La modélisation des différentes transformations de l'énergie calorifique présente dans les résidus de bois en énergie électrique a été établie dans cette étude. Les résultats de simulation ont été comparés avec des données expérimentales approuvées dans les littératures, révélant que les

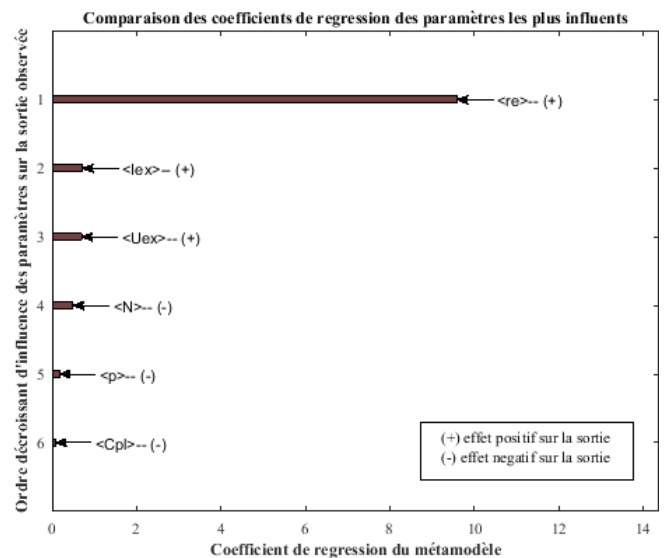


Fig. 8. Coefficients de régression des paramètres influents du modèle alternateur

modèles ont pu prédire les performances de chaque système de conversion avec une précision assez raisonnable. Les modèles ont alors été utilisés pour l'analyse exergetique, basée sur la première et la seconde loi de la thermodynamique, de chaque procédé de transformation. Les effets de chaque paramètre d'entrée de chaque modèle ont été ensuite étudiés par l'utilisation du système d'analyse de sensibilité GoSAT sous le logiciel Matlab. Les modèles développés dans cet article peuvent être utilisés pour la simulation de la gazéification d'autres types de biomasse pour la production d'électricité. Une optimisation de ces modèles est aussi possible pour des études plus poussées comme une étude exergoéconomique du système en entier.

Références

- [1] : Direction Générale de l'Energie et du Climat, *Biomasse énergie*, France, 2010. Accessible sur : <http://www.ladocumentationfrancaise.fr/var/storage/rapports-publics/134000060.pdf>
- [2] : Mermoud Floriane, Gazéification du charbon de bois à la vapeur d'eau : de la particule isolée au lit fixe continu, Thèse de doctorat, Institut National Polytechnique de Toulouse, 2006.
- [3] : Nambinintsoa Ravakiniaina Thierry, Modélisation d'un système de production d'énergie à partir des résidus de bois en vue les valoriser en une source d'énergie. Mémoire de Master, Université de la Réunion, 2014.
- [4] : Randriambahoaka Noromahefa. Analyse exergetique d'un système de conversion d'énergie renouvelable : cas de la picocentrale hydroélectrique d'Andriantsemboka Analamanga Madagascar. Mémoire de DEA, Université d'Antananarivo, 2014.
- [5] : Ibrahim Dincer, Cengel, Yunus A. Energy, entropy and exergy concepts and their roles in thermal engineering. *Journal of MDPI - Entropy* Vol. 3, (2001) pp 116 – 149.
- [6] : Rakotondramiarana Hery Tiana, Andriamamonjy Ando Ludovic. Matlab automation algorithm for performing global sensitivity analysis of complex system models with a derived FAST method. *Journal of Computations and Modelling*, Vol. 3, (2013), pp 17 – 56.
- [7] : Roy P. C., Datta A., Chakraborty N.. Kinetic model of the reduction zone of a downdraft biomass gasifier. Article, *International Journal of Emerging Technology and Advanced Engineering*, Vol. 3, (2013) pp 591 – 597.
- [8] : Pandey S. et al., Prediction of syngas composition from biomass gasification using thermodynamics equilibrium models. *Rentech Symposium Compendium*, Vol. 3, (2013).
- [9] : Goncalves Da Silva Eric, Thibault Jean-Paul, Cycles thermodynamiques des machines thermiques. Thèse, Institut Polytechnique de Grenoble : pp 64 – 67, 2011.
- [10] : Zhang Yanning et al., Energy and exergy analyses of syngas produced from rice husk gasification in an entrained flow reactor. Article. *Journal of Cleaner production*, (2015), pp 1 – 8.
- [11] : Arend de Groot, *Advanced exergy analysis of high temperature fuel cell systems*. Dissertation. Delft University of technology, Faculty of applied sciences, 2004.

[12] : Wu Yueshi, Yang W., Blasiak W., Energy and exergy analysis of high temperature agent gasification of biomass. Article. *Journal of MDPI - Energies*, (2014). pp 2107 – 2122.

[13] : Pinard Sébastien, Fraisse Gilles, Memezo Christophe, Lepierres Nolwenn. Analyse exergetique d'un système de chauffage adapté à la rénovation par l'intérieur. Accessible sur : https://www.polytech.univ-smb.fr/fileadmin/polytech_autres_sites/sites/auge2012/actes/Contribution1208.pdf

[14] : Yin Ningxia et al., Exergy analysis of ideal thermodynamic cycle for the four stroke free piston engine (FPE). Article, *International Energy Journal* 14, (2014), pp 199 – 208.

[15] : Mahgoun Mohamed Seddick, Application de la commande H_∞ aux systèmes linéaires perturbés. Mémoire de Magister, Université Ferhat Abbas – Setif Ufas – Algérie, 2012.

[16] : Barakat Abdallah et al., Analysis of synchronous machine modeling for simulation and industrial applications. Article, *Simulation modeling practice and theory journal*, Vol. 18, (2010), pp 1382 – 1396.

[17] : Mallen Badis, Modélisation, analyse et commande des grands systèmes électriques

interconnectés. Thèse de doctorat, Ecole Normale Supérieure de Cachan, 2010.

[18] : Gimeno Anthony. Contribution à l'étude d'alternateurs automobiles : caractérisation des pertes en vue d'un dimensionnement optimal. Thèse de doctorat, Université de Technologie de Compiègne, 2011.

[19] : Pedroso T. Daniel et al., Biomass gasification on a new really tar free downdraft gasifier. Article, *Journal of Exact Sciences*, Vol. 11, (2005), pp 59 – 62.

[20] : Zhang Yaning et al., Exergy analysis of biomass utilization via steam gasification and partial oxidation. Article. *Journal of Thermochemica Acta*, Vol. 538, (2012), pp 21- 28.

[21] : Lu Zhecheng M., Bilan énergétique et exergetique d'un moteur à allumage commandé. Thèse de doctorat, Ecole centrale de Lyon. pp 95 – 96, 1991.

[22] : Mouni B. Emile, Contribution à l'amélioration des performances des génératrices synchrones : nouvelle structure d'excitation basée sur une machine à aimants et combinée à des lois de commande avancée. Thèse, Université de Poitiers, 2008.