Revue des Energies Renouvelables Vol. 16 N°1 (2013) 75 – 89
DOI: https://doi.org/10.54966/jreen.v16i1.365

Utilisation des coques de noix de palmiste comme combustible dans un four de fusion de la ferraille

Samuel Epesse Misse [1], Marcel Obounou [2],
Louis Max Ayina Ohandja [1] et Sébastien Caillat [3,4]

[1] Département de Génie Mécanique et Productique
Institut Universitaire de Technologie
Université de Douala, B.P. 8698, Douala, Cameroun
[2] Département de Physique, Faculté des Sciences
Université de Yaoundé 1, Cameroun
[3] Université de Lille Sciences et Technologie, 59000 Lille, France
[4] Ecole Nationale Supérieure des Mines, B.P. 10838, 59508 Douai, France

(reçu le 09 Janvier 2013 – accepté le 29 Mars 2013)

Résumé - *Dans ce travail, la possibilité d'utiliser des coques de palmistes comme combustible de substitution au coke métallurgique qui est un combustible fossile, est menée dans un petit four métallurgique appelé cubilot. Ces déchets obtenus après extraction de l'huile de palme et de palmiste, présentent comme tout produit issu de la biomasse, un bilan nul en CO_2 pendant leur combustion. L'étude montre de façon comparative, que l'emploi des coques de palmiste en lieu et place du coke métallurgique conduit aussi à la fusion de la ferraille dans le four. Pour cela, deux approches sont utilisées. La première s'appuie sur la composition élémentaire du combustible et le diagramme réticulaire du coke. Elle conduit à la détermination des bilans globaux de quantité de combustible et de chaleur requises pour la fusion d'une charge équivalente à la production horaire. La deuxième s'appuie sur un modèle de lit traversé par les gaz chauds et où l'on s'impose un fonctionnement du four pour lequel la différence des températures entre la matière et le gaz est connue le long de la colonne. On aboutit par cette approche à prédire numériquement la fusion de la ferraille par usage de coques de noix de palmiste.*

Abstract - *In this work, the possibility of employment of the cockles of oil palm stone as fuel of substitution to the metallurgic coke that is a fossil fuel is led in a small metallurgic furnace named cupola. These wastes gotten after extraction of the oil of palm and oil palm stone, present like all product descended of the biomass, a hopeless balance in CO_2 during their combustion. The survey shows in comparative way that, the use of the cockles of oil palm stone in place of the metallurgic coke also driven to the melting of the junk in the oven. For it, two approaches are used. The first leans on the elementary composition of the fuel and the reticular diagram of coke. It duct to the determination of the global balances of quantity of fuel and heat required for the fusion of a load equivalent to the hourly production. The second leans on a model of bed crossed by the hot gases and where one imposes itself a working of the oven for which the difference of the temperatures between matter and gas is known along the column. One results by this approach to predicting the fusion of the junk numerically by use of cockles of walnut of oil palm stone.*

Mots clés: Biocombustible - Combustion - Déchets - Métallurgie.

1. INTRODUCTION

La combustion des produits issus de la biomasse est de nos jours un axe de recherche fort apprécié. En effet, comparativement aux produits fossiles, le bilan gazeux

en termes de CO_2 (gaz à effet de serre) produit lors de la combustion est nul. Le combustible libérant dans l'atmosphère le gaz carbonique retiré de celui-ci pendant la photosynthèse.

Pour ces sources d'énergie renouvelable, le gaz carbonique CO_2 est donc neutre [1]. La crise économique de ces dernières années n'ayant pas épargné le secteur de la métallurgie, des industriels, mais aussi de nombreux chercheurs se tournent vers la possibilité d'emploi d'autres combustibles dans les fours en lieu et place du coke devenu plus cher sur le marché.

Dans cette foulée, Chean *et al.* [2] montrent que la substitution de 10 % de coke par des coques de graines de tournesol comme combustible dans un four de réduction du minerai de fer ne change pas de façon significative les caractéristiques de la combustion ou la qualité de la réduction.

Il en est de même de Tihon [3] qui propose l'usage du méthane, de l'anthracite ou du charbon de bois comme combustibles de substitution du coke dans la fusion au cubilot. Ceci contribuerait affirme t-il dans la foulée, à réduire les émissions de gaz à effet de serre.

Quant à Choi *et al.* [4], ayant étudiés les caractéristiques de la combustion dans un lit de réduction de la ferraille avec substitution d'une partie du coke par de l'anthracite, ils montrent que la réactivité de l'anthracite pouvait affecter de façon significative la propagation de la combustion et la qualité de la réduction au dessus du lit de fusion.

Gunther *et al.* [5], quant à eux proposent plutôt la conception d'un cubilot semblable au haut fourneau et qui utiliserait du charbon de bois ou l'électricité pour les opérations de fusion.

2. PRESENTATION DES COQUES DE NOIX DE PALMISTE ET DU FOUR DE FUSION

La noix de palme appartient à la famille des *Arecacées*, genre *elaeis*, épithète spécifique *guineensis*. Otée de ses couches fibreuses et donc aussi de son huile de palme, la noix de palme est appelée noix de palmiste.

On distingue quatre variétés et celle qui est employée dans cette étude est la variété *elaeis guineensis* var *sauvage* (coque moyenne plus ou moins dure). Ces coques proviennent de la région du littoral (Bessounkang par Bonaléa). (Fig. 1).

Fig. 1: Coques de noix de palmiste (*elaeis guineensis var sauvage*)

Ce combustible a les caractéristiques chimiques et physiques consignées dans les **Tableaux** ci-après:

Tableau 1: Analyses physiques, de base et élémentaire des coques de noix de palmiste

Paramètres analytiques	Résultats	Unités	Méthodes	Normes	Limites de qualité	Références de qualité	COFRAC
Analyse sur le produit							
Analyses physiques							
Préparation/Broyage d'un échantillon	-	-	-	*XP CEN/TS 14780*			#
Humidité totale	9.3	% brut	Séchage en étuve	*EN 14774-1*			#
Analyse de base							
Cendres à 815°C	1.4	% sec	Calcination à 815°C - Méth int PA209 ou PA276	*ISO 1171*			#
Cendres à 815°C	1.3	% brut	Calcination à 815°C - Méth int PA209 ou PA276	*ISO 1171*			#
Matières volatiles à 900°C pendant 7 min.	76.7	% sec	Calcination et gravimétrie	*XP CEN/TS 15148*			#
Matières volatiles à 900°C pendant 7 min.	69.6	% brut	Calcination et gravimétrie	*XP CEN/TS 15148*			#
Analyse élémentaire							
Carbone total	54.2	% sec	Microanalyseur	*XP CEN/TS 15104*			#
Carbone total	49.1	% brut	Microanalyseur	*XP CEN/TS 15104*			#
Hydrogène total	6.22	% sec	Microanalyseur	*XP CEN/TS 15104*			#
Hydrogène total	6.68	% brut	Microanalyseur	*XP CEN/TS 15104*			#
Azote total	0.39	% sec	Microanalyseur	*XP CEN/TS 15104*			#
Azote total	0.36	% brut	Microanalyseur	*XP CEN/TS 15104*			#
Oxygène total	39.0	% sec	Calcul				

Tableau 2: Analyses thermiques et chimiques des coques de noix de palmiste

Paramètres analytiques	Résultats	Unités	Méthodes	Normes	Limites de qualité	Références de qualité	COFRAC
Minéralisation pour dosage halogènes et/ou soufre	-	-	Combustion en bombe	*EN 15289*			
Soufre total	375	mg/kg sec	Chromatographie ionique	*EN 15289*			
Chlore total	313	mg/kg sec	Chromatographie ionique	*EN 15289*			
Analyse thermique							
Pouvoir calorifique supérieur (PCS)	5069	cal/g sec	Calorimétrie	*XP CEN/TS 14918*			#
Pouvoir calorifique supérieur (PCS)	21223	J/g sec	Calorimétrie	*XP CEN/TS 14918*			#
Pouvoir calorifique supérieur (PCS)	4598	cal/g brut	Calorimétrie	*XP CEN/TS 14918*			#
Pouvoir calorifique supérieur (PCS)	19251	J/g brut	Calorimétrie	*XP CEN/TS 14918*			#
Pouvoir calorifique inférieur (PCI)	4763	cal/g sec	Calcul	*XP CEN/TS 14918*			#
Pouvoir calorifique inférieur (PCI)	19942	J/g sec	Calcul	*XP CEN/TS 14918*			#
Pouvoir calorifique inférieur (PCI)	4269	cal/g brut	Calcul	*XP CEN/TS 14918*			#
Pouvoir calorifique inférieur (PCI)	17873	J/g brut	Calcul	*XP CEN/TS 14918*			#
Métaux							
Arsenic total	< 0.10	mg/kg sec	-	*EN 15297*			
Cadmium total	< 0.40	mg/kg sec	-	*EN 15297*			
Chrome total	4.5	mg/kg sec	-	*EN 15297*			
Cuivre total	11	mg/kg sec	-	*EN 15297*			
Mercure total	< 0.05	mg/kg sec	-	*EN 15297*			
Nickel total	3.1	mg/kg sec	-	*EN 15297*			
Plomb total	3.5	mg/kg sec	-	*EN 15297*			
Zinc total	5.2	mg/kg sec	-	*EN 15297*			
Minéralisation pour le dosage des métaux mineurs	-	-	Digestion acide	*EN 15297*			
Analyses chimique des cendres							
Composition des cendres à 815°C							
Minéralisation aux micro-ondes	-	-	micro-ondes				
Arsenic total	3.70	mg/kg cendres	ICP/MS sur cendres				
Silicium total (en SiO2)	77.1	% cendres	ICP sur cendres à 815°C				
Aluminium total (en Al2O3)	3.0	% cendres	ICP sur cendres à 815°C				
Fer total (en Fe2O3)	3.1	% cendres	ICP sur cendres à 815°C				
Titane total (en TiO2)	< 0.1	% cendres	ICP sur cendres à 815°C				
Calcium total (en CaO)	2.2	% cendres	ICP sur cendres à 815°C				
Magnésium total (en MgO)	1.9	% cendres	ICP sur cendres à 815°C				
Sodium total (en Na2O)	0.7	% cendres	ICP sur cendres à 815°C				
Potassium total (en K2O)	6.6	% cendres	ICP sur cendres à 815°C				
Soufre total (en SO3)	2.1	% cendres	ICP sur cendres à 815°C				
Phosphore total (en P2O5)	1.6	% cendres	ICP sur cendres à 815°C				
Manganèse total (en MnO2)	0.1	% cendres	ICP sur cendres à 815°C				
Total	98.4	% cendres	ICP sur cendres à 815°C				
Zinc total	196.37	mg/kg cendres	ICP/MS sur cendres				
Chrome total	209.81	mg/kg cendres	ICP/MS sur cendres				

Paramètres analytiques	Résultats	Unités	Méthodes	Normes	Limites de qualité	Références de qualité	Critères
Cadmium total	< 1	mg/kg cendres	ICP/MS sur cendres				
Plomb total	191.06	mg/kg cendres	ICP/MS sur cendres				
Nickel total	134.26	mg/kg cendres	ICP/MS sur cendres				
Cuivre total	682.13	mg/kg cendres	ICP/MS sur cendres				
Mercure total	< 1	mg/kg cendres	ICP/MS sur cendres				

Le four de fusion employé est un four à cuve constitué principalement d'une virole cylindrique garnie de réfractaire. Il se présente comme un réacteur où se réalise un contre courant gaz-solide. Les charges métalliques s'échauffant au fur et à mesure de leur descente jusqu'à la zone de fusion où elles passent à l'état liquide.

Le modèle utilisé et qui est en exploitation à l'Institut Universitaire de Technologie de l'Université de Douala se présente comme suit (Fig. 2):

Fig. 2: Utilisation du four de fusion

Il présente les caractéristiques suivantes:

- Production horaire: $P = 153.6$ kg/h, soit 0.1536 t/h.
- Volume de préchauffage: $V = 38.25$ l, soit 38.25×10^{-3} m^3.
- Indice de capacité de préchauffage: $ICP = 0.25$ m^3/t.
- Durée maxi de fonctionnement (journalier): 3 heures.
- Débit de vent: de 130 m^3/h à 190 m^3/h.
- Pression du vent: de 5000 Pa à 6800 Pa.

3. DETERMINATION DES BESOINS EN COMBUSTIBLE ET EN COMBURANT

3.1 Besoins en combustible

Nous partons des considérations suivantes:

- Température de coulée: $\theta_c = 1425$ °C,
- Température de fusion: $\theta_{fus} = 1200$ °C,
- Chaleur latente de fusion du fer: $L_f = 46$ kcal/kg

- Chaleur d'échauffement de la fonte liquide de 1200 à 1425°C: C_{pl} = 0.21 kcal/kg.°C
- Chaleur d'échauffement de la fonte solide: C_{ps} = 0.17 kcal/kg.°C
- Les charges sont introduites à la température ambiante: θ_a =25 °C
- La quantité de chaleur Q est apportée par le carbone du combustible
- Le taux de carbone servant à la recarburation entre gueulard et chenal est égal à 1%

Nous calculons la quantité de chaleur requise pour la fusion d'un kilogramme de ferraille [6] par la relation:

$$q = C_{ps}(\theta_{fus} - \theta_a) + L_f + C_{pl}(\theta_c - \theta_{fus}) \quad (1)$$

Nous déduisons alors la quantité de chaleur nécessaire à la fusion d'une masse de ferraille correspondant à la production horaire:

$$Q = q \times P_{hor} \quad (2)$$

Le PCI du combustible étant connu, l'on déduit donc la masse théorique de combustible:

$$m_{th} = Q / PCI \quad (3)$$

Afin de tenir compte des pertes (débris de combustible qui échappent à la combustion, pertes thermiques par les parois et les gaz d'échappement, échauffement des différents éléments d'addition (Si, P, $CaCO_3$…)), nous majorons la valeur de la masse théorique de combustible précédemment calculée en nous référant au diagramme réticulaire du coke (Fig. 3).

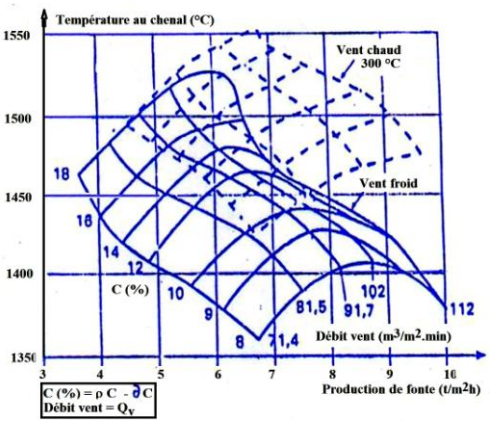

Fig. 3: Diagramme réticulaire se rapportant au coke [7]

En effet, le diamètre de fusion du cubilot expérimental étant connu (D = 0.16 m), nous calculons la production horaire ramenée à la surface de fusion; ici: P_{horf} = 7.63.

Connaissant, P_{horf} , le choix du débit de vent et de la température de coulée au chenal nous permet de trouver le taux de carbone par rapport au métal enfourné. On en déduit le taux de combustible à enfourner par rapport au métal p (%/t de fonte), grâce à l'expression:

$$p\,(\%/\text{t de fonte}) = \frac{C\,(\%) + \partial C}{\alpha} \quad (4)$$

avec α qui représente la teneur en carbone du combustible.

On détermine la masse de coke à enfourner:

$$m_{coke,\,enf} = p \times P_{hor} \quad (5)$$

et la masse servant à la recarburation est:

$$m_{coke,\,rec} = 0.1 \times p \times P_{hor} \quad (6)$$

et celle qui sert à la production de chaleur:

$$m_{coke} = m_{coke,\,enf} - m_{coke,\,rec} \quad (7)$$

Puis la quantité de chaleur libérée par cette masse de coke:

$$Q_{coke} = m_{coke} \times PCI_{coke} \quad (8)$$

On s'impose enfin cette quantité de chaleur pour nos coques de noix de palmiste et on trouve alors la masse correspondante à enfourner.

$$m_{réel} = \frac{Q_{coke}}{PCI_{coques}} \quad (9)$$

Comparativement au coke, l'on obtient donc le tableau suivant.

Tableau 3: Présentation de quelques paramètres relatifs à l'usage du coke ou des coques de noix de palmiste

Combustible	PCI (kcal/kg)	% de carbone	m_{th} (kg)	p (%/t fonte)	$M_{réel}$ (kg)
Coke	7200	85	6.25	11.76	18.06
Coques de noix de palmiste (sur sec)	4763	54.2	9.44	18.45	28.33

3.2 Besoins en comburant

Hypothèses

- La combustion est oxydante avec un excès d'air $e = 20\%$;
- Le comburant utilisé est de l'air à 20.9% d'oxygène et 79.1% d'azote (composition volumique);
- Les fuites dans les canalisations et autres de ce four expérimental sont estimées à $c = 10\%$;
- Le vent froid est insufflé dans le four à une température $T = 25°C$.

L'analyse pondérale élémentaire du combustible étant connue, l'on calcule:

- Le pouvoir comburivore [8]

$$P_a\,(kg/kg) = \frac{8}{23.1} \times \left(\frac{C(\%)}{3} + H(\%) + \frac{S(\%) - O(\%)}{8} \right) \quad (10)$$

Et $$V_a\ (m^3N/kg) = \frac{P_a}{1.293} \quad (11)$$

- Le pouvoir fumigène

- Fumées humides

$$m_{fh}(kg/kg) = P_a \times \left(1 + \frac{e}{100}\right) + 1 - \frac{K}{100} \quad (12)$$

$$V_{fh}(Nm^3/kg) = 0.0893C + 0.324H + 0.0334S - 0.0265O + 0.008N + 0.124E + \frac{e}{100}V_a \quad (13)$$

- Fumées sèches

$$m_{fs}(kg/kg) = P_a + 1 - \frac{K}{100} - \frac{E}{100} - \frac{9H}{100} + \frac{e}{100} \times P_a \quad (14)$$

$$V_{fs}(Nm^3/kg) = V_{fh} - \frac{22.4}{18} \times \left(\frac{E}{100} + \frac{9H}{100}\right) \quad (15)$$

Dans les expressions précédentes, les termes $C(\%)$, $H(\%)$,…, $E(\%)$, $K(\%)$ représentent les teneurs en carbone, hydrogène, soufre, oxygène, azote, humidité et les cendres.

Il s'en suit l'expression suivante:

$$C(\%) + H(\%) + S(\%) + O(\%) + N(\%) + E(\%) + K(\%) = 100 \quad (16)$$

Comparativement à l'usage du coke, on obtient le tableau suivant:

Tableau 4: Pouvoirs comburivore et fumigène des combustibles utilisés

Combustible	Pouvoir comburivore		Pouvoir fumigène			
			Fumées humides		Fumées sèches	
	P_a (kg/kg)	V_a (Nm^3/kg)	m_{fh} (kg/kg)	V_{fh} (Nm^3/kg)	m_{fs} (kg/kg)	V_{fs} (Nm^3/kg)
Coke	10.03	7.76	12.966	9.421	12.865	9.295
Coques de noix de palmiste	6.722	5.19	9.05	8.01	8.4	7.2

4. MODELISATION

Pour la modélisation, nous considérons la partie du four qui va du centre des tuyères jusqu'au niveau de chargement. De plus nous adoptons les hypothèses suivantes:

- la température est supposée homogène dans le sens radial;
- les gaz chauds montent du centre des tuyères jusqu'au niveau de chargement à vitesse constante V_g ;
- la vitesse de descente de la charge V_m du niveau de chargement jusqu'au centre des tuyères est constante;
- bien que les grandeurs λ, ρ, C_p soient fonction de la température, elles sont ici considérées constantes;
- la charge solide est constituée d'un seul type de matériau;

- les pertes thermiques à travers les parois du four sont négligées;
- le four est supposé cylindrique, de section constante;
- le four est supposé avoir atteint le régime permanent.

Le modèle utilisé [9] est celui d'un lit fixe échauffé progressivement par le gaz qui le traverse (Fig. 4).

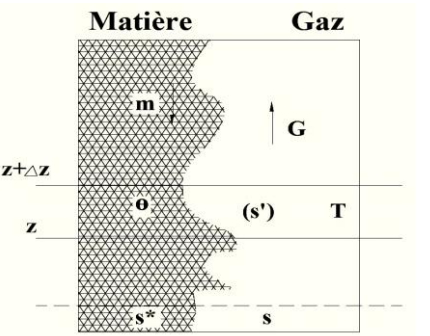

Fig. 4: Modélisation de la couche de grains

La couche de grains traversée par le gaz est modélisée par deux parties distinctes: à droite, un débit de gaz seul, à gauche une quantité équivalente de matière (grains rassemblés en une masse dense). La surface d'échange S' représente la somme des surfaces des grains présents dans la tranche.

Le bilan thermique concernant le gaz s'écrit:

Chaleur transportée par le gaz = Chaleur échangée par conduction dans le gaz
+ Chaleur échangée par convection et rayonnement entre le gaz et les grains
+ Chaleur stockée dans la tranche de gaz.

Soit

$$V_g \times \rho_g \times C_{pg} \times S \times \left[T(z) - T(z+\Delta z)\right] = \lambda_g \times \left(\left(\frac{\partial T}{\partial z}\right)_z - \left(\frac{\partial T}{\partial z}\right)_{z+\Delta z} \right) \times S + h \times (T-\theta) \times S' + \rho_g \times C_{pg} \times \frac{\partial T}{\partial t} \times S \times \Delta z \quad (17)$$

Qu'on peut encore écrire:

$$\lambda_g \times \left(\left(\frac{\partial T}{\partial z}\right)_z - \left(\frac{\partial T}{\partial z}\right)_{z+\Delta z} \right) \times S + h \times (T-\theta) \times S' + V_g \times \rho_g \times C_{pg} \times S \times \left[T(z) - T(z+\Delta z)\right] = \rho_g \times C_{pg} \times \frac{\partial T}{\partial t} \times S \times \Delta z \quad (18)$$

$T(z,t)$ et $\theta(z,t)$ désignent la température du gaz et la température des grains.

Le bilan énergétique concernant la matière s'écrit, d'une manière symétrique:

$$\lambda_m \times \left(\left(\frac{\partial T}{\partial z}\right)_z - \left(\frac{\partial T}{\partial z}\right)_{z+\Delta z} \right) \times S^* + h \times (T-\theta) \times S' - V_m \times \rho_m \times C_{pm} \times S^* \times \left[\theta(z) - \theta(z+\Delta z)\right] = \rho_m \times C_{pm} \times \frac{\partial \theta}{\partial t} \times S^* \times \Delta z \quad (19)$$

Compte tenu de l'hypothèse du régime permanent, les équations précédentes s'écrivent:

$$-\lambda_g \times \left(\left(\frac{\partial T}{\partial z} \right)_z - \left(\frac{\partial T}{\partial z} \right)_{z+\Delta z} \right) \times S - h \times (T-\theta) \times S' + V_g \times \rho_g \times C_{pg} \times S \times \left[T(z) - T(z+\Delta z) \right] = 0 \quad (20)$$

$$\lambda_m \times \left(\left(\frac{\partial T}{\partial z} \right)_z - \left(\frac{\partial T}{\partial z} \right)_{z+\Delta z} \right) \times S^* + h \times (T-\theta) \times S' - V_m \times \rho_m \times C_{pm} \times S^* \times \left[\theta(z) - \theta(z+\Delta z) \right] = 0 \quad (21)$$

Pour la résolution, nous procédons comme suit:

- Nous supposons connus les échanges gaz-matière $h(T-\theta) \times S$ en fonction de la hauteur, c'est-à-dire en chaque pas Δz, du nez des tuyères au gueulard;
- Nous choisissons l'une des équations et nous la discrétisons, en utilisant la méthode des différences finies;
- L'équation étant discrétisée, nous écrivons une loi de variation de $T_k - \theta_k$ en fonction de k. Pour cela, nous imposons un fonctionnement du four analogue à celui présenté dans [10] où une loi vérifiée expérimentalement de variation de $T_k - \theta_k$ est donnée.

Ramenée à l'échelle de notre cubilot, et ayant divisé celui-ci du niveau des tuyères au point de départ des charges en 269 points, on obtient le **Tableau 5**.

Tableau 5: Variation de la différence de température entre le gaz et le matériau en fonction de la hauteur

Para.	Valeurs											
T_g-T_m	-450	-250	0	140	100	150	150	200	200	250	250	675
k	1	20	40	60	80	100	120	140	161	181	201	269

La représentation de l'interpolation par morceau de cet ensemble de points, nous donne la figure 3.

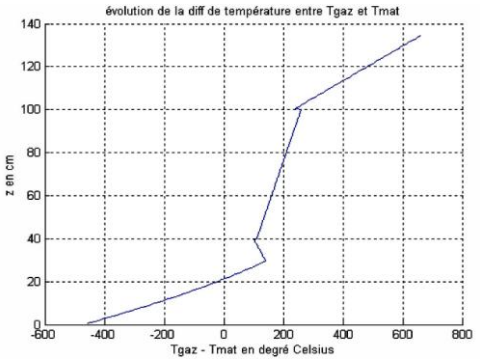

Fig. 3: Evolution de la différence de température entre le gaz et le matériau suivant la hauteur

▪ Ayant obtenu la courbe d'évolution de T_{gaz} - T_{mat} suivant chaque point k, nous résolvons donc l'équation discrétisée avec de plus les considérations suivantes:

- Matériau: morceaux d'acier et de fonte, avec λ = 45 W/m.°C à 400°C, ρ = 7800 kg/m^3 et C_p = 450 J/kg.°C.

- Température d'entrée des charges: $T_{empench}$ = 25°C.

- Température de la charge au niveau des tuyères: $T_{empsoch}$ = 1550°C.

- Coefficient de convection h : valeur h_1 constante du niveau des tuyères à la paillasse et différente de la valeur h_2 constante également de la paillasse au niveau de chargement.

L'équation (21) discrétisée peut encore s'écrire:

$$\lambda_m((1-\varepsilon)/\Delta z)\times(-\theta_{k-1}+2\theta_k-\theta_{k+1}) + h_k\times(T_k-\theta_k)\times\sigma\times\Delta z - V_m\times\rho_m\times C_{pm}(1-\varepsilon)\times[\theta_{k-1}-\theta_k] = 0 \quad (22)$$

En posant: $A=\lambda_m((1-\varepsilon)/\Delta z)$, $f_k=(T_k-\theta_k)$, $C = V_m\times\rho_m\times C_{pm}(1-\varepsilon)$, $B_k = h_k\times\sigma\times\Delta z$.

Elle devient alors:

$$A(-\theta_{k-1}+2\theta_k-\theta_{k+1})+B_k\times f_k - C(\theta_{k-1}-\theta_k) = 0 \quad (23)$$

La détermination de certaines grandeurs intervenants dans les constantes A, B_k et C de l'équation (23) est consignée dans le **Tableau 6** ci-après.

Tableau 6: Quelques grandeurs liées à l'usage des types de combustibles

Combustible	Surface spécifique d'échange (α)	Vitesse de descente des charges	Indice du vide (ε)	Hauteur de la paillasse HP
Coke	72 m^2/m^3	0.000285 m/s	0.56	40 cm
Noix de palmiste	54 m^2/m^3	0.000715 m/s	0.44	58 cm

5. RESULTATS ET ANALYSES

La résolution de l'équation discrétisée précédente via le code Matlab conduit aux courbes suivantes: Pour le coke métallurgique, avec h_1 = 0.23 et h_2 = 0.935

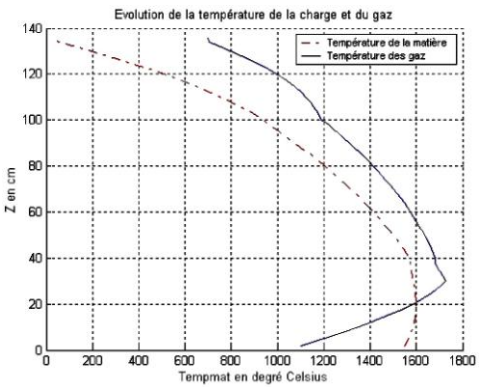

Fig. 4: Evolution de la température de la charge
et du gaz dans le cas d'emploi du coke métallurgique

Pour les coques de noix de palmiste, avec $h_1 = 0.70$ et $h_2 = 4.30$ on obtient:

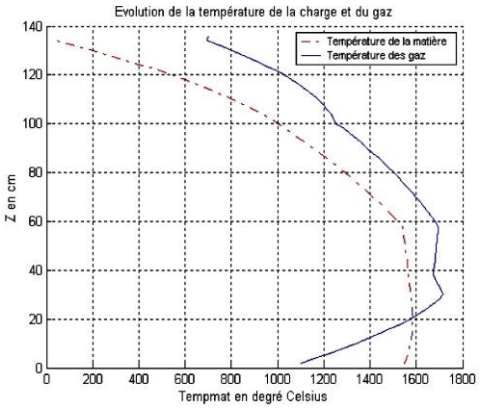

Fig. 5: Evolution de la température de la charge et du gaz dans le cas d'emploi des coques de noix de palmiste

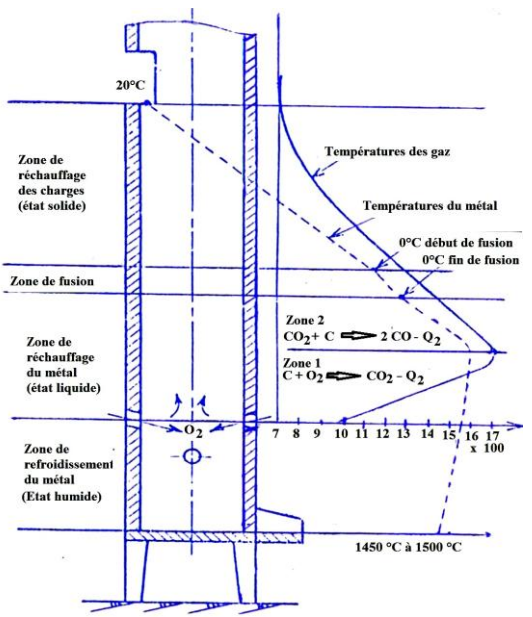

Fig. 6: Aspect thermique de fonctionnement d'un cubilot à vent froid [10]

Ces courbes d'évolution de la température de la charge et du gaz obtenues à partir du modèle numérique ont une même allure que celles obtenues expérimentalement et présentées par Facy *et al.* [10] sur un cubilot à vent froid fonctionnant avec le coke métallurgique.

D'après l'allure des courbes d'évolution de la température de la charge (en tirets) telle que donnée par le modèle, on remarque que:

- Il y a possibilité de fusion du métal en utilisant comme combustible les coques de noix de palmistes puisque la charge atteint et même dépasse les 1200°C (température de début de fusion);

- Plus la paillasse est haute, plus les charges commencent à fondre plus haut ; toutefois la zone de début de fusion est comprise dans l'intervalle [80 cm – 90 cm];

- La fusion s'achève (1350°C) aux alentours de 65 cm au dessus des tuyères pour le coke et 75 cm pour les coques de noix de palmiste.

On constate en outre que:

Pour avoir ces courbes se rapprochant du cas réel, la valeur de la constante h est prépondérante, car l'allure des courbes et les valeurs des températures (tous les autres paramètres étant constants), sont très sensibles à la variation de h (donc de h_1 et h_2). La porosité du lit combustible influencée par la grande variabilité de la taille des morceaux de combustible pourrait expliquer ce phénomène.

Le modèle n'intègre pas les conditions de soufflage, telles que le nombre de tuyères, la vitesse d'entrée, la pression d'entrée et le débit d'air. Conditions qui influencent la cartographie thermique du four et donc la répartition des zones de fusion. Ceci suppose donc que pour chaque combustible, l'on est censé fonctionner dans les conditions requises pour la génération de la chaleur à chaque tranche de hauteur du four.

6. CONCLUSION

La disponibilité des coques de noix de palmiste dans le monde étant réelle, (Sud-Est Asiatique, Afrique) en général et Cameroun en particulier [11], leur utilisation conduirait à l'optimisation de l'exploitation de l'unité pilote de fusion de la ferraille mise sur pied par un usage énergétique cadrant avec les ressources locales. Ceci pourrait aussi du point de vue économique, entraîner une valorisation de ces déchets. L'étude présentée ici nous montre bien que l'on peut utiliser les coques de noix de palmiste comme combustible pour la fusion de la ferraille dans un four métallurgique.

La détermination de la quantité minimale de coques de noix de palmiste nécessaire à la fusion d'une charge de ferraille équivalente à la production horaire, a été faite en partant de l'analyse élémentaire du combustible et de son PCI. En s'appuyant sur le diagramme réticulaire du coke et connaissant notre diamètre de fusion, on a pu calculer la quantité réelle de combustible à enfourner suivant la température de coulée envisagée.

Une modélisation du lit de coques de noix de palmiste dans le four qui est ensuite faite, nous amène à voir que l'on peut atteindre les hautes températures nécessaires à la fusion de la ferraille comme dans le cas d'emploi du coke métallurgique.

Toutefois, une étude du comportement dynamique du four en utilisant les coques de noix de palmiste avec relevés de températures de la charge par sondes à plusieurs tranches de hauteur de la colonne, permettrait non seulement de mieux valider le modèle, mais surtout de l'enrichir.

Une étude de la dégradation thermique du lit combustible permettrait aussi de connaître la nature et les proportions des gaz de pyrolyse émis, afin de mieux contrôler la combustion en phase gazeuse lors de l'usage de ces coques de noix de palmiste dans le four.

NOMENCLATURE

ICP : Indice de capacité de préchauffage

NEPAD: Nouveau Partenariat pour le Développement de l'Afrique

PCI: Pouvoir calorifique inférieur

PCS: Pouvoir calorifique supérieur

V_m : Vitesse de descente de la charge (m/s)

V_g : Vitesse de montée des gaz, m/s

σ : Surface spécifique d'échange, m^2/m^3

S : Section équivalente du vide (phase gazeuse uniquement)

S' : Surface d'échange gaz↔grains dans Δz

S* : Section équivalente de matière homogène

S=S + S*: Section du cubilot totale

ε : Indice du vide

HP : Hauteur de paillasse

λ_m : Conductivité ther. du matériau, W/m°C

ρ_m : Masse volumique du matériau, kg/m^3

λ_g : Conductivité thermique du gaz, W/m°C

ρ_g : Masse volumique du gaz, kg/m^3

C_{p_g} : Chaleur massique du gaz, J/kg.°C

C_{p_m} : Chaleur mas. du matériau, J/kg°C

V_{fh} : Pouvoir fumigène (fum. hum.),Nm^3/kg

V_a : Pouvoir comburivore, Nm^3/kg

V_{fs} : Pouvoir fumigène (fum. sèches),Nm^3/kg

V_{airtuy}: Débit d'air requis pour la combustion avec excès d'air, Nm^3/kg

$V_{airvent}$: Débit d'air à fournir par le ventilateur, Nm^3/kg

D_{vent}: Débit de vent, m^3/m^2mn

P_{hor} : Production horaire, kg/h

P_{horf} : Production de fonte ramenée à la surface de fusion, t/m^2h

C_{pl}: Chaleur d'échauffement de la fonte (grise) liquide de 1200 à 1425 °C, kcal/kg°C

C_{ps}: Chaleur d'échauffement de la fonte solide, kcal/kg.°C

Q : Quantité de chaleur à fournir pour obtenir la production horaire, kcal

h : Coefficient de convection

L_f : Chaleur latente de fusion, kcal/kg

θ_c : Température de coulée

θ_{fus} : Température de fusion de la fonte

V_N : Volume normal

$V_{réel}$: Volume réel

T_N : Température normale

T : Température de l'air froid

∂C : Taux de carbone servant à la recarburation entre le gueulard et le chenal

REMERCIEMENTS

Nous remercions pour leur assistance, les sociétés Socor Analyse Environnementale et Cofrac Essais, et pour leur collaboration MM. Franquenouille de la Socor et Perdrix de l'Ecole des Mines de Douai.

REFERENCES

[1] P. Lv, C. Wu, L. Ma and Z. Yuan, '*A Study on the Economic Efficiency of Hydrogen Production from Biomass Residues in China*', Renewable Energy, Vol. 33, N°8, pp. 1874 – 1879, 2008.

[2] O. Tze Chean, E. Aries, B.C.R. Ewan, D. Thompson, D.R. Anderson, R. Fisher, T. Fray and D. Tognarelli, '*The Study of Sunflower Seed Husks as a Fuel in the Iron Ore Sintering Process*', Minerals Engineering, Vol. 21, N°2, pp. 167 - 177, 2008.

[3] G. Tihon, '*Les Combustibles de Substitution pour le Cubilot*', 3ème Conférence Internationale sur le Cubilot, 2009.

[4] W. Yang, S. Choi, E.S. Choi, D.W. Deog and K. Sungman, '*Combustion Characteristics in an Iron Ore Sintering Bed-Evaluation of Fuel Substitution*', Combustion and Flame, Vol. 145, N°3, pp. 447 - 463, 2006.

[5] H. Gunther Rachner, '*L'Avenir de la Fusion au Cubilot*', 3ème Conférence Internationale sur le Cubilot, 2009.

[6] M. Geier, '*Métallurgie de Fonderie: avec Exercices Résolus*', Eyrolles, Tome 1, 191 p., 1976

[7] L. Chaze et R. Sanz, '*Fusion de la Fonte au Cubilot: Principes*', Techniques de l'Ingénieur, Matériaux Métalliques, Vol. MC3, M 765.1 - M 765.17, 1997.

[8] E. Perthuis, '*Combustion Industrielle*', Editions Technip, 214 p., Paris.

[9] B. Eyglunent, '*Manuel de Thermique: Théories et Pratiques*', 2ème Edition, Hermès Sciences, 373 p., 2000.

[10] G. Facy et M. Pompidou, '*Précis de Fonderie: Méthodologie, Production et Normalisation*', 2ème Edition, Afnor, 178 p., 1992.

[11] NEPAD Report, Programme Détaillé pour le Développement de l'Agriculture Africaine, Cameroun**:** Profil de Projet d'Investissement, '*Développement de la Filière des Palmeraies à Huiles Villageoises*', 2006.

ANNEXE

METHODES D'EVALUATION DE QUELQUES GRANDEURS

Estimation de la vitesse de descente de la charge V_m

Le cubilot étant en fonctionnement, on relève à l'aide d'un chronomètre, le temps que la charge met pour quitter le point de regard haut à celui qui lui est immédiatement inférieur; ces deux points sont distants de 9 cm.

Estimation de la surface spécifique d'échange σ

- On prend un récipient transparent cylindrique de diamètre Φ = 20 cm et de hauteur h = 25.5 cm;
- On y verse une quantité de combustible jusqu'à ras bord;
- On compte le nombre de morceaux de combustible;
- On calcule de façon approximative la surface extérieure d'un morceau et en multipliant par le nombre de morceaux, on trouve la surface moyenne de tous les morceaux.

La surface spécifique d'échange σ (m^2/m^3) est alors :

$$\sigma = \frac{\text{Surface moyenne de tous les morceaux du combustible}}{\text{Volume du récipient}}$$

Estimation de l'indice du vide ε

On procède comme suit:

- On se donne un calibre moyen des morceaux du combustible utilisé pour la mesure, celui qui est très proche de celui utilisé pour l'enfournement;
- On met dans un récipient transparent cylindrique de diamètre Φ = 20 cm et de hauteur h = 25.5 cm, une quantité de combustible jusqu'à ras bord;
- On verse ensuite de l'huile d'arachide au dessus du récipient jusqu'à ras bord;
- On attend environ 10 heures de temps, puis on retire délicatement les morceaux de combustible et on les introduit dans un second récipient identique au premier;
- On verse ensuite de l'huile d'arachide au dessus de ce deuxième récipient jusqu'à ras bord;
- On mesure alors le volume d'huile versé (qui correspond au volume du vide).

L'indice du vide est:

$$\varepsilon = \frac{\text{Volume d'huile}}{\text{Volume du récipient}}$$