

Evaluation des rendements énergétiques et exergetiques du circuit du four rotatif d'une cimenterie en RD CONGO

Baby-Jean Robert MUNGYEKO BISULANDU^{1*} et Charles PONGO PONGO²

1. Groupe Transfert et Séchage Thermique, « GTST »

Génie Mécanique, spécialité Electromécanique, Faculté Polytechnique, Université Kongo

B.P. 202 Mbanza-Ngungu, Bas-Congo, RD CONGO

2. Service contrôle - qualité, Cimenterie Nationale de Kimpese, « CINAT »

Usine à Kimpese, Bas-Congo, RD CONGO

*(auteur correspondant : bjr.mungyeke@universitekongo.org)

Résumé - Le présent article procède à l'évaluation énergétique et exergetique du four rotatif Unax de la Cimenterie Nationale de Kimpese, en RD Congo. Le four rotatif Unax connait une usure avancée des matériaux réfractaires, d'où les pertes thermiques excessives. Après analyse, un rendement énergétique de 93 % a été trouvé et les pertes énergétiques dans les parois de 415,21 kJ/kg de clinker et de 972,34 kJ/kg de clinker, respectivement par convection et par rayonnement. Le rendement exergetique trouvée est de 27,97 %. Il se dégage une détérioration qualitative de 72,03 % de l'énergie.

Nomenclature

C_p chaleur massique, $J.kg^{-1}.K^{-1}$

$\overline{C_p}$ chaleur spécifique molaire, $J.mol^{-1}.K^{-1}$

Ex exergie, J

ex exergie massique ou spécifique, $J.kg^{-1}$

h enthalpie massique, $J.kg^{-1}$

h_f^0 enthalpie spécifique de formation, $J.kg^{-1}$

m masse, kg

NA non analysé

p pression, Pa

q_p pertes, J

R constante des gaz parfaits, $J.mol^{-1}.K^{-1}$

\dot{S} entropie, $J.s^{-1}.K^{-1}$

t température, $^{\circ}C$

T température, K

Symboles grecs

η rendement, %

ω_{Ex} rendement exergetique, %

Indices

0 ambiance atmosphérique

ch chimique

d détruite

e entrée

en énergétique

fc formation clinker

g généré

pg poussière-gaz

ph physique

s sortie

te total entrée

ts total sortie

1. Introduction

L'industrie du ciment est l'une des industries les plus consommatrices d'énergie. Sa consommation énergétique est évaluée à 30 - 40 % du cout de production [1-4]. Le présent article procède à l'analyse énergétique et exergetique d'un four rotatif à préchauffeur, installé à la Cimenterie Nationale (CINAT) de Kimpese en République Démocratique du Congo, dans le but de détecter et d'évaluer quantitativement les imperfections thermodynamiques causées par les procédés thermiques et chimiques dus à l'usure avancée des matériaux réfractaires dans

le circuit du four. Le principal objectif de l'analyse énergétique est de fournir un compte rendu exact de la consommation d'énergie, d'analyser la consommation d'énergie des différents composants et de révéler les informations détaillées nécessaires pour déterminer les éventuelles possibilités de conservation de l'énergie [2, 3, 5, 6].

Vu l'intérêt croissant de l'utilisation à la fois de l'analyse énergétique et de l'analyse exergetique pour l'utilisation rationnelle de l'énergie, cet article se focalise sur les imperfections thermodynamiques qui occasionnent les pertes excessives dans le circuit du four rotatif Unax.

Ces imperfections thermodynamiques sont évaluées en utilisant à la fois la première et la seconde loi de la thermodynamique, alors que l'analyse de l'énergie est basée que sur la première loi. Il s'agit d'une caractéristique du concept d'exergie qui permet de quantifier et d'évaluer la dégradation de l'énergie [3].

2. Production du ciment

L'industrie du ciment a un rôle important dans l'économie, basé sur la production. Au cours de la production de ciment, les ressources naturelles sont consommées en grande partie. Les principales matières premières qui entrent dans la fabrication du ciment sont le calcaire (CaCO_3) et l'argile ($\text{Al}_2\text{O}_3.n\text{SiO}_2.m\text{H}_2\text{O}$) et/ou la marne, matière dans laquelle les deux composants sont déjà naturellement mélangés. Après extraction à la carrière, ces composants sont concassés, puis broyés et séchés par des gaz de combustion provenant du four rotatif. En fonction du type de ciment à produire, on peut ajouter les produits suivants : cendres de pyrite, cendres volantes de centrales électriques au charbon, sable argile et cendres provenant des filtres électrostatiques [7]. Le mélange est obtenu (farine crue) après broyage de 80 % de calcaire et de 20 % d'argile, et est ensuite cuit dans un four rotatif à ciment, pour obtenir le clinker. Les clinkers sont broyés avec 3 % du gypse, pour donner finalement du ciment.

3. Méthodologie

3.1. Analyses énergétiques et exergetiques

La première loi de la thermodynamique, appelée loi de conservation de l'énergie, est utilisée pour l'analyse énergétique du four rotatif. Cette loi est appliquée au système où se produisent les réactions chimiques importantes. Aujourd'hui, plusieurs études utilisent le second principe de la thermodynamique pour l'analyse des systèmes énergétiques, qui introduit la notion d'exergie et anergie. L'exergie d'un système est une fonction thermodynamique qui exprime la capacité de ce système à produire du travail en raison de son déséquilibre avec l'ambiance dans laquelle il se trouve [8-9]. L'analyse exergetique évalue le degré de perfection de transfert et de conversion de la chaleur, et de l'énergie en processus thermiques variables [10]. Elle contient le premier et le deuxième principes de la thermodynamique. Associer l'exergie à l'énergie dans les analyses du fonctionnement des systèmes revient ainsi à associer qualité et quantité de l'énergie et de ses diverses formes ou types. L'analyse devient nettement plus riche qu'une simple analyse énergétique [1, 11].

3.2. Données de la CINAT

3.2.1. Les analyses effectuées

Les valeurs suivantes proviennent du Service contrôle - qualité de la CINAT.

- Débit de farine : 40 -72 t/h
- Température de chauffage fuel oil : 120 °C
- Pression d'injection du bruleur : 19,62 bar (20 kgf/cm²)
- Température entrée matière au four : 80 °C
- Température de sortie clinker : 200 °C max.
- Consommation spécifique : 3.5 MJ/t clinker
- Débit clinker : 23 – 42 t/h
- Débit fuel oil : ~3 t/h

Les tableaux 1 et 2 ci-dessous donnent les résultats des analyses effectuées au laboratoire de la CINAT.

<i>Composition élémentaire du fuel oil</i>		<i>Constituants des gaz</i>		<i>Composition de la farine alimentée</i>	
	%		%		%
(H ₂)	7,2	CO ₂	NA	CaCO ₃	76
(O ₂)	0,115	O ₂	3,29	MgCO ₃	1,6
(C)	86	NO _x	NA	SiO ₂	12,8
(S ₂)	1,5	CO	0,12	Al ₂ O ₃	3,4
(N ₂)	0,385			Fe ₂ O ₃	1,8
(H ₂ O)	0,5			H ₂ O	0,6
(Cendres)	0,06				

Tableau 1 : Les analyses effectuées au laboratoire de la CINAT

La CINAT n'analyse pas le CO₂ et le NO_x, il ne dispose pas des équipements lui permettant de les analyser.

<i>Notation</i>	<i>Nom et formule</i>	<i>Proportion %</i>	<i>Chaleur dégagée kJ/kg clinker</i>
C ₃ S	Silicate tricalcique ou Alite	62	502,32
	3CaO.SiO ₂		
C ₂ S	Silicate bicalcique ou Bélite	22	259,53
	2CaO.SiO ₂		
C ₃ A	Aluminate tricalcique	8	866,5
	3CaO.Al ₂ O ₃		
C ₄ AF	Alumino-ferrite tétracalcique	8	418,6
	4CaO.Al ₂ O ₃ .Fe ₂ O ₃		

Tableau 2 : Principaux constituants minéralogiques du clinker

Les C₃S, C₂S, C₃A et C₄AF sont les principaux constituants minéralogiques du clinker.

3.2.2. Réactions de formation de clinker

Le Processus de cuisson de la farine se présente comme suit :

- 80 °C : entrée farine crue dans les cyclones préchauffeurs
- A 100 °C : évaporation de l'eau libre
- De 100 – 400 °C : déshydratation d'eau cristalline

$$\text{Al}_2\text{O}_3.n\text{SiO}_2.m\text{H}_2\text{O} \longrightarrow \text{Al}_2\text{O}_3.n\text{SiO}_2 + m \text{H}_2\text{O}$$
- A 500 °C : dissociation du MgCO_3

$$\text{MgCO}_3 + 0,29 \text{ MJ/mol} \longrightarrow \text{MgO} + \text{CO}_2$$
- De 500 – 900 °C : effondrement de la structure de l'argile ($\text{Al}_2\text{O}_3.2\text{SiO}_2.2\text{H}_2\text{O}$ =Kaolin, $\text{Al}_2\text{O}_3.4\text{SiO}_2.2\text{H}_2\text{O}$ = Montmorillonite)

$$\text{Al}_2\text{O}_3.n\text{SiO}_2 \longrightarrow \text{Al}_2\text{O}_3 + m\text{SiO}_2$$
- De 600 – 1000 °C : dissociation de CaCO_3 et formation de CS et CA

$$\text{CaCO}_3 + 0,56 \text{ MJ/mol} \longrightarrow \text{CaO} + \text{CO}_2$$

$$3\text{CaO} + 2\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 \longrightarrow 2(\text{CaO.SiO}_2) + \text{CaO.Al}_2\text{O}_3 \text{ (si Kaolin)}$$

$$5\text{CaO} + 4\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 \longrightarrow 4(\text{CaO.SiO}_2) + \text{CaO.Al}_2\text{O}_3 \text{ (si Montmorillonite)}$$
- De 800-1300 °C : formation de C_4AF

$$2\text{CaO} + \text{SiO}_2 \longrightarrow 2\text{CaO.SiO}_2 + 2,58 \text{ MJ/mol}$$

$$(2\text{C}+\text{S} \longrightarrow \text{C}_2\text{S})$$

$$\text{CaO.Al}_2\text{O}_3 + 2\text{CaO} \longrightarrow 3\text{CaO.Al}_2\text{O}_3 + 3,93 \text{ MJ/mol}$$

$$(\text{CA}+2\text{C} \longrightarrow \text{C}_3\text{A})$$

$$\text{CaO.Al}_2\text{O}_3 + 3\text{CaO} + \text{Fe}_2\text{O}_3 \longrightarrow 4\text{CaO.Al}_2\text{O}_3.\text{Fe}_2\text{O}_3 + 9,91 \text{ MJ/mol}$$

$$(\text{CA}+3\text{C}+\text{F} \longrightarrow \text{C}_4\text{AF})$$
- De 1200 – 1450 °C : fusion et fin des réactions exothermiques de combinaison du clinker.

$$2\text{CaO.SiO}_2 + \text{CaO} \longrightarrow 3\text{CaO.SiO}_2 + 4,42 \text{ MJ/mol}$$

$$(\text{C}_2\text{S}+\text{C} \longrightarrow \text{C}_3\text{S})$$

3.3. Formulations mathématiques

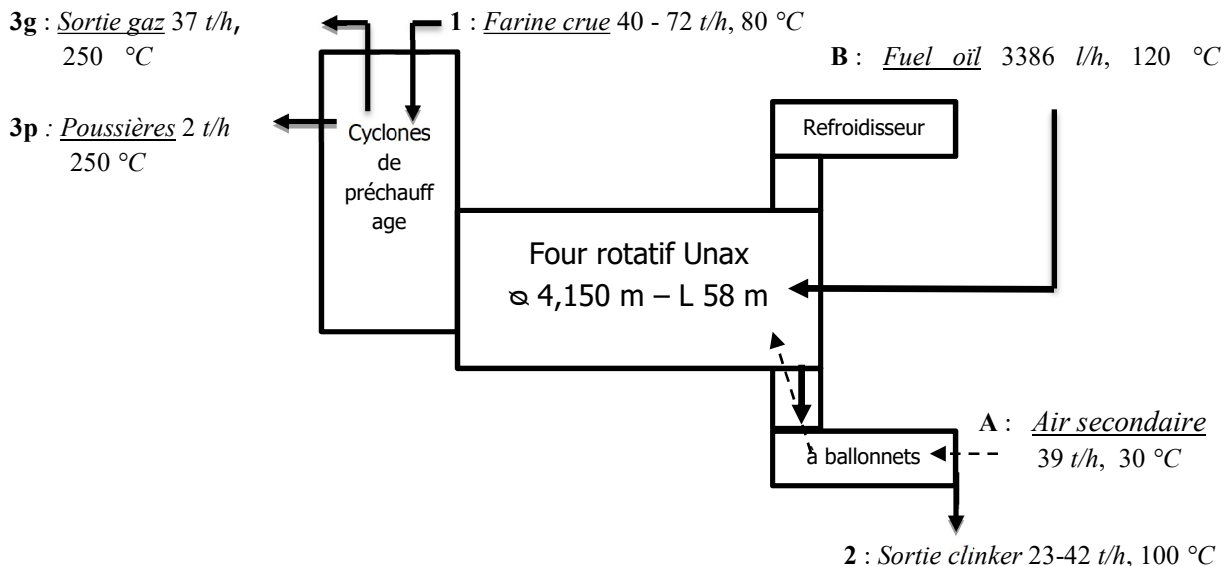


Figure 1: Le système du four rotatif Unax à refroidisseurs ballonnets

3.3.1. Analyse du bilan massique du four rotatif Unax

Les quantités d'air d'infiltration sont estimées par la différence entre la masse à l'entrée et la masse à la sortie. Les différentes données, c'est-à-dire la composition de la farine crue, du fuel oil et de l'air à l'entrée associées la composition du clinker produit, de la poussière contenue dans les gaz de sortie et la composition des gaz de sortie sont utilisées pour le calcul du bilan massique [4, 6, 7]. Ainsi, le bilan massique de l'installation du four rotatif Unax de la CINAT est donné par les relations (1), (2) et (3) ci-dessous, dont les composants sont donnés dans le tableau 3.

$$\sum m_e = \sum m_s \quad (1)$$

$$\sum m_e = m_1 + m_B + m_A \quad (2)$$

$$\sum m_s = m_2 + m_{3p} + m_{3g} \quad (3)$$

Condition	Matières	T	m	$\eta_{m,p}$	η_m
		K	t/h	%	%
Entrée	Farine crue	353	56	57,31	1
	Fuel oil	393	2,84	2,909	
	Air	298-1373	38,87	39,78	
	Total		97,71		
Sortie	Clinker	1098	58,87	60,25	
	Gaz de fumée	523	37,23	38,1	
	Poussières	523	1,61	1,643	
	Total		97,71		

Tableau 3 : Analyse massique du four rotatif Unax

3.3.2. Analyse énergétique du four rotatif Unax

Pour un état d'équilibre général, la masse et l'énergie doivent être équilibrées. Au regard de la figure 1 ci-dessus, le bilan énergétique peut être écrit de la manière suivante :

$$m_1 \cdot h_1 + m_B \cdot h_B + m_A \cdot h_A = m_2 \cdot h_2 + m_{3g} \cdot h_{3g} + m_{3p} \cdot h_{3p} + q_p \quad (4)$$

L'équation (4) peut être résumée par la relation (5) comme suit :

$$\sum m_e h(T, p) = \sum m_s h(T, p) + \sum q_p \quad (5)$$

Où

$$h(T, p) = h_f^0 + \Delta h \quad (6)$$

$$\Delta h = \int_{303.15}^T C_p dT \quad (7)$$

$$C_p = a + bT + cT^{-2} \quad (8)$$

Les coefficients a, b et c de l'équation (8) sont fonction du type de matériaux [5, 7, 10]. Le tableau (4) donne les valeurs numériques de certains matériaux utilisés dans le four rotatif.

Substance	a	b	c	ΔT
				K
CaO	11.86	1.08×10^{-3}	-1.66×10^5	-

<SiO ₂ >	3.27	24.8x10 ⁻³	-	(298 <T<390)
<SiO ₂ >	13.64	2.64x10 ⁻³	-	(390<T<2000)
Al ₂ O ₃	25.48	4.25x10 ⁵	-6.82x10 ⁵	(298<T<1800)
<Fe ₂ O ₃ > α	23.5	18.6x10 ⁻³	-3.55x10 ⁵	(298<T<950)
<Fe ₂ O ₃ > β	36	-	-	(950<T<1050)
<Fe ₂ O ₃ > δ	31.7	1.76x10 ⁻³	-	(1050<T<1873)
< > : phase solide ; < > α : α -phase < > β : β -phase < > δ : δ -phase				

Tableau 4 : Chaleur spécifique à pression constante de certaines substances utilisées en cimenterie

Pour estimer le rendement énergétique du four rotatif, il est d'usage d'utiliser l'équation (9) qui est le rapport de l'énergie sortante du four rotatif par l'énergie entrante :

$$\eta = \frac{|\sum m_s \cdot h(T, p)|}{|\sum m_e \cdot h(T, p)|} \quad (9)$$

3.3.3. Analyse exergetique du four rotatif Unax

Le bilan exergetique général, en utilisant le concept de la destruction d'exergie pour un système idéal, peut être exprimé par l'équation (10) [1, 2, 5, 12, 13] :

$$Ex_d = Ex_{te} - Ex_{ts} = Ex_{te} - (Ex_{fc} + Ex_{pg}) = T_0 \dot{S}_g \quad (10)$$

L'exergie physique spécifique peut être exprimée comme suit :

$$ex_{ph} = (h - h_0) - T_0(s - s_0) \quad (11)$$

Avec hypothèses des gaz parfaits et de chaleur spécifique constante, la relation (11) devient :

$$ex_{ph} = C_p(T - T_0) - T_0 \left(C_p \ln \frac{T}{T_0} - R \ln \frac{P}{P_0} \right) \quad (12)$$

L'exergie chimique spécifique de l'espèce de référence i ayant une pression partielle de p_{00i} est donnée par la relation (13) :

$$ex_{ch} = RT_0 \ln \frac{p_{oi}}{p_{00i}} \quad (13)$$

L'équation (10) met en exergue les irréversibilités causées par les pertes exergetiques, et peut encore être écrite comme suit :

$$\sum_e m_e \cdot ex_{ph}^e + \sum_e m_e \cdot ex_{ch}^e = \sum_s m_s \cdot ex_{ph}^s + \sum_s m_s \cdot ex_{ch}^s + Ex_d \quad (14)$$

Hypothèses : le système est supposé être en état d'équilibre ; l'exergie électrique utilisée pour la rotation du four n'est pas incluse dans l'analyse d'obtention de l'équation d'exergie ; les gaz de sortie de la cheminée sont supposés comme étant des gaz parfaits ; les effets de pression sur l'enthalpie et l'entropie de solides sont négligés ; les variations des énergies cinétique et potentielle sont négligées.

Le rendement exergetique définit toutes les exergies entrées comme l'exergie consommée et toutes les exergies sortantes comme l'exergie utilisée. L'efficacité exergetique est généralement définie par la relation (15) ci-dessous [3, 12, 14] :

$$\omega_{Ex} = \frac{Ex_{ts}}{Ex_{te}} = \frac{Ex_{fc} + Ex_{pg}}{Ex_{te}} \quad (15)$$

4. Résultats et discussion

4.1. Analyse énergétique du four rotatif

En utilisant les équations (5) - (9) et les données des tableaux 1, 2 et 3, l'analyse énergétique du four rotatif Unax résumée est présentée dans le tableau 5.

Condition	Matières	T K	h GJ/h	η_{en_p} %	η_{en} %
Entrée	Farine crue	353	161,94	69,05	93,08
	Fuel oil	393	3,25	1,38	
	Air	298-1373	69,33	29,56	
	Total		234,52		
Sortie	Clinker	1098	174,28	79,84	
	Gaz de fumée	523	22,47	10,29	
	Poussières	523	21,55	9,872	
	Total		218,30		
	Pertes		16,22		

Tableau 5 : Analyse énergétique du four rotatif Unax

La valeur de l'efficacité énergétique du four rotatif 93 % représente la performance globale du système du four rotatif Unax de la CINAT. Il s'est dégagé une perte de 7 %.

Pour ce qui est des pertes thermiques dans les parois du four, les valeurs suivantes ont été trouvées 415,21 kJ/kg de clinker et 972,34 kJ/kg de clinker, respectivement par convection et par rayonnement.

4.2. Analyse exergetique du four rotatif

L'analyse exergetique du four rotatif est presque similaire à l'analyse énergétique, elle contient le premier et le deuxième principes et fait état de la quantité et de la qualité de l'énergie. Le processus d'irréversibilité de la cuisson du clinker produit l'entropie, qui est une conséquence conduisant à la destruction d'exergie.

Le rendement de la seconde loi trouvé, est de 27,97 %. Il se dégage 72,03 % de pertes exergetiques dans le système du four rotatif Unax. L'entropie générée est de 1,56 GJ/h/K. L'analyse exergetique résumée du four rotatif Unax est présentée dans le tableau 6. Cependant, l'exergie contenue dans le gaz de fumée sortant du four et dans le clinker refroidi peut être récupérée pour être utilisée. L'efficacité exergetique du système du four rotatif Unax est relativement très faible, comparée à l'efficacité énergétique, qui était de 93 %. Ce qui montre que l'exergie du système est toujours détruite dans le processus d'irréversibilité de la cuisson de la farine pour produire du clinker.

Condition	Matières	T K	Ex GJ/h	ω_{Ex_p} %	ω_{Ex} %
Entrée	Farine crue	353	213,49	32,48	27,97
	Fuel oil	393	366,61	55,77	
	Air	298-1373	25,34	3,85	
	Après Rx du fuel		51,89	7,89	
	Total		657,33		
Sortie	Clinker	1098	62,99	34,26	

Gaz de fumée	523	13,06	7,10
Poussières	523	107,80	58,63
Total		183,85	
Anergie		473,48	

Tableau 6 : Analyse exergetique du four rotatif Unax

5. Conclusion

Au regard des chiffres ci-dessus, il est facile de constater que le four rotatif Unax de la CINAT génère une grande quantité d'entropie, évaluée à $1,56 \text{ GJ.h}^{-1}.\text{K}^{-1}$, raison pour laquelle les pertes thermiques sont excessives.

Il est à souligner que la valeur de rendement énergétique de 93 % ne traduit pas le mieux la situation thermique du four rotatif Unax de la CINAT, valeur qui pouvait laisser croire que la situation était satisfaisante alors qu'en procédant par l'analyse exergetique, les résultats sont tout à fait différents. Ce qui permet d'affirmer une fois de plus que l'analyse exergetique traduit le mieux le comportement thermique d'une installation.

Ainsi, pour palier au problème de pertes excessives au niveau du four rotatif Unax, plusieurs solutions peuvent être envisagées, parmi lesquelles il y a l'utilisation des briques réfractaires ayant un faible coefficient de conductibilité thermique, de deux couches de briques réfractaires, l'installation d'une coque secondaire, conception d'un récupérateur de chaleur des gaz sortant du four,...

L'analyse exergetique est un outil puissant, qui a été utilisée avec succès dans l'évaluation de la conception et de la performance des systèmes énergétiques [1, 3, 9]. Ainsi, l'élément critique de la conduite de l'énergie d'une usine implique un contrôle efficace en subdivisant l'équipement en différentes parties génératrices de l'énergie dans le processus de production d'une usine [15].

Les valeurs des exergies chimiques utilisées dans ce travail sont des valeurs standards [16].

Les futures recherches peuvent consister à l'étude de cogénération dans l'Usine de la CINAT, afin de rentabiliser l'énergie perdue dans les gaz de sortie.

Références

- [1] Ahamed J.U., Assessment of energy and exergy efficiencies of a grate clinker cooling system through the optimization of its operational parameters, *Energy* 46, (2012), 664-674.
- [2] Kabir G. et al., Energy audit and conservation opportunities for pyroprocessing unit of a typical dry process cement plant. *Energy* 35, (2010), 1237-1243.
- [3] Madloul N.A., et al., An exergy analysis for cement industries: An overview, *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 16, (2012), 921-932.
- [4] Rasul M.G., Assessment of the thermal performance and energy conservation opportunities of a cement industry in Indonesia, *Applied Thermal Engineering* 25, (2005), 2950-2965.
- [5] Sogut M. Z., Energetic and exergetic assessment of a trass mill process in a cement plant, *Energy Conversion and Management* 50, (2009), 2316-2323.
- [6] Tahsin E., Vedat A., Energy auditing and recovery for dry type cement rotary kiln systems - A case study, *Energy Conversion and Management* 46, (2005), 551-562.
- [7] Camdali U. et al, Energy and exergy analyses in a rotary burner with pre-calcinations in cement production, *Energy Conversion and Management* 45, (2004), 3017-3031.
- [8] Heyen G., Analyse exergetique des systèmes industriels, Faculté des Sciences Appliquées, Université de Liège, Liège, SYST 016, (2000).

- [9] Jiangfeng W. et al., Exergy analyses and parametric optimizations for different cogeneration power plants in cement industry, *Applied Energy* 86, (2009), 941-948.
- [10] Trubaev P. A., Exergy Analysis of Thermal Processes in the Building Materials Industry, *Theoretical Foundations of Chemical Engineering*, 2006, Vol. 40, No. 2, (2006), 175–182.
- [11] Lallemand A., Energie, exergie, économie thermo-économie, *Journées internationales de Thermique*, Albi, 28-30 août 2007.
- [12] Kolip A., Fevzi S. A., Energy and exergy analyses of a parallel flow, four-stage cyclone precalciner type cement plant, *International Journal of the Physical Sciences* Vol. 5(7), (2010), 1147-1163.
- [13] Zafer U., Energy and exergy analyses of a raw mill in a cement production, *Applied Thermal Engineering* 26, (2006), 2479–2489.
- [14] Vedat A., Energetic and exergetic assessments of a cement rotary kiln system, *Scientific Research and Essays* Vol.6 (6), (2011), 1428-1438.
- [15] Worrell E., Galitsky C., Energy Efficiency Improvement Opportunities for Cement Making, *BERKELEY NATIONAL LABORATORY*, (2004).
- [16] Kolip A., Energy and exergy analyses of a serial flow, four cyclone stages precalciner type cement plant, *Scientific Research and Essays* Vol. 5(18), (2010), 2702-2712.

Remerciements

Nous remercions Messieurs Jeanmart Hervé et Sumuna Temo, respectivement professeurs à l'Université Catholique de Louvain et à l'Université Kongo, pour leur contribution à ce travail, leurs commentaires et suggestions ont grandement contribué au développement de cet article.