

Analyses des paramètres affectant la consommation d'énergie dans un four rotatif cimentier et solutions possibles d'optimisation énergétique

B.-Jean Robert MUNGYEKO-BISULANDU^{a,c,*}, Guy WANLONGO-NDIWULU^{b,c}, Charles PONGO-PONGO^d

^aLaboratoire de Thermique, Energétique et de Procédés (LaTEP), Université de Pau et des Pays de l'Adour, rue Jules Ferry, 64000 Pau, France

^bEcole polytechnique de Louvain, Université catholique de Louvain, B-1348 Louvain-la-Neuve, Belgique

^cOptimisation Énergétique des Fours de Cimenterie (OEFC), Faculté Polytechnique, Université Kongo B.P. 202 Mbanza-Ngungu, Bas-Congo, RD CONGO

^dService contrôle-qualité, Cimenterie Nationale de Kimpese, « CINAT » Usine à Kimpese, Bas-Congo, RD CONGO

* (Auteur correspondant : jean-robert.mungyeko-bisulandu@univ-pau.fr)

Résumé—L'industrie cimentière consomme l'énergie allant de 30-40% du cout de production (Ahamed, 2012; Kabir, 2010 ; Madlool, 2012 ; Rasul, 2005). A cet effet, elle est considérée comme étant la plus énergivore, comparé à d'autres industries. Le présent article procède à l'analyse des paramètres affectant la consommation énergétique du four rotatif Unax de la Cimenterie Nationale de Kimpese en République Démocratique du Congo, et de donner des pistes d'optimisation énergétique. Le four rotatif Unax connaît une usure avancée des matériaux réfractaires ; ce qui occasionne des pertes thermiques excessives. L'analyse thermodynamique du four est effectuée le long du circuit dudit four ; de l'entrée matières premières (et sortie gaz) à la sortie clinker (et entrée air de refroidissement), pour atteindre un système de gestion de l'énergie efficace et efficiente. Cette analyse permet de connaître les endroits où les grandes pertes thermiques sont présentes afin d'apporter une solution satisfaisante. Les résultats trouvés montrent que la grande portion de pertes est localisée dans les zones de décarbonatation et de cuisson. La consommation spécifique d'énergie pour la production de clinker est de 3457,27 kJ/kg de clinker. Les rendements de la première et seconde lois de thermodynamiques valent respectivement 93 % et 27,97 %. Il se dégage une détérioration qualitative de 72,03 % de l'énergie. Pour ce qui est des pertes thermiques, les valeurs suivantes ont été trouvées respectivement par convection et par rayonnement 415,21 kJ/kg de clinker et 972,34 kJ/kg de clinker. Les deux premières solutions technologiques, celle d'utiliser de réfractaires neufs et/ou ayant des faibles coefficients de conductibilité thermique et celle d'un four à double couche de réfractaires, ont permis d'économiser respectivement 73 % et 67 % d'énergie perdue par convection et par rayonnement. Les grosses pertes sont localisées dans le tube du four, ainsi que dans le refroidisseur. Cela signifie qu'il faut plus se concentrer dans ces deux zones.

Nomenclature

C_p Chaleur massique, $J.kg^{-1}.K^{-1}$
 \bar{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, $J.kg^{-1}$
 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 exergétique, %

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
te 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 coût de production [1-4]. L'intérêt du présent article est d'analyser les paramètres affectant la consommation d'énergie dans un four rotatif cimentier et de proposer quelques solutions d'optimisation énergétique. L'étude fera aussi appel aux analyses énergétiques et exergétiques de l'installation du dit four.

Le four rotatif Unax a pour rôle de cuire la farine crue, composée de calcaire et des argiles finement broyées, afin de produire du clinker, composant principal servant à la fabrication du ciment Portland. Ce dernier est obtenu après broyage du clinker et du gypse. Il sert également à la production des gaz chauds, utiles pour le séchage des matières premières (argiles+calcaire) dans la première chambre du broyeur à crue.

L'analyse des différents paramètres énergétiques est faite dans le but de détecter et de quantifier 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 proposer les pistes permettant d'optimiser la consommation énergétique [2, 3, 5, 6].

2. Production du ciment

L'industrie du ciment a un rôle important dans l'économie, basé sur la production. Les principales matières premières qui entrent dans la fabrication du ciment sont le calcaire (CaCO_3) et l'argile ($\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot n\text{SiO}_2 \cdot m\text{H}_2\text{O}$) 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. 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 % de gypse, pour donner finalement du ciment. La figure 1 illustre le processus de production du ciment.

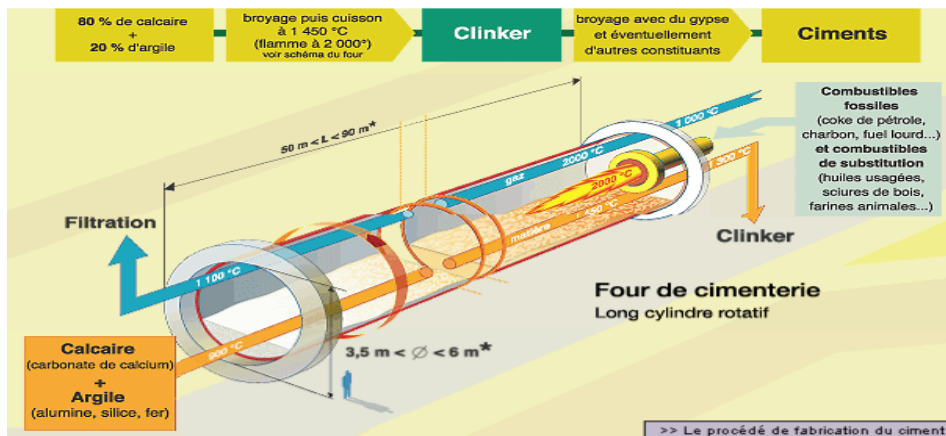


Figure 1 : Processus de production du ciment [Source : normalesup.org]

3. Méthodologie

3.1. Données de la CINAT

Les valeurs suivantes (analyses effectuées) proviennent du Service contrôle - qualité de la CINAT.

- Débit de farine : 40 -72 t/h
- Température de chauffage fuel : 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 : ~3 t/h

Les tableaux 1 et 2 ci-dessous donnent les résultats des analyses effectuées au laboratoire de la CINAT. Le CO₂ et le NO_x ne sont pas analysés faute d'équipements adéquats.

<i>Fuel</i>	%	<i>Gaz</i>	%	<i>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				

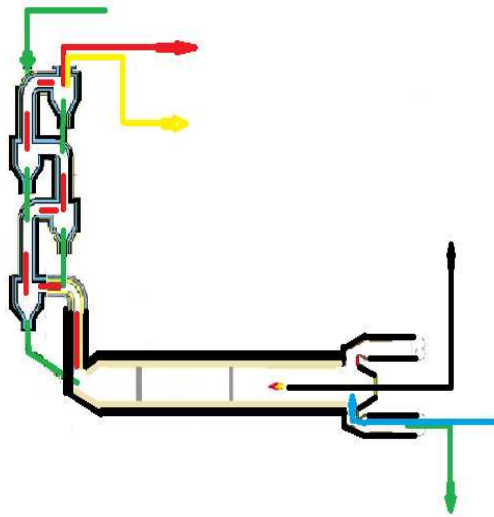
Tableau 1: Les analyses effectuées au laboratoire de la CINAT

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

Tableau 2: Principaux constituants minéralogiques du clinker

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

3.2. Formulations mathématiques



LES ENTREES :

- **1** : Farine crue 40 -72t/h, 80°C
- **B** : Fuel 3386 l/h, 120 °C
- **A** : Air secondaire 39 t/h, 30°C

LES SORTIES :

- **2** : Sortie clinker 23-42t/h, 200°C max
- **3g** : Sortie gaz 37 t/h, 250 °C
- **3p** : Poussières 28 t/h, 250°C

Figure 2: Système global du four rotatif Unax

3.2.1. Analyse du bilan massique du four rotatif Unax

Les compositions la farine crue, du fuel, de l'air, du clinker produit, de la poussière, des gaz de sortie sont prises en compte dans l'établissement du bilan massique. Ainsi, le bilan massique du système du four rotatif Unax est donné par les relations(1) et (2) ci-dessous, dont les composants sont donnés dans le tableau 3.

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

$$m_1 + m_B + m_A = m_2 + m_{3p} + m_{3g} \quad (2)$$

Condition	Matières	T	m	$\eta_{m,p}$	η_m
		K	t/h	%	%
Entrée	Farine crue	353	56	57,31	
	Fuel oil	393	2,84	2,909	
	Air	298-1373	38,87	39,78	
	Total		97,71		1
Sortie	Clinker	1098	32,56	60,25	
	Gaz de fumée	523	37,23	38,1	
	Poussières	523	27,9	1,643	
	Total		97,71		

Tableau 3 : Bilan massique du four rotatif Unax

3.2.2. 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 2 ci-dessus, le bilan énergétique peut être écrit de la manière suivante :

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

L'équation (3) peut être résumée par la relation (4) comme suit :

$$\sum m_e h(T, p) = \sum m_s h(T, p) + \sum q_P \quad (4)$$

Où

$$h(T, p) = h_f^0 + \int_{303.15}^T C_p dT \quad (5)$$

$$C_p = a + bT + cT^{-2} \quad (6)$$

Les coefficients a, b et c de l'équation (6) sont fonction du type de matériaux [5, 7, 8]. 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	24.8×10^{-3}	-	(298 <T<390)
<SiO ₂ >	13.64	2.64×10^{-3}	-	(390<T<2000)
Al ₂ O ₃	25.48	4.25×10^5	-6.82×10^5	(298<T<1800)
<Fe ₂ O ₃ > α	23.5	18.6×10^{-3}	-3.55×10^5	(298<T<950)
<Fe ₂ O ₃ > β	36	-	-	(950<T<1050)
<Fe ₂ O ₃ > δ	31.7	1.76×10^{-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

3.2.3. Analyse exergetique du four rotatif Unax

Le bilan exergetique général des fours de cimenterie, prenant en compte le concept de la destruction d'exergie pour un système idéal, peut être exprimé par l'équation (7) [2, 5, 9, 10] :

$$Ex_d = Ex_{te} - Ex_{ts} = Ex_{te} - (Ex_{fc} + Ex_{pg}) = T_0 \dot{S}_g \quad (7)$$

L'exergie physique spécifique est donnée par la relation suivante :

$$ex_{ph} = (h - h_0) - T_0(s - s_0) \quad (8)$$

Avec hypothèses des gaz parfaits et de chaleur spécifique constante, la relation (8) devient:

$$ex_{ph} = C_p(T - T_0) - T_0 \left(C_p \ln \frac{T}{T_0} - R \ln \frac{P}{P_0} \right) \quad (9)$$

L'exergie chimique spécifique de l'espèce de référence i ayant une pression partielle de p_{00i} est donnée par la relation (10) :

$$ex_{ch} = RT_0 \ln \frac{p_{oi}}{p_{00i}} \quad (10)$$

L'équation (7) met en exergetique les irréversibilités causées par les pertes exergetiques, et peut être reformulée de la manière suivante :

$$\sum_e m_e \cdot ex_{ph}^e + \sum_e m_e \cdot ex_{ch}^e = \sum_s m_s \cdot ex_{ph}^s + \sum_s m_s \cdot ex_{ch}^s + Ex_d \quad (11)$$

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.

4. Résultats et discussion

4.1. Analyse énergétique du four rotatif

En utilisant les équations (4) - (6) 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	h	$\eta_{en,p}$	η_{en}
		K	MW	%	%
Entrée	Farine crue	353	44,89	69,05	
	Fuel	393	0,90	1,38	
	Air	298-1373	19,26	29,56	
	Total		65,05		
Sortie	Clinker	1098	48,41	79,84	93,08
	Gaz de fumée	523	6,24	10,29	
	Poussières	523	5,98	9,872	
	Total		60,63		
	Pertes		4,42		

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 %. Les pertes thermiques dans les parois du four ont donné des valeurs suivantes : 415,21 kJ/kgde clinker et 972,34 kJ/kgde clinker, respectivement par convection et par rayonnement.

4.2. Analyse exergetique du four rotatif

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. 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. L'analyse exergetique résumée du four rotatif Unax est présentée dans le tableau 6.

Condition	Matières	T	Ex	$\omega_{Ex,p}$	ω_{Ex}
		K	MW	%	%
Entrée	Farine crue	353	59,30	32,48	
	Fuel	393	101,84	55,77	
	Air	298-1373	7,04	3,85	
	Après Rx du fuel		14,41	7,89	
	Total		182,59		
Sortie	Clinker	1098	17,49	34,26	27,97
	Gaz de fumée	523	3,63	7,10	
	Poussières	523	29,94	58,63	
	Total		51,07		
	Anergie		131,52		

Tableau 6: Analyse exergétique du four rotatif Unax

4.3. Optimisation énergétique du four rotatif Unax

Comme dit ci-dessus, la grande portion des pertes se localise au niveau du tube du four, qui représente 47 % des pertes par convection et 70 % des pertes par rayonnement.

4.3.1. Améliorations à apporter

A. Utilisation des briques ayant un faible coefficient de conductibilité thermique

L'utilisation des briques réfractaires ayant un coefficient de conductibilité thermique faible est un moyen efficace pour réduire les pertes dans le circuit du four. L'énergie gagnée dans les deux modes s'élève à 1012,9 kJ/kg de clinker, soit 73 % des pertes avant optimisation.

B. Utilisation de deux couches de briques réfractaires

L'une des possibilités les plus pertinentes est d'utiliser deux couches de briques, mais en faisant attention sur l'épaisseur et sur le poids de briques à utiliser. L'énergie gagnée dans les deux modes s'élève à 929,66 kJ/kg de clinker, valeur qui représente 67 % des pertes avant optimisation.

C. Fréquence de changement de briques réfractaires

Ici, le facteur « durée de vie » des briques entre en jeu. Le respect de fréquence d'utilisation de brique a aussi un impact considérable dans la réduction des pertes dans le système du four.

D. Réglage de l'excès d'air et qualité du combustible utilisé

Les réglages de l'air de combustion et du combustible font partie des variables d'efficacité les plus importantes et les plus complexes pour les fours de cimenterie. La teneur en oxygène a une incidence considérable sur la qualité du produit et la consommation d'énergie, et son réglage peut présenter par conséquent de grands avantages énergétiques et financiers. La qualité du combustible utilisé influe aussi sur la consommation énergétique ; un combustible présentant un pouvoir calorifique inférieur faible conduira à une consommation élevée d'énergie en vue d'atteindre des températures requises pour la cuisson. Pour un four traitant 102 000 tonnes par an de produit à un taux de 6,6 GJ/t et à un coût du gaz naturel d'approximativement 3,03 \$/GJ, la réduction de l'excès d'air permettra d'économiser approximativement 22 000 \$ par année. [13]

E. Utilisation de scanner pour four de cimenterie [14]

Actuellement, les installations modernes utilisent un scanner infrarouge pour contrôler la température de la virole (tube du four). Cette technologie permet de prévenir les risques d'apparition de points chauds (tache rouge) sur la virole, de détecter les chutes de briques réfractaires, de déterminer l'épaisseur du croûtage (collage de la farine ou du clinker) et d'évaluer l'amplitude thermique du vilebrequin (déformation du four).

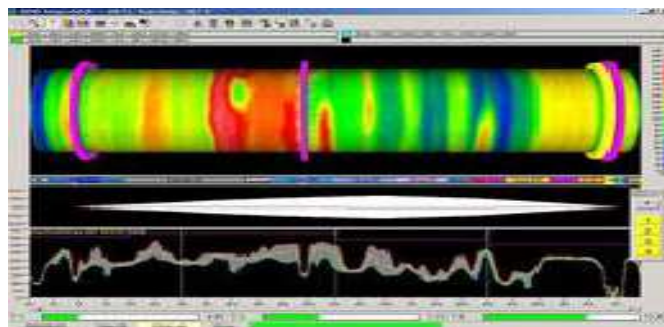


Figure 2: Visualisation des points chauds d'un four à l'aide de scanner infrarouge [14]

5. Conclusion générale

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. La valeur de rendement énergétique de 93 % ne traduit pas le mieux la situation thermique du four rotatif Unax, 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. Les valeurs des exergies chimiques utilisées dans ce travail sont des valeurs standards [15].

Ainsi, pour palier au problème de pertes excessives au niveau du four rotatif Unax et réaliser des économies d'énergie, plusieurs solutions ont été proposées. Les meilleures améliorations du système du four Unax de la CINAT sont l'utilisation de réfractaires à faible conductivité thermique, toute en respectant la fréquence de changement de réfractaires.

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] 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.
- [9] 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.
- [10] Zafer U., Energy and exergy analyses of a raw mill in a cement production, *Applied Thermal Engineering* 26, (2006), 2479-2489.
- [11] Labahn et al., *Cement engineer's handbook*, fourth edition, Bauverlag (1983)
- [12] Fiches technique PRISME, Diagnostic énergétique d'une cimenterie, Institut de l'Energie et de l'Environnement de la Francophonie (IEPF), www.iepf.org
- [13] OEE, Energie consommée à des fins commerciales : secteur industriel, www.mcan.gc.ca
- [14] HGH Infrared Systems, Thermographie industrielle, www.hgh.fr/Produits/Thermographie-industrielle
- [15] 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 les autorités de la CINAT d'avoir permis que cette étude ait lieu. Nous remercions également le Professeur Marias Frédéric (LaTEP/UPPA) pour son encadrement sur les fours tournants.