

Audit énergétique dans une cimenterie

Mohammed Allae Bennini¹, Abdelaziz Arbaoui^{1,2}, Mohamed Asbik¹

¹Laboratoire de Physique des Matériaux et Modélisation des Systèmes (LP2MS), URAC08, Faculté des Sciences, Université Moulay Ismail, B.P 11201, Zitoune, Meknès, Maroc

² M2I, Ecole Nationale d'Art et Métiers, Université Moulay Ismaïl, B.P: 4024, Meknès Ismaïlia, Maroc.
(*bennini.allae@gmail.com, abdelaziz_arbaoui@yahoo.fr, asbik_m@yahoo.fr*)

Résumé : Ce travail présente un audit énergétique du système de cuisson d'une cimenterie marocaine. L'objectif est de dresser l'inventaire des énergies fournies, utilisées et perdues. L'importance d'un tel audit réside dans le fait qu'il révèle les endroits du système où des économies d'énergie sont possibles. Les résultats obtenus montrent qu'une grande partie de l'énergie fournie est perdue au travers : les gaz d'échappement du four (22,5%), les gaz à la sortie du refroidisseur (5,7%) et au niveau des surfaces extérieures du four et du refroidisseur par convection et radiation (19,4%). L'importance de ces résultats stimule l'intégration de la cogénération pour récupérer l'énergie thermique perdue afin de la réutiliser.

Mots clés : Audit énergétique, Four rotatif, Ciment, Cogénération.

1. Introduction

En théorie, produire une tonne de clinker (constituant du ciment, qui provient de la cuisson d'un mélange composé de calcaire, de silice ...) nécessite un minimum de 1,6 GJ de chaleur [3]. Cependant, la consommation d'énergie spécifique moyenne observée est d'environ 2,95 GJ par tonne de ciment produite pour les fours bien équipés, alors que dans certains pays, la consommation est supérieure à 5 GJ / tonne.

Dans le but de maîtriser le cheminement des flux d'énergie au niveau du système de cuisson du clinker, un audit énergétique est nécessaire. Le principal objectif de cet audit énergétique est de fournir un compte rendu exact des énergies fournies, utilisées et perdues. L'importance d'un tel audit réside dans le fait qu'il révèle les endroits du système où des économies d'énergie sont possibles.

Dans ce paragraphe, nous présentons une démarche systématique pour élaborer l'audit énergétique du système de cuisson d'une cimenterie. Cette démarche, représentée sur la figure 1, est jalonnée selon quatre étapes déterminantes. En effet, la première fait appel à des outils de l'analyse fonctionnelle pour étudier le système et structurer le problème. A l'issue de cette étape les flux de matières ainsi que les flux du cheminement d'énergie sont identifiés. Quant à la deuxième étape, elle consiste à formuler les modèles utilisés en s'appuyant sur les normes internationales et la littérature scientifique. La troisième étape se concentre sur la réalisation des mesures nécessaires pour résoudre notre modèle formulé. Finalement, la dernière étape est réservée à la synthèse et des résultats.

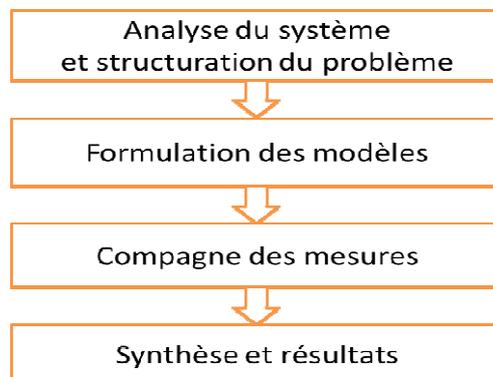


Fig. 1 : Démarche de l'audit énergétique

2. Audit énergétique du système de cuisson de la cimenterie

2.1. Analyse du système et structuration du problème

L'analyse fonctionnelle et l'organigramme technique du système (voir figures 2et3) ont permis d'identifier les relations qui existent entre le système de cuisson, le flux de matière ainsi que le cheminement d'énergie. Les fonctions structurantes prises effectivement en compte dans cette communication sont :

- FS : Transformation de la farine crue en clinker.
- FC1 : L'énergie calorifique dégagée par le combustible lors de la combustion.
- FC2 : La composition chimique et l'humidité de la farine crue.
- FC3 : La formation du Clinker.
- FC4 : Respecter les critères environnementaux.
- FC5 : Chaleur dégagée par les gaz d'exhaure.

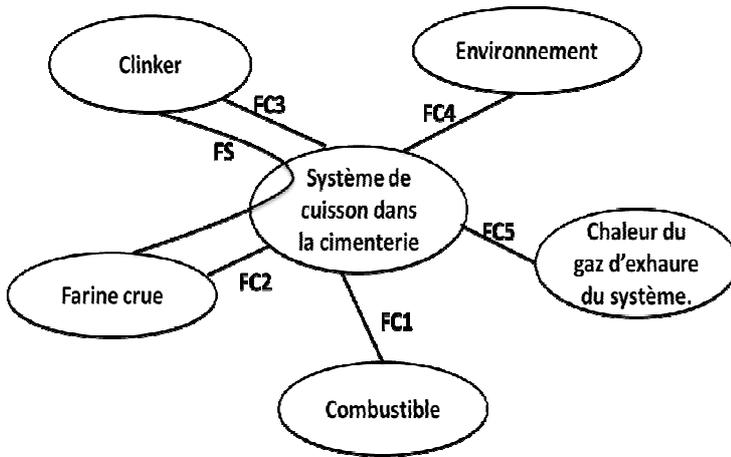


Fig. 2: Analyse fonctionnelle du système.

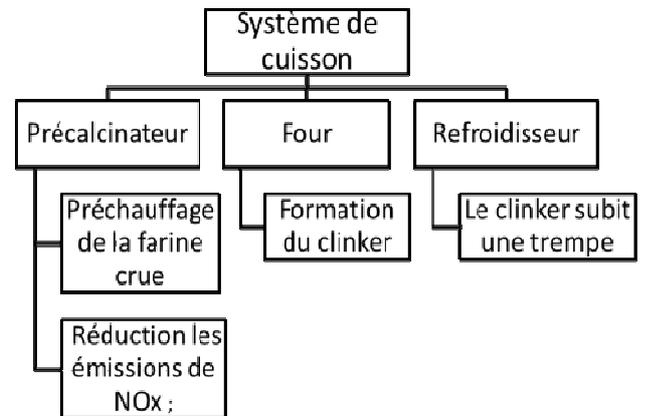


Fig. 3: Organigramme technique du système.

2.2. Formulation du modèle

Les relations présentées ci-dessous permettant la détermination des différentes chaleurs de l'entrée et de la sortie du système considéré, sont celles de la référence [3].

2.2.1. Chaleurs d'entrée :

A l'entrée, les chaleurs mises en jeu sont comme suit :

- ❖ La chaleur apportée par la combustion du coke de pétrole :

$$Q_1 = m_c \cdot PCI \quad (1)$$

- ❖ La chaleur sensible du combustible :

$$Q_2 = m_{combustible} \cdot C_{combustible} \cdot (T - 20 \text{ °C}) \quad (2)$$

- ❖ La chaleur sensible de la farine crue :

$$Q_3 = m_{fc} \cdot C_{fc} \cdot (T - 20 \text{ °C}) \quad (3)$$

- ❖ Les réactions organiques dans le four [5] :

$$Q_4 = \frac{100-Hig}{100} \cdot K \cdot h_{os} \quad (4)$$

- ❖ La chaleur par l'air de refroidissement :

$$Q_5 = m_{ar} \cdot C_{ar} \cdot (T - 20 \text{ °C}) \quad (5)$$

2.2.2 Chaleur de sortie :

- ❖ La chaleur de formation de Clinker [3] :

$$Q_6 = 17.196(Al_2O_3) + 27.112(MgO) + 32(CaO) - 21.405(SiO_2) - 2.468(Fe_2O_3) \quad (6)$$

- ❖ La chaleur du gaz d'exhaure du four:

$$Q_7 = m_{ef} C_{ef} T_{ef} \quad (7)$$

- ❖ Chaleur d'évaporation de l'eau :

$$Q_8 = \left(P_e \times \frac{\text{débitfarinecrue}}{\text{débitclinker}} \right) \cdot L_{eau} \quad (8)$$

- ❖ La chaleur de l'Air d'exhaure du refroidisseur :

$$Q_9 = m_{air-ref} h_{air-ref} \quad (9)$$

- ❖ Chaleur perdue par le mélange (air+ poussière) :

$$Q_{10} = (m_{poussière} + m_{poussière-airref}) h_{poussière} \quad (10)$$

- ❖ La chaleur de décharge de clinker :

$$Q_{11} = m_{cli} \cdot h_{cli} \quad (11)$$

- ❖ Rayonnement de la surface du four :

$$Q_{12} = \sigma \varepsilon A_{four} (T_s^4 - T_\infty^4) / (1000 m_{clinker}) \quad (12)$$

- ❖ Convection de surface du four :

$$Q_{13} = h_{con} A_{four} (T_s - T_\infty), h_{con} = \frac{K_{air} N_u}{D_{four}} \quad (13)$$

- ❖ Rayonnement de préchauffeur :

$$Q_{14} = \sigma \varepsilon A_{ph} (T_s^4 - T_\infty^4) / (1000 m_{clinker}) \quad (14)$$

- ❖ Convection naturelle préchauffage de surface

$$Q_{15} = h_{ncon} A_{ph} (T_s - T_\infty), h_{ncon} = \frac{K_{air} N_u}{D_{ph}}, N_u = 0.1(Ra) \quad (15)$$

- ❖ Rayonnement de la surface du refroidisseur :

$$Q_{16} = \sigma \varepsilon A_c (T_s^4 - T_\infty^4) \cdot \frac{H_c}{1000 m_{clinker}} \quad (16)$$

- ❖ Convection naturelle de la surface du refroidisseur :

$$Q_{17} = h_{ncon} A_c (T_s - T_\infty), h_{ncon} = \frac{K_{air} N_u}{D_{ph}}, N_u = 0.1(Ra) \quad (17)$$

2.3. Compagne des mesures

Pour mettre en œuvre le modèle défini ci-dessus, les mesures effectuées au sein de la cimenterie [4] ont été prises comme paramètres d'entrée du modèle.

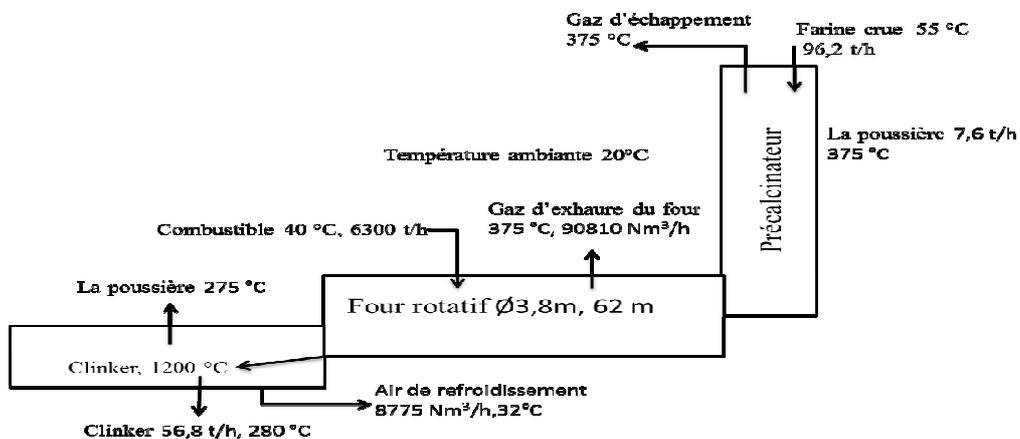


Fig. 4: Bloc diagramme fonctionnel du flux de matière entre le système et le milieu extérieur.

2.4. Synthèse et résultats de l'audit énergétique

Un audit énergétique détaillé a été mené à l'aide d'un fichier Datasheet sur Excel. Les résultats obtenus sont regroupés sur les figures 5 et 6 qui montrent que le bilan énergétique est pratiquement conservé. Il ressort également de cette étude que les principales pertes de chaleur sont dues aux gaz d'échappement de four (22,5%), aux gaz d'exhaure du refroidisseur (5,7%) et aux pertes de chaleur par convection et rayonnement (19,4%). Ainsi, l'efficacité globale du système est évaluée par :

$$\mu = \text{Chaleur de formation de clinker} / Q_{\text{totale d'entrée}} = 1791 / 3827 = 0.468$$

Cette efficacité qui ne dépasse pas 47% peut éventuellement être améliorée par un système de cogénération adéquat.

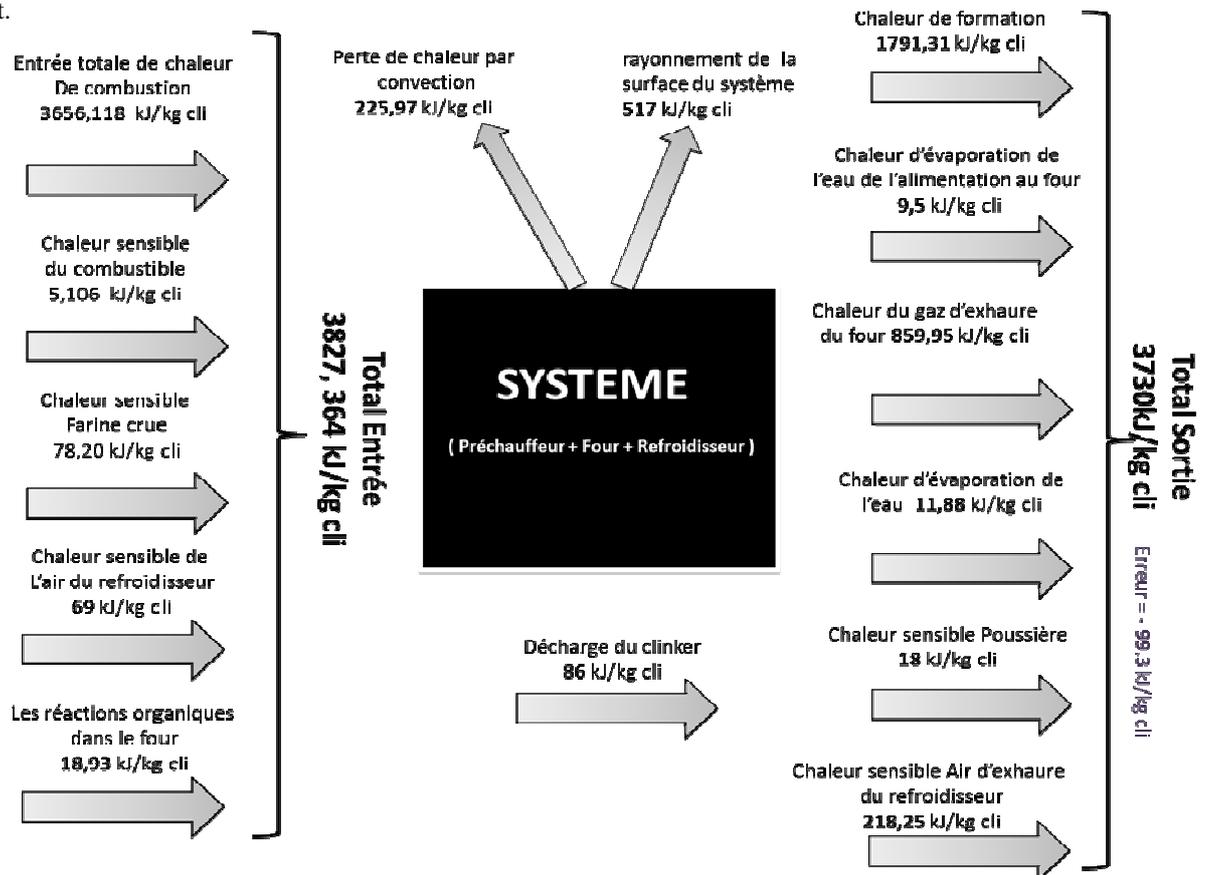
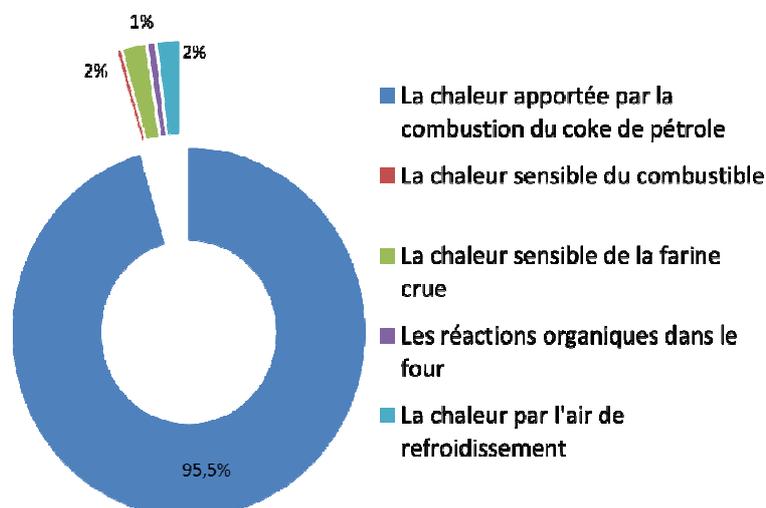


Fig.5 : Ensemble des entrées et sorties de chaleur au niveau du système.

la chaleur d'entrée



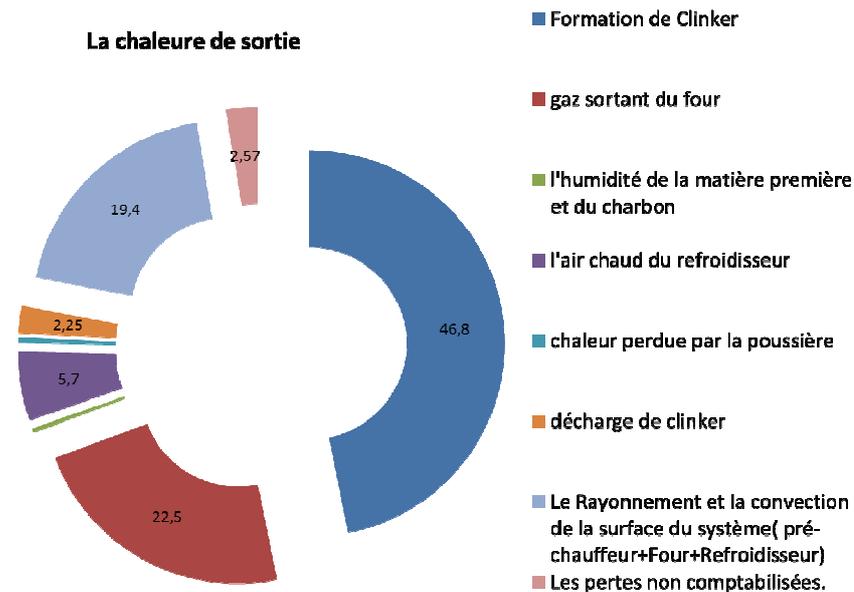


Fig.6: Graphiques représentant la répartition des chaleurs d'entrée et de sortie du système de cuisson de la cimenterie considérée.

3. Conclusion

La démarche de l'audit énergétique élaborée et le fichier Datasheet développé peuvent être appliqués à tout système de cuisson de ciment. Cette démarche a dévoilé, grâce au modèle formulé, la répartition de l'énergie thermique consommée par système. Les principales sources de perte de chaleur ont été détectées, notamment les gaz d'échappement du four : 22,5%, les gaz d'exhaure du refroidisseur : 5,7% et les transferts de chaleur par convection et par rayonnement sur les surfaces du four : 19,4%. Pour les deux premières pertes, l'intégration d'un système de cogénération est en cours d'étude.

Nomenclature :

A_{ph} : Surface de précalcinateur

A_{four} : Surface du Four

C_x : Chaleur spécifique moyenne de l'élément x (en $\text{kJ/kg } ^\circ\text{C}$ ou $\text{kJ/Nm}^3 \text{ } ^\circ\text{C}$).

h_x : Coefficient d'échange thermique de l'élément x ($\text{W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-1}$).

H_{ig} : Pourcentage de perte de transfert de la chaleur de la flamme.

K : Pourcentage de la matière organique.

L_x : Chaleur latente à la pression atmosphérique (kJ/kg).

m_c : Consommation spécifique en Petcoke (Bruleur principal + calcinateur) (kg/kg cli).

$m_x = \left(\frac{\text{débit}(x)}{\text{débitclinker}} \right)$: Masse spécifique de la matière échangé (en Kg/Kg cli ou Nm^3/kg).

$N_u = 0.1(Ra)$: Nombre de Nusselt.

PCI : Pouvoir calorifique inférieur (kJ/kg).

Pe : Taux d'humidité dans la farine crue.

T : Température de la matière échangée (en $^\circ\text{C}$).

Ra : Nombre de Rayleigh.

σ : Constante de Stefan-Boltzmann ($5,6703 \cdot 10^{-8} \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-4}$).

Références

- [1] Liu F, Ross M, Wang S., Energy efficiency of China's cement industry, Energy (1995), 20(7):669–81.
- [2] Khurana S, Banerjee R, Gaitonde U., Energy balance and cogeneration for cement plant. Applied Thermal Engineering (2002),22: 485–94.
- [3] Engin T. and Ari V., Energy auditing and recovery for dry type cement rotary kiln systems—A case study, Energy Conversion and Management (2005), 46: 551–562.
- [4] Elamine M. et Annaki Z., Audit énergétique du système de cuisson, Projet de fin d'études à l'ENSAM.
- [5] Peray KE. Cement manufacturer's handbook. New York, NY: Chemical Publishing Co., Inc.; 1979.