

SUBSTITUTION PARTIELLE DES COMBUSTIBLES ALTERNATIFS DANS LES FOURS DE CIMENTERIE : POTENTIELS AVANTAGES ET PROBLEMES LIES A L'ENVIRONNEMENT

**Baby-Jean Robert Mungyeko Bisulandu^{a,c} et Charles Pongo Pongo^b*

^a Génie Mécanique-Energétique, Optimisation Energétiques des Fours de Cimenterie (OEFC), Faculté Polytechnique, Université Kongo (UK), B.P. 202 Mbanza-Ngungu, Kongo Central, RD Congo

^b Direction Etudes et Recherches, Service contrôle - qualité, Cimenterie Nationale de Kimpese (CINAT), Usine à Kimpese, Kongo Central, RD Congo

^c Laboratoire de Thermique, Energétique et Procédés (LaTEP), Ecole Nationale Supérieure de Génie et de Technologies Industrielles (ENSGTI), Université de Pau et des Pays de l'Adour (UPPA), Rue Jules Ferry, 64000 Pau, France

*Auteur Correspondant: bjr.mungyeko@universitekongo.org

Résumé

L'industrie du ciment est considérée comme l'une des industries les plus consommatrices d'énergie, avec un taux de consommation énergétique allant de 30 – 40 % du coût de production [4]. Au regard de ces chiffres, deux principales raisons d'utilisation de déchets comme combustibles de substitutions peuvent être données : premièrement la rareté et le coût élevé de combustibles primaires (charbon, fuel lourd, gaz naturel) et deuxièmement les effets liés à l'environnement (pollutions, émissions des gaz à effet de serre,...). Le présent travail concerne le four rotatif Unax de la Cimenterie Nationale, en RD Congo, et s'attèle à présenter sommairement les avantages liés à la substitution partielle de combustibles alternatifs (déchets, biomasse, etc.) dans les fours rotatifs à ciment, et surtout à épingler les problèmes cruciaux des émissions des gaz, des poussières et des métaux lourds dans l'environnement. La substitution de combustibles conventionnels par des combustibles alternatifs composés de déchets dans la cimenterie contribue énormément au développement durable à travers la valorisation énergétique de déchets et surtout à la réduction des gaz à effet de serre tels que CO₂, CH₄. Les résultats d'études ont montré que la combustion de déchets dans les fours de cimenterie crée quelques problèmes majeurs : la présence des métaux lourds dans les poussières sortant du four (0,90 ppm d'Arsenic ; 409 ppm de Chrome, et ; 394 ppm de Cadmium) [9]. Et les émissions des gaz de 0,0027 Nm³/kg de CO ; 0,0062 Nm³/kg de NO ; 1,414 Nm³/kg de CO₂. Les gaz CH₄, HCl et SO₂ ont été évalués à 0,097 Nm³/kg. Une partie de SO₂ formé se combine aux éléments alcalins présents à l'intérieur du four, pour former les alkalis tels que Na₂SO₄, K₂SO₄ et CaSO₄, ce qui d'une part forment une couche supplémentaire au niveau de matériaux réfractaires, et d'autre part vont dans le clinker produit.

Mots clés: Four rotatif Unax, Déchets, Emissions, Métaux lourds, Poussière, Environnement

1. INTRODUCTION

Les combustibles alternatifs sont de plus en plus utilisés dans l'industrie du ciment. Depuis plusieurs années, la cimenterie, a toujours été classée parmi les industries énergivores et les plus polluantes. Elle a été forcée d'adopter la voie de la valorisation énergétique de déchets, et cela pour de multiples raisons, notamment la rareté de combustibles fossiles, les nombreux

codes environnementaux régissant des limites d'émissions de gaz à effet de serre dans l'atmosphère, et aussi pour des raisons environnementales (élimination des quantités de déchets produits dans des villes urbaines). Ces déchets sont sous divers types, solides, liquides, et gazeux. Plusieurs auteurs ont affirmé que les fours tournants de cimenterie

étaient appropriés pour l'élimination des déchets, en raison de leurs conditions opératoires. Les boues d'épuration peuvent être utilisées d'une manière efficace et respectueuse de l'environnement. Si on les utilise correctement, les boues d'épuration créent très peu, voire zéro impact environnemental [3]. Les boues d'épuration est un produit renouvelable qui ne finira jamais. Le principal problème normalement soulevé par les citoyens, est celui de son odeur désagréable, la forte teneur en humidité, de métaux lourds et d'autres substances nuisibles potentiels rendent l'utilisation des boues d'épuration un des processus les plus difficiles, en termes de la protection de l'environnement. S'agissant des déchets de pneus, ils sont considérés comme étant les meilleurs de combustibles alternatifs, en raison de leur pouvoir calorifique proche à celui de charbon (ou de fuel oil). L'utilisation des déchets dans les fours tournants peut conduire à certaines anomalies ; colmatage au niveau des cyclones, ce qui réduit le débit de farine alimentée au four, pouvant conduire à l'arrêt du four. Etant donné que l'arrêt est susceptible d'être accompagné de dépenses supplémentaires de combustibles (réchauffage du four), les industries cimentières modernes sont présentement équipées des systèmes de by-pass, pour faire ré circuler le Chlore (cycle de chlore) et des purges. Cependant, pour les boues d'épuration, le colmatage des cyclones préchauffeurs peut avoir lieu, si la teneur en Cl varie de 0,2-0,5% Cl [12]. Les émissions mesurées aux installations de cimentière de la CINAT sont contrôlées avec précision, en temps réel et en continu dans la salle de commande. Bien que l'industrie de ciment est considérée comme la plus polluée, il présente des avantages remarquables : la température élevée du four rotatif à ciment (1450 °C) et le refroidissement rapide des gaz jouent un rôle déterminant dans la mesure où ils entravent la formation de dioxines / furannes, quand les déchets sont utilisés. Quant aux métaux lourds contenus dans les déchets consommés, ils vont dans les clinkers. La formation de la phase liquide dans le lit de solide (Farine +déchets) permet la combinaison de métaux lourds contenus dans

les déchets avec ceux contenus dans les matières premières du ciment (calcaire et argile). Zabaniotou et al, [12] ont mis l'accès sur les concentrations de métaux lourds, en particulier le mercure (Hg) contenu dans les boues d'épuration. Ils ont affirmé que les boues d'épurations ne créent presque pas de problèmes à l'environnement. Plusieurs analyses chimiques et tests ont été entrepris pour la composition des boues d'épuration, notamment ceux de Mantis I. et al [5], qui ont conduit aux résultats suivants : 7 Biphényle polychlorinates (PCBs), 13 Hydrocarbures Aromatiques Polycycliques (PAHs), Carbone organique total (TOC) et 7 métaux lourds (As, Cd, Cr, Cr, Pb, Mn et Zn). Dans la présente étude, les déchets de pneus ont été utilisés pour simuler la production du clinker dans le four rotatif Unax, lorsque les combustibles fossiles et alternatifs sont brûlés ensemble, dans des ratios de 0,6 et 0,4 respectivement.

2. BREVE APERÇU DU PROCESSUS DE FABRICATION DU CIMENT

L'industrie du ciment a un rôle important dans l'économie basée sur la production. Au cours de la production de ciment, les ressources naturelles sont consommées en grande quantité. Les principales matières premières qui entrent dans la fabrication du ciment sont le calcaire (CaCO_3) et l'argile ou l'argilo-calcaire, dans lequel les deux composants sont déjà naturellement mélangés. Après extraction à la carrière, ces composants sont concassés, puis broyés et séchés avec les 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 de cendres de filtre dans le filtre électrostatique. Le mélange obtenu est broyé, puis cuit dans le four rotatif. A l'entrée cyclones, la farine crue (matières) a une température moyenne de 80°C et où elle subit des mouvements tourbillonnaires, provoqués par les gaz chauds sortant du four. La farine est chauffée durant son parcours de l'entrée à la sortie cyclones (entrée tube du four). A l'entrée tube du four, les matières ont une température dites températures sortie du dernier cyclone ou du

précalcinateur, selon qu'il s'agit d'un four à précalcinateur ou non. Dans le four rotatif Unax par exemple, cette température avoisine 800 °C Dans la zone la plus chaude, le matériau étant au feu atteint des températures

de l'ordre de 1450 °C. Après un refroidissement rapide à l'air ambiant, puis les clinkers sont broyés avec du gypse, pour donner du ciment.

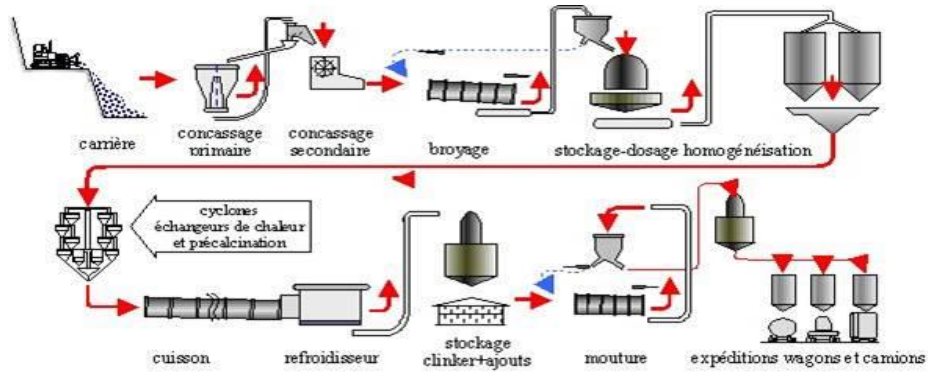


Figure 1: Processus de fabrication du ciment [source : Google]

3. VALORISATION DE DECHETS DANS LES FOURS DE CIMENTERIE

Depuis quelques décennies, l'industrie du ciment a entrepris d'énormes efforts pour remplacer les carburants conventionnels par d'autres dits carburants dits verts. Cette transition est faite dans le but de réduire le coût de production (demandes énergétiques), et de répondre aux exigences environnementales. Il existe dans la littérature de nombreux travaux, et études menées sur les émissions provenant des déchets, et sur la synthèse et la destruction des polychlorodibenzo-*p*-dioxines (PCDD) et des polychlorodibenzo-furanes (PCDF) dans les incinérateurs et dans les fours de cimenterie [2] [6].

3.1. Déchets utilisés dans les fours cimenteries

3.1.1. Exigences relatives aux déchets autorisés

Il existe des exigences que les déchets doivent remplir, en ce qui concerne leur utilisation en tant que combustible de substitution, ou en tant que substitut du cru, ou encore comme ajout au ciment. Les déchets sont retenus lorsque leur qualité est comparable ou approche les valeurs énergétiques des combustibles fossiles, et matières premières utilisés dans la production du ciment Portland. Les valeurs limites des métaux lourds, à ne pas dépasser quand les déchets sont utilisés comme combustible sont données dans le tableau 1 ci-dessous :

Tableau 1: Valeurs indicatives pour les teneurs en polluants de déchets[8]

Elément		Valeurs indicatives [mg/kg de matière sèche]			
		Colonnes A : déchets combustibles (à gauche: en mg/MJ; à droite: en mg/kg, rapporté à un pouvoir calorifique PCI de 25 MJ/kg)		Colonnes B : déchets servant de substitut au cru	Colonnes C : déchets servant d'ajout au ciment dans la production de ciment Portland
		mg/MJ	mg/kg (pour 25MJ/kg)	mg/kg	mg/kg
Antimoine	Sb	0,2	5	5	5
Argent	Ag	0,2	5	-	-
Arsenic	As	0,6	15	20	30
Baryum	Ba	8	200	600	1000
Béryllium	Be	0,2	5	3	3

Cadmium	Cd	0,08	2	0,8	1
Chrome	Cr	4	100	100	200

3.1.2. Déchets autorisés (ou utilisés)

Les fours de cimenterie sont flexibles à l'utilisation de divers types de déchets. Plusieurs facteurs favorisent leur utilisation dans le four rotatif, parmi lesquels : les températures élevées développées, la longueur du four, le temps de séjour, la combustion des

combustibles solides se déroule à l'intérieur du four et le milieu alcalin à l'intérieur du four. Aussi, pour de raisons environnementales et économiques [4], [1], [11]. Les déchets utilisés dans les fours de cimenterie sont synthétisés dans le tableau 2 ci-dessous.

Tableau 2: Combustibles alternatifs utilisés en cimenterie

Déchets liquides	Déchets de peinture - Huiles usées – Tar - Déchets chimiques - Résidus de distillation – Déchets de solvants - Suspensions de cire - Déchets pétrochimiques - Boues d'hydrocarbures
Déchets solides	Pneus usés - Copeaux de bois – Biomasse - Pet coke - Déchets de papier - Résidus de caoutchouc - Boues de pâtes - Boîtiers de batterie - Résidus en plastique - Déchets de bois- Ordures ménagères - Paille de riz - Coques d'arachide - Coquilles de noix - Boues d'épuration
Déchets gazeux	Gaz de pyrolyse - Gaz de décharge

3.2. Valorisation énergétique

Les déchets contiennent de l'énergie suffisante, qui peut être valorisée dans les processus industriels. La valorisation énergétique des déchets dans la cimenterie est généralement liée à des objectifs économique-environnementaux : la cimenterie a souvent été sollicitée par les pouvoirs publics à cause de sa capacité à assurer une bonne destruction des déchets dangereux, tout en assurant la sécurité durant l'opération de destruction [7]. Les déchets utilisés comme matières premières dans la production du ciment (clinker) et comme combustibles de substitution permettent de protéger les ressources naturelles non renouvelables.

3.3. Valorisation matière

L'utilisation des déchets dans les fours tournants peut aussi avoir pour objectif la valorisation matière. Le groupe cimentier Lafarge propose l'utilisation de matières de substitution conduisant à des taux réduits d'émission de CO₂. Il a retenu trois avantages donnés ci-dessous :

- les ciments multi-constituants substituent une partie du clinker (très émetteur de CO₂) par des ajouts de types laitier, cendres volantes et/ou calcaire, débouchant ainsi sur des bétons de qualité et moins émetteurs de CO₂ ;

- l'emploi de ciments multi-constituants permet de limiter la consommation de matières premières naturelles non renouvelables (calcaire et argiles) et de réduire de 40 à 60% les émissions de CO₂ liées à la fabrication des ciments, rentrant dans la composition des bétons, et ;
- la part des ciments multi-constituants (proposée par Lafarge) est passée de 18%, en 2008, à 22 % en 2010. Actuellement, 47% des ciments produits par Lafarge sont à taux réduit de CO₂.

4. PROBLEMES D'UTILISATION DES DECHETS

4.1. Problèmes liés au dosage du combustible

Le problème crucial est de bien arriver à doser la quantité qu'il faut pour obtenir un mélange ou un ratio important, surtout quand plusieurs combustibles sont utilisés. Selon Kaantee et al [3], le taux d'alimentation, pour ce qui concerne les boues d'épuration ne doit pas dépasser 5 % de la capacité de l'usine de ciment.

4.2. Problèmes liés à la qualité du clinker et du ciment Portland

La substitution partielle des déchets dans les fours de cimenterie peut dans une certaine

mesure entamer la qualité du clinker, et du ciment Portland. Cependant, plusieurs études ont été faites sur la limitation des teneurs de différents polluants contenus dans les déchets susceptibles d'être valorisés dans les fours

rotatifs de production du ciment. Le tableau 3 ci-dessous reprend les indications et directives données par l'Office fédéral de l'environnement, des forêts et du paysage (OFEFP) [8].

Tableau 3: Valeurs indicatives pour les polluants du clinker et du ciment [8]

Elément		Valeur indicative (mg/kg)	
		Clinker	Ciment Portland
Antimoine	Sb	10	-
Arsenic	As	40	-
Baryum	Ba	1000	-
Béryllium	Be	5*	-
Cadmium	Cd	1,5	1,5*
Chlore (inorg.)	Cl	-	1000
Chrome	Cr	150	-

Pour les éléments signalés par un astérisque (*) - Be, Cd - l'utilisation de déchets ne doit pas entraîner une élévation sensible de la teneur en polluants dans le clinker ou le ciment [8].

4.3. Problèmes liés à l'environnement

La restriction la plus importante dans le ratio combustible alternatif /combustible fossile reste l'émission des substances nuisibles, des métaux lourds, et des poussières. L'augmentation de déchets dans le ratio, dans

le combustible, conduit à l'augmentation de NOx et SOx (oxydes d'Azote et Oxydes de soufre : SO₂ et SO₃). Ces derniers sont difficiles à éliminer dans les gaz de sortie, et demandent des installations appropriées (cout élevée de l'installation). Le contrôle de ratio de déchets envoyés au four est très conseillé. Quant aux émissions de métaux lourds, il existe des normes spécifiant les limites à ne pas dépasser en ce qui concerne les métaux lourds.

5. Analyse du bilan massique du four rotatif à ciment (FRC)

L'analyse massique du four rotatif est fait sur base du principe de la conservation de la masse, qui exige que, dans des conditions de régime permanent, la somme des entrées à un système est égale à la somme des sorties. 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 à l'entrée, c'est-à-dire la composition de la farine crue, les compositions de combustibles fossile et alternatif, la poussière contenue dans les gaz de sortie et la composition des gaz de sortie sont utilisées pour le calcul du bilan massique. Ainsi, le bilan massique global de l'installation du four rotatif est donné par la relation ci-dessous, dont les composants sont donnés dans le tableau 7. Les équations 1, 2 et 3 ci-dessous donnent le bilan massique du four :

$$\sum m_{entrée} = \sum m_{sortie} \quad (1)$$

Où :

$$\sum m_{entrée} = m_{fa} + m_{dec} + m_{cble\ fossile} + m_{air} \quad (2)$$

$$\sum m_{sortie} = m_{clker} + m_{pousD} + m_{gaz} \quad (3)$$

5.1. Poussière

Le bilan massique local de poussière dans l'électro-filtre (ou filtre à manches) est donné par la relation 4 ci-dessous :

$$m_{pousF} = m_{pousD} + m_{pousR} \quad (4)$$

5.2. Métaux lourds

Le bilan massique global pour chaque métal lourd individu est donné par l'équation 5 ci-dessous :

$$\begin{aligned}
& ML_{fa} + ML_{dec} + ML_{cble_fossile} \\
& = ML_{clker} + ML_{pousD} \\
& + ML_{gaz} \quad (5)
\end{aligned}$$

Quant au bilan massique local pour chaque métal lourd (équation 6), il s'écrit de la même façon que précédemment, compte tenu que les métaux lourds sont localisés dans la poussière.

$$\begin{aligned}
& ML_{pousF} \\
& = ML_{pousD} + ML_{pousR} \quad (6)
\end{aligned}$$

Guo Q. et al [9] ont développé des modèles permettant d'estimer et d'examiner l'influence de plusieurs processus et paramètres opérationnels pour les émissions de métaux, notamment les ratios de distribution de métaux lourds, de recirculation de poussière et métaux lourds. Le ratio de distribution pour la sortie des métaux lourds dans la quantité totale de poussière est donné par la relation 7 ci-dessous :

$$\begin{aligned}
& R_{pousF} \\
& = \frac{ML_{pousF}}{ML_{fa} + ML_{dec} + ML_{cble_fossile} + ML_{pousR}} \quad (7)
\end{aligned}$$

La relation 8 ci-dessous donne le ratio de distribution pour la sortie des métaux lourds dans les gaz de cheminée:

$$\begin{aligned}
& R_{gaz} \\
& = \frac{ML_{gaz}}{ML_{fa} + ML_{dec} + ML_{cble_fossile} + ML_{pousR}} \quad (8)
\end{aligned}$$

Le ratio de distribution pour la sortie des métaux lourds dans les clinkers est défini comme étant :

$$\begin{aligned}
& R_{clker} \\
& = \frac{ML_{clker}}{ML_{fa} + ML_{dec} + ML_{cble_fossile} + ML_{pousR}} \quad (9)
\end{aligned}$$

Le taux de recirculation de masse de poussière est défini comme :

$$REC_{pousR} = \frac{m_{pousR}}{m_{pousF}} \quad (10)$$

Le taux de recirculation de métaux lourds dans la poussière est défini comme :

$$RML_{pousR} = \frac{ML_{pousR}}{ML_{pousF}} \quad (11)$$

6. RESULTATS ET DISCUSSIONS

6.1. Données industrielles

Les données recueillies dans les installations du four rotatif Unax de la Cimenterie Nationale de Kimpese (CINAT), en RD Congo sont présentées dans le tableau 4 ci-dessous.

Tableau 4: Les analyses effectuées au laboratoire de la CINAT

ENTREES ESPECES	
Espèces	Valeurs numériques
Farine	<i>Fractions massiques, en % du poids</i>
CaCO ₃	76
MgCO ₃	1,6
SiO ₂	12,8
Al ₂ O ₃	3,4
Fe ₂ O ₃	1,8
H ₂ O	0,6
K ₂ O, SO ₃ , Na ₂ O	
Déchets [10]	<i>Fractions massiques, en % du poids</i>
C	70
H	7
O	10
N	0,5
S	1,5
Cendres	10
Combustible fossile	<i>Fractions massiques, en % du poids</i>
C	86
H	7,2
O	0,115
N	0,385
S	1,5

H ₂ O	0,5
------------------	-----

6.2. Emissions de gaz

Les résultats trouvés dans les mesures et prélèvements dans la salle de commande et dans le laboratoire (Service contrôle-qualité de

la CINAT) ont montré que le gaz dans la cheminée est composé des CO₂, CO, SO₂, NO, H₂O, O₂, CH₄, HCl, et H₂, dont les volumes massiques sont donnés dans le tableau 5.

Table 5: Volume massique des gaz en Nm³/kg

Combustible	CO ₂	CO	SO ₂	NO	H ₂ O	O ₂	CH ₄	HCl	H ₂
Fossile	0,107	0,027	0,024	0,0027	0,0124	0,0016	0,035	0,014	1,622
Alternatif	1,307	-	0,024	0,0035	1,568	-	-	-	-

6.3. Emissions des poussières

Le bilan massique du four rotatif est dressé dans le tableau 6 ci-dessous.

Tableau 6: Bilan massique du four rotatif Unax de la CINAT

Matières entrantes au FRC		Matières sortantes au FRC	
<i>Farine</i>	[kg/h]	<i>Clinker</i>	[kg/h]
CaO	23833,6	C ₃ S	2604,651
CO ₂	19191,2	C ₂ S	2604,651
SiO ₂	7168	C ₃ A	7162,791
Al ₂ O ₃	1904	C ₄ AF	20186,05
Fe ₂ O ₃	1008	Total	32558,14
MgO	431,2	<i>Poussière</i>	[kg/h]
K ₂ O, SO ₃ , Na ₂ O	2464	CaO	21717,41
Total	56000	SiO ₂	117,8659
<i>Déchets</i>	[kg/h]	Al ₂ O ₃	243,2551
C	831,4047	Fe ₂ O ₃	852,6466
H	83,14047	MgO	1201,229
O	118,7721	SO ₃	228,2083
N	5,938605	K ₂ O	596,8526
S	17,81581	Na ₂ O	120,3736
Cendres	118,7721	Total	25077,84
Total	1175,8437	<i>Gaz de sortie</i>	[kg/h]
<i>Combustible fossile</i>	[kg/h]	CO ₂	11307,16
C	1532,16	SO ₂	495,1998
H	128,9865	NO	61,71081
O	2,04882	H ₂	21165,11
N	6,859088	O ₂	21,01164
S	26,72372	H ₂ O	6107,18
Cl	39,19479	HCl	183,754
Cendres	1,068949	CO	349,8025
H ₂ O	8,907907	CH ₄	462,1782
Total	1745,95	Total	40153,11
<i>Air</i>	[kg/h]		
O ₂	8945,06		
N ₂	29922,24		
Total	38867,3		
Totaux généraux EN	97789,09	Totaux généraux SO	97789,09

Nous avons remarqué que plus de 66 % de matière est perdue dans la cheminée. Cette

perte représente la sommation des débits de sortie de poussière et de gaz. Pour la réduire,

l'une des possibilités est de revoir l'installation de l'électro-filtre à manches. Ce dernier quant il fonctionne correctement, ne laisse passer que des faibles quantités de poussière dans l'atmosphère.

6.4. Emissions des métaux lourds

Les métaux lourds produits par les déchets peuvent constituer un facteur majeur dans l'agriculture. Dans les cendres produites par la combustion des déchets dans le four rotatif, les métaux lourds y sont présents. En termes d'émissions, les particules fines en suspension

Tableau 7: Concentration de métaux lourds perdus dans la cheminée [9]

Elément	Valeur numérique [ppm]
Arsenic	90
Cadmium	394
Chrome	409

Tableau 8: Ratios de distribution pour la sortie des métaux lourds[9]

Elément	R_{pousF}	R_{gaz}	R_{clker}	RML_{pousR}
Arsenic	0,251	0,0000620	0,656	0,457
Cadmium	0,911	0,00452	0,0131	0,233
Chrome	0,206	0,000395	0,679	0,351

7. CONCLUSION

Les combustibles alternatifs sont des plus en plus utilisés dans le secteur du ciment. Leur utilisation dans le four rotatif s'accompagne le plus souvent à des changements d'équipement, en particulier le brûleur (cas où les déchets sont pulvérisés ensemble avec le combustible fossile). Quant à la question de savoir si un four donné peut changer un type de combustible ou substituer partiellement les déchets dans le système de four rotatif, Kaantee et al [3] ont proposé la simulation du processus industriel afin d'obtenir des informations sur la possibilité de changement de combustible. Bien que les fours de

de calcaire sont efficaces dans l'élimination des polluants gazeux et acides provenant de la combustion des déchets. Ces particules absorbent les métaux lourds provenant de boues d'épuration, et sont dans retenues et retournées dans le processus (cuisson farine crue) après filtrage et séparation dans les électro-filtres à manches[12]. Les résultats trouvés [9] sont donnés dans les tableaux 7 et 8, qui donnent la concentration et les ratios de distribution des métaux lourds respectivement.

cimenterie soient réputés d'être flexible à tous les combustibles, des études préliminaires s'avèrent indispensables pour se rendre compte des conséquences qui pourraient y découler. Dans cette étude, nous avons simulé le four rotatif Unax de la CINAT en introduisant des ratios respectivement de combustibles fossile et alternatif de 0,6 et 0,4. Nous avons supposé que la combustion des déchets est complète, et celle de fuel oil incomplète. Il s'est avéré que les combustibles alternatifs rejettent une quantité remarquable de CO₂ et de H₂O dans l'ensemble d'émission de gaz sortant du four. Ces quantités peuvent être dues à la teneur en eau qu'ils contiennent, et aussi à la teneur en carbone souvent élevée dans les déchets de pneus. La fraction de poussière émise dans l'atmosphère représente environ 26% des quantités sortantes, soit 25077,84 kg/h. Quant aux émissions de métaux lourds, 0,90 ppm d'Arsenic, 409 ppm de Chrome, et 394 ppm de Cadmium ont été trouvés dans la cheminée du four. Les études futures se focaliseront sur la façon de réduire les émissions de poussière, afin d'éviter non seulement la pollution de l'environnement, mais aussi des pertes de production, car c'est la farine et le clinker qui se voient diminuer.

NOMENCLATURE

$m_{entrée}$	débit masse totale des espèces à l'entrée, en kg/h
m_{sortie}	débit masse totale des espèces à la sortie, en kg/h
m_{fa}	débit masse de farine à l'entrée four, en kg/h
m_{dec}	débit masse de déchets à l'entrée four, en kg/h
$m_{cble\ fossile}$	débit masse de fuel oil au brûleur du four, en kg/h
m_{clker}	débit masse de clinker à la sortie four, en kg/h
m_{gaz}	débit masse de gaz à la sortie four, en kg/h
m_{air}	débit masse de l'air primaire (et secondaire), en kg/h
m_{pousF}	débit masse totale dans l'électro-filtre, en kg/h

m_{pousD}	débit masse de poussière perdue dans la cheminée, en kg/h
m_{pousR}	débit masse de poussière recyclée dans le circuit, en kg/h
ML_{fa}	débit d'entrée de chaque métal contenu dans la farine, en kg/h
ML_{dec}	débit d'entrée de chaque métal contenu dans les déchets, en kg/h
$ML_{cble_{fossile}}$	débit d'entrée de chaque métal contenu dans le fuel oil, en kg/h
ML_{clker}	débit de sortie de chaque métal contenu dans le clinker, en kg/h
ML_{pousD}	débit de sortie de chaque métal contenu dans la poussière vers l'extérieur, en kg/h
ML_{gaz}	débit de sortie de chaque métal contenu dans le gaz, en kg/h
ML_{pousF}	débit collecté pour chaque métal dans l'électro-filtre, en kg/h
ML_{pousR}	débit recirculation pour chaque métal contenu dans la poussière vers le four, en kg/h

REFERENCES

- [1] Ari, V. 2011. Energetic and exergetic assessments of a cement rotary kiln system. *Scientific Research and Essays*. 6, 6 (2011), 1428–1438.
- [2] Griffin RD 1986. A new theory of dioxin formation in municipal solid waste combustion. *Chemosphere*.
- [3] Kaantee, U., Zevenhoven, R., Backman, R. and Hupa, M. 2003. Modelling a Cement Manufacturing Process to Study Possible Impacts of Alternative Fuels- Part A. *NORDIC CONCRETE RESEARCH-PUBLICATIONS*-. 30, (2003), 21.
- [4] Madlool, N.A., Saidur, R., Rahim, N.A., Islam, M.R. and Hossian, M.S. 2012. An exergy analysis for cement industries: An overview. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 16, 1 (Jan. 2012), 921–932.
- [5] Mantis, I., Voutsas, D. and Samara, C. 2005. Assessment of the environmental hazard from municipal and industrial wastewater treatment sludge by employing chemical and biological methods. *Ecotoxicology and Environmental Safety*. 62, 3 (Nov. 2005), 397–407.
- [6] Morselli L, Zappoli S, Liberti A, Rotatori M and Brancaloni E 1989. Evaluation and comparison of organic and inorganic compounds between emission and emission samples from municipal solid waste incinerator. *Chemosphere*.
- [7] MUNGYEKO BISULANDU, B.-J.R. and PONGO PONGO, C. 2014. LES ENERGIES RENOUVELABLES FACE A L'ÉPUISEMENT DES ENERGIES FOSSILES: UTILISATION ET VALORISATION DES DECHETS DANS LES FOURS DE CIMENTERIE. *7ème édition COFRET* (Paris, France, Apr. 2014), 905–918.
- [8] OFEFP 2005. Élimination des déchets dans les cimenteries. Office fédéral de l'environnement, des forêts et du paysage (OFEFP).
- [9] Qizhong, G. and James O., E., Jr. 1996. Heavy metal outputs from a cement kiln co-fired with hazardous waste fuels. *Journal of Hazardous Materials* 5 1.
- [10] Radwan, A.M. 2012. Different Possible Ways for Saving Energy in the Cement Production. *Advances in Applied Science research* Vol. 3 (2).
- [11] Seyler, C., Hellweg, S., Monteil, M. and Hungerbühler, K. 2005. Life Cycle Inventory for Use of Waste Solvent as Fuel Substitute in the Cement Industry - A Multi-Input Allocation Model (11 pp). *The International Journal of Life Cycle Assessment*. 10, 2 (Mar. 2005), 120–130.
- [12] Zabaniotou, A. and Theofilou, C. 2008. Green energy at cement kiln in Cyprus— Use of sewage sludge as a conventional fuel substitute. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 12, 2 (Feb. 2008), 531–541.