HAL
open science

Les énergies renouvelables face à l'épuisement des énergies fossiles: Utilisation et Valorisation des déchets dans les fours de cimenterie

Baby-Jean Robert Mungyeko Bisulandu, Pongo Pongo

To cite this version:

Baby-Jean Robert Mungyeko Bisulandu, Pongo Pongo. Les énergies renouvelables face à l'épuisement des énergies fossiles: Utilisation et Valorisation des déchets dans les fours de cimenterie. Septième édition du COlloque FRancophone en Energie, Environnement, Economie et Thermodynamique - COFRET'14, Apr 2014, Paris, France. hal-02569747

HAL Id: hal-02569747

https://univ-pau.hal.science/hal-02569747

Submitted on 11 May 2020

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

Les énergies renouvelables face à l'épuisement des énergies fossiles: Utilisation et Valorisation des déchets dans les fours de cimenterie.

***MUNGYEKO BISULANDU B.-Jean Robert** [a)] **et PONGO PONGO Charles** [b)]

a) Génie Mécanique, Optimisation énergétiques des fours de cimenterie, Faculté Polytechnique, Université Kongo
B.P. 202 Mbanza-Ngungu, Bas-Congo, RD CONGO
b) Service contrôle - qualité, Cimenterie Nationale de Kimpese,
Usine à Kimpese, Bas-Congo, RD CONGO

* Auteur correspondant: bjr.mungyeko@universitekongo.org

Résumé

L'article présente sommairement la façon dont les sources d'énergies renouvelables (biomasse, déchets) peuvent être utilisées et valorisées dans la cimenterie, pour la cuisson du clinker au four rotatif.
Vue la tendance d'épuisement des combustibles fossiles, la présente recherche étudie les voies et moyens de substitution partielle et/ou totale des combustibles fossiles en combustibles alternatifs, dans la cimenterie, et cela, dans le but de comprendre les enjeux liés à la combustion desdits combustibles aux fours de cimenterie. Ce travail se concentre plus à donner un aperçu général de l'utilisation rationnelle des déchets comme combustibles dans les fours rotatifs à ciment, ainsi que d'éventuelles conséquences dans le processus.
Pour arriver au bout des objectifs assignés, nous avons analysé la littérature récente dans ce domaine, visité des usines cimentières qui sont à l'avant-garde dans l'utilisation des combustibles alternatifs, répertorié les différents types de déchets, qui peuvent être utilisés comme combustibles alternatifs en cimenterie et évalué leur pouvoir calorifique [1].
Les résultats ont montré que les combustibles constitués des divers déchets offrent des valeurs énergétiques plus ou moins satisfaisants pour l'industrie du ciment. Ainsi, la valeur minimale du pouvoir calorifique acceptable pour les combustibles alternatifs doit être supérieure ou égale à 13MJ/kg [2], dans le but d'assurer à la fois le fonctionnement approprié du four et aussi la qualité du clinker à produire. Les études sur la combustion de combustibles alternatifs aux fours de cimenterie sont pertinentes à tel enseigne qu'elles permettent de baliser la route vers l'utilisation intensive des combustibles dits alternatifs. Les cimenteries congolaises peuvent ainsi migrer vers la substitution partielle des combustibles fossiles par des combustibles alternatifs.

Mots-clés : Four rotatif à ciment, déchets, combustibles fossiles, combustibles alternatives, utilisation, environnement.

Introduction

Les sources d'énergies renouvelables sont des sources d'énergies inépuisables, qui se renouvellement sans cesse ; elles sont fournies par le soleil, le vent, la chaleur de la Terre, les chutes d'eau, les marées ou encore la croissance des végétaux. Leur exploitation n'engendre pas ou peu de déchets et d'émissions polluantes. Ce sont les énergies de l'avenir. Aujourd'hui, elles sont sous-exploitées par rapport à leur potentiel.

D'une manière générale, il existe cinq familles de sources d'énergies renouvelables, à savoir : le solaire, l'éolien, l'hydraulique, la biomasse et la géothermie. L'industrie du ciment utilise comme combustibles de substitution la biomasse, qui est la fraction biodégradable des produits, déchets et résidus provenant de l'agriculture, y compris les substances végétales et animales issues de la terre et de la mer, de la sylviculture et des industries connexes, ainsi que la fraction biodégradable des déchets industriels et ménagers [3].

Les fours rotatifs se retrouvent dans beaucoup de processus de traitement des solides. Ceux-ci incluent le séchage, l'incinération, le chauffage, le refroidissement, l'humidification, la calcination, la réduction, etc. Une des plus importantes utilisations industrielles est la production de ciment [4].

Les fours rotatifs sont principalement utilisés dans les cimenteries, et ont comme rôle de produire le clinker servant à la fabrication du ciment portland. Le clinker est obtenu après cuisson de la farine crue (matière fine), constituée d'un mélange d'argile et de calcaire finement broyé. La production du clinker nécessite des températures très élevées pour amorcer les réactions de clinkérisation et les changements de phase nécessaires pour former les composés minéraux complexes du clinker, qui donnent au ciment ses propriétés uniques [5, 6].

Aujourd'hui, les producteurs de ciment ont augmenté l'utilisation des combustibles de substitution en remplacement des combustibles fossiles pour atteindre les mélanges de combustible les plus économiques [7- 9].

L'utilisation de combustibles alternatifs, surtout de la biomasse, dans une usine de ciment nécessite la connaissance de plusieurs paramètres, dont le plus important est la composition massique élémentaire. Cependant, le choix est surtout actuellement basé sur le prix et la disponibilité [6, 8].
A l'heure actuelle, il existe différentes façons d'alimenter le four rotatif en combustibles alternatifs, parmi lesquelles il y a l'alimentation dans les zones de combustion du four, et dans le système de préchauffage, plus précisément dans la conduite montante et dans le précalcinateur [7]. Le présent article va s'atteler sur l'alimentation dans le système de préchauffage, à l'extrémité entrée de la farine crue au tube du four.

1. Utilisation et Valorisation des déchets dans la cimenterie

1.1. Utilisation des déchets dans les fours rotatifs

L'industrie cimentière est une des industries les plus consommatrices d'énergie. Dans une installation cimentière par exemple, le four rotatif d'une capacité de 3000 tonnes par jour de clinker nécessite un apport d'énergie de 1000 kJ/ kg de clinker [10]. Compte tenu des quantités produites, il s'avère indispensable d'étudier les moyens de réduire la consommation d'énergie, en améliorant l'équipement industriel ou en changeant le type de combustible, ou encore en substituant partiellement le combustible primaire aux combustibles alternatifs.

Etant donné que les combustibles fossiles deviennent couteux et rares, les industries cimentières commencent déjà à utiliser d'autres types de combustibles [7, 8, 11], dont les plus connus sont les combustibles dits alternatifs, constitués des déchets de différents types. Mais, il est important de souligner que malgré la rareté et le cout élevé des combustibles fossiles, les industries

cimentières n'utilisent les combustibles alternatifs que partiellement car la substitution totale des combustibles alternatifs dans la cimenterie sont encore en cours d'études. Le remplacement des combustibles fossiles par des combustibles alternatifs doit se faire après des études sérieuses sur la faisabilité technique et sur la façon de les utiliser dans les processus de production de clinker [2].

Aujourd'hui, certaines cimenteries substituent déjà, du moins partiellement, les déchets provenant d'autres usines et des cités urbaines au charbon, qui est le combustible fossile le plus utilisé au monde en cimenterie. Les principales raisons sont la réduction du cout de production et des pénalités environnementales, dues aux émissions de CO_2.

En utilisant les déchets dans les fours rotatifs, l'industrie du ciment participe à l'effort collectif de préservation des ressources naturelles et de traitement des déchets.

De façon générale, les déchets peuvent être utilisés de deux manières [12]:

- En remplacement partiel des constituants de base tels que le calcaire et l'argile : **valorisation matière**, et ;
- En remplacement des combustibles fossiles tels que le coke de pétrole, le charbon, le fuel oïl lourd… : **valorisation énergétique**.

Le présent article se concentre plus sur la valorisation énergétique des déchets.

1.2. Valorisation énergétique des déchets

La valorisation énergétique est celle qui s'intéresse à l'utilisation des déchets comme combustibles alternatifs ou de substitution dans le four rotatif cimentier. Comme il est dit ci-haut, l'épuisement et le cout élevé de combustibles primaires poussent de plus en plus les cimentiers à rechercher d'autres sources énergétiques moins onéreuses et disponibles. Parmi les solutions de réduction de cout énergétique, nous avons l'utilisation des déchets. La valorisation énergétique des déchets dans la cimenterie est généralement liée à des objectifs 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.

La valorisation des déchets utilisés en tant que matières premières pour la production de clinker et comme combustibles de substitution a permis de protéger les ressources naturelles non renouvelables. Grâce à cette valorisation, l'industrie cimentière contribue à résoudre certains des problèmes de déchets de la collectivité, en réduisant la quantité de déchets à éliminer (sans compter les avantages qui en résultent au niveau des émissions de CO_2) [13].

L'utilisation des déchets comme combustibles constitue une technique fiable car les composés organiques sont détruits tandis que les constituants inorganiques, tels que les métaux lourds, sont fixés et intégrés au produit. Les fours à ciment présentent un certain nombre de caractéristiques qui en font un excellent équipement pour la valorisation et la combustion en toute sécurité des combustibles de substitution [2, 5, 8, 13, 14, 15, 16]: les températures élevées, le long temps de séjour, les conditions d'oxydation, l'inertie thermique élevée, le milieu alcalin, la rétention des cendres dans le clinker, l'alimentation continue en combustible,…

2. Problèmes associés à l'utilisation des déchets en cimenterie

A ces jours, il existe plusieurs problèmes liés à l'utilisation des déchets dans l'industrie du ciment, parmi lesquels il y a le problème de disponibilité et d'approvisionnement, le pouvoir énergétique, le dosage de la technologie et l'équilibre thermique du four.

2.1. Disponibilité et approvisionnement en déchets

L'étude préliminaire sur la substitution des combustibles fossiles aux combustibles alternatifs est sans doute la disponibilité et la localisation des lieux d'approvisionnement en déchets [2, 8].
Cette étude est indispensable dans la mesure où elle permet de se rendre compte du potentiel en déchets pouvant être utilisés en cimenterie sans qu'il y ait rupture de stock ou d'approvisionnement, car la production des cimenteries exige que le combustible puisse être disponible, afin d'éviter des arrêts pouvant conduire à des dépenses supplémentaires de combustible, car le réchauffage du four demande beaucoup d'énergie.

2.2. Pouvoir énergétique des déchets

Etant donné que le four rotatif est qualifié d'énergivore [14-17], les combustibles qui seront substitués partiellement au charbon (ou fuel oïl) devront répondre à certains critères, notamment en ce qui concerne leur pouvoir calorifique [6, 8, 18], le taux du carbone qu'ils contiennent. Plus souvent, les industries qui substituent partiellement les combustibles fossiles par les déchets acceptent des valeurs moyennes du pouvoir calorifique inférieur (PCI) allant de 16 – 18 GJ/tonne [19], ce qui est le cas de la biomasse.

2.3. Le dosage de la technologie

Les combustibles alternatifs fabriqués suite à un mélange de divers déchets doivent respecter certaines règles [6] :

- la qualité chimique du combustible doit répondre aux normes réglementaires assurant la protection de l'environnement ;
- le pouvoir calorifique doit être suffisamment stable pour permettre le contrôle d'énergie alimentée au four, l'objectif étant d'arriver à un niveau de composition assez homogène, et ;
- la forme physique doit permettre une manipulation facile de la matière pour le transport et le réglage de débit de matière à la cimenterie.

2.4. Equilibre thermique du four

Le four de cimenterie est réputé être sensible à la formation d'alkalis [18] tels que Na_2SO_4, K_2SO_4 et $CaSO_4$, où les deux premiers sont stables et le dernier est instable [9, 20].

L'utilisation des déchets comme combustible alternatif à l'extrémité entrée des matières premières du four peut amener un certain nombre d'anomalies : le colmatage (bouchage, obturation) [9, 14, 20] au niveau des cyclones, et même au niveau du four, dû à l'oxydation du soufre libéré par les matières premières lors de la combustion des déchets et/ou à la libération de SO_2 suite à la dissociation de $CaSO_4$, illustrée par les relations (1) et (2) ci-dessous. Cette

libération (et/ou dissociation) est causée par des agents réducteurs (CO, CO_2…) qui proviennent du gaz produit par le brûleur du four [9, 20]. Le rejet d'une fraction de SO_2 dans l'atmosphère, sans être transporté au niveau des cyclones (ou du précalcinateur) s'est fait par l'intermédiaire du by pass.

$$CaSO_4(s) + CO(g) \leftrightarrow CaSO_3(s) + CO_2(g) \quad (1)$$

$$CaSO_3(s) \leftrightarrow CaO(s) + SO_2(g) \quad (2)$$

Par la suite, $CaO(s)$est sulfurisé, illustré par relation (3):

$$CaO(s) + SO_2(g) + 3CO(g) \leftrightarrow CaS(s) + 3CO_2(g) \quad (3)$$

L'oxydation de CaS(s) est rapide et très exothermique, et est illustrée par la relation (4) ci-après:

$$CaS(s) + 1.5O_2(g) \leftrightarrow CaO(s) + SO_2(g) \quad (4)$$

3. **Classification de déchets utilisés en cimenterie** [6]

Tous les déchets ne sont pas utilisables en cimenterie. Les déchets utilisés en cimenterie ont de propriétés particulières, notamment le faible taux d'alkalis produits et le faible taux de métaux lourds, le pouvoir calorifique acceptable.

Plusieurs classifications ont été établies. Selon Cembureau, les combustibles alternatifs sont divisés en les cinq catégories suivantes:

- classe 1: les combustibles alternatifs gazeux (exemples: les déchets de gaz de raffinerie, gaz de décharge) ;
- classe 2: les combustibles alternatifs liquides (exemples: solvants usés à basse teneur en clore, huiles hydrauliques) ;
- classe 3: les combustibles alternatifs solides pulvérisés, granulés ou finement broyés (exemples: sciure de bois, les boues d'épuration séchées, plastique granulé, farines animales, pneus bien broyés) ;
- classe 4 : les combustibles alternatifs solides grossiers broyés (exemples : pneus broyés, caoutchouc/déchets plastiques, déchets de bois, matière organique ré agglomérée), et ;
- classe 5: les combustibles alternatifs grossiers (exemples: pneus entiers, des balles en plastique).

3.1. Combustibles alternatifs solides

Les combustibles alternatifs solides peuvent être divisés en quatre groupes :

- groupe 1: les combustibles solides et secs de taille relativement bonne, qui n'adhèrent pas (dimensions : < 2 mm, humidité : < 10-15%), par exemple: la poussière de bois, la poudre d'écorce, écorce de riz ;
- groupe 2: les combustibles solides et secs de grosse taille, qui n'adhèrent pas (dimensions : < 20 mm, humidité : < 10-15%), par exemple: les déchets plastiques, les copeaux de bois, les déchets bois ;

- groupe 3: les combustibles solides, secs qui ont tendance à coller (dimensions : < 20 mm, humidité : < 10-15%), par exemple: farine animale, la poussière de bois imprégné, et ;
- groupe 4: les mélanges de différents combustibles grumeleux (dimensions : < 200 mm, humidité: < 20%), par exemple: peluches, papier, carton.

Une autre classification donne trois catégories des combustibles solides:

- composés végétaux ou de produits naturels (huile de schiste, de la tourbe, écorces, sciure, etc.) ;
- produits synthétiques (pneus usagés, déchets de caoutchouc, déchets de plastiques, etc.), et ;
- autres (pièces de voitures déchiquetées, les carburants issus de rebuts, des ordures ménagères, etc.).

3.2. Combustibles alternatifs liquides

Les combustibles liquides sont divisés en deux catégories:

- combustibles de substitution liquides facilement décomposés, légèrement toxiques (goudron acide, les résidus de pétrole, etc.),
- combustibles de substitution liquides, toxiques stables (hydrocarbures poly aromatiques (HPA), bi phényle poly chlorate (BPC), etc.)

4. Evaluation énergétique de déchets

La combustion de différents types de déchets nécessite un contrôle détaillé et une adaptation des procédés technologiques à chaque type de déchets.

4.1. Composition élémentaire des déchets

La composition élémentaire de quelques combustibles alternatifs dérivés de divers déchets est donnée dans le tableau 1 ci-dessous :

Tableau 1 : Analyse élémentaire de quelques combustibles alternatifs (déchets)

Combustibles alternatifs	PCI	StO_2	C [%]	H [%]	O [%]	S [%]	N [%]	Cendres [%]
Combustible dérivé des ordures [a]	26	2,16	60	10	25	1	0,1	10
Boues d'épuration [a]	16	1,6	43	9	27	0,2	1,8	20
Combustible dérivé des pneus [a]	32	2,34	70	7	10	1,5	0,5	10
Sciure [b]	17,5	-	50,94	5,61	37,28	0,01	0	6,16
Déchets de bois industriels [b]	6,0-20	-	43,5-50,7	6-6,4	-	< 0,05	0,1-0,5	0,4-2
Coques de tournesol [c]	-	-	51,4	5	43	0	0,6	1,9
Coque d'arachide [c]	-	-	50,9	7,5	40,4	0,02	1,2	3,1
Noix de coco [c]	-	-	51	5,6	43	0,1	0	3,1
Coques de café [c]	-	-	43,9-46,8	4,8-4,9	47,1-49,6	0,1-0,6	0,6-1,6	0,9-4,1
Enveloppe de soya [c]	-	-	45,4	6,7	46,9	0,1	0,9	5,1

Enveloppe de coton [c]	-	-	50,4	8,4	39,8	0	1,4	3,2
Farine animale [a]	17	1,45	42	6	15,3	0,4	7,5	30

a = source [5] ; b = source [4] ; c = source [21] ; PCI (MJ/kg cble sec) ; StO_2 (kg O_2/kg cble) : Oxygène stœchiométrique requise pour la combustion complète.

4.2. Propriétés des combustibles alternatifs dérivés de déchets

Les combustibles alternatifs dérivés de déchets ont des compositions et des propriétés similaires. Parmi les propriétés importantes [6], qui doivent être examinées avant la combustion des déchets, il y a:

- l'état physique du combustible (solide, liquide, gazeux),
- la teneur en éléments circulants (Na, K, Cl, S),
- la toxicité (composés organiques, métaux lourds),
- la composition et la teneur en cendres (voir tableau 2 ci-dessous),
- l'aptitude à pouvoir donner des éléments volatiles
- le pouvoir calorifique (ou énergétiques),
- les propriétés physiques (taille de la ferraille, densité, homogénéité),
- les propriétés de broyage (combustibles solides),
- la teneur en humidité,
- le dosage de la technologie.

Tableau 2 : La composition (teneur) de cendres de quelques combustibles alternatifs

Combustibles alternatifs	SiO_2 [%]	Al_2O_3 [%]	Fe_2O_3 [%]	CaO [%]	MgO [%]	K_2O [%]	Na_2O [%]	SO_3 [%]	Cl [%]	TiO_2 [%]	P_2O_5 [%]
Combustible dérivé des ordures [a]	40	25	2	20	2,5	1	1	1	-	-	-
Boues d'épuration [a]	40	15	5	20	2,5	1	1	1	-	-	-
Combustible dérivé des pneus [a]	22	10	1,5	11	1,5	1	1	15	0,4	-	-
Sciure [b]	16,34	3,16	1,43	38,89	7,44	11,06	0,6	2,62	-	0,2	2,06
Déchets de bois industriels [b]	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Coques de tournesol [c]	17,8	14,5	6,4	14,6	8,5	21,1	0,1	6,8	-	0,2	9,4
Coque d'arachide [c]	27,7	8,3	10,3	24,8	5,4	8,5	0,8	10,4	-	0,1	3,7
Noix de coco [c]	69	8,8	6,4	2,5	1,6	8,8	4,8	0	-	-	1,6
Coques de café [c]	13,5 -16,6	3,9 - 4,8	2,2 - 2,4	9,8 - 10,7	3,7 - 4	36,9 - 38,1	0,4 - 0,5	-	-	-	3,4 - 3,7
Enveloppe de soya [c]	1,7	7,4	2,5	21,4	7,1	30,5	5,3	3,7	-	0,2	4,9
Enveloppe de coton [c]	10,8	1,3	1,9	20,7	7,5	49,6	1,3	1,7	-	0	4
Farine animale [a]	0,5	0	-	20	-	0,5	-	-	-	-	-

a = source [5] ; b = source [4] ; c = source [21]

4.3. Co-combustion des déchets avec les combustibles fossiles

La température de combustion joue un grand rôle dans la combustion de ces déchets. Plusieurs auteurs ont souligné que les températures élevées régnant dans les fours rotatifs constituent

l'une des avantages de bruler les déchets dans desdits fours. Cela donne à la cimenterie une place de choix pour l'utilisation, la valorisation et la combustion rationnelle et efficiente en toute sécurité des combustibles de substitution de divers types. Il est souvent d'usage dans les cimenteries d'effectuer la co-combustion, qui permet d'assurer la combustion en agissant sur le taux de différents combustibles alternatifs disponibles et combustibles fossiles.

4.4. Analyse de l'économie d'énergie

La substitution partielle et/ou totale des combustibles alternatifs dans l'industrie du ciment présente un certain avantage en termes d'économie d'énergie. C'est d'ailleurs l'une de deux principales raisons d'utilisation des déchets comme combustibles dans les fours de cimenterie. Lorsque les combustibles fossiles sont remplacés par des déchets de divers types, l'économie énergétique peut être évaluée par les équations (5) et (6) ci-dessous [15] :

$$m_{\text{déchets}}.\,PCI_{\text{déchets}} = m_{\text{fuel oil}}.\,PCI_{\text{fuel oil}} + m_{\text{charbon}}.\,PCI_{\text{charbon}} \qquad (5)$$

$$\frac{m_{\text{charbon}}}{m_{\text{fuel oil}}} = \frac{P_{\text{charbon}}}{P_{\text{fuel oil}}} \qquad (6)$$

Où
m_i est la masse du combustible i, en t,
PCI_i est le pouvoir calorifique inférieur du combustible i, en MJ/t, et
P_i est la proportion du combustible i dans le mélange de carburant d'origine (fossile), en %.

Hypothèses :

- la quantité d'énergie introduite par les déchets substitue la quantité égale d'énergie qui, autrement, aurait été fournie par le mélange de combustibles conventionnels (fossiles), à savoir le charbon et le fuel oïl lourd.
- la proportion du charbon et du fuel oïl reste constant.

4.4.1. Deux combustibles fossiles substitués par les déchets

L'économie d'énergie réalisée lorsque deux combustibles fossiles (le charbon et le fuel oïl) sont substitués aux déchets, est calculée par les équations (7) et (8), obtenues par combinaison des équations (5) et (6) ci-dessus:

$$m_{\text{charbon}} = \frac{m_{\text{déchets}}.\,PCI_{\text{déchets}}}{PCI_{\text{charbon}} + \frac{P_{\text{fuel oil}}}{P_{\text{charbon}}}.\,PCI_{\text{fuel oil}}} \qquad (7)$$

$$m_{\text{fuel oil}} = m_{\text{charbon}}.\frac{P_{\text{fuel oil}}}{P_{\text{charbon}}} \qquad (8)$$

4.4.2. Un seul combustible fossile substitué par les déchets

Dans le cas où un seul combustible fossile est remplacé par les combustibles alternatifs (déchets), les relations (9) et (10) ci-dessous sont d'usage avec $m_{\text{charbon}} = 0$ et $m_{\text{fuel oil}} = 0$ dans l'équation (7) respectivement:

$$m_{\text{fuel oil}} = \frac{m_{\text{déchets}} \cdot PCI_{\text{déchets}}}{PCI_{\text{fuel oil}}} \quad (9)$$

$$m_{\text{charbon}} = \frac{m_{\text{déchets}} \cdot PCI_{\text{déchets}}}{PCI_{\text{charbon}}} \quad (10)$$

4.4.3. Pouvoir calorifique effectif des déchets

Si les déchets contiennent de l'eau, une partie de l'énergie sera dissipée par l'échauffement et l'évaporation de cette eau dans le four rotatif. Ce qui permet d'introduire la notion du pouvoir calorifique efficace (ou effectif), qui représente la quantité effective d'énergie disponible pour la production de clinker, donné par la relation (11) ci-dessous [15].

$$PCI_{\text{déchets_eff}} = PCI_{\text{déchets}} - \frac{m_{H2O}}{m_{\text{déchets}}} . f_c \quad (11)$$

Où

m_{H2O} est la masse d'eau, en t.

f_c est le facteur de correction utilisé par Holcim AG. $f_c = 2500$ MJ/t de H_2O.

5. Conséquences environnementales

La combustion de déchets dans les fours de cimenterie présente plusieurs avantages pour l'environnement : la combustion dans un milieu alcalin, les éléments chimiques toxiques vont dans le clinker et ne polluent donc pas l'atmosphère,...
La combustion des déchets dans les fours de cimenterie participe à la réduction des émissions de CO_2 dans la mesure où si ces déchets étaient brulés par l'incinération traditionnelle, il y aurait production de CO_2, du méthane et d'autres gaz à effet de serre [12]. Au regard de ce qui précède, il s'avère important d'affirmer que toute utilisation de déchets comme combustible pour la cimenterie est une valorisation, d'un point de vue écologique à l'élimination, car elle économise l'énergie et diminue les émissions de CO_2 [12].

5.1. Estimation des émissions de CO_2

C. Seyler et al. [15] ont calculé les émissions de CO_2 provenant du carbone contenu dans les combustibles, en supposant une conversion de 100% de C en CO_2. Ils ont établi la relation (12), qui quantifie le changement des émissions de CO_2, en considérant que 1 kg de C donne 3,67 kg de CO_2, du point de vue stœchiométrique.

$$\Delta CO_2 = (m_{\text{déchets}} \cdot C_{\text{déchets}} - m_{\text{fuel oil}} \cdot C_{\text{fuel oil}} - m_{\text{charbon}} \cdot C_{\text{charbon}}) . 3{,}67 \quad (12)$$

Où

C_i est la teneur en carbone C du combustible i, en kg/t de combustible.

ΔCO_2 est le changement des émissions de CO_2, en kg CO_2.

Les tableaux 3 et 4 montrent à quel point il est avantageux de bruler les combustibles alternatifs aux fours de cimenterie où les émissions de CO_2 sont réduites, comparé à un incinérateur dédié.

Tableau 3: Récapitulatif des émissions de CO_2 provenant de la combustion 1 tonne de déchets dans un incinérateur dédié avec récupération d'énergie ou dans un four à ciment, l'actualisation de l'opération de la charge de base de l'usine. [22]

Activité	Biocarburants (16 GJ/t)	Déchets de solvant (26 GJ/t)
L'incinération dans un incinérateur dédié	3,379 kg CO_2	4,429 kg CO_2
Combustion dans les fours à ciment, substitution du charbon	2,778 kg CO_2	3,462 kg CO_2
Bénéfice nette suite à la combustion dans les fours à ciment	601 kg CO_2/t déchets	967 kg CO_2/t déchets

Tableau 4: Récapitulatif des émissions de CO_2 provenant de la combustion 1 tonne de déchets dans un incinérateur dédié sans récupération d'énergie ou dans un four à ciment. [22]

Activité	Biocarburants (16 GJ/t)	Déchets de solvant (26 GJ/t)
L'incinération dans un incinérateur dédié	3,379 kg CO_2	4,429 kg CO_2
Combustion dans les fours à ciment, substitution du charbon	1,760 kg CO_2	1,820 kg CO_2
Bénéfice nette suite à la combustion dans les fours à ciment	1,619 kg CO_2/t déchets	2,609 kg CO_2/t déchets

5.2. Estimation des émissions de NO_x

De même, le changement des émissions de NO_x émission, en considérant que 1 kg de N donne 3,29 kg NO_x stœchiométrique peut être estimé par la relation (13) [15] suivante :

$$\Delta NO_x = (m_{déchets}.N_{déchets}.R_{déchets} - m_{fuel\ oil}.N_{fuel\ oil}.R_{fuel\ oil} - m_{charbon}.N_{charbon}.R_{charbon}) * 0{,}5 * 3{,}29 \quad (13)$$

Où
N_i est la teneur en azote du combustible i, en kg/t de combustible et
R_i est le taux de conversion du combustible i, en %.

5.3. Estimation des métaux lourds dans le gaz de fumée

Pour calculer le transfert des métaux lourds dans le gaz de fumée, il est indispensable de connaitre les coefficients de transfert des métaux lourds. Les changements de la teneur de métaux lourds dans le gaz de fumée sortant de la cheminée du four rotatif sont calculés par la relation (14) ci-dessous [15]:

$$\Delta ML = (m_{déchets}.ML_{déchets} - m_{fuel\ oil}.ML_{fuel\ oil} - m_{charbon}.ML_{charbon}).ct_i \quad (14)$$

Où
ML_i est la teneur en métaux lourds dans le combustible i, en mg/t,
ct_i est le coefficient de transfert des métaux lourds dans le gaz. Et l'indice i spécifie l'élément métallique lourd respectif.

6. Résultats et recommandations

Pour assurer le fonctionnement approprié du four, une valeur minimale du pouvoir calorifique acceptable pour les combustibles alternatifs a été fixée à 13MJ/kg [2], qui permettra de ne pas détériorer la qualité du clinker à produire.

L'emploi de combustibles de substitution dans l'industrie cimentière présente de nombreux avantages écologiques et environnementaux [13]:

- diminution de la consommation de combustibles fossiles, non renouvelables, tels le charbon, fuel oïl, et des atteintes à l'environnement qu'implique l'extraction du charbon.
- contribution à la réduction des émissions, comme les gaz à effet de serre, en remplaçant les combustibles fossiles par des matières qu'il faudrait autrement incinérer, en provoquant des émissions et des résidus ultimes.
- récupération maximale de l'énergie fournie par les déchets. La totalité de cette énergie est directement utilisée dans les fours pour la production de clinker.
- récupération maximale des éléments non combustibles des déchets et élimination des laitiers et des cendres puisque les éléments inorganiques remplacent la matière première dans le ciment.

Il ne suffit pas seulement de se décider de l'utilisation des déchets comme combustibles de substitution dans la cimenterie pour faire des économies d'énergie, mais aussi de se rendre compte de la disponibilité (potentialité) des déchets susceptibles d'être valorisés comme combustible, car plus il y a des changements fréquents dans les proportions des combustibles brulés, plus la maitrise des procédés technologiques et le contrôle de paramètres deviennent complexes.

Conclusion

L'industrie cimentière convient bien à l'emploi des combustibles alternatifs (voir point 1.2).

L'utilisation des combustibles alternatifs en cimentière peut s'accompagner des besoins de modification du système existant, par la mise au point d'un nouvel équipement de combustion (brûleur). Plusieurs auteurs ont proposé des solutions, parmi lesquelles la solution de A. Nielsen [23], qui a proposé l'introduction des combustibles solides à l'extrémité d'entrée des matières premières au four, cas auquel les combustibles alternatifs se mélangent avec matières premières surchauffées provenant des cyclones. Ce qui constitue un grand avantage dans la mesure où la température des matières premières amorce (joue un rôle capital) la combustion des combustibles alternatifs. A ce moment, le brûleur du four ne servira qu'à brûler le combustible fossile. C'est donc la solution optimale.

Les cimenteries congolaises (CILU et CINAT) ont la possibilité de substituer partiellement les combustibles fossiles par des combustibles alternatifs, compte tenu de la disponibilité de déchets à travers le pays, et qui sont jusqu'ici non exploités.

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. Nous ne pouvons pas oublier l'Ingénieur Scibetta Stéphane, AFR Project Engineer de Heidelberg Cement Benelux, cimenterie CBR de Liège/Lixhe, pour son expertise et le temps qu'il a consacré lors de notre visite dans leurs installations.

Références

[1] W. Małgorzata, *Characterisation of the properties of alternative fuels containing sewage sludge*, Fuel Processing Technology, Vol. 104, 80–89, 2012.
[2] I. K. Kookos, Y. Pontikes, G. N. Angelopoulos, G. Lyberatos, *Classical and alternative fuel mix optimization in cement production using mathematical programming*, Fuel, Vol. 90, 1277-1284, 2011.
[3] Observatoire des énergies renouvelables (2013), *Les cinq familles des énergies renouvelables,* (http://www.energies-renouvelables.org/energies_renouvelables.asp)
[4] S. Noui, *Etude numérique de la combustion des gaz dans un four de cimenterie*, Université Hadj-Lakhdar Batna/Algérie, Mémoire de magistère, 2006.
[5] A. M. Radwan, *Different Possible Ways for Saving Energy in the Cement Production*, Advances in Applied Science research, Vol. 3 (2), 1162-1174, 2012.
[6] E. Mokrzycki, A. U. Bochenczyk, *Alternative fuels for the cement industry*, Applied Energy, Vol. 74, 95–100, 2003.
[7] U. Kaantee, R. Zevenhoven, R. Backman, M. Hupa, *Cement manufacturing using alternative fuels and the advantages of process modeling*, Fuel Processing Technology, Vol. 85, 293-301, 2004.
[8] E. Mokrzycki, A. U. Bochenczyk, S. Mieczyslaw, *Use of alternative fuels in the Polish cement industry*, Applied Energy, Vol. 74, 101 – 111, 2003.
[9] A. R. Nielsen et al, *High-Temperature Release of SO2 from Calciner Cement Raw Materials*, Energy Fuels, Vol. 25, 2917-2926, 2011.

[10] K. S. Mujumdar, A. Arora and V. V. Ranade, *Modeling of Rotary Cement Kilns: Applications to Reduction in Energy Consumption*, Ind. Eng. Chem. Res., Vol. 45, 2315-2330, 2006.
[11] A. R. Nielsen, R. A. Wochnik, M. B. Larsen, P. Glarborg, K. Dam-Johansen, *Mixing large and small particles in a pilot scale rotary kiln*, Powder Technology, Vol. 210, 273-280, 2011.
[12] Fedelcem, *Préserver les ressources naturelles : la valorisation des déchets en cimenterie*, JP Jocobs, 2006.
[13] Cembureau, Les combustibles de substitution dans la production du ciment : bilan technique et écologique, Cembureau, 1997.
[14] A. R. Nielsen, M. B. Larsen, P. Glarborg, and K. Dam-Johansen, *Devolatilization and Combustion of Tire Rubber and Pine Wood in Pilot Scale Rotary Kiln*, Energy & Fuel, Vol. 26, 854-868, 2012.
[15] C. Seyler, S. Hellweg, M. Monteil and K. Hungerbuhler, *Life Cycle Inventory for Use of Waste Solvent as Fuel Substitute in the Cement Industry, A Multi-Input Allocation Model*, Int. J LCA, Vol. 10 (2), 120-130, 2005.
[16] N.A. Madlool, R. Saidur, M.S. Hossain, N.A. Rahim, *A critical review on energy use and savings in the cement industries*, Renewable and Sustainable Energy Reviews, Vol. 15, 2042-

2060, 2011.
[17] A. Kolip, A. S. Fevzi, *Energy and exergy analyses of a parallel flow, four-stage cyclone precalciner type cement plant*, International Journal of the Physical Sciences, Vol. 5(7), 1147-1163, 2010.
[18] C. A. Tsiliyannis, *Alternative fuels in cement manufacturing: Modeling for process optimization under direct and compound operation*, Fuel, Vol. 99, 20-39, 2012.
[19] Groupe Heidelberg Cement, *Cimenterie de Lixhe à Liège (CBR)/Belgique*, inédit, 01 octobre 2012.
[20] A. R. Nielsen et al, *Sulfur Release from Cement Raw Materials during Solid Fuel Combustion*, Energy Fuels, Vol. 25, 3917-3924, 2011.
[21] J. Werther, M. Saenger, E.-U. Hartge, T. Ogada, Z. Siagi, *Combustion of agricultural residues*, Progress in Energy and Combustion Science, Vol. 26, 1-7, 2000.
[22] Cembureau, *Environmental Benefits of Using Alternative Fuels in Cement Production*, Cembureau, 1999.

[23] A. R. Nielsen, *Combustion of large solid fuels in cement rotary kilns,* Ph. D Thesis, DTU Chemical Engineering/Denmark, ISBN 978-87-92481-66-5, 2012.

Nomenclature

Abréviations et sigles
CBR = Cimenterie Belge Réunifiée
CILU = Cimenterie de Lukala
CINAT= Cimenterie Nationale/ Kimpese
cble = Combustible.
Formules chimiques
Na_2SO_4 = Sulfate de Sodium
K_2SO_4 = Sulfate de Potassium
$CaSO_4$ = Sulfate de Calcium