

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

Ecole Nationale Polytechnique



Département de Maitrise des Risques Industriels et Environnementaux

Filière : Qualité, Hygiène, Sécurité, Environnement et Gestion des Risques Industriels

(QHSE-GRI).

Mémoire de projet de fin d'études

pour l'obtention du diplôme d'ingénieur d'état en QHSE-GRI

Intitulé

Valorisation des pneus usagés comme carburant de substitution dans le processus de production de ciment. Analyse des modes de défaillance de l'installation d'injection des pneus dans la cimenterie Biskria ciment

Hasni CHIKH

Sous la direction de : M. Abdelmalek CHERGUI

M. Mohamed BOUBAKEUR

Présenté et soutenue publiquement le (01/07/2019)

**Composition du Jury :**

Président	M. Bouzid BENKOUSSAS	Professeur	(ENP)
Promoteurs	M. Abdelmalek CHERGUI	Professeur	(ENP)
	M. Mohamed BOUBAKEUR	Maître Assistant A	(ENP)
Examineurs	M. M'hamed BOUSBAI	Maître e de Conférences B	(ENP)
	Mme. Karima BITCHIKH	Maître de Conférences B	(ENP)



REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

Ecole Nationale Polytechnique



Département : maitrise des risques industriels et environnementaux

Filière : Qualité, Hygiène, Sécurité, Environnement et Gestion des Risques Industriels

(QHSE-GRI).

Mémoire de projet de fin d'études

pour l'obtention du diplôme d'ingénieur d'état en QHSE-GRI

Intitulé

Valorisation des pneus usagés comme carburant de substitution dans le processus de production de ciment. Analyse des modes de défaillance de l'installation d'injection des pneus dans la cimenterie Biskria ciment

Hasni CHIKH

Sous la direction de : M. Abdelmalek CHERGUI

M. Mohamed BOUBAKEUR

Présenté et soutenu publiquement le (01/07/2019)

**Composition du Jury :**

Président	M. Bouzid BENKOUSSAS	Professeur	(ENP)
Promoteurs	M. Abdelmalek CHERGUI	Professeur	(ENP)
	M. Mohamed BOUBAKEUR	Maître Assistant A	(ENP)
Examineurs	M. M'hamed BOUSBAI	Maître e de Conférences B	(ENP)
	Mme. Karima BITCHIKH	Maître de Conférences B	(ENP)

ENP 2019

## *Dédicace*

*Je dédie ce travail à :*

*A mes parents pour leurs amours inconditionnels et inestimables, leurs sacrifices et leurs soutiens en continu dans tout ce que j'entreprends.*

*A mon petit frère El Hamlaoui.*

*Mes frères et mes sœurs.*

*Toute ma famille, tous mes proches et tous mes amis, en particulier, mon chère ami Ismaïl NADJARI.*

*A tous mes professeurs, en particulier, mes promoteur M. Abdelmalek CHERGUI et M. Mohamed BOUBAKEUR.*

*A tous mes amis et à tous mes camarades de promotion.*

*Toute personne qui m'est chère.*

## **Remerciements**

*Nos remerciements s'adressent tout d'abord à ALLAH Le Tout Puissant pour la force qu'il nous a donnée pour atteindre nos objectifs et arriver où nous en sommes.*

*Nos remerciements s'adressent également aux membres du jury, Monsieur BENKOUSSAS, Professeur à l'ENP, qui nous fait l'honneur de présider ce Jury, Madame BITCHIKH et Monsieur BOUSBAÏ, qui ont bien voulu accepter d'examiner et de juger ce travail.*

*Nous souhaiterions adresser nos vifs remerciements aux personnes qui nous ont apporté leur aide et qui ont contribué à l'élaboration de ce mémoire :*

*À Monsieur HAMZA LAKHDAR, mon encadreur de l'entreprise pour son encadrement, ses remarques ainsi que ses précieux conseils durant toute la période du stage où nous avons pu bénéficier de sa riche expérience et savoir-faire. Pour son accueil, sa bienveillance, sa patience et son savoir-être, qui ont toujours suscités notre profond respect.*

*À Monsieur M. CHERGUI, professeur à l'ENP, ET M. BOUBAKEUR, maître-assistant à l'ENP, pour leur disponibilité, leurs précieux conseils et leur aide qui a contribué à l'exceptionnel encadrement dont nous avons bénéficiés.*

*Notre gratitude se destine également aux enseignants du Département MRIE de l'Ecole Nationale Polytechnique qui ont contribué à notre formation et notre suivi durant notre passage.*

*À toutes les personnes qui ont contribué de près ou de loin à la réalisation de ce travail, nous présentons notre respect et notre gratitude.*

**ملخص:** في هذا العمل، قمنا بإجراء دراسة لجدوى استعادة الطاقة للإطارات المستعملة في الفرن الدوار لمصنع البسكرية للأسمنت، من أجل تقدير الكمية اللازمة لضمان استمرار إمدادات الفرن لمدة 10 أيام، بمعدل استبدال 25٪. اقترحنا طريقة لحقن الإطارات المقطعة في الفرن. ثم درسنا أوضاع فشل التركيب من خلال تطبيق طريقة AMDEC، باستخدام تحليل وظيفي بواسطة طريقة SADT

**الكلمات المفتاحية:** التثمين، مصنع الاسمنت، معدل الاستبدال، AMDEC ، SADT

**Abstract:** In this work, we carried out a study of the feasibility of the energy recovery of used tires in the rotary kiln of the Biskria Cement plant, in order to estimate the quantity necessary to ensure the continuous supply of the kiln for 10 days a 25% substitution rate. We proposed a method of injecting shredded tires into the kiln. We then studied the failure modes of the installation by applying the FMEA method, using a functional analysis by the SADT method.

**Key words:** recovery, used tires, Cement plant, FMEA, SADT.

**Résumé :** Dans ce travail, nous avons effectué une étude de la faisabilité de la valorisation énergétique de pneus usagés dans le four rotatif de la cimenterie Biskria Ciment, afin d'estimer la quantité nécessaire pour assurer l'approvisionnement continu du four pendant 10 jours pour un taux de substitution 25%. Nous avons proposé un procédé d'injection des pneus déchiquetés dans le four. Nous avons, ensuite, étudié les modes de défaillance de l'installation par l'application de la méthode AMDEC et par une analyse fonctionnelle par l'application de la méthode SADT pour ressortir les systèmes à critiques.

**Mots clés :** Valorisation, Pneus usagés, Cimenterie, AMDEC, SADT.

## Table des matières

Dédicace	
Remerciements	
Résumé	
Liste des figures	
Liste des abréviations	
Introduction générale.....	15
Chapitre I : Présentation de la cimenterie Biskria Ciment .....	17
I.1. Présentation de l'entreprise .....	18
I.1.1. Activités & Stratégie .....	18
I.1.2. Services .....	18
I.1.1.3. Produits .....	19
I.1.4. Situation géographique :.....	19
I.2.Procédé de fabrication du ciment :.....	20
I.2.1. Les matières premières.....	21
I.2.2. Différentes étapes de la fabrication du ciment par voie sèche .....	22
: Les quatre matières premières utilisées dans la fabrication du ciment.....	22
I.2.2.1. Préparation de la matière première .....	22
I.2.2.2. La cuisson du cru .....	24
II.2.2.3. Le ciment.....	27
Chapitre II : les émissions atmosphériques dans l'industrie du ciment .....	29
II.1. Introduction .....	30
II.2. Les gaz d'échappement.....	30
II.2.1. Les émissions de l'Oxyde d'Azote (NOx) .....	30
II.2.2. Les émissions des oxydes de Soufre (SOx) .....	31
II.2.3. Les émissions de Dioxyde de Carbone (CO <sub>2</sub> ).....	32
II.2.4. Les émissions de Dioxines et Furannes .....	33
II.2.5. Les émissions de HCl : .....	36
II.3. Les matières particulaires.....	36
II.4. Les émissions de poussières .....	37
II.5. Les émissions de métaux lourds et autres polluants atmosphériques .....	37
Chapitre III : Etat des déchets en Algérie.....	39
III.1. Introduction .....	40
III.2. Définitions des concepts.....	40
III.3. Quantité des déchets urbains produits en Algérie .....	40
III.3.1. Déchets industriels spéciaux.....	42

III.3.2. Déchets d'activités de soin .....	43
III.3.3. Déchets inertes.....	43
III.4. Composition des déchets solides urbains .....	43
III.5. Élimination des déchets.....	45
III.6. Conclusion.....	45
Chapitre IV : Utilisation des pneus usagés en tant que combustible dans la cimenterie Biskria Ciment .....	47
IV.1. Introduction .....	48
IV.2. Situation des pneumatiques en Algérie .....	49
IV.2.1. Gisement du pneumatique usagé.....	49
IV.2.2. Les filières de valorisation des pneus usages .....	51
IV.2.2.1. Le rechapage .....	51
IV.2.2.2. Valorisation énergétique .....	51
IV.2.3. Valorisation en matière première.....	52
IV.2.4. Emploi en domaine de génie civil.....	52
IV.3. Utilisation des pneus usés en tant que combustible de substitution dans le four de cimenterie .....	53
IV.3.1. Introduction .....	53
IV.3.2. Propriétés et combustion des pneus usagés .....	55
IV.3.3. Pneus entiers ou déchiquetés .....	57
IV.3.4. Utilisation des pneus usagés dans le processus de fabrication de ciment.....	58
IV.3.4.1. Cas de la cimenterie du groupe UNICEM .....	58
IV.3.4.2. Cas de l'unité Titan cement company: (L'effet sur la qualité de ciment).....	65
Utilisation de carburant dérivé des pneus TDF lors de la cuisson du clinker.....	65
IV.4. Cimenterie Biskria ciment.....	70
IV.4.1. Analyse des matières entrantes.....	75
IV.4.2. Installation et procédé d'alimentation d'un four de cimenterie en pneus usagés déchiqueté.....	75
IV.4.2.1. Description détaillée de l'installation d'alimentation d'un four : .....	76
IV.5. Conclusion .....	80
Chapitre V : Analyse des modes de défaillance de leurs effets et de leur criticité (AMDEC) 81	
V.1. Introduction .....	82
V.2. Méthode AMDEC .....	82
V.2.1. Historique et domaine d'application .....	82
V.2.2. Déroulement .....	82
V.2.3. Limites Et Avantages.....	83
V.3. Application de la méthode AMDEC : .....	84



V.3.1. Décomposition fonctionnelle.....	84
V.3.1.1. Caractéristiques techniques des Convoyeurs à bandes .....	84
V.3.1.1.1. La bande transporteuse.....	85
V.3.1.1.2. Les tambours .....	87
V.3.1.1.3. Les rouleaux .....	88
V.3.1.1.4. Le châssis .....	88
V.3.1.1.5. Dispositifs de tension : .....	89
V.3.1.1.6. Éléments mobiles de transmission d'énergie .....	89
V.3.1.1.7. Système de chargement.....	90
V.3.1.1.7.1. Trémie .....	90
V.3.1.1.8. Dispositif de nettoyage à racleur.....	90
V.3.1.2. Description technique du broyeur .....	91
V.3.1.2.1. Définition d'un broyeur .....	91
V.3.1.2.2. Caractéristiques du broyeur.....	92
V.3.1.2. La méthode SADT .....	93
V.3.1.2.1. Principe de base de la méthode SADT.....	93
V.3.1.2.2. Les niveaux de représentation de SADT : .....	94
V.3.1.2.3. Application de la méthode : .....	95
V.3.2. Modes de défaillance .....	99
V.3.3. Causes de défaillance.....	99
V.3.4. Effet de la défaillance .....	99
V.3.5. Mode de détection.....	100
V.3.6. Criticité .....	101
V.3.7. Résultats et interprétations : .....	101
V.3.8. Maintenance et sécurité .....	108
V.3.8.1. Dispositions à prendre pour assurer la maintenabilité .....	108
V.3.8.1.1. Lieu pour effectuer des épissures et pour remplacer la courroie .....	108
V.3.8.1.2. Lieux de nettoyage fréquent.....	109
V.3.8.2. Maintenance corrective .....	110
V.3.8.3. Maintenance préventive .....	112
V.3.8.3.1. Maintenance des éléments en mouvement.....	112
V.3.9. Arbre des fautes .....	112
V.3.9.1. Utilisation de l'AdF .....	113
V.3.9.2. L'AdF des convoyeurs à bande.....	113
CONCLUSION .....	115
Références : .....	117
Annexe .....	121

## Liste des figures :

Figure 1- 1: Plan de masse de la Cimenterie Biskria Cement.....	18
Figure 1- 2: Situation géographique de la cimenterie BC .....	20
Figure 1- 3:Schéma procédé de fabrication du ciment.....	20
Figure 1- 4 : Les quatre matières premières utilisées dans la fabrication du ciment .....	21
Figure 1- 5: Four rotatif de ciment. ....	26
Figure 1- 6:Le clinker.....	27
Figure 1- 7: Intérieur d'un broyeur à boulets [3] .....	27
Figure 1- 8 : Procédé de fabrication de ciment .....	28
Figure 2- 1: Répartition des émissions de CO <sub>2</sub> du secteur cimentier (2005) [3].....	32
Figure 2- 2 : Émissions de particules (PM, PM <sub>10</sub> , PM <sub>2.5</sub> ) des cimenteries québécoises entre 2005 et 2012 et contraste avec la production de ciment [7].....	36
Figure 3- 1 : Production des déchets solide urbains en Algérie par rapport la densité [17].....	41
Figure 3- 3: production des déchets industriel [15].....	42
Figure 3- 4: différents secteurs générateurs des déchets .....	43
Figure 3- 5: Composition des déchets ménagers en Algérie .....	44
Figure 3- 6 : Modes d'élimination des déchets en Algérie .....	45
Figure 4- 1 : Estimation des pneus en circulation selon type au 1 <sup>er</sup> semestre 2007.....	50
Figure 4- 2: Schéma simplifié du four rotatif avec emplacement marqué pour le dosage des pneus [5].....	54
Figure 4- 3 : Coupe transversale d'un pneu .....	55
Figure 4- 4 : Courbe de combustion du pneu [27][28].....	56
Figure 4- 5 : Schéma général de l'installation de production de clinker (cimenterie Unicem) 59	
Figure 4- 6 : Concentrations de NO <sub>x</sub> en aval de la section d'alimentation du pneu par rapport aux taux de substitution du carburant à différents niveaux de NO <sub>x</sub> dans la sortie des gaz de combustion du four [20].....	64
Figure 4- 7 : Microstructure d'un échantillon de clinker sans TDF (a) et avec TDF (b)[1].....	68
Figure 4- 8: une vue schématique d'ensemble en perspective de l'installation [32].....	78
Figure 4- 9: Vue schématique en perspective de la trémie et de son dispositif d'évacuation [32] .....	79
Figure 4- 10: Schéma de l'ensemble de l'installation [32].....	79

Figure 5- 1 : Etapes d'une analyse de type AMDEC [34] .....	84
Figure 5- 2 : les éléments d'un système de transport avec un convoyeur [37].....	84
Figure 5- 3: Convoyeur à bandes plates et en auges [37].....	85
Figure 5- 4: Les composants d'une bande [37].....	86
Figure 5- 5: Bande à carcasse textile.....	86
Figure 5- 6 : Bande à carcasse métallique.....	86
Figure 5- 7 : : Composants du convoyeur [35].....	87
Figure 5- 8: Fixation des rouleaux sur la station-support [35].....	88
Figure 5- 9: Rouleaux porteurs inférieures [35].....	88
Figure 5- 10: Châssis utilisé dans le transport des produits [35].....	89
Figure 5- 11 : : Système de transmission d'énergie [35].....	89
Figure 5- 12: Système de chargement [35] .....	90
Figure 5- 13: Dispositif de nettoyage à racleur [37] .....	91
Figure 5- 14: les différents éléments d'un broyeur [40].....	91
Figure 5- 15: Modèle de diagramme de la méthode SADT .....	93
Figure 5- 16: Comparaison entre les représentations par Actigrammes et Datagrammes .....	94
Figure 5- 17: Hiérarchies des diagrammes des niveaux.....	95
Figure 5- 18: répartition des défaillances selon leur criticité.....	106
Figure 5- 19: Répartition des défaillances sur les composants de l'installation .....	107
Figure 5- 20: Différents types de défaillance pour le convoyeur à bande.....	107

## Liste des tableaux :

Tableau 1- 1 : : les principaux constituants du clinker [3] .....	26
Tableau 2- 1 : : les procédés de formation et d'absorption des oxydes de soufre [40,41] .....	31
Tableau 2- 2 : Résumé des mesures de PCDD/PCDF [13] .....	34
Tableau 2- 3 : Niveau des émissions atmosphériques pour la fabrication du ciment [14].....	38
Tableau 3- 1 : la répartition des déchets spéciaux sur les différentes régions .....	42
Tableau 3- 2: Comparaison de la composition de déchets dans des pays arabes (en volume) .....	44
Tableau 4- 1 : L'accumulation annuelle des pneus découlant par l'UE en tonne [21] .....	49
Tableau 4- 2 : Quantités des PU générer par an en Algérie [21].....	51
Tableau 4- 3: Températures et temps de séjour typiques dans un four [25] .....	53
Tableau 4- 4 : Les caractéristiques des pneumatiques [21].....	55
Tableau 4- 5 : Pouvoir calorifique inférieur des pneus .....	57
Tableau 4- 6 : Répartition du poids et principales caractéristiques physiques des fragments de pneu utilisés (toutes les moyennes sont exprimées en termes de moyenne arithmétique)[20] .....	60
Tableau 4- 7 : Taux d'alimentation en carburant et taux de remplacement thermique appliqués lors des essais de combustion des pneus usés [20].....	61
Tableau 4- 8 : Paramètres de processus d'exploitation mesurés lors des essais de combustion de référence et d'essais de pneus déchiquetés [20].....	62
Tableau 4- 9 Comparaison des caractéristiques du clinker obtenu lors d'essais de référence sur l'essai de combustion du pneu déchiqueté [20] .....	62
Tableau 4- 10 : Concentration de polluants classiques dans la cheminée.....	63
Tableau 4- 11 : Concentrations de polluants en traces (Données se référant à 0 ° C, 1 atm, 11% d'O <sub>2</sub> ) [20].....	65
Tableau 4- 12 : Analyse typique comparative des carburants [24] .....	66
Tableau 4- 13 : Analyses chimiques des échantillons sans TDF [24] .....	67
Tableau 4- 14 : Analyses chimiques des échantillons avec TDF [24] .....	67
Tableau 4- 15 : Propriétés du ciment et mesures de la résistance à la compression pour le ciment CEM I-52.5[24] .....	69
Tableau 4- 16 : Paramètres de process Four 1.....	70
Tableau 4- 17 : Consommation totale d'énergie et d'eau par tonne de clinker produite durant le mois de mai de l'année 2019 .....	70
Tableau 5- 1 : Exemple d'un tableau de type AMDEC .....	83

Tableau 5- 2: les différents éléments d'un broyeur [40] .....	92
Tableau 5- 3: Grille de cotation des fréquences de défaillances pour AMDEC [37].....	99
Tableau 5- 4: Grille de cotation des gravités de défaillances pour AMDEC [37] .....	100
Tableau 5- 5: Grille de cotation de détection de défaillances pour AMDEC [37].....	100
Tableau 5- 6:Grille des criticités de défaillances pour AMDEC [37] .....	101

## **Liste des abréviations :**

**3RVE** : Réduire, Réemployer, Recycler, Valoriser, Eliminer

**ACL** : Agglomérations Chefs-Lieux

**AND** : Agence National de Déchets

**AMDEC** : Analyse des modes de défaillance de leurs effets et de leur criticité

**APC** : Assemblée Populaire Communale

**AS** : Agglomérations Secondaires

**BC** : Biskria Ciment

**CET** : Centre d'Enfouissement Technique

**CNERIB** : Centre National d'Étude et de Recherche Intégrée en Bâtiment

**CTS** : Consommation thermique spécifique

**ETRA**: The European Tyre Recycling Association

**DAS** : Déchets d'Activités de Soins

**DASRI** : Déchets d'activité de Soins à Risques Infectieux

**DEW** : Direction de l'Environnement de Wilaya

**DIB** : Déchets Industriels Banals

**DIS** : Déchets Industriels Spéciaux

**DM** : Déchets Municipaux

**DMA** : Déchets Ménagers et Assimilés

**DRI** : Direction régionale d'impôt

**DSM** : Déchets Solides Municipaux

**EPIC** : Établissement Public à caractère Industriel et Commercial

**MATE** : Ministère d'aménagement de territoire et de l'environnement

**OM** : Ordures Ménagères

**ONS** : Office National des Statistiques

**PCI** : Pouvoir calorifique Inferieur

**PNAGDES** : Plan National de Gestion des Déchets Spéciaux

**PROGDEM** : Programme National pour la Gestion intégrée des Déchets Ménagers

**PU** : Pneu usés

**PUNR** : Pneus Usagés Non Réutilisables

**RGHP** : Recensement Général d'Habitat et de Population

**SADT**: Structured Analysis and Design Technique

**TAPD** : Taxe sur les Activités Polluantes ou Dangereuses

**TDF** : Tire derived fuel

**UE** : Union Européen

**Formules chimiques :**

**Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>** : Alumine

**CaCO<sub>3</sub>** : Carbonate de calcium

**CaO**: Chaux

**CO<sub>2</sub>** : Dioxyde de Carbone

**Ca<sub>4</sub>Al<sub>2</sub>Fe<sub>2</sub>O<sub>10</sub>** : Alumino-ferrite tétracalcique

**Ca<sub>3</sub>Al<sub>2</sub>O<sub>6</sub>** : Aluminate tricalcique

**Ca<sub>2</sub>SiO<sub>4</sub>** : Bélite (silicate bicalcique)

**Ca<sub>3</sub>SiO<sub>5</sub>** : Alite (silicate tricalcique)

**Ca<sub>3</sub>Al<sub>2</sub>O<sub>6</sub>** : Aluminate tricalcique

**Ca<sub>4</sub>Al<sub>2</sub>Fe<sub>2</sub>O<sub>10</sub>** : Aluminoferrite tétracalcique

**Ca (OH)<sub>2</sub>** : Chaux hydratée

**CO** : Monoxyde de carbone

**COV** : Composés organiques volatils

**°C** : Degré Celsius

**C<sub>3</sub>S, C<sub>2</sub>S** : Silicates de calcium

**C<sub>3</sub>A**: Silicates d'aluminium

**C<sub>4</sub>AF** : Silicates de fer

**cm<sup>3</sup>**: Centimètre cube

**Fe<sub>2</sub> O<sub>3</sub>** : Oxyde ferrique

**HAP** : Hydrocarbures Poly Aromatiques

**NO<sub>x</sub>**: Oxydes d'Azote

**NO**: Monoxyde d'azote

**NO<sub>2</sub>**: Dioxyde d'azote

**N<sub>2</sub>** : Azote de l'air



## Introduction générale

Le concept de développement durable se traduit par le principe de hiérarchisation des modes de gestion des déchets. Ce principe s'appelle les 3RVE, il établit l'ordre selon lequel il est préférable de réduire à la source, de réemployer, de recycler, de valoriser et finalement d'éliminer les résidus.

Les 3R sont des domaines bien connus alors que celui de la valorisation est relativement nouveau. Elle se présente comme une alternative à l'élimination qui consiste en général à enfouir ou à incinérer les résidus.

La valorisation énergétique à la différence de l'incinération, cherche à exploiter la valeur calorifique des résidus à des fins de remplacement de combustibles conventionnels. L'utilisation des résidus comme combustible de substitution a un double avantage :

- D'une part en diminuant la consommation de nouvelles ressources, puisque on fait substituer le résidu à des ressources non renouvelables qui sont les combustibles fossiles,
- D'autre part, permet de diminuer les quantités de résidus à éliminer.

Les résidus les plus sollicités, à cause de leur pouvoir calorifique sont, entre autres, les huiles usées, les solvants usés, les pneus usés.

Les industries qui s'intéressent à ce type de combustible (déchets) sont celles qui ont un besoin important en consommation énergétique et qui offrent des technologies comparables à celles des incinérateurs (four opérant à des hautes températures). Les industries les plus fréquentes sont les industries des pâtes et du papier, les centrales thermiques et les cimenteries.

Le procédé cimentier semble être un des plus appropriés pour la valorisation de déchets. La présente étude a été effectuée en collaboration avec la cimenterie Biskria Ciment où nous les avons intéressés à l'utilisation de plusieurs déchets en tant que combustible de substitution, et en particulier les pneus usés.

Cette étude a pour but d'étudier la faisabilité d'utiliser ce type de déchets et d'évaluer l'impact de l'utilisation des pneus hors usage sur les émissions gazeuses et son effet sur la qualité de ciment. En effet, les rejets des cimenteries à l'environnement sont principalement des émissions atmosphériques. Les contaminants auxquels une attention particulière est portée sont les fines particules, les métaux lourds et les contaminants obtenus lors de toute opération de combustion tels que le dioxyde de soufre, les oxydes d'azote, le monoxyde de carbone, les

composés organiques comme les hydrocarbures aromatiques polycycliques, les dioxines et les furanes.

Des études ont montré à travers des essais à l'échelle réelle, que l'utilisation des pneus en tant que combustible de substitution n'a aucune incidence notable sur l'environnement et sur la qualité du ciment.

Pour atteindre notre objectif, nous avons divisé notre mémoire en cinq chapitres :

Le premier chapitre est consacré à la présentation de l'entreprise Biskria Ciment, le procédé de fabrication de ciment à voie sèche et les différentes étapes de la préparation de la matière première jusqu'au produit final.

Dans le deuxième chapitre, nous avons présenté les différents rejets atmosphériques générés par l'industrie cimentière.

Dans le chapitre trois, nous avons donné la définition des différents concepts de déchets, l'état et la gestion des déchets en Algérie.

Le quatrième chapitre est consacré à la valorisation d'une manière générale des pneus usagés particulièrement en Algérie et les possibilités de les utiliser en tant que combustible dans l'industrie cimentier BC.

Le cinquième chapitre est consacré à l'analyse des modes de défaillance (AMDEC) de l'installation d'injection des pneus déchiquetés dans le four rotatif de ciment et à une analyse fonctionnelle par l'application de la méthode SADT pour ressortir les systèmes critiques.

Et à la fin une conclusion générale et perspective.

# **Chapitre I : Présentation de la cimenterie Biskria Ciment**

## I.1. Présentation de l'entreprise

### I.1.1. Activités & Stratégie

L'Algérie est un marché d'importance stratégique pour la société Biskria Ciment dans le Bassin méditerranéen. Le secteur de la construction en Algérie a reconnu une croissance importante depuis l'an 2000, ce qui a déclenché la nécessité en matériaux de construction et solutions constructives.

Le but de la société est d'améliorer son efficacité au niveau du développement socio-économique en Algérie, et conforter l'avantage concurrentiel au niveau national et international ;

L'objectif en premier lieu consiste à satisfaire le marché national d'un produit local tout en permettant un accès stable aux matériaux de construction en termes de qualité, de choix, de services à des prix abordables et en deuxième lieu d'ouvrir des marchés internationaux.

La société BISKRIA CIMENT est une entreprise de fabrication et ventes des ciments au Capital social : 870.000.000,00 DA.

La cimenterie possède de 3 lignes de productions avec une capacité totale de 4 millions T/an.



*Figure 1- 1: Plan de masse de la Cimenterie Biskria Ciment*

### I.1.2. Services

La S.P.A BISKRIA CIMENT possède trois secteurs :

- Secteur administratif :
- Secteur industriel : contient trois lignes de production d'une capacité de 4 millions T/an.
- Secteur commerciale : contient le service de vente et d'expédition

### **I.1.1.3. Produits**

La S.P.A Biskria Ciment produit des ciments de qualité qui sont systématiquement contrôlés par le laboratoire de la cimenterie et périodiquement par le Centre d'Études et de Services Technologiques de l'Industrie des Matériaux de Construction CETIM. Ces produits sont :

1. CEM II/A-M 42.5 :
  - Béton armé en général coulé sur place ou préfabriqué
  - Béton étuvé ou auto-étuvé.
2. CEM II/B-M 32.5 :
  - Béton en élévation armé ou non avec un décoffrage rapide dallage.
  - Stabilisation des sols.
  - Fondations ou travaux souterrains en milieux chimiquement non Agressifs
  - Travaux de maçonnerie.
3. CEM I- 42.5R- SR 5 (CRS) (إسمنت مضاد للأملاح) :
  - Béton armé ou précontraint avec un décoffrage rapide Préfabrication.
4. CEM IV/A-42.5 (ciment pouzzolanique) :
  - Travaux souterrains en milieux chimiquement agressifs, ouvrages en milieux sulfatés et travaux nécessitant une faible chaleur d'hydratation.
  - Bétons de masse et travaux en béton armé ou non Stabilisation des sols et travaux à la mer.

### **I.1.4. Situation géographique :**

Biskria ciment est l'une des grandes cimenteries en Afrique, Elle se situe 8 km de Branis au nord de la wilaya de Biskria (figure 1-2).



*Figure 1- 2: Situation géographique de la cimenterie BC*

### **I.2.Procédé de fabrication du ciment :**

Les étapes de fabrication de ciment sont présentées dans la figure 1-3.

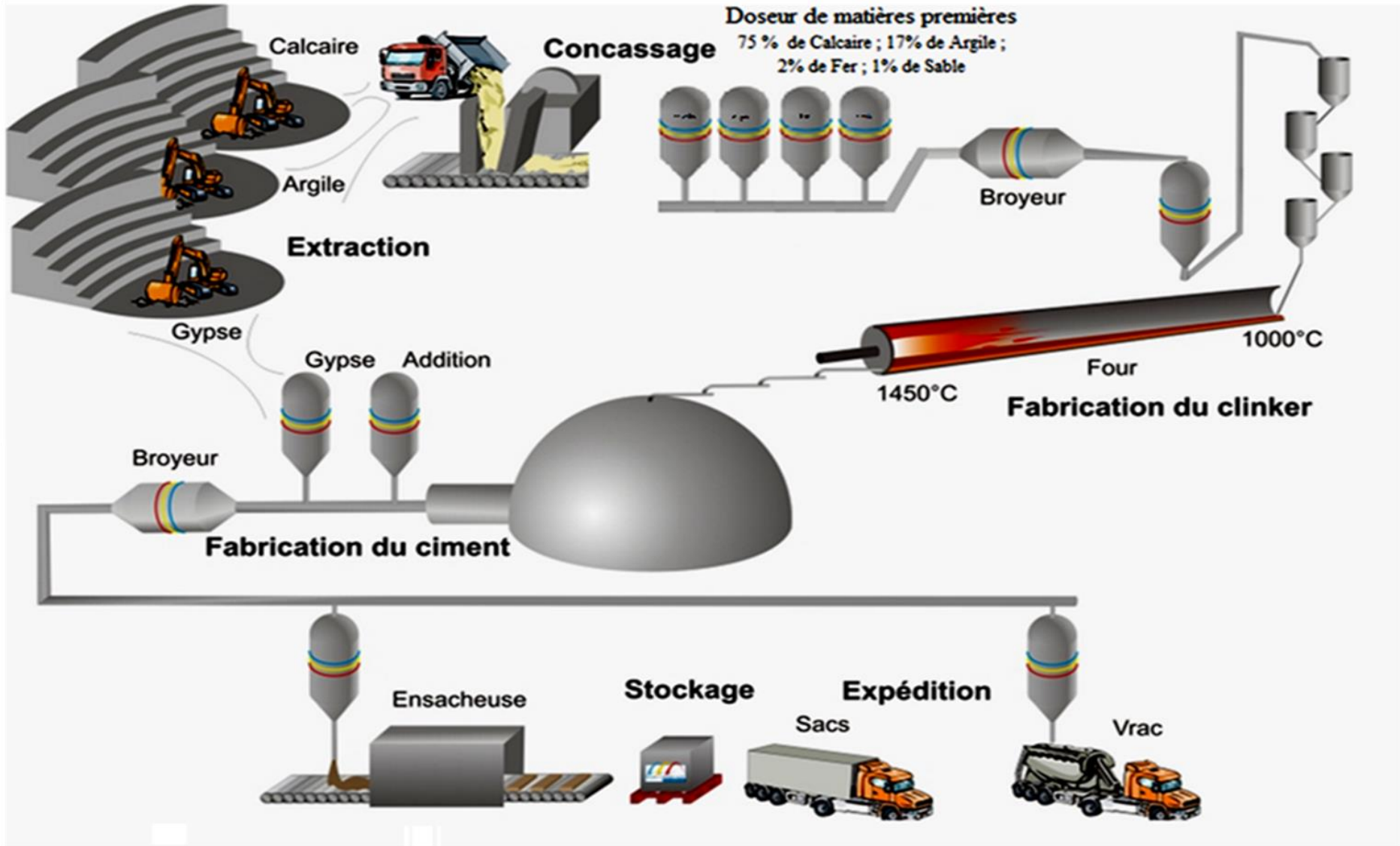


Figure 1- 3: Schéma procédé de fabrication du ciment

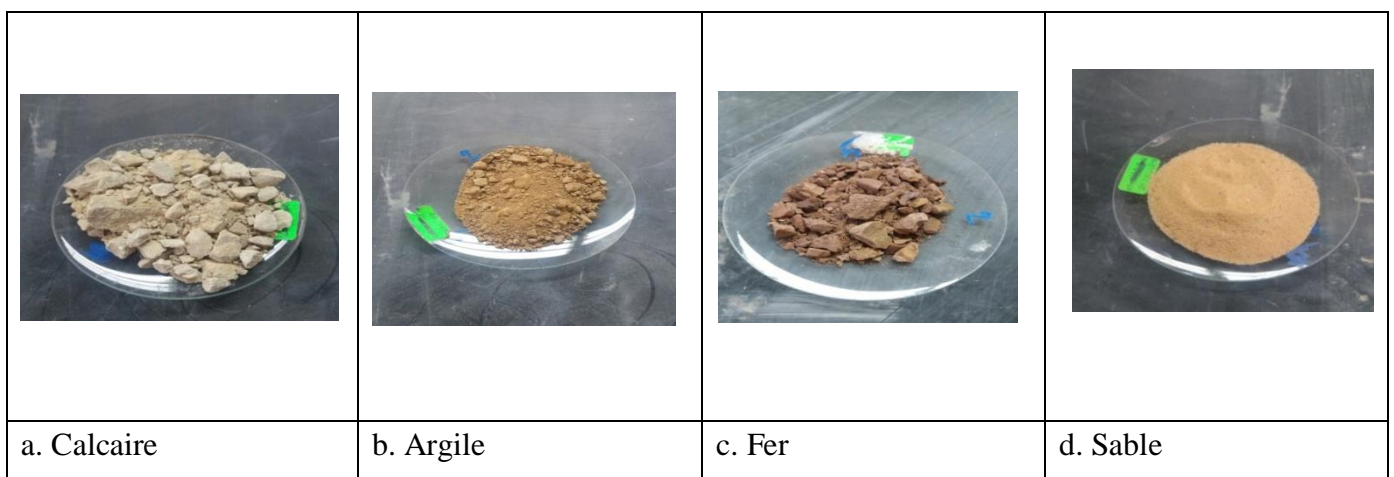
### I.2.1. Les matières premières

Les matières premières qui rentrent dans la fabrication du Ciment sont essentiellement de Calcaire (majoritairement composé de carbonate de calcium  $\text{CaCO}_3$ ) et d'Argile (un mélange complexe et souvent hydraté de silice ( $\text{SiO}_2$ ), d'alumine ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) et d'oxyde ferrique ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ )) [1]. Ces deux principales matières sont en proportion respective moyenne de 80 % et 20 %.

Pour produire des ciments de qualités constantes, les matières premières doivent être très soigneusement échantillonnées, dosées et mélangées de façon à obtenir une composition parfaitement régulière dans le temps. La composition du cru doit être dans les proportions suivantes (figure 1-5) :

- Carbonate de calcium ( $\text{CaCO}_3$ ) : de 77 à 83 %
- Silice ( $\text{SiO}_2$ ) : de 13 à 14 %
- Alumine ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) : de 2 à 4 %
- Oxyde ferrique ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ) : de 1,5 à 3 %

La roche est échantillonnée en continu pour déterminer la quantité des différents ajouts nécessaires (oxyde de fer, alumine et silice). Le mélange est ensuite réalisé dans un hall de pré-homogénéisation où la matière est disposée en couches horizontales superposées puis reprise verticalement. Selon l'origine des matières premières, ce mélange peut être corrigé par apport de bauxite, d'oxyde de fer ou d'autres matériaux fournissant le complément d'alumine et de silice requis.



*Figure 1- 4 : Les quatre matières premières utilisées dans la fabrication du ciment*



## **I.2.2. Différentes étapes de la fabrication du ciment par voie sèche**

Avant d'arriver aux produits finis que sont les différents types de ciments, le mélange de départ va passer successivement par différentes phases durant lesquelles la matière va subir une transformation chimique et cristalline importante.

La fabrication du ciment passe par 3 phases essentielles :

- La préparation de la matière première.
- La cuisson du cru.
- L'obtention du ciment

Chacune de ces phases est divisé en sous étapes :

- **La préparation de la matière première.**
  1. Extraction des matières premières
  2. Concassage
  3. La pré-homogénéisation
  4. Le broyage et le séchage
  5. L'homogénéisation
- **La cuisson du cru**
  6. Préchauffage
  7. Pré-calcination
  8. Clinkérisation
  9. Refroidissement
- **L'obtention du ciment**
  10. Broyage du ciment
  11. Stockage du ciment
  12. Conditionnement et expédition.

Ces étapes de fabrication sont plus détaillées dans ce qui suit :

: Les quatre matières premières utilisées dans la fabrication du ciment

### **I.2.2.1. Préparation de la matière première**

La préparation de la matière première est une opération très importante qui intervient avant la cuisson du cru dans le four. Ainsi elle garantit une composition chimique constante et permet d'obtenir une poudre de la finesse requise [2].

## **1. L'Extraction des matières premières**

Les matières premières vierges (comme le calcaire (75 à 80 %) et l'argile (20 à 25 %)) sont extraites des parois rocheuses d'une carrière à ciel ouvert par abattage à l'explosif ou à la pelle mécanique ou encore par ripage au bulldozer. Elles sont extraites dans des carrières proches de l'usine.

Après un concassage primaire, les matières premières sont transportées vers l'usine où elles sont stockées et préparées. D'autres matériaux tels que la bauxite, le minerai de fer, le laitier de haut fourneau ou le sable de fonderie sont approvisionnés par d'autres sources. L'étude du gisement des matières premières permet de définir la composition exacte du cru avec les besoins en ajouts qu'exige le procédé de fabrication. La qualité et la régularité requises pour les matières premières assurent, au final, la qualité de ciment recherchée [3].

## **2. Le Concassage**

Les blocs obtenus sont réduits, dans des concasseurs à marteaux, en éléments d'une dimension de 80 à 150 mm maximum. La matière ainsi obtenue est amenée par convoyeur jusque dans l'usine.

## **3. La pré-homogénéisation**

Le ciment nécessite des teneurs proportionnées des différents composants : chaux, silice, alumine et oxyde ferrique. Le composant principal du mélange est le calcaire, riche en carbonate de calcium. L'argile est utilisée comme composant d'appoint.

Après concassage des blocs extraits de la carrière, on mélange, de façon aussi homogène que possible, leurs différents composants et les ajouts déterminés lors de la formulation. C'est la phase appelée de pré-homogénéisation.

La pré-homogénéisation permet d'atteindre un dosage parfait des constituants essentiels du ciment et de créer un mélange homogène. Les matières premières doivent être échantillonnées, dosées et mélangées de façon à obtenir une composition régulière dans le temps. La prise d'échantillons en continu permet de déterminer la quantité des différents ajouts nécessaires (oxyde de fer, alumine et silice) et arriver ainsi à la composition chimique idéale. Des roches naturelles, les marnes ou calcaires argileux, ont une composition qui est proche de la composition calcaire-argile. Des correcteurs, minerai de fer qui apporte l'oxyde ferrique  $Fe_2O_3$ , bauxite riche en alumine ( $Al_2O_3$ ), sable qui apporte la silice ( $SiO_2$ ) sont ajoutés pour atteindre la composition souhaitée [4].

## **4. Le broyage et le séchage**

Le broyage (figure 1-6) procède par fragmentations successives des grains jusqu'à obtenir des grains de faible dimension pour faciliter leur cuisson. L'échange thermique et les réactions

chimiques sont en effet d'autant plus intenses lors de la cuisson que les surfaces de contact entre les grains de matière et les gaz sont importantes.



*Figure 1- 6 : Le broyeur*

À la sortie du hall de pré-homogénéisation, le mélange est très finement broyé dans des broyeurs sécheurs, qui éliminent l'humidité résiduelle et permettent d'obtenir une poudre qui présente la finesse requise. Cette poudre, appelé le « cru » [5].

## **5. L'homogénéisation**

En sortant du broyeur, le cru doit être malaxé pour que le mélange acquière sa rhéologie optimale avant introduction dans les différents types de four. Le cru est homogénéisé et stocké dans des silos.

### **I.2.2.2. La cuisson du cru**

Une fois homogénéisé, la matière première est acheminée au four à l'aide d'un élévateur à godet pour la cuisson. Il s'agit de l'opération la plus importante du procédé de fabrication en termes de potentiel d'émissions, de qualité et de coût du produit.

#### **1. Le préchauffage : la décarbonatation partielle**

Avant introduction dans le four, la farine (le cru) est chauffée à environ 800 °C dans un préchauffeur à cyclones appelé échangeur de chaleur. Un échangeur de chaleur comportant une série de cinq cyclones dans lesquels la poudre déversée à la partie supérieure descend vers l'entrée du four rotatif. La matière froide, introduite dans la partie supérieure, se réchauffe au contact des gaz circulant à contre-courant. D'étage en étage, elle arrive partiellement décarbonatée, jusqu'à l'étage inférieur, à la température d'environ 800°C. L'opération commence par l'évaporation de l'eau que le mélange cru contient et se poursuit par la décarbonatation partielle [3].

## 2. La pré-calcination : décarbonatation complète (combustion du calcaire)

La réaction chimique de base de la fabrication du ciment commence avec la décomposition du carbonate de calcium ( $\text{CaCO}_3$ ) en chaux (oxyde de calcium,  $\text{CaO}$ ) accompagnée d'un dégagement de gaz carbonique ( $\text{CO}_2$ ) à environ  $900^\circ\text{C}$ . [3]

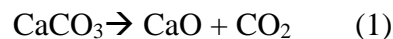
Une décarbonatation plus complète peut être obtenue par l'ajout d'un foyer complémentaire situé dans le cyclone inférieur (précalcination).

La décarbonatation commencée dans le préchauffeur se fait pour l'essentiel dans le précalcinateur et se termine dans le four. Cette opération, qui s'effectue à des températures entre  $650$  et  $900^\circ\text{C}$ , permet de libérer le gaz carbonique pour obtenir la chaux (oxyde calcium) nécessaire à la fabrication de clinker. [4]

## 3. La Clinkérisation

Une fois préchauffée et décarbonatée, la farine "crue" entre dans le four rotatif et progresse jusqu'à la zone de clinkerisation (à environ  $1450^\circ\text{C}$ ). Le temps de parcours est de l'ordre d'une heure [3].

À partir de  $650^\circ\text{C}$ , le carbonate de calcium du calcaire subit une décarbonatation suivant la réaction (1):

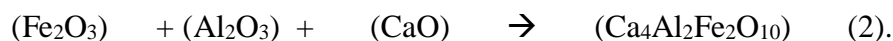


On obtient alors de la chaux vive ( $\text{CaO}$ ) accompagnée d'un important dégagement gazeux ( $\text{CO}_2$ ).

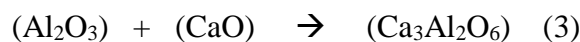
Sous l'effet de la chaleur, les constituants de l'argile, principalement composée de silicates ( $\text{SiO}_2$ ), d'alumine ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) et d'oxydes de fer ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ), se combinent à la chaux provenant du calcaire pour donner des silicates et des aluminates de calcium pour former les nouveaux composés chimiques qui entrent dans la composition minéralogique du clinker.

Le processus de calcination est suivi de la cuisson du clinker ou clinkérisation pendant laquelle l'oxyde de calcium réagit à haute température (entre  $1400$  et  $1500^\circ\text{C}$ ) avec la silice, l'alumine et l'oxyde ferreux pour former des silico-aluminates de calcium composant le clinker.

A partir de  $1400^\circ\text{C}$ , les réactions de clinkérisation se produisent [3]:

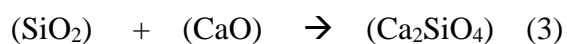


Oxyde de fer    Alumine    Oxyde de calcium    Alumino-ferrite tétra calcique



Alumine    Chaux vive    Aluminate tricalcique

Ces deux composés nouvellement formés constituent la phase liquide du mélange. Celui-ci progresse vers la partie la plus chaude du four. La silice ( $\text{SiO}_2$ ) et la chaux vive ( $\text{CaO}$ ) réagissent entre-elles :



Silice    chaux vive    silicate bicalcique

S'il reste de l'oxyde de calcium (CaO) qui n'a pas encore réagi, la réaction peut se poursuivre [3] :



Le four utilisé dans l'industrie cimentaire est un four horizontal rotatif cylindrique en acier (avec revêtement intérieur réfractaire) de 74 m de long, de 4 à 5 m de diamètre, légèrement incliné et tournant de 1 à 3 tours/minute (figure 1-5).



*Figure 1- 5: Four rotatif de ciment.*

Les principaux constituants du clinker sont donnés dans le tableau 1-1.

*Tableau 1- 1 : : les principaux constituants du clinker [3]*

Nom cimentier	Formule	Min.	Max.
Alite (silicate tricalcique)	$\text{Ca}_3\text{SiO}_5$	45.0 %	79.7 %
Bélite (silicate bicalcique)	$\text{Ca}_2\text{SiO}_4$	5.7 %	29.8 %
Célite(Aluminate tricalcique)	$\text{Ca}_3\text{Al}_2\text{O}_6$	1.1 %	14.9 %
Célite (Aluminoferrite tétracalcique)	$\text{Ca}_4\text{Al}_2\text{Fe}_2\text{O}_{10}$	2.0 %	16.5 %
Chaux libre	CaO	0.6 %	2.8 %



*Figure 1- 6:Le clinker*

#### **4. Le refroidissement**

À la fin de la cuisson, la matière est brusquement refroidie à l'air, ce qui permet de lui donner la structure cristallographique optimale. On obtient ainsi des grains solides à 150 °C : c'est le clinker, qui est transporté vers d'énormes silos de stockage (6 silos de stockage). Le clinker se présente sous la forme de granules (figure 1-6) d'environ 2 cm de diamètre.

#### **II.2.2.3. Le ciment**

##### **1. Broyage du ciment**

À la fin de la cuisson, la matière brusquement refroidie se présente sous forme de granules qui constituent le clinker. Celui-ci, finement broyé avec du gypse (environ 5%) pour régulariser la prise. Ce broyage s'effectue dans des broyeurs à boulets, dispositifs cylindriques chargés de boulets d'acier et mis en rotation (20 tours/minute) (figure 1-7) [6].



*Figure 1- 7: Intérieur d'un broyeur à boulets [3]*

Durant cette phase le ciment atteint une température élevée (150°C), ce qui nécessite l'arrosage extérieur des broyeurs. À la sortie du broyeur, le ciment, passe au refroidisseur à

force centrifuge pour que la température du ciment reste à environ 65°C puis transporté vers des silos de stockage [3].

## 2. Stockage du ciment

Des systèmes de transport mécaniques avec un élévateur à godets sont utilisés pour acheminer le ciment jusqu'aux silos de stockage. Les différents types de ciments sont stockés dans des silos différents.

## 3. Conditionnement et expédition

Le ciment est chargé directement en vrac dans des camions citernes ou envoyé dans un atelier d'ensachage.

La figure 1-8 résume le processus de fabrication ainsi les compositions dans chaque étape jusqu'à l'obtention du produit fini (Ciment).

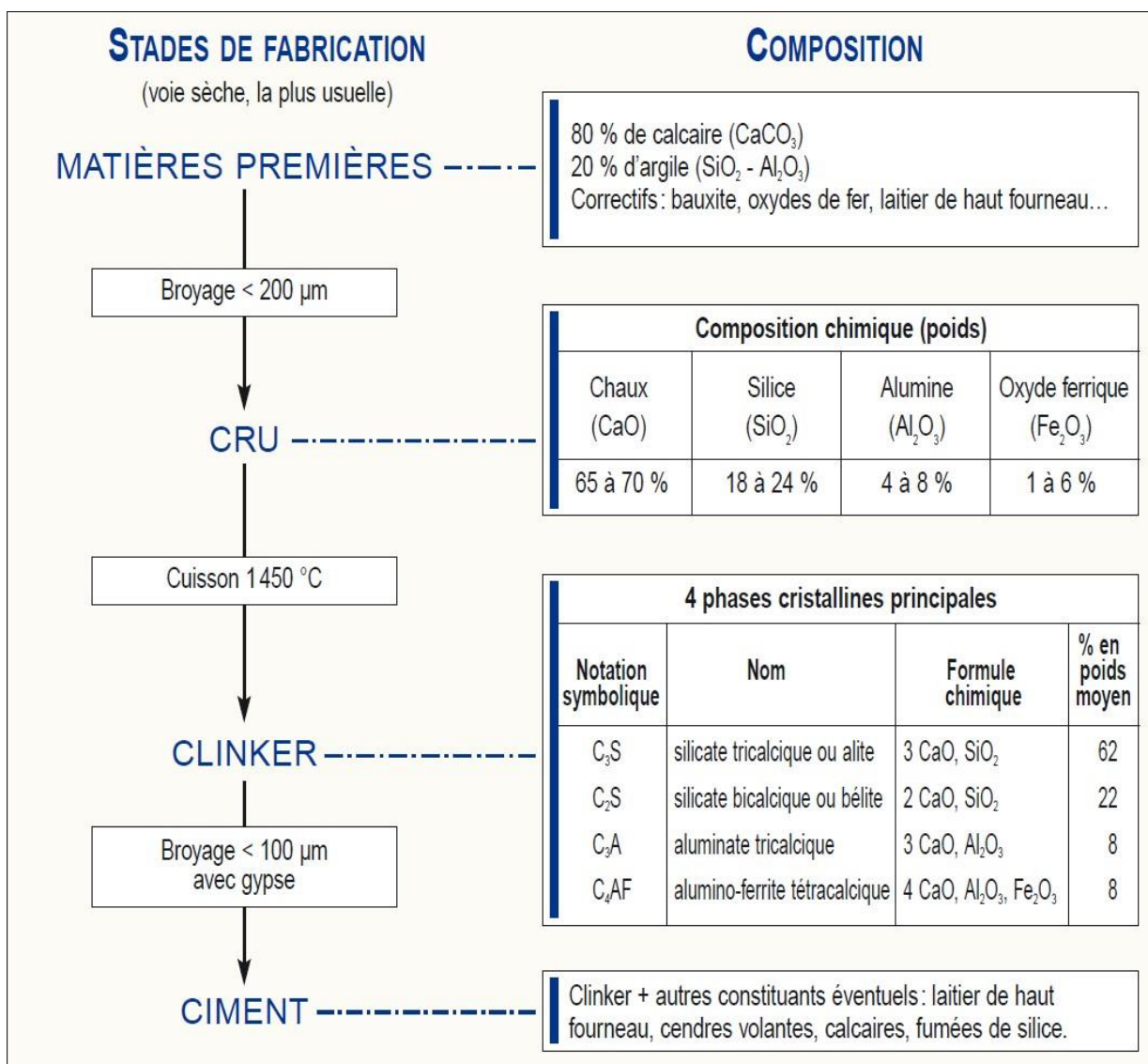


Figure 1- 8 : Procédé de fabrication de ciment

# **Chapitre II : les émissions atmosphériques dans l'industrie du ciment**



## II.1. Introduction

Les émissions atmosphériques issues de la fabrication du ciment sont générées par la manutention et le stockage des matériaux intermédiaires et finaux, et par l'exploitation des systèmes de fours, des refroidisseurs à clinker et des broyeurs.

Depuis plusieurs années maintenant, des contrôles des émissions des cimentiers sont effectués. Les contrôles concernent différents polluants : poussières, métaux lourds, NO<sub>x</sub>, SO<sub>2</sub>, HCl, dioxines et furannes...etc. Les conditions d'exploitation fixent, en effet, de manière très précise, les paramètres à mesurer à la sortie de la cheminée ainsi que les contrôles et les analyses à effectuer. Ces mêmes conditions déterminent également des "valeurs limites d'émissions" (VLE), exprimées en concentration de polluant dans les fumées par m<sup>3</sup> [7].

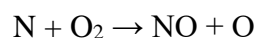
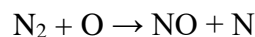
## II.2. Les gaz d'échappement

### II.2.1. Les émissions de l'Oxyde d'Azote (NO<sub>x</sub>)

Au cours des processus de combustion à haute température qui se déroulent dans les fours à ciment, des émissions d'oxyde d'azote (NO<sub>x</sub>) sont générées. Les principaux oxydes d'azote émis par l'industrie cimentière sont le monoxyde d'azote NO et le dioxyde d'azote NO<sub>2</sub> [3].

Ils ont deux origines possibles :

- **Les réactions à hautes températures** : À haute température, l'Azote de l'air (sous forme de N<sub>2</sub>) réagit avec l'Oxygène de l'air pour former des Oxydes d'Azote dans une plage comprise entre 1200-1600°C [8] .



L'importance de ces émissions dépend de la quantité d'air injectée pour la combustion et de la température (A des températures élevées la formation de NO augmente).

Le NO produit se transforme en NO<sub>2</sub> à la sortie de la cheminée dans des conditions atmosphériques et apparaît en brun-jaune [8] :



Le cimentier, en optimisant la température et l'injection d'air dans les limites tolérées par le procédé de fabrication, restreint au mieux les émissions de NO<sub>x</sub>

- **Le combustible** : 90% des oxydes produites sont sous forme des oxydes d'azotes NO, et 10% sont sous forme des dioxydes d'azotes NO<sub>2</sub> [9]. Les précurseurs de ces oxydes d'azote sont l'acide cyanhydrique (HCN) et l'ammoniac (NH<sub>3</sub>). Si l'oxygène est limitant, ces deux gaz sont convertis en NO [10] ;

D'une manière pratique, les émissions de NO<sub>x</sub> augmentent avec l'azote contenu dans le combustible et la température de combustion (et dans une certaine mesure avec l'excès d'air, mais un excès d'air trop important diminue fortement la température de combustion) [10].

Dans le monde industriel, les valeurs limites d'émissions sont en cours de révision. Elles étaient jusque fin 2005 de 1200 à 1800 mg/m<sup>3</sup> et seront (ou sont déjà dans certains cas) ramenées à 800 mg/m<sup>3</sup> [3].

Il est à signaler que plusieurs pays dans le monde, européens principalement, ont investi ces dernières années dans des installations de réduction des émissions de NO<sub>x</sub>. Ces installations permettront de réduire l'impact de l'utilisation accrue de combustibles de substitution.

### II.2.2. Les émissions des oxydes de Soufre (SO<sub>x</sub>)

Le dioxyde de soufre est le principal oxyde de soufre émis par les cimenteries. Les oxydes de soufre SO<sub>2</sub> et SO<sub>3</sub> sont formés à des températures entre 370 - 420°C [8]. Ces émissions sont principalement associées à la teneur en soufre volatil ou réactif des matières premières et, certes dans une moindre mesure, à la qualité des combustibles utilisés pour produire de l'énergie. Les émissions de SO<sub>2</sub> sont fortement dépendantes du gisement exploité, ce qui explique des différences parfois importantes entre les émissions des différents fours.

Tableau 2- 1 : : les procédés de formation et d'absorption des oxydes de soufre [42,43]

Procédé		
Matière première	SO <sub>2</sub> Formation	Sulfures + O <sub>2</sub> → Oxydes + SO <sub>2</sub> Organic S + O <sub>2</sub> → SO <sub>2</sub>
	SO <sub>2</sub> Absorption	CaCO <sub>3</sub> + SO <sub>2</sub> → CaSO <sub>3</sub> + CO <sub>2</sub>
Préchauffage	SO <sub>2</sub> Formation	Sulfures + O <sub>2</sub> → Oxydes + SO <sub>2</sub> Organic S + O <sub>2</sub> → SO <sub>2</sub>
	SO <sub>2</sub> Absorption	CaCO <sub>3</sub> + SO <sub>2</sub> → CaSO <sub>3</sub> + CO <sub>2</sub>
Calcination	SO <sub>2</sub> Formation	Fuel S + O <sub>2</sub> → SO <sub>2</sub> CaSO <sub>4</sub> + C → CaO + SO <sub>2</sub> + CO
	SO <sub>2</sub> Absorption	CaO + SO <sub>2</sub> → CaSO <sub>3</sub> CaSO <sub>3</sub> + ½ O <sub>2</sub> → CaSO <sub>4</sub>
Burning zone	SO <sub>2</sub> Formation	Fuel S + O <sub>2</sub> → SO <sub>2</sub> Sulfates → Oxydes + SO <sub>2</sub> + ½ O <sub>2</sub>
	SO <sub>2</sub> Absorption	NaO + SO <sub>2</sub> + ½ O <sub>2</sub> → NaSO <sub>4</sub> K <sub>2</sub> O + SO <sub>2</sub> + ½ O <sub>2</sub> → K <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> CaO + SO <sub>2</sub> + ½ O <sub>2</sub> → CaSO <sub>4</sub>

Les techniques de prévention et de maîtrise des émissions de  $\text{SO}_2$ , qui s'ajoutent à la nécessité d'assurer la bonne marche des fours, consistent notamment à :

- Choisir des matériaux de carrière qui ont une faible teneur en soufre volatil ;
- Utiliser des broyeurs verticaux, et y faire transiter les gaz pour récupérer l'énergie et réduire la teneur en soufre du gaz. Dans le broyeur, le gaz contenant de l'oxyde de soufre se mélange avec le carbonate de calcium ( $\text{CaCO}_3$ ) de l'agrégat brut et produit du sulfate de calcium (gypse) [1] ;
- Choisir une source de combustible dont la teneur en soufre est faible ;
- Injecter des absorbants comme de la chaux hydratée ( $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ), de l'oxyde de calcium ( $\text{CaO}$ ) ou des cendres volantes à haute teneur en  $\text{CaO}$  dans les gaz brûlés avant de les acheminer vers les filtres .

### II.2.3. Les émissions de Dioxyde de Carbone ( $\text{CO}_2$ )

L'industrie cimentière est aussi fortement émettrice de gaz à effet de serre (dioxyde de carbone  $\text{CO}_2$ ), provenant des besoins en "énergie calorifique", mais aussi du procédé de fabrication du ciment. Ces émissions de gaz carbonique sont principalement associées à la combustion du combustible, c'est à dire à un processus basé sur une combinaison physico-chimique à très haute température (consommatrice d'énergie). C'est ce que l'on appelle le  $\text{CO}_2$  énergétique "direct". Une autre source d'émission de  $\text{CO}_2$  en cimenterie est l'utilisation de l'électricité, principalement dans les installations de broyage. C'est le  $\text{CO}_2$  énergétique « indirect » (ces émissions ne représentent qu'une petite partie du total) [3].

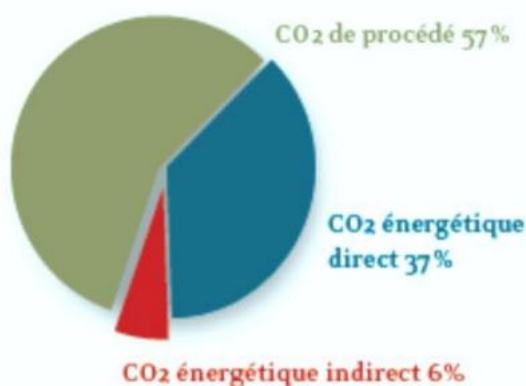


Figure 2- 1: Répartition des émissions de  $\text{CO}_2$  du secteur cimentier (2005) [3]

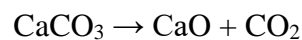
Environ 60 % des émissions de  $\text{CO}_2$  sont issues de la décarbonatation et les 40 % restant issus de la combustion du combustible. Les émissions de  $\text{CO}_2$  produites par la combustion du

carbone du combustible sont directement proportionnelles au besoin de chaleur spécifique et au rapport entre la teneur en carbone du combustible et son pouvoir calorifique [10].

À l'échelle mondiale, la production du ciment a été responsable de 4 % des émissions de CO<sub>2</sub> durant la décennie 2000-2009 [7].

Toute mesure d'économie d'énergie et d'utilisation de déchets comme combustibles de substitution ou comme matière première permettra de réduire l'utilisation de combustibles fossiles primaires et de réduire les émissions de gaz à effet de serre associées [3].

En effet, au cours de la fabrication du clinker, le calcaire (carbonate de calcium) se décompose en gaz carbonique (CO<sub>2</sub>) qui s'échappe à la cheminée et en chaux libre (CaO). Le CO<sub>2</sub> émis lors de la décarbonatation est évalué à 520 kg de CO<sub>2</sub> par tonne de clinker [11]



$$(1 \text{ kg} \quad 0.56 \text{ kg} + 0.44 \text{ kg}) [12]$$



Les techniques de prévention et de maîtrise des émissions de CO<sub>2</sub> recommandées, qui s'ajoutent à la nécessité d'assurer la bonne marche des fours, consistent, notamment, à :

- Produire des ciments mélangés, qui ont le potentiel de réduire de manière significative la consommation de combustible et les émissions de CO<sub>2</sub> subséquentes par tonne de produit fini ; procéder à des choix et à une exploitation qui favorisent l'efficacité énergétique (four de préchauffage/pré-calcination par voie sèche) ; [3]
- Choisir un combustible pour lequel le rapport teneur en carbone/valeur calorifique est faible (combustible provenant de déchets...) ;
- Opter pour des matières premières qui renferment peu de matière organique. Le monoxyde de carbone (CO) contribue, dans une proportion mineure, aux émissions des gaz à effet de serre (moins de 0,5 à 1 % de l'ensemble des émissions gazeuses). Ces émissions sont généralement liées à la teneur en matière organique des matières premières [3].

#### **II.2.4. Les émissions de Dioxines et Furannes**

Tout apport de chlore, en présence de matériaux organiques, peut potentiellement mener à la formation de dibenzo-p-dioxines polychlorés (PCDD) et de dibenzofuranes polychlorés (PCDF) lors des procédés thermiques (combustion). Les PCDD/PCDF peuvent être formés dans, ou après, le four de préchauffage et dans le dispositif de contrôle de la pollution de l'air

si les précurseurs de chlore ou d'hydrocarbures dans les matières premières sont disponibles en quantités suffisantes dans une gamme de température s'échelonnant de 200°C à 450°C [13].

**Tableau 2- 2 : Résumé des mesures de PCDD/PCDF [13]**

<b>Pays ou société</b>	<b>Substitution de combustibles et de matières premières</b>	<b>Concentration de PCDD/PCDF<sup>a</sup>, en ng I-TEQ/m<sup>3</sup></b>	<b>Nombre de mesures</b>	<b>Facteur d'émission µg I-TEQ/tonne de ciment<sup>a</sup></b>
Australie	Oui	0,001–0,07	55	0,0032–0,216
Belgique	Oui	<0,1	23	
Canada	Oui	0,0054–0,057	30	
Chili	Oui	0,0030–0,0194	5	
Colombie	Oui	0,00023–0,0031	3	
Danemark	Oui	<0,0006–0027	?	
Egypte	Oui	<0,001	3	
Europe	Oui	<0,001–0,163	230	<0,001–5
Allemagne 1989–1996	Oui	0,02	>150	
Allemagne 2001	Oui	<0,065	106	
Holcim 2001	Oui	0,0001–0,2395	71	0,104 (clinker)
Holcim 2002	Oui	0,0001–0,292	82	0,073 (clinker)
Holcim 2003	Oui	0,0003–0,169	91	0,058 (clinker)
Heidelberg	Oui	0,0003–0,44	>170	
Japon	Oui	0–0,126	164	
Lafarge	Oui	0,003–0,231	64	
Mexico	Oui	0,0005–0,024	3	
Norvège	Oui	0,02–0,13	>20	0,04–0,40
Philippines	Oui	0,0059–0,013	5	
Pologne	Oui	0,009–0,0819	7	
Portugal		0,0006–0,0009	4	
RMC	Oui	0,0014–0,0688	13	
Siam Cement Co.	Oui	0,0006–0,022	4	
Afrique du Sud	(Oui)	0,00053–0,001	2	
Espagne	Oui	0,00695	89	0,014464

Spain Cemex	Oui	0,0013–0,016	5	
Spain Cimpor	Oui	0,00039–0,039	8	
Taiheiyo	Oui	0,011	67	
Thaïlande	Oui	0,0001–0,018	12	0,00024–0,0045
Royaume-Uni	Oui	0,012–0,423	14	<0,025–1,2
Uniland		0,002–0,006	2	0,005–0,011
USA <sup>b</sup>	Oui	0,004– ~ 50	~ 750	<0,216–16,7
Venezuela	Oui	0,0001–0,007	5	
Vietnam		0,0095–0,014	3	

a. Les chiffres sont donnés soit comme une fourchette, soit comme valeur moyenne, et se réfèrent à 10 ou 11% d'O<sub>2</sub>, selon les réglementations européennes.

b. Les chiffres élevés des Etats-Unis se réfèrent aux mesures obtenues dans les années '90 ; le nombre de mesures est approximatif.

Les conséquences possibles de l'injection de différents déchets au niveau du préchauffage/ pré-calcination à basse température ont été étudiées par Lafarge, et les résultats sont présentés dans le tableau 2-3

**Tableau 2-3 : Injection de déchets au niveau du préchauffage/pré-calcination et influence sur les émissions de PCDD/PCDF [13]**

Usine	Année	Type de combustible alternatif	Emissions de PCDD/PCDF en ng I-TEQ/Nm <sup>3</sup>
1	2002	Farines animales, plastiques et textiles	0,0025
2	2002	Farines animales et sciures imprégnées	0,0033
3	2002	Charbon, plastiques et pneus	0,0021 & 0,0041
4	2002	Pneus	0,002 & 0,006
5	2002	Petcoke (coke de pétrole), plastiques et huiles usagées	0,001
6	2002	Petcoke, coques de tournesol et huiles usagées	0,012
7	2002	Copeaux de pneus	0,004 & 0,021
8	2002	Solvants	0,07
9	2002	Sciures imprégnées, et solvants	0,00003 & 0,00145
10	2002	Solvants	0,00029 & 0,00057
11	2002	Boues	<0,011
12	2002	Déchets automobiles et boues	0,0036 & 0,7 & 0,0032

Les données rapportées indiquent que les fours à ciment peuvent respecter un niveau d'émission de 0,1 ng I-TEQ/Nm<sup>3</sup>, qui est la valeur limite de la législation. [13]

### II.2.5. Les émissions de HCl :

Le Chlore provient à la fois des matières premières et des combustibles utilisés dans les fours à ciment. Il est important de constater que près de 90 % du Chlore introduit dans les fours est intégré dans le ciment et ne se retrouve pas dans les fumées [3].

Une fraction du chlore contenu dans le combustible peut se retrouver sous forme d'HCl. La plupart du chlore est converti en chlorures (Na et K), tandis qu'une fraction minime peut être transformée en dioxine ou autres organochlorées [10].

### II.3. Les matières particulaires

Les émissions particulaires ont plusieurs origines et sont issues de mécanismes complexes. Parmi les émissions particulaires, on retrouve les cendres volantes, résultat de l'entraînement dans les gaz de fumées de cendres et de sels (KCl, NaCl, K<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>) [10].

Les principaux facteurs influençant la formation de particules sont le débit de combustible et sa proportion en fines particules, l'excès d'air et sa distribution [10].

La figure 2-2 donne des émissions de particules (PM, PM10, PM2.5) des cimenteries québécoises entre 2005 et 2012 et contraste avec la production de ciment

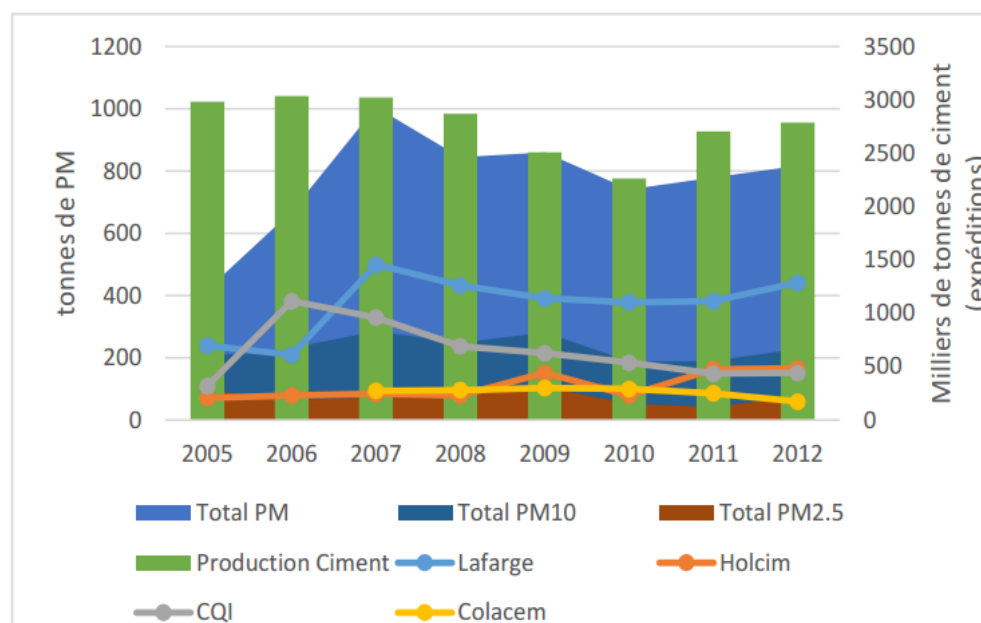


Figure 2- 2 : Émissions de particules (PM, PM10, PM2.5) des cimenteries québécoises entre 2005 et 2012 et contraste avec la production de ciment [7]

#### **II.4. Les émissions de poussières**

Les diverses étapes de production du ciment, dont le broyage et le mélangeage, peuvent générer des poussières. Celles-ci peuvent être récupérées par des filtres. Selon l'étape du procédé d'où proviennent ces poussières, elles peuvent soit être réincorporées comme matériau dans le procédé ou en seront extraites sous forme de matières résiduelles. La quantité de poussières pouvant être réintroduite peut toutefois être limitée par la concentration d'alcalins susceptible de s'y retrouver, car ceux-ci peuvent affecter les propriétés du ciment. Ces poussières constituent l'une des principales matières résiduelles spécifiques aux cimenteries [7].

L'industrie cimentière est soumise, au niveau mondial, à des normes toujours plus sévères en matière d'émissions de poussières. Ainsi, les valeurs limites applicables aux cheminées des fours à clinker qui étaient de 150 mg/m<sup>3</sup> en 1990 ont été ramenées à 50 puis maintenant à 30 mg/m<sup>3</sup>. Les appareillages qui équipent les fours actuellement permettent de respecter et même de descendre significativement en dessous de ces seuils (pour les autres installations tels les broyeurs et les refroidisseurs, la "VLE" applicable est de 50 mg/m<sup>3</sup>) [3].

#### **II.5. Les émissions de métaux lourds et autres polluants atmosphériques**

Des métaux contenus dans les matières premières ou les combustibles peuvent être émis à l'atmosphère [7]. Les métaux non volatils sont principalement liés à la matière particulaire. Les émissions de métaux volatils, comme le mercure, sont habituellement issues des matières premières et des combustibles provenant de déchets, et ne peuvent pas être maîtrisées en utilisant des filtres. Les métaux lourds et leurs composés sont généralement répartis en trois classes qui dépendent de leur volatilité ou de la volatilité de leurs composés les plus courants. [14]

- Le Mercure Hg ;
- Le Cadmium (Cd) et le Thallium (Tl) ;
- Les autres métaux lourds : Sb, As, Pb, Cr, Co, Ni, Cu, Mn, V

Les analyses réalisées en 2004 et 2005 sur les matières premières, les combustibles et les émissions atmosphériques dans plusieurs cimenteries européennes montrent que les métaux lourds introduits dans les fours des cimenteries proviennent majoritairement du cru et non des combustibles.

Par ailleurs, les bilans massiques montrent que les taux de séquestration des métaux dans le ciment sont particulièrement élevés : de l'ordre de 87 % pour le mercure, 95 % pour le plomb et de plus de 99 % pour les autres métaux [14].



Tableau 2- 3 : Niveau des émissions atmosphériques pour la fabrication du ciment [14]

Polluants	Unités	Valeurs selon les directives
Matières particulaires (Nouveau système de four)	mg/m <sup>3</sup>	30 <sup>a</sup>
Matières particulaires (fours existants)	mg/m <sup>3</sup>	100
Poussière (autres sources ponctuelles dont refroidissement du clinker, le broyage du ciment)	mg/m <sup>3</sup>	50
SO <sub>2</sub>	mg/m <sup>3</sup>	400
NOX	mg/m <sup>3</sup>	600
HCl	mg/m <sup>3</sup>	10 <sup>b</sup>
Fluorure d'hydrogène	mg/m <sup>3</sup>	1 <sup>b</sup>
Carbone organique total	mg/m <sup>3</sup>	10
Dioxines/furannes	mg Téq/m <sup>3</sup>	0.1 <sup>b</sup>
Cadmium et thallium (Cd+Ti)	mg/m <sup>3</sup>	0.05 <sup>b</sup>
Mercure (Hg)	mg/m <sup>3</sup>	0.05 <sup>b</sup>
Métaux totaux <sup>c</sup>	mg/m <sup>3</sup>	0.5
<p><b>Note :</b></p> <p>* émissions de la cheminée du four, sauf indication contraire. Valeurs moyennes journalières corrigées à 273 K, 101.3 KPa, 10 % d'O<sub>2</sub>, et gaz sec, sauf indication contraire.</p> <p><b>a</b> 10 mg/Nm<sup>3</sup> si plus de 40 % de la libération de chaleur résultante provient de déchets dangereux.</p> <p><b>b</b> si plus de 40 % de la libération de chaleur résultante provient de déchets dangereux, valeurs moyennes sur la période d'échantillonnage de 30 minutes minimum et 8 heures maximum.</p> <p><b>c</b> Métaux totaux = Arsenic (As), plomb (Pb), cobalt(Co), chrome (Cr), cuivre (Cu), manganèse (Mn), nickel (Ni), vanadium (V) et antimoine (Sb).</p>		

## **Chapitre III : Etat des déchets en Algérie**

### **III.1. Introduction**

La question des déchets a commencé à se poser de manière aigüe avec le développement urbain. Le volume de déchets s'amplifie de façon préoccupante, leur caractère hétérogène rend difficile la généralisation d'une filière de traitement, connaître leur composition et leurs caractéristiques permettra le choix d'une filière de traitement la mieux adaptée et la plus pérenne possible.

En Algérie, la quantité de déchets ménagers et assimilés a connu une augmentation substantielle au cours des dernières décennies en raison d'une croissance démographique galopante conjuguée à une urbanisation non maîtrisée. Ce phénomène est accentué en raison d'insuffisance de moyens et d'équipements appropriés.

Parallèlement, la composition de ces déchets est en phase de passer d'un profil organique (déchets alimentaires) à des matériaux complexes (emballages, plastiques, produits en fin de vie, etc.) qui présentent des risques majeurs pour l'environnement et la santé publique. La méthode pratiquée pour leur élimination demeure à ce jour la mise en décharge, du fait de son faible coût par rapport aux autres filières comme l'incinération ou le compostage.

### **III.2. Définitions des concepts**

Les déchets au sens de la réglementation algérienne comprennent trois grandes catégories :

- ✓ Les déchets ménagers et assimilés.
- ✓ Les déchets spéciaux (industriels, agricoles, soins, services, ...)
- ✓ Les déchets inertes.

La définition des différents types des déchets et des modes de traitement pouvant varier d'un pays à l'autre, il est nécessaire de définir précisément les termes que nous utiliserons par la suite [15] :

### **III.3. Quantité des déchets urbains produits en Algérie**

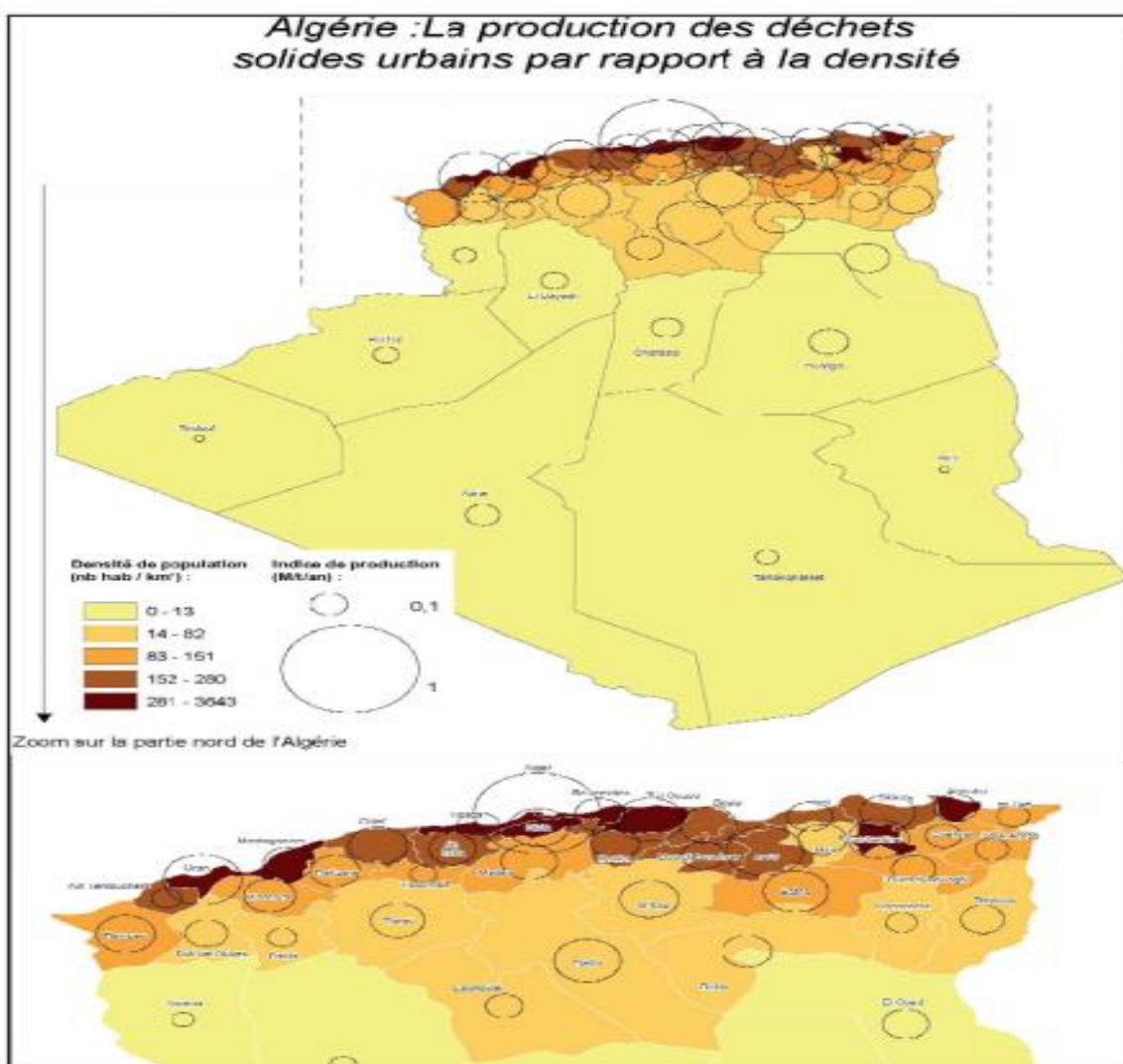
La connaissance de la production d'ordures ménagères est essentielle dans la planification d'un système de gestion. La quantité produite par collectivité est variable en fonction de plusieurs éléments. Elle dépend essentiellement, du niveau de vie de la population, de la saison, du mode de vie des habitants, du mouvement des populations pendant la période des vacances, les fins de semaines et les jours fériés, du climat. Elle peut être exprimée en poids ou en volume, seul le poids constitue une donnée précise et facilement mesurable [16].

Des études au niveau local ont permis l'évaluation de la production de la quantité des déchets urbains en fonction de l'importance des diverses agglomérations. La quantité

journalière générée par habitant au niveau des deux wilayas (Alger et Biskra) déclaré par la direction de l'environnement est présenté dans le tableau 3-1.

**Tableau 3- 1: Quantités journalières générées des déchets par habitant, dans l'agglomération Algéroise et à Biskra en 2017**

Ville (s)	Références	Production déchets Kg/hab./J
Alger	AND	0.95
Biskra	Direction de l'environnement-Biskra	0,58



**Figure 3- 1 : Production des déchets solide urbains en Algérie par rapport la densité [17]**

### III.3.1. Déchets industriels spéciaux

En 2002, selon le cadastre national des déchets spéciaux, la production de déchets industriels spéciaux est de 325 000 t/an, et la quantité en stock est de 2 008 500 tonnes. Les 12 plus grands générateurs de déchets se trouvent dans les régions Centre, Est et Ouest. Ils produisent près de 87% de déchets au niveau national soit 282 800 tonnes par an, et près de 95% en stock soit 1905200 tonnes [15]. Le tableau 3-3 montre la répartition des déchets spéciaux sur les différentes régions.

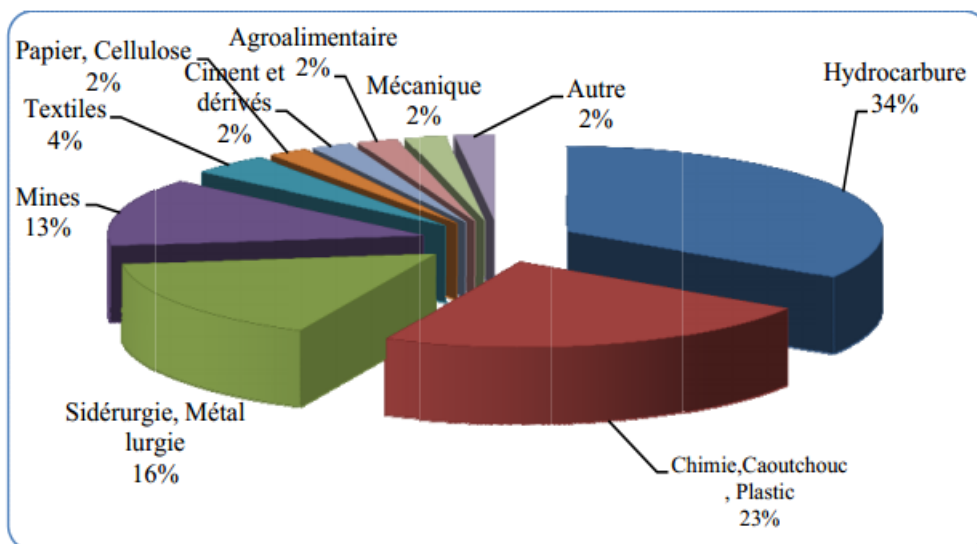
**Tableau 3- 1 : la répartition des déchets spéciaux sur les différentes régions**

Région	Production t/an	%	Stock tonnes	%
Est	145000	45	1100800	54
Ouest	98550	30	521800	26,8
Centre	77007	23,6	378000	18,8
Sud Est, Sud-Ouest	4500	1,4	-	0,4



**Figure 3- 2: production des déchets industriel [15]**

Nous constatons dans figure 3-4 que le secteur des hydrocarbures et celui de la chimie (caoutchouc, plastique) génèrent de 57% des déchets spéciaux, en deuxième position, les secteurs de sidérurgies avec 16% et le secteur des mines avec un taux de 13%, soit 86% de DIS sont d'origine de secteur primaire. Plus de 10% du total des déchets spéciaux sont répartis entre les différents secteurs, le textile 4%, papier 2% [15].



*Figure 3- 3: différents secteurs générateurs des déchets*

### III.3.2. Déchets d'activités de soin

En 2002, le cadastre des déchets de soins a recensé plus de 40190 tonnes de déchets hospitaliers qui se répartissent sur les différentes régions, 43% dans la région sanitaire du Centre, 29% dans la région sanitaire Est, 22% dans la région sanitaire Ouest, 4% dans la région sanitaire Sud-est, et 2% dans la région sanitaire Sud- Ouest.

### III.3.3. Déchets inertes

Les déchets inertes ce sont notamment, les déchets qui ne subissent aucune modification physique, chimique ou biologique lors de leur mise en décharge. Ces déchets proviennent de l'exploitation des mines, des carrières, des travaux de démolition, de construction ou de rénovation, et ils ne sont pas contaminés par des substances dangereuses ou autres éléments générateurs de nuisances, susceptibles de nuire à la santé et à l'environnement.

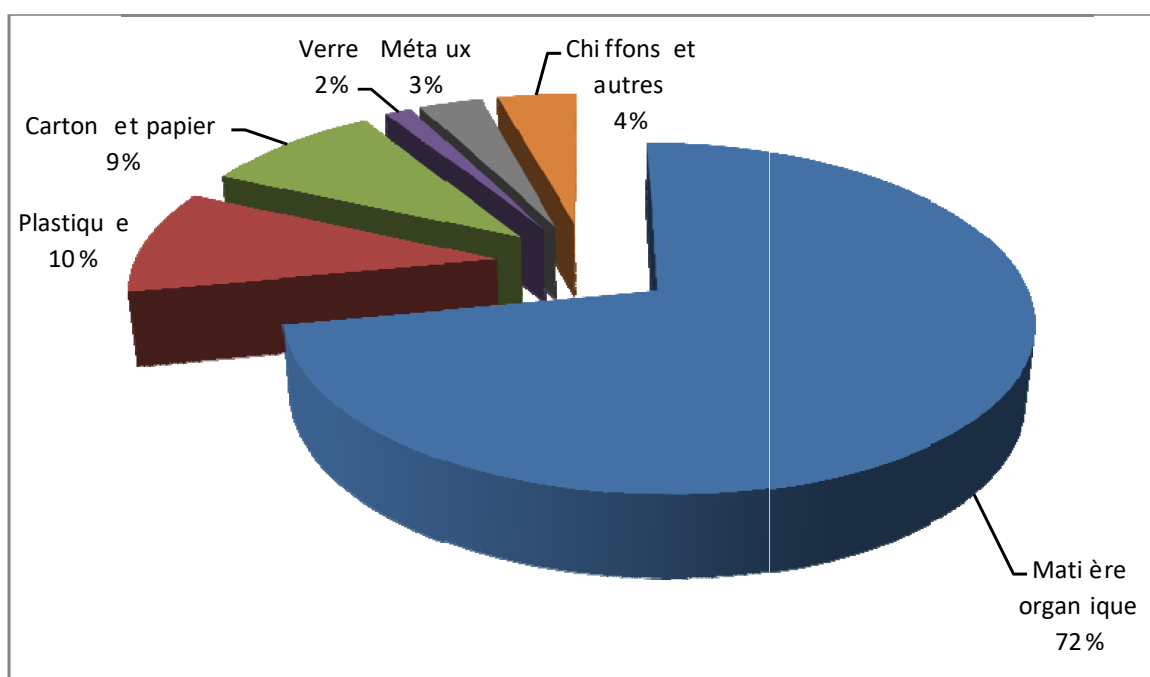
### III.4. Composition des déchets solides urbains

Le flux des déchets est un mélange hétérogène de produits et matériaux dont sa composition varie avec ses sources de génération, ainsi bien que la classification socio-économique de la localité. Le tableau 3-4 donne la comparaison de la composition de déchets dans des pays arabes (en volume) [17].

**Tableau 3- 2: Comparaison de la composition de déchets dans des pays arabes (en volume)**

Composant	TUNISIE	EGYPT	MAROC	JORDAN	ALGERIE
Matière organique	68 %	60%	67%	56%	72 %
Plastique	11 %	12%	2,6 %	13%	10 %
Carton et papier	9 %	10%	19 %	16%	9 %
Verre	2 %	3%	0,4%	7%	2 %
Métaux	4 %	2%	1,4%	5%	3 %
Chiffons et autres	6%	13%	9,6%	3%	4 %
Total	100 %	100%	100%	100%	100%

La figure 3-5 fournit des données sur la composition des déchets solides produits en Algérie. Les principaux composants sont les résidus alimentaires (organiques) avec un taux moyen de 72 %, plastique 10 %, papier/carton 9,3 %, verre 1,36 %, métaux 3,2% et le chiffon et autres 4,14% (AND, 2007).



**Figure 3- 4: Composition des déchets ménagers en Algérie**

### III.5. Élimination des déchets

L'élimination fait référence à la mise en décharge, enfouissement, compostage et incinération.

En général, l'élimination reste la solution appliquée à 97 % des déchets produits en Algérie (figure 3-5). L'élimination reste la solution appliquée à 89 % des déchets produits en Algérie. Les déchets destinés à l'élimination sont mis en décharges sauvages à 46 %, brûlés à l'air libre dans des décharges publiques ou communales non contrôlées, en décharge contrôlée et dans les CET (36 %). Le nombre de décharges sauvages est passé de 2 000 en 1980 à 3 130 en 2007. Par contre, les quantités destinées à être valorisées sont trop faibles : seulement 10 % par recyclage et 1 % par compostage.

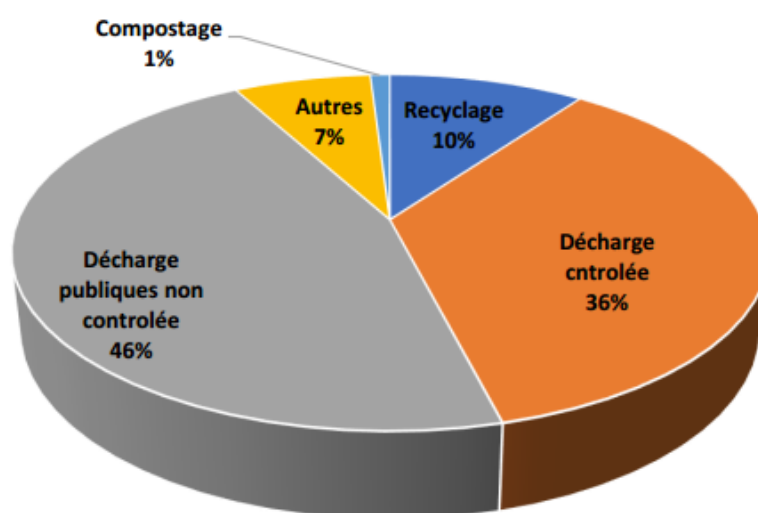


Figure 3- 5 : Modes d'élimination des déchets en Algérie

### III.6. Conclusion

L'état de l'environnement en Algérie en matière de déchets urbains a été marqué, durant les années quatre-vingt et quatre-vingt-dix par plusieurs facteurs : un problème de la santé publique qui ne cesse d'augmenter ; une baisse des moyens humains et matériels affectés à la préservation de la qualité de l'environnement ; une saturation des décharges ; une baisse des coûts d'élimination à la suite de la mise en décharges sauvages et une augmentation du ratio par tête des déchets produits [15].



En matière de gestion des déchets, on constate que la notion gestion intégrée n'existe pas encore en Algérie, dans la mesure où les différents secteurs ne disposent d'aucune stratégie de traitement, de revalorisation et / ou d'élimination des déchets [16].

L'enfouissement technique reste un mode important d'élimination des déchets, il doit permettre non seulement une gestion efficace des déchets mais aussi le traitement après drainage et récupération des deux effluents que sont le biogaz et les lixiviats [16].

## Chapitre IV : Utilisation des pneus usagés en tant que combustible dans la cimenterie Biskria Ciment

## **IV.1. Introduction**

Au cours des dernières années, le volume de polymères non recyclables tels que les pneus usés, les plastiques incinérés dans les déchets municipaux a fortement augmenté, de sorte que les industries devraient trouver une solution appropriée à ce problème [18].

Les filières classiques de valorisation des pneus usagés qui nécessitent souvent une technologie avancée, sont généralement concentrées dans les pays riches. Le développement de nouvelles filières de valorisation des pneus usagés, reste cependant toujours en grande demande partout dans le monde [19].

Les pneus usés sont l'un des déchets non dangereux, les plus facilement utilisables et les plus calorifiques.

Les usines de production de ciment offrent des possibilités intéressantes d'utilisation des pneus usés comme combustible auxiliaire [20]. Outre le développement d'équipements auxiliaires destinés aux installations de réception et d'alimentation des pneus, les caractéristiques du processus de cuisson pour la production de clinker ne nécessitent aucune autre modification du fonctionnement et de la configuration de l'installation [20].

Les processus de production de ciment nécessitent une énorme quantité d'énergie et sont les plus importants émetteurs de gaz à effet de serre et de dioxyde de carbone dans le monde.

L'utilisation des pneus usés comme carburant alternatif entraîne des économies d'énergie et des avantages économiques et environnementaux [18].

Dans ce chapitre, nous allons traiter l'utilisation du combustible dérivé des pneus (tire derived fuel (TDF)) dans les fours à ciment, les différentes formes de TDF, son utilisation dans les différents processus de production de clinker, son impact sur la qualité du produit et les émissions de cheminées résultant de son utilisation. Nous allons proposer, à la fin, un procédé pour l'injection des pneus dans le four.

## IV.2. Situation des pneumatiques en Algérie

### IV.2.1. Gisement du pneumatique usagé

Les statistiques montrent que des millions de tonnes de déchets de pneumatiques sont jetées chaque année dans le monde (Etats Unis, Espagne, Allemagne, Algérie...). D'après l'ETRA, The European Tyre Recycling Association, l'accumulation annuelle des Pneus Usagés (PU) en Allemagne est estimée à 640 000 tonnes par an (tous types confondus). Le nombre de pneumatiques consommés progresse régulièrement avec la croissance du parc automobile. Malgré l'amélioration de la longévité des pneumatiques, le gisement de ces déchets reste très important [19] (Tableau 4-1).

Plusieurs méthodes sont utilisées pour estimer le nombre de pneus usagés, générés par an. Au Canada, le nombre de pneus usés, est estimé en fonction du nombre de pneus neufs vendus (Chaque pneu neuf vendu génère un pneu usé).

*Tableau 4- 1 : L'accumulation annuelle des pneus découlant par l'UE en tonne [21]*

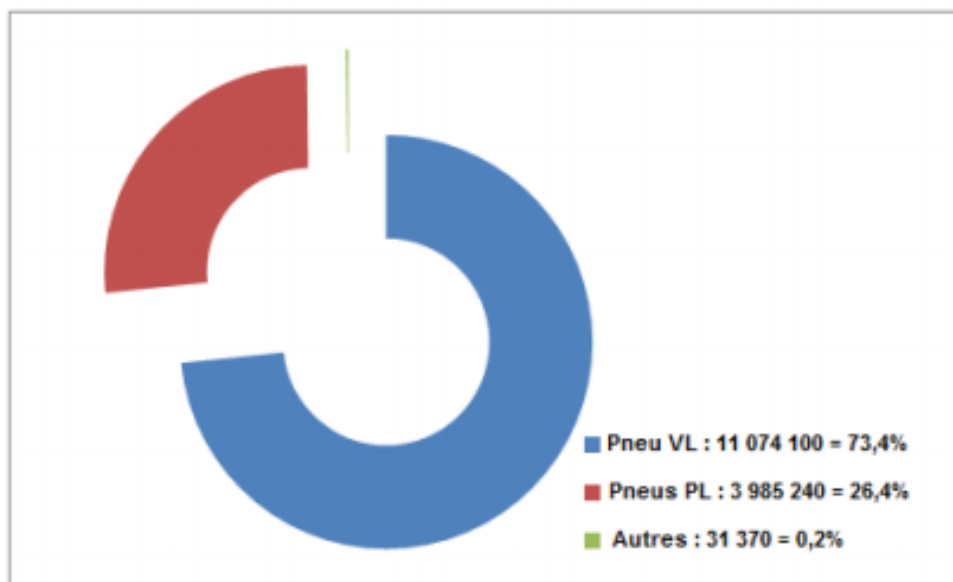
Etat membre	Pneu découlant en tonne	Population
France	401 000	58 265 400
Allemagne	640 000	81 845 000
Italie	434 500	57 330 500
Espagne	280 000	39 241 900
Ukraine	435 000	58 684 000
Union Européen	2 659 100	372 662 100

Selon une étude statistique estimative du gisement des Pneus Usagés Non Réutilisables (PUNR) publiée en 2011, la quantité générée annuellement en Algérie est de l'ordre de 1 439 514 unités, soit 25 918 tonnes par an (3 500 000 véhicules en 2007). Cette quantité évoluera à la hausse à cause de l'augmentation du parc automobile Algérien qui est estimé à 6.162542 véhicules à la fin de 2017, contre 5986181 véhicules à la fin de 2016, soit une hausse de 2,94%, selon l'Office National des Statistiques [19].

Selon une enquête réalisée par l'Ecole Nationale des Travaux Publics auprès de Sonatrach, en 1994, pas moins d'un (01) million de pneus usagés, ont été dénombrés contre 385000 unités en 1990. Ces chiffres sont éligibles à la hausse à cause de l'augmentation du nombre de véhicules [19].

La longévité d'un pneu dépend de plusieurs paramètres (technologie du pneu, nombre de cycles de rotation, freinage...etc.). Pour les pneus de types VL, deux pneus sur quatre sont changés tous les cinq ans en moyenne. Pour les pneus de types PL, deux sur six entrent dans le flux de déchets tous les quatre ans en moyenne [19].

A partir de ces chiffres, le gisement de pneumatiques usagés en Algérie, est estimé par ce modèle à 1 439 514 pneus usés par an (Figure 4-1), soit 25918,5 tonnes de pneus usés par an.



*Figure 4- 1 : Estimation des pneus en circulation selon type au 1<sup>er</sup> semestre 2007*

Ces pneus sont repartis en 1 107 410 pneus usés de type VL par an et 332 104 pneus usés de type PL par an, soit 0,0413 pneu/personne/an (L'Office National des Statistiques, estime que 34,8 millions de personnes résidaient en Algérie au 16 avril 2008 selon le Recensement Général de la Population et de l'Habitat de 2008) [19].

Notons qu'une (01) tonne PUNR égale à 139 pneus type VL ou 18,5 pneus type PL donne 2m<sup>3</sup>de pneus broyés.

Le tableau 4-2 donne des quantités des PU générées par an en Algérie

*Tableau 4- 2 : Quantités des PU générées par an en Algérie [21]*

<b>Types de pneus</b>	<b>Pneus/an</b>	<b>Tonne/an</b>	<b>Pneus/personne/an</b>
<b>Véhicule Léger VL</b>	1 107 410	7 967	-
<b>Poids Lourd PL</b>	332 104	17 951	-
<b>Total</b>	1 439 514	25 918	0,0413

#### **IV.2.2. Les filières de valorisation des pneus usages**

Certains pneus usagés peuvent faire l'objet de plusieurs voies de valorisation :

##### **IV.2.2.1. Le rechapage**

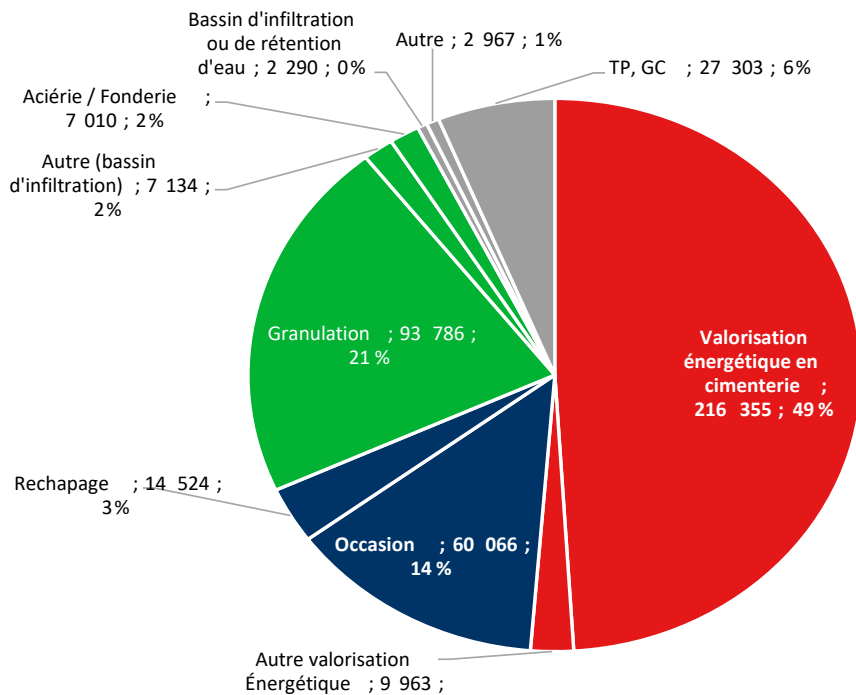
C'est une technique qui consiste à reconstituer la bande de roulement du pneu pour prolonger sa durée de vie [21]. Le rechapage consiste à ôter la bande de roulement usée et à la remplacer par une bande neuve, en garantissant au pneu rechapé des performances identiques à un pneu neuf, en toutes saisons et dans les mêmes conditions d'utilisation.

##### **IV.2.2.2. Valorisation énergétique**

Les pneus possèdent un pouvoir calorifique important : Trois (03) tonnes de pneus se substituent à environ 2 tonnes de fioul [21].

Sa composition homogène en fait par ailleurs un combustible de substitution stable. La valorisation énergétique, est cependant limitée en France où 18 % des pneus usagés sont valorisés, contre 63 % au Japon, 44 % en Allemagne et 29 % en Grande-Bretagne. Elle repose de surcroît, quasi essentiellement, sur les cimenteries [19].

L'industrie cimentière a commencé à utiliser des pneus usagés en substitution partielle des combustibles traditionnels depuis 1992. Ces pneus sont le plus souvent utilisés broyés, rarement entiers. En 1998, 26 000 tonnes de pneus usagés ont été valorisés en cimenterie en France [19].



**Figure 4- 2 : Tonnages déclarés par les producteurs par famille de traitement en France 2015 pour une quantité de 441396 tonnes [22]**

En Algérie, le problème reste posé puisque la réglementation n'est pas encore claire sur la valorisation énergétique. Les cimenterie Algérienne préfèrent utiliser du gaz naturel qui est abondant et nettement moins couteux que les pneus usés [19, 21]

### II.2.3. Valorisation en matière première

Après un tri, les PU peuvent être broyés en poudrettes ou en granulats de caoutchouc. Les deux sont utilisés dans la fabrication des revêtements du sol industriels et sportifs, des matériaux d'isolation phonique, membranes anti fissure, anti vibration...etc [21].

### II.2.4. Emploi en domaine de génie civil

Les pneus possèdent des propriétés multiples qui leur donnent un intérêt dans l'ingénierie civil et géotechnique : ductilité, faible conductivité thermique. Plusieurs techniques utilisant les PU en génie civil sont connues dans le monde entre autre la technique Pneusol. Les domaines d'application sont variés « Ouvrages de soutènements, remblai léger, répartiteur des contraintes, protection des pentes...). Plus de 2000 ouvrages valorisant les PU, selon les différentes techniques sont connues dans le monde, dont environ une vingtaine en Algérie [19,21].

### IV.3. Utilisation des pneus usés en tant que combustible de substitution dans le four de cimenterie

#### IV.3.1. Introduction

Les températures de fonctionnement élevées dans les fours à ciment, généralement autour de 1450°C et le long temps de séjour des gaz à haute température [23] (tableau 4-3), favorisent la combustion quasi complète des pneus usagés avec des émissions limitées [24] (figure 4-3).

Le caractère alcalin du cru, qui circule à contre-courant des gaz de combustion, constitue un piège efficace aussi bien pour les gaz acides que pour les métaux provenant des combustibles fossiles et des déchets [23]. Les cendres solides issus de la combustion des pneus (c'est-à-dire l'acier des bourrelets et des courroies du pneu) sont incorporées en totalité dans le clinker [24].

*Tableau 4- 3: Températures et temps de séjour typiques dans un four [25]*

Equipement	Tour préchauffage	Précalcinateur	Four rotatif	Refroidisseur
Température du gaz (°C)	350-880	880-1100	1100-2000	1100-ambiante
Temps de rétention de gaz(s)	≈ 5-10s	≈ 3-4s	≈ 5-10s	≈ 1s
Température de la matière (°C)	100-780	780-900	900-1450	1400-100
Temps de rétention de la matière (s)	≈ 50s	≈ 5s	≈ 15-30 min	30 min

Les pneus hors d'usage constituent un bon combustible pour les cimenteries ; de plus, ils peuvent remplacer une partie des matières premières. En effet, la carcasse en acier des pneus apporte une partie significative de fer, ce qui implique ainsi une réduction de matière ferreuse à ajouter au cru [23].

Un autre point intéressant est que les pneus ont généralement un pourcentage de soufre inférieur à celui de la plupart des charbons. Le soufre dans les pneus va de 1,24% à 1,30% en poids. Le charbon moyen utilisé dans la fabrication du ciment contiendra environ 1,5% de soufre. La présence de carbonate de calcium contribue à contrôler les émissions de soufre provenant d'un four à ciment. Tous les composants des pneus étant soit détruits, combinés dans le clinker (les métaux lourds tels que le zinc et le chrome) ou capturés dans le dispositif antipollution atmosphérique [24].



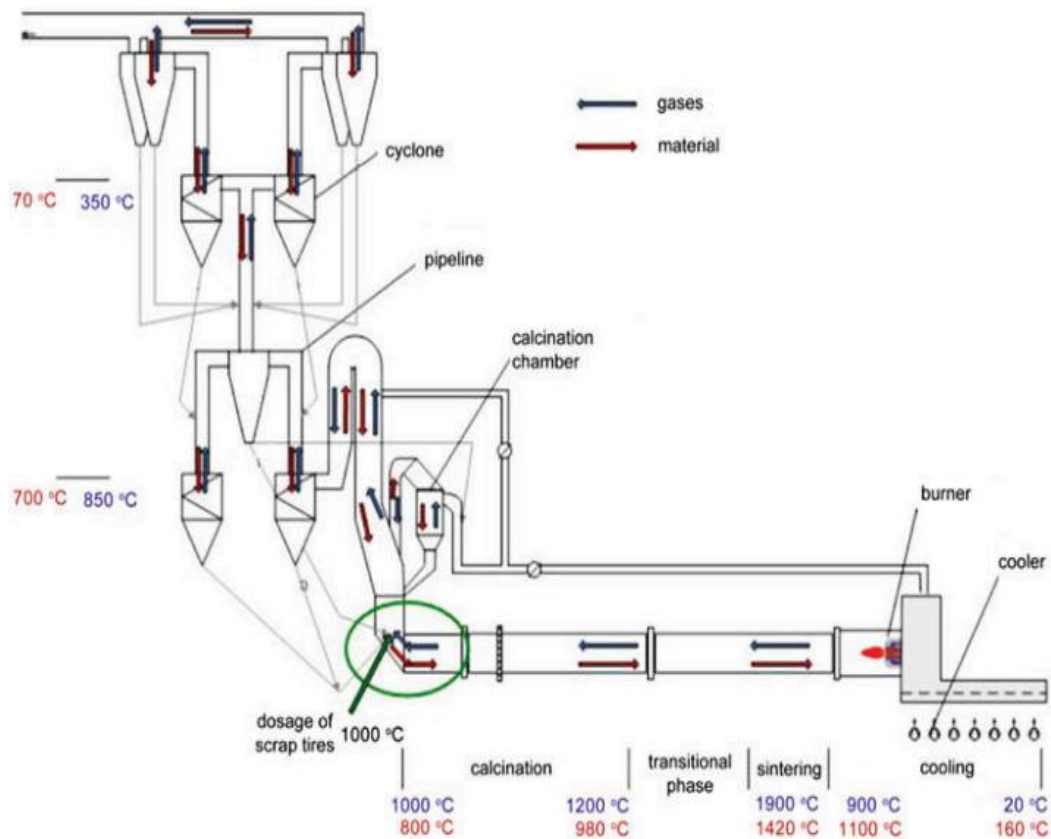


Figure 4- 2: Schéma simplifié du four rotatif avec emplacement marqué pour le dosage des pneus [5]

La valorisation des déchets dans les cimenteries présente des avantages économiques et environnementaux [23] :

- Réduction des coûts de production du ciment : les déchets sont des combustibles moins dispendieux que les combustibles conventionnels ;
- Coûts d'adaptation d'une cimenterie (afin qu'elle puisse brûler des déchets) sont inférieurs à ceux occasionnés par la construction d'unités de traitement comme les incinérateurs ;
- Conservation des ressources non renouvelables que sont le charbon, le mazout, le gaz naturel en les remplaçant par les combustibles de substitution ;
- Utilisation sécuritaire de déchets.

### IV.3.2. Propriétés et combustion des pneus usagés

Si on effectue une coupe, d'un pneumatique de type radial, dans le sens transversal (Figure 4-4), on distingue :

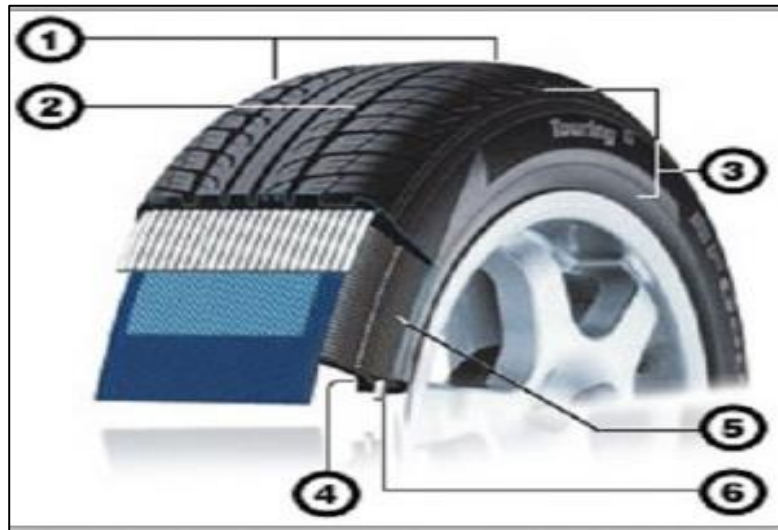


Figure 4- 3 : Coupe transversale d'un pneu

Il est divisé en six zones :

- La bande de roulement (1).
- Les sculptures (2).
- Le flan (3).
- L'enveloppe intérieur (4).
- Le talon ou bourrelet (5).
- Le talon ou bourrelet (6)

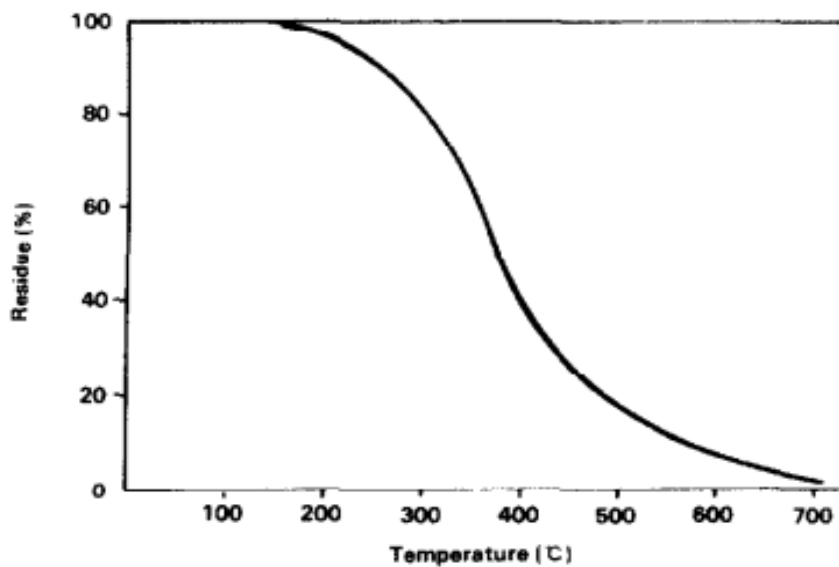
Les caractéristiques des pneumatiques pour véhicule léger et poids lourds sont présentées dans le tableau 4-4.

Tableau 4- 4 : Les caractéristiques des pneumatiques [21]

Caractéristiques	(VL)	(PL)
Poids moyen.	7 kg	50 kg
Diamètre intérieur	0,30 m	0,55 à 0,66 m
Diamètre extérieur	0,60 m	1,10 à 1,20 m
Nombre de pneus /m <sup>3</sup>	20	3

Composition des pneus tourisme et poids lourd (BLIC Bruxelles and Busel convention séries N°00/33)		
Matériaux	Pneus tourisme (%)	Poids lourds (%)
Caoutchouc	48	43
Noir de carbone et silice	21.5	21
Métaux	16.5	27
Textiles	5.5	-
Oxyde de zinc	1	2
Soufre	1	1
Autre produit chimique	7.5	6

Les propriétés de combustion des pneus sont illustrées à la figure 4-5. Comme il ressort clairement de cette figure, les pneus usés brûlent rapidement dans une plage de températures allant de 300 à 350°C, puis en augmentant la température à 400°C, la partie en carbone des pneus commence à brûler, puis à la température de 650°C, le processus de combustion du carbone est terminé. En calcul théorique, le pouvoir calorifique de 1 kg de pneu équivaut à 0,86 litre d'huile [27,28].



*Figure 4- 4 : Courbe de combustion du pneu [27][28]*

Les pneus usagés ont l'avantage de présenter un Pouvoir Calorifique Inférieur (PCI) élevé proche des combustibles conventionnels. Le PCI change avec la composition de pneus, le tableau 4-5 présente différentes valeurs de PCI :

*Tableau 4- 5 : Pouvoir calorifique inferieur des pneus*

<b>PCI (MJ/kg)</b>	38,453	36,9	37.6	31,4
<b>Références</b>	[44]	[25]	[18]	[24]

#### **IV.3.3. Pneus entiers ou déchiquetés**

L'approvisionnement en TDF (tire derived fuel) pour les fours à ciment est divisé en deux catégories générales : entier et transformé [24].

Le format TDF peut être fourni sous plusieurs formes :

Les pneus peuvent être broyés en "miettes": L'utilisation de cette forme présente de nombreux avantages [29] :

- L'acier dans le bourelet et les bandes radiales peut être enlevé via la classification d'air,
- Les miettes peuvent ensuite être soufflées avec du charbon pulvérulent en substitution directe au charbon en poudre,
- Le stockage, le transport et la gestion des miettes sont très similaires à la gestion des fines de charbon.

Il existe des inconvénients, ou plus précisément des avantages inutiles, pour les fours à ciment utilisant des miettes TDF :

- L'enlèvement de l'acier n'est pas nécessaire car les fours à ciment ont besoin de fer dans leur processus.
- La production des miettes coûte cher.
- Les pneumatiques sont élastiques et il est coûteux de les pulvériser minutieusement ou de les réduire à la taille nécessaire au transport pneumatique [29].

Des "copeaux" de pneus de différentes tailles sont couramment utilisés comme combustible dans les fours à ciment. La section de ces copeaux varie de 2 cm x 2 cm à 15 cm x 15 cm. Le transport se fait par camion à benne basculante. L'alimentation des copeaux dans le four se fait par un convoyeur alimenté par une trémie. Un chargeur frontal est utilisé pour charger la trémie à partir de la pile de stockage [29].

L'utilisation de pneus entiers comme combustible est courante dans l'industrie des fours à ciment. Dans ce cas, des camions de pneus entiers, généralement des fourgons fermés, sont livrés à l'extrémité d'un convoyeur. Les pneus sont déchargés manuellement du camion sur le convoyeur. Le convoyeur achemine les pneus vers un mécanisme qui insère un pneu dans le four à des intervalles des temps réguliers. Parmi les avantages, nous citons :

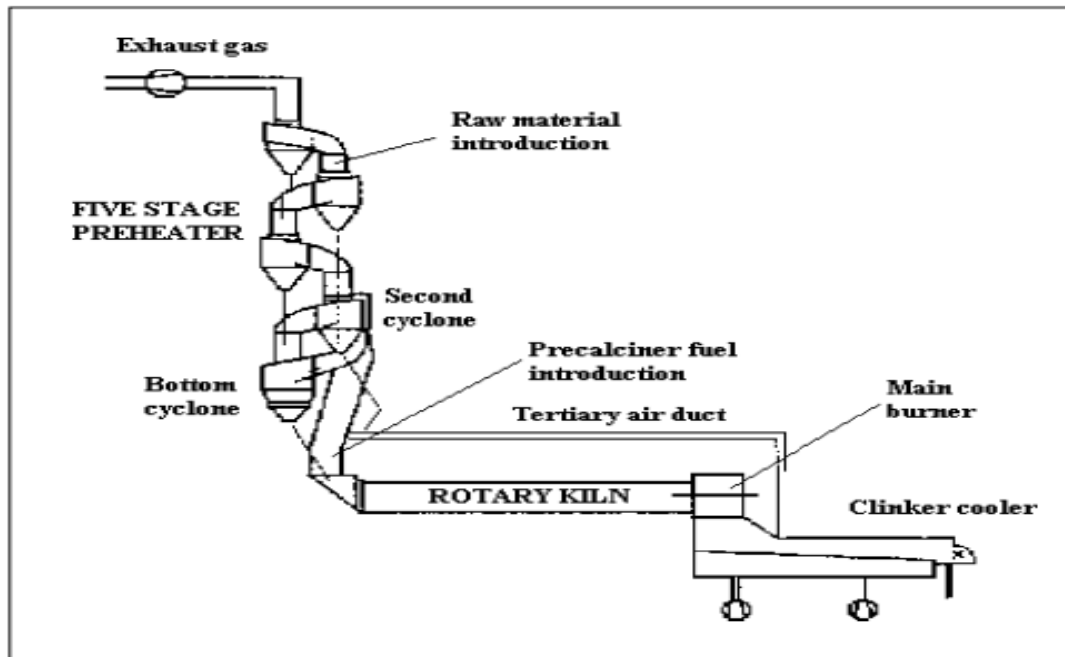
- Pas de coûts de traitement en plus des coûts d'acquisition ;
- Contrairement aux copeaux de pneus, les pneus ne migrent pas dans l'ensemble des installations ;
- Ils ne sont pas soumis à des "incendies de poussière, comme le cas des miettes ;
- Le transport, le stockage et la gestion des pneus entiers nécessitent plus de soin logistique et de main-d'œuvre que la gestion des autres formes TDF.

#### **IV.3.4. Utilisation des pneus usagés dans le processus de fabrication de ciment**

##### **IV.3.4.1. Cas de la cimenterie du groupe UNICEM**

L'étude vise à illustrer une série d'expériences à grande échelle, menées dans la cimenterie du groupe Unicem, visant à évaluer l'utilisation des pneus usés déchiquetés en copeaux de 6 cm de large, en tant que substituts partiels du combustible conventionnel dans la production de clinker [20].

Des tests expérimentaux ont été menés dans les installations industrielles Unicem de Barletta, dans le sud de l'Italie. La cimenterie (figure 4-6), en activité depuis le milieu de 1993, a une capacité moyenne de production de 100 tonnes/heure de clinker et est équipée d'un cyclone à cinq étapes, équipé d'un système de calcination en ligne. Les premières étapes de la cuisson des matières premières (séchage, déshydratation et calcination) se produisent dans la tour à cyclone, tandis que le clinker se produit dans le four rotatif (54 m de long et 4 m de diamètre interne) [20].



*Figure 4- 5 : Schéma général de l'installation de production de clinker (cimenterie Unicem)*

Des essais de combustion des pneus usés ont été effectués pendant quatre mois consécutifs, pour un total de plus de 100 heures de fonctionnement continu de l'usine. Les déchets ont été utilisés sous forme de copeaux déchiquetés injectés à l'entrée du précalcinateur, avec une unité d'alimentation pneumatique spécialement installée. Les fragments en vrac ont été correctement caractérisés en termes de répartition du poids et de paramètres physiques (Poids, dimension maximale et surface maximale) [20].

La distribution obtenue, indiquée dans le tableau 4-6, donne cinq classes granulométriques différentes, avec des dimensions moyennes comprises entre 2 et 7 cm et un poids compris entre 2 et 18 g [20].

**Tableau 4- 6 : Répartition du poids et principales caractéristiques physiques des fragments de pneu utilisés (toutes les moyennes sont exprimées en termes de moyenne arithmétique)[20]**

Classe	Caractéristiques	Poids moyen	Dimension maximale moyenne (cm)	Surface maximale moyenne (cm <sup>2</sup> )	Pourcentage en poids (%)
A	Poids < 4g	3,1	2,5	3,4	16
B	Poids = 4-7g	5,7	3,3	4,9	26
C	Poids = 7-12 g	9,4	4	7	23
D	Poids > 12g	15,2	4,9	9,5	18
E	Forme étirée	11,4	6,8	13	17
Échantillon entier	-	8,9	4,3	7,5	100

Les caractéristiques de taille, le lieu d'alimentation et les modes d'injection des déchets de pneus ont été sélectionnés après une évaluation minutieuse des exigences les plus importantes du processus : récupération optimale de la chaleur du carburant, réduction au minimum du temps de combustion de la chaleur du carburant, précision du dosage du matériau et utilisation éventuelle de différents carburants de substitution.

Les essais de combustion ont été évalués avec six essais différents et avec des rapports d'alimentation en masse constants des copeaux de pneus par rapport au coke de pétrole pulvérisé comprises entre 0,25 et 0,7. Les taux de substitution du carburant, calculés à partir de masses des carburants utilisés et de bilan thermique (tableau 4-7), varient entre 16 et 36% en termes d'apport thermique total (37 à 80% en termes de charge calorifique du précalcinateur). Avec ces rapports de masse de 0,25 et 0,7, le PCI est de 6500 kcal / kg à 7150 kcal/kg respectivement [20].

**Tableau 4- 7 : Taux d'alimentation en carburant et taux de remplacement thermique appliqués lors des essais de combustion des pneus usés [20]**

		Opérations de base	16%	22%	36%
Taux d'alimentation en carburant	Précalcinateur				
	Pneu (kg/h)	0	2010	2530	4060
	Coke de pétrole (kg/h)	3900	2030	1910	550
	Brûleur principal				
	Coke de pétrole (kg/h)	5090	5040	5130	5130
	PCI DE pneu (kcal/kg) <sup>a</sup>	-	7160	6630	6510
Remplacement de la chaleur	Apport total de chaleur	-	16%	22%	36%
	Apport de chaleur du précalcinateur	-	37%	52%	85%

<sup>a</sup> Calculé à partir du taux d'alimentation en coke de pétrole remplacé

L'utilisation des copeaux de pneus ont abouti aux conclusions suivantes :

- Le four dans son ensemble semble plutôt insensible à l'ajout de copeaux de pneu, pour les différents taux de substitution.
- Pas de changement significatif concernant les émissions de CO (Tableau 4-8).
- L'utilisation de carburants de substitution n'a aucune influence particulière sur les principaux paramètres de fonctionnement, y compris les indicateurs les plus courants de la stabilité des processus (en particulier, les concentrations de CO, O<sub>2</sub> et NO<sub>x</sub> dans différentes sections du four, les températures des gaz d'échappement et des matières premières, et la rotation vitesse du four et du ventilateur d'extraction) [20],
- L'ajout de copeaux de pneu n'a aucune influence sur la qualité du clinker produit. Le tableau 4-9 compare les caractéristiques des échantillons de clinker moyens obtenus avec et sans utilisation de pneus usés [20].



- On observe une légère diminution de la température d'entrée du four et augmentation de la température de l'air de refroidissement du clinker (Tableau 4-8) qui peut être due à la combustion des substances non volatiles.

**Tableau 4- 8 : Paramètres de processus d'exploitation mesurés lors des essais de combustion de référence et d'essais de pneus déchiquetés [20]**

Paramètre	Ajout de pneus hors d'usage (% d'apport thermique total)			
	0%	16%	22%	36%
CO à l'entrée de l'ESP (ppm à 6% d'O <sub>2</sub> )	204	227	197	196
Air de refroidissement du clinker T (°C)	1050–1130	1140–1150	1200–1220	1100
Entrée du four rotatif T (°C)	995–1050	950–990	950–980	980
Tour de cyclone : rejet de gaz de combustion T (°C)	330–335	320–330	320–325	325
Différence de température d'alimentation brute à travers le précalcinateur (°C)	100–105	100–112	110–115	100

**Tableau 4- 9 Comparaison des caractéristiques du clinker obtenu lors d'essais de référence sur l'essai de combustion du pneu déchiqueté [20]**

	Résistance à la compression (kg/cm <sup>2</sup> )			Indice CaO libre	SO <sub>3</sub> (% en poids)
	1 Jour	7 Jours	28 Jours		
Tests de base (0% pneus)	20	30,5	54,5	1,1	1,8
Essais de pneus déchiquetés	19,8	30,5	54,5	0,9	1,9

L'influence de l'utilisation des pneus déchiquetés sur les émissions atmosphériques a été évaluée. Les valeurs de concentration mesurées pour certains polluants gazeux sont rapportées dans le tableau 4-10.

On note en général une réduction significative des émissions de polluants gazeux à la cheminée particulièrement les NO<sub>x</sub> avec l'utilisation de copeaux de pneus [20].

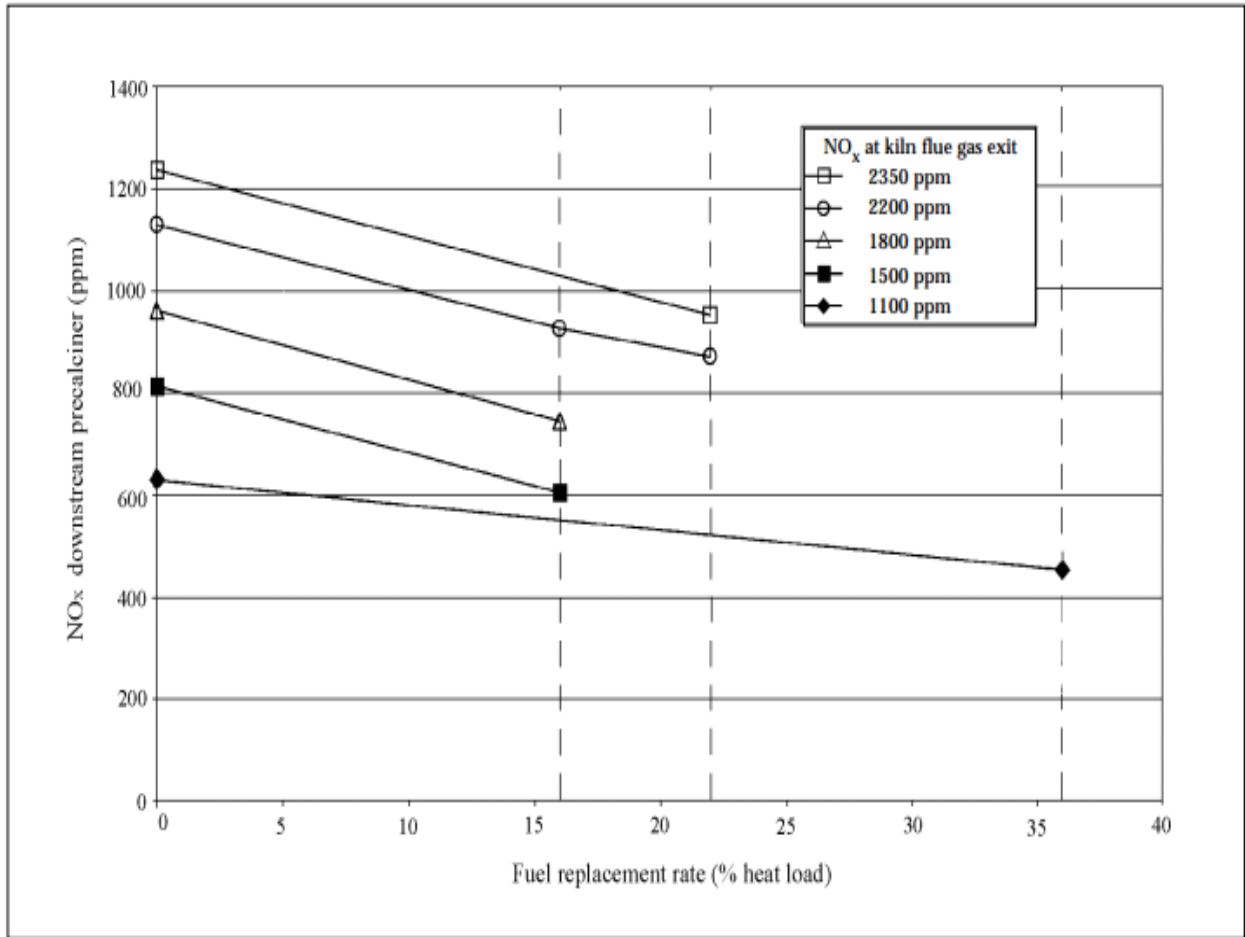
**Tableau 4- 10 : Concentration de polluants classiques dans la cheminée**

*(Données relatives à 0°C, 1 atm, 11% d'O<sub>2</sub>)*

<b>Polluant</b>	<b>Test de base</b>	<b>Essai de combustion du pneu déchiqueté (remplacement de la chaleur à 36%)</b>
<b>Particules totales (mg/m<sup>3</sup>)</b>	2,1	2,2
<b>SO<sub>2</sub>(ppm)</b>	15	Non-déecté
<b>NOx(ppm)</b>	360	210
<b>CO (ppm)</b>	138	168
<b>COV (ppm en C)</b>	2,2	< 0,1
<b>O<sub>2</sub> (%)</b>	15,4	15,5

Cette réduction est illustrée à la Figure 4-7, qui indique - pour cinq niveaux d'émission de NOx représentatifs à la sortie des gaz de combustion du four (allant de 1100 à 2350 ppm et en fonction du mode de combustion du brûleur principal) et pour chaque taux de remplacement du combustible appliqué - concentrations correspondantes de NOx mesurées en aval de la section d'alimentation en carburant du précalcinateur [20].

En ce qui concerne les résultats des tests de référence, les réductions observées pour ces dernières valeurs au cours de l'utilisation du pneu semblent plutôt régulières et sont comprises dans la plage comprise entre 200 et 280 ppm à 0% O<sub>2</sub> [20].



**Figure 4- 6 : Concentrations de NOx en aval de la section d'alimentation du pneu par rapport aux taux de substitution du carburant à différents niveaux de NOx dans la sortie des gaz de combustion du four**  
[20]

L'influence de l'utilisation des pneus déchiquetés sur les émissions atmosphériques a été évaluée avec deux campagnes de mesures différentes. Le tableau 4-11 donne les valeurs en trace de certains polluants dans l'atmosphère.

Tableau 4-11 : Concentrations de polluants en traces (Données se référant à 0 ° C, 1 atm, 11% d'O<sub>2</sub>) [20]

Polluant	Test de base (taux de substitution de 0%)	Essai de combustion du pneu déchiqueté (taux de substitution de 36%)
Antimonium ( $\mu\text{g} / \text{m}^3$ )	< 0.2	< 0.2
Arsenic ( $\mu\text{g} / \text{m}^3$ )	< 0.2	< 0.2
Cadmium ( $\mu\text{g} / \text{m}^3$ )	< 0.1	< 0.1
Chrome ( $\mu\text{g} / \text{m}^3$ )	0.2	0.7
Cuivre ( $\mu\text{g} / \text{m}^3$ )	8,8	2,1
Manganèse ( $\mu\text{g} / \text{m}^3$ )	0,1	1,5
Mercure ( $\mu\text{g} / \text{m}^3$ )	4	4
Plomb ( $\mu\text{g} / \text{m}^3$ )	< 0.2	< 0.2
Nickel ( $\mu\text{g} / \text{m}^3$ )		
Sélénium ( $\mu\text{g} / \text{m}^3$ )	< 0.2	< 0.2
Vanadium ( $\mu\text{g} / \text{m}^3$ )	0.2	0.2
Zinc ( $\mu\text{g} / \text{m}^3$ )	10	10
HAP ( $\mu\text{g} / \text{m}^3$ )	0,5	0,3
PCDD / F ( $\mu\text{g} / \text{m}^3$ en I-TEQ)	< 0.1	< 0.1

En conclusion, les essais à grande échelle ont montré la faisabilité de l'utilisation des pneus usagés sur le plan technique et environnementale [20].

#### IV.3.4.2. Cas de l'unité Titan cement company: (L'effet sur la qualité de ciment)

Utilisation de carburant dérivé des pneus TDF lors de la cuisson du clinker.

Des expériences ont été réalisées de deux façons :

- 1- Utilisation du charbon dans le précalcinateur et du coke de pétrole dans le bruleur principal,
- 2- Utilisation avec un rapport égal du charbon et du TDF dans le précalcinateur et le coke de pétrole dans le bruleur principal.

88% du combustible total est utilisé dans le brûleur principal et 12% dans le précalcinateur.

La substitution n'a eu lieu que dans le précalcinateur et 6% du carburant utilisé était du TDF.

Les échantillons ont été collectés aux points suivants [24] :

- La sortie du four ;
- La tour de pulvérisation ;
- Les filtres électrostatiques ;
- Le quatrième étage du cyclone ;
- L'entrée du four.

La composition des carburants utilisés est donnée dans le tableau 4-12

Les valeurs des paramètres les plus importants tels que les quantités de soufre, d'azote, de carbone, la valeur calorifique des combustibles les plus utilisés sont proches à ceux du TDF, ce qui montre que le TDF est un combustible efficace pour la combustion du clinker. En plus les pneus contiennent du fer et du zinc dans leurs compositions qui augmentent les propriétés chimiques et la qualité du ciment [18].

**Tableau 4- 12 : Analyse typique comparative des carburants [24]**

Analyse	Charbon	Coke de pétrole	TDF
Volatile (%)	13	36,8	72
Cendres (%)	7,1	14	7
Carbone (%)	82,6	80,6	84
Soufre (%)	3,4	4,6	5
Azote (%)	1,75	0,3	1,75
Pouvoir calorifique inférieure (kJ / kg)	32 480	27 430	31 400

Afin d'évaluer la mise en œuvre du TDF dans le processus de production de clinker, il est nécessaire de mesurer les alcalis, les chlorures et les sulfates volatils contenus à différentes étapes du processus.

Le principal problème lié à l'utilisation de différents combustibles lors de la combustion du clinker est la concentration élevée en soufre dans la composition du pneu et de la tendance à la production de sels alcalins volatils tels que KCl, K<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>, Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>, Ca<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> [24] et la formation des couches solides à l'entrée et à la sortie du four à ciment [18] (tableaux 4-13 et 4-14).

**Tableau 4- 13 : Analyses chimiques des échantillons sans TDF [24]**

Des échantillons	Perte au feu (%)	K <sub>2</sub> O (%)	Na <sub>2</sub> O (%)	Cl <sup>-</sup> (%)	SO <sub>3</sub> (%)	Zn (%) soluble	Total Zn (%)	Total Cr (%)
Clinker	-	0,6	0,2	0,01	0,72	0.01·10 <sup>-3</sup>	0,04	7·10 <sup>-3</sup>
Poussière de tour de refroidissement	36,55	0,99	0,27	0,14	1,4	-	-	-
Filtre à poussière	36,18	1,07	0,18	0,9	3,01	-	-	-
Quatrième cyclone poussière	22,73	1,76	0,21	0,92	3,62	-	-	-
Poussière d'entrée du four	36,58	0,55	0,2	0,01	0,16	-	0,04	-

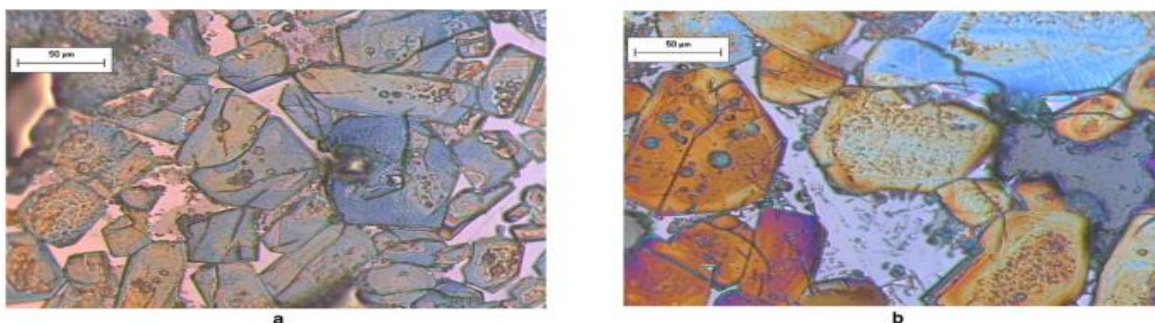
**Tableau 4- 14 : Analyses chimiques des échantillons avec TDF [24]**

Des échantillons	Perte au feu (%)	K <sub>2</sub> O (%)	Na <sub>2</sub> O (%)	Cl <sup>-</sup> (%)	SO <sub>3</sub> (%)	Zn (%) soluble	Total Zn (%)	Total Cr (%)
Clinker	-	0,59	0,2	0,01	1.13	0.01·10 <sup>-3</sup>	0,08	7·10 <sup>-3</sup>
Poussière de tour de refroidissement	36,99	1.11	0,15	0,48	0.84	-	-	-
Filtre à poussière	36,32	1,12	0,18	0,39	2.99	-	-	-
Quatrième cyclone poussière	22,73	1,75	0,21	0,91	4.07	-	-	-
Poussière d'entrée du four	35.65	0,55	0,2	0,01	0.16	-	0,08	-

Il ressort de la comparaison des tableaux 4-13 et 4-14, que les valeurs des alcalis, des chlorures et des sulfates sont similaires dans le cas de la présence ou non du TDF comme combustible [24].

Un autre facteur étudié est la quantité de zinc dans le clinker produit. Ceci est examiné en raison de l'effet direct que la quantité de zinc dans le clinker sur le processus de durcissement du ciment.

Les tableaux 4-13 et 4-14, indiquent la quantité de zinc dans le clinker. Les résultats montrent que sa concentration ne pose aucun problème dans la limite raisonnable des quantités de pneus utilisées lors de la combustion du clinker. La quantité de chrome total lorsque le TDF est utilisé dans la combustion du clinker est identique à la quantité de chrome total lorsque le TDF n'est pas utilisé [24]. La microstructure du clinker a été examinée par microscopie optique. L'utilisation de TDF comme combustible secondaire lors de la combustion du clinker ne semble pas affecter sa microstructure ni la formation de ses phases caractéristiques minéralogiques (Figure 4-9 (a) et (b))



**Figure 4- 7 : Microstructure d'un échantillon de clinker sans TDF (a) et avec TDF (b)[1]**

Les résultats de cette analyse et les propriétés du ciment CEM I-52.5 sont présentés dans le tableau 14. Les mesures de la résistance à la compression lorsque du TDF était utilisé lors de la combustion du clinker étaient similaires à celles de l'absence du TDF. Comme prévu en raison de la teneur en zinc, il y a une augmentation du temps de durcissement du ciment, tandis que l'augmentation de la demande en eau du ciment peut également être attribuée à la distribution granulométrique.

**Tableau 4- 15 : Propriétés du ciment et mesures de la résistance à la compression pour le ciment CEM I-52.5[24]**

Propriétés du ciment	Sans TDF (MPa)	Avec TDF (MPa)
Composition, %	95.5 Clinker	96.5 Clinker
	4.5 Gypse	3.5 Gypse
Blaine,	3860	3680
Initial setting time ( IST), min	180	220
Final setting time ( FST), min	115	170
H2O, %	25,6	27,4
Age		
1 jour	20	17,5
2 jour	29,5	30,4
7 jour	43	46,7
28 jour	63	62,3

Les conclusions tirées des travaux de recherche actuels sont les suivantes [24]:

- Le procédé industriel de frittage dans des fours rotatifs, impliqué dans la fabrication du ciment, offre la possibilité d'utiliser le TDF comme combustible alternatif en remplacement des combustibles classiques. Cela implique des avantages environnementaux tels que la destruction complète des composés organiques présents dans les résidus en raison des températures et des temps de séjours élevés dans une atmosphère riche en oxygène.
- L'utilisation du TDF comme carburant de substitution est rentable. L'utilisation de pneus usés réduit le tonnage du combustible fossile utilisé. Enfin, du fer par les pneus peut réduire les coûts d'acquisition du fer.
- La qualité du produit final (ciment) reste intéressante [24].



#### IV.4. Cimenterie Biskria ciment

Les besoins thermiques d'une cimenterie sont essentiellement liés à la cuisson des matières premières dans le four, les matériaux devant être portés à une température de l'ordre de 1450 à 1500°C. Le souci permanent des cimentiers en matière de l'amélioration de leur efficacité est de réduire la consommation d'énergie par tonne de ciment.

Les lignes de production dans la cimenterie BC sont alimentées par le gaz naturel de Hassi R'mel. Le tableau 4-16 présente quelques paramètres de fonctionnement du four de la ligne 1.

*Tableau 4- 16 : Paramètres de process Four 1*

<i>Caractéristique</i>	<i>Unité</i>	<i>Nominale</i>	<i>Moyenne%</i>	<i>Min%</i>	<i>Max%</i>	<i>Ecart%</i>
<i>Débit alimentation</i>	<i>(T/h)</i>	<b>417</b>	<b>364</b>	<b>280</b>	<b>420</b>	<b>53</b>
<i>Gaz bruleur</i>	<i>(Nm<sup>3</sup>/h)</i>	<b>8300</b>	<b>9112</b>	<b>8000</b>	<b>9500</b>	<b>812</b>
<i>Gaz Précalcinateur</i>	<i>(Nm<sup>3</sup>/h)</i>	<b>10423</b>	<b>8865</b>	<b>5966</b>	<b>10914</b>	<b>1558</b>
<i>Nox</i>	<i>(ppm)</i>		<b>425</b>	<b>66</b>	<b>1014</b>	
<i>Consommation chaleur spécifique</i>	<i>(Kcal/kg de clinker)</i>	<b>760</b>	<b>764</b>	<b>667</b>	<b>909</b>	<b>4</b>
<i>Température sortie préchauffeur</i>	<i>(°C)</i>	<b>335</b>	<b>344</b>	<b>324</b>	<b>399</b>	<b>9</b>
<i>Cyclone 5 Top Temp</i>	<i>(°C)</i>	<b>870</b>	<b>888</b>	<b>840</b>	<b>915</b>	<b>18</b>
<i>Température Clinker</i>	<i>(°C)</i>	<b>70</b>	<b>57</b>	<b>10</b>	<b>220</b>	<b>13</b>

Le tableau 4-17 présente la consommation totale du gaz naturel, la production totale de clinker et la consommation totale d'énergie thermique par tonne de clinker produite durant le mois de mai de l'année 2019.

*Tableau 4- 17 : Consommation totale d'énergie et d'eau par tonne de clinker produite durant le mois de mai de l'année 2019*

	<b>Unité</b>	<b>Quantité</b>	<b>Production total clinker (t)</b>	<b>Consommation spécifique</b>
<b>Electricité</b>	<b>Kw</b>	<b>39759</b>	<b>363298</b>	<b>0.1kw/tonne</b>
<b>Gaz</b>	<b>Nm<sup>3</sup></b>	<b>4365311,8</b>	<b>363298</b>	<b>12 Nm<sup>3</sup>/tonne</b>
<b>Eau</b>	<b>m<sup>3</sup></b>	<b>50228</b>	<b>363298</b>	<b>0.14 m<sup>3</sup>/tonne</b>

Pour suivre la consommation thermique de la cimenterie, on détermine la consommation thermique spécifique  $CTS$ , ce paramètre est utilisé dans le secteur des cimenteries et sa valeur change d'un procédé à un autre [44].

$$CTS = \frac{\text{Consommation thermique}(GJ)}{\text{Production du clinker (tonne)}} = \frac{\text{Consommation gaz naturel} * PCI_{gaz}}{\text{Production clinker}}$$

$CTS$  : Consommation thermique spécifique ( $GJ/ t$  de clinker) [30]

Consommation du gaz naturel : ( $Nm^3/ans$ )

$PCI_{gaz}$  : Pouvoir calorifique inférieur du gaz ( $GJ/ Nm^3$ )

$Production clinker$  : Quantité du clinker produite ( $tonnes/ans$ )

Nous notons que [30,31] :

- Le pouvoir calorifique inférieur du gaz naturel Algérien est de :  $CI_{gaz} = 36,43$  ( $MJ/Nm^3$ ). ( $PCI_{gaz} = 37,44$   $MJ/Nm^3$ )
- Le pouvoir calorifique inférieur du pneu :  $PCI_{pneu} = 34,5$  ( $MJ/Kg$ )

D'après ses données, nous constatons que le pouvoir calorifique des pneus est comparable avec celui du gaz naturel.

Pour le cas de notre cimenterie, la consommation thermique (calorifique) spécifique standard d'un atelier de cuisson en voie sèche à cinq étages de cyclones (tour de préchauffage) et sans précalcinateur est de  $760kcal /kg$  de *clinker* soit de l'ordre de  $3,18$   $GJ/$  tonne de clinker.

Nous remarquons d'après le tableau 4-16 que la consommation thermique spécifique moyenne dépasse la consommation thermique spécifique standard durant le mois de mai, ce qui peut se traduire par des pertes considérables de l'énergie thermique.

D'après les données du tableau 4-17, les besoins en gaz nécessaire pour produire une tonne de clinker est de  $12$   $Nm^3$ .

### Calcul de débit de pneus déchiquetés

Le taux de substitution varie selon les conditions de fonctionnement de chaque cimenterie. Plusieurs études ont montré que le meilleur apport énergétique est entre 20% et 25%, soit en termes d'impact sur l'environnement, soit en termes de qualité de ciment. Si le taux substitution énergétique est supérieur à 25%, la production de clinker peut augmenter considérablement [18].

La UK Environment Agency a mené une étude sur plusieurs usines de fabrication de ciments et utilisant 25% de pneus. Cette étude a montré une réduction de l'impact environnemental, notamment pour les Nox [5].

D'autres études ont montré qu'une substitution énergétique de 20% n'a pas un impact négatif significatif sur l'environnement [23].

Dans notre cas, et pour des raisons citées précédemment, nous avons pris un taux de substitution de 25%. Ce taux nous permettra de calculer la quantité de pneus déchiquetés nécessaire à injecter dans le four rotatif de ciment. Cette quantité doit produire en équivalent énergétique la même quantité de chaleur qu'avec le gaz. Cette quantité est calculée selon l'équation (1) :

$$PCI_{pneu} * D_{pneu} = 25\% * PCI_{gaz} * D_{gaz} \quad (1)$$

Avec :

$D_{gaz}$ : le débit du gaz ;  $D_{gaz} = 10423 Nm^3/h$ ;  $PCI_{gaz} = 36,43 MJ/Nm^3$

$PCI_{pneu}$  : le débit de pneu ;  $PCI_{pneu} = 34.5 MJ/Kg = 34.5 MJ/kg$

$$D_{pneu} = 25\% * (PCI_{gaz} * D_{gaz}) / PCI_{pneu} \quad (2)$$

Soit :  $D_{pneu} = 2751,5 kg/h$

Nous avons estimé la quantité de gaz nécessaire pour alimenter le four 1 sans arrêt pendant un mois :

$$Q_{gaz} = 0,4 * Q_T = 0,4 * 4365311,8 = 1\,746\,124,72 Nm^3 \quad (3)$$

Avec le taux de substitution de 25% de pneus, nous allons calculer la quantité de gaz substituée :

$$Q_{gaz.s} = 0,25 * Q_{gaz} = 436\,531,18 Nm^3$$

Cette quantité de gaz peut fournir une quantité d'énergie  $E_s$  :

$$E_s = Q_{gaz.s} * PCI_{gaz} = 1876140 * 36,43 = 15\,902\,830,8874 MJ$$

La quantité de pneus nécessaire pour fournir la quantité d'énergie  $E_s$  :

$$Q_{pneu} = \frac{E_s}{PCI_{pneu}} = 460\,951,62 kg = 460,951 tonnes$$

D'après le tableau 4-4, le poids d'un pneu est :

- $P_{vl}= 7$  kg pour les voitures léger, et
- $P_{pl}=50$  kg pour le poids lourd

- **Pour les  $P_{vl}$**  (En utilisant des pneus léger seulement) :

le nombre de pneus de poids léger est :

$$N_{pneu} = \frac{Q_{pneu}}{P_{vl}} = 65\,850,23 \text{ pneus}$$

- **Pour les  $P_{pl}$**  (En utilisant des pneus de poids lourd seulement) :

Le nombre de pneus de poids léger est :

$$N_{pneu} = \frac{Q_{pneu}}{P_{pl}} = 9\,219,03 \text{ pneus}$$

Nous avons un besoin d'un gisement de **65 850,23** pneus/mois pour assurer la production du ciment avec un taux de substitution de 25% pendant un mois. Avant l'injection dans le four, ce gisement sera déchiqueté à des copeaux, pour cela il nous faut calculer le volume de la fosse nécessaire pour le stockage.

Ce volume est calculé comme suit :

Notons qu'une tonne de PUNR correspond à 139 pneus de type VL, ou bien à 18,5 pneus de type PL, permettant d'avoir dans les deux cas un volume équivalent de  $2\text{m}^3$  de pneus broyés [19].

Ce qui nous permet d'avoir un volume global des pneus broyés pour une autonomie de un mois :

$$V_{Pneus\ broyé} = \frac{N_{pneu} * 2}{139} = 947,48 \text{ m}^3$$

On devrait prévoir une fosse de stockage des pneus déchiquetés d'un volume de **947.48 m<sup>3</sup>**, nécessitant un volume supplémentaire en piles de pneus entiers aussi important, ce qui est énorme et génère un encombrement gênant.

Avec l'utilisation d'un broyeur qu'il peut déchiqueter jusqu'à 1000 pneus de voiture ou 200 pneus de camion, soit une capacité de 12 tonnes de pneus par heure [39], nous avons besoin seulement d'environ **66** heures de fonctionnement du broyeur (moins de **6** jour de fonctionnement) pour assurer l'approvisionnement en combustible, pneus usagés déchiqueter, d'un mois de production continue du clinker.

## Gestion de stock des pneus

La substitution de gaz naturel par les pneus usés a permis d'avoir une autre source de matière première d'énergie avec des caractéristiques différentes, nécessitant un approvisionnement et un stockage adéquats.

Les stocks sont indispensables à l'entreprise afin d'éviter les ruptures qui engendrent parfois l'arrêt de la production et parfois la perte de certains clients. Mais les stocks de pneus coûtent cher, notamment en ce qui concerne l'espace que nous devons réserver dans la cimenterie, ainsi les risques liés à leur stockage. En effet, le stockage des piles de pneus usés ou déchiquetés est une source d'encombrement pour les voies de la circulation au sein de la cimenterie, comme il peut provoquer des incendies avec la formation de nuage de fumée qui mènent à des conséquences graves.

Pour les raisons citées précédemment, la gestion de stock du nouveau carburant est très importante et a un double avantage, elle permet d'assurer :

- La sécurité au sein l'entreprise et
- Le fonctionnement continu de la chaîne de production du ciment.

**Pour un stock d'équilibre de dix jours :** On réduit l'autonomie en pneus usagés à 10 jours seulement, pour réduire au mieux le volume stocké.

Un jour de fonctionnement du four rotatif sans arrêt, avec l'apport de substitution de 25%, nécessite une quantité de pneus broyée de :

$$N_{pneu,jour} = \frac{N_{pneu}}{30} \approx 2\,195 \text{ pneus/jour}$$

Soit :

$$Q_{pneu,jour} = 2195 * 7 = 15365 \text{ kg} = 15,365 \text{ tonnes/jour}$$

Sot :

$$N_{pneu,10jour} = 2195 * 10 = 21950 \text{ pneus/10jours}$$

Pour une durée de dix jours, la cimenterie doit assurer un stockage de **153,65 tonnes**

Pour produire cette quantité de pneus broyée, on a besoin de faire fonctionner le broyeur pendant environ **22 heures**, et d'une fosse de stockage de volume **94,75 m<sup>3</sup>**.

#### **IV.4.1. Analyse des matières entrantes**

Les opérateurs qui sont responsables des fours doivent développer des critères de sélection pour l'acceptation des matières premières (pneus usés), et doivent effectuer une évaluation continue du procédé tenant compte des points suivants :

- Nom et adresse du transporteur/fournisseur, origine des pneus, quantité, teneur en cendres, chaleur spécifique, concentration des chlorures, fluorures, soufre et métaux lourds ;
- Chaque fournisseur de matériaux doit être obligé de fournir, au début et ensuite périodiquement, des échantillons représentatifs du combustible, qui seront employés à des fins d'analyse du combustible, avant qu'il ne soit livré à l'usine ;
- Le fournisseur devra également inclure une fiche de données détaillant les propriétés chimiques et physiques du combustible fourni ;
- Les caractéristiques physiques et chimiques de l'échantillon doivent être examinées et vérifiées selon les spécifications.

Un système fiable pour la gestion de l'assurance qualité et de contrôle qualité doit être mis en place, y compris en ce qui concerne le prélèvement et l'analyse périodiques des matières réellement fournies à l'usine, et la vérification que le seuil des contaminations respecte les spécifications fixées.

#### **IV.4.2. Installation et procédé d'alimentation d'un four de cimenterie en pneus usagés déchiqueté**

Dans ce cas, Les pneus sont amenés à l'usine par camion. Ils proviennent de différentes sources : voitures de tourisme, camions, autobus, etc., Les pneus sont déchargés manuellement du camion sur le convoyeur. Le convoyeur achemine les pneus vers un déchiqueteur.

Ce déchiqueteur de pneus est spécialement conçu pour couper des pneus entiers, même des pneus radiaux ceinturés d'acier, en une seule étape. Selon les spécifications du constructeur du broyeur, nous pouvons déchiqueter jusqu'à 1000 pneus de voiture ou 200 pneus de camion, soit 12 tonnes de pneus par heure [32].

Les copeaux nominaux qui en résultent sont de taille appropriée pour le carburant dérivé des pneus, seront stockés dans une fosse de stockage pour alimenter le four.

Pour ce faire, l'installation se compose de façon générale d'une fosse de stockage dans laquelle puise un grappin piloté par laser, d'une réserve-tampon sous la forme d'une trémie de grand volume par rapport au grappin équipée d'un détecteur de niveau. Le produit est évacué

de cette trémie vers le bas par un extracteur à tablier avec tambour écreteur qui l'emporte sur un transporteur-doseur à bande, équipé d'une bascule intégratrice associée à une commande pour réguler la vitesse de l'extracteur.

Un convoyeur incliné achemine le produit vers une cheminée d'alimentation du four [32].

#### **IV.4.2.1. Description détaillée de l'installation d'alimentation d'un four :**

L'installation d'alimentation du four, en raison de sa souplesse, est particulièrement adaptée aux déchets formés à partir de pneus usagés [32].

Pour comprendre le fonctionnement de l'installation, nous pouvons se référer aux figures suivantes [32] :

- La figure 4-8 est une vue schématique d'ensemble en perspective de l'installation ;
- La figure 4-9 est le schéma de l'ensemble de l'installation
- La figure 4-10 est une vue schématique en perspective de la trémie et de son dispositif d'évacuation ;

L'installation (figure 4-10) débute par une réserve principale 1, constituée par exemple d'une fosse 2 et d'une soute 3 protégées par des murs tels que 4 et une couverture 5 formant un bâtiment 6. On peut également laisser cette réserve principale 1 en plein air sans murs de protection. On peut aussi se dispenser de fosse. Elle présente une ouverture frontale 7 permettant l'accès aux camions venant déverser les déchets dans la fosse et la soute [32].

Au-dessus de ce volume, se déplace un grappin de préhension 8 monté sur un chariot-palan automateur 9 le long d'un rail supérieur 10 entre une extrémité 11 de la réserve et une trémie 12 disposée au voisinage de l'autre extrémité 13 de la réserve principale 1.

Les mouvements de ce grappin 8 sont commandés par un automate en liaison avec un détecteur 14 de niveau bas ou haut et bas du volume présent dans la trémie 12 de manière à la remplir partiellement en occupant un volume minimal 15 par les morceaux 16 des pneus déchiquetés provenant du grappin 8. [32]

A cet effet, le volume de prise du grappin 8 est choisi 10 de façon à ne présenter qu'une petite fraction du volume total de stockage de la trémie 12.

La trémie en forme de pyramide renversée présente une sortie latérale 17 sous la forme d'une ouverture rectangulaire 18, équipée d'un dispositif évacuateur 19 formé d'un extracteur 20 à tablier coopérant avec un tambour écreteur 21.

Le tambour écreteur 21 est disposé en partie supérieure de l'ouverture de sortie de préférence à un emplacement tel qu'il constitue son bord supérieur 22. Il présente des nervures ou des réglettes longitudinales 23. Il tourne dans le sens opposé de sortie des produits comme indiqué par la flèche.

L'extracteur 20 à tablier est incliné à environ 30° par rapport au plan de sortie des produits. Il est formé d'un tambour amont 24 à son extrémité avant 25 et d'un tambour aval 26 à son extrémité arrière 27 entre lesquelles circule un tablier 28.

L'extrémité avant 25 est située sensiblement à la verticale du tambour écreteur 21.

Le sens de rotation du tambour écreteur et l'avance de l'extracteur sont contraires comme indiqué par les flèches. Ainsi, le tambour écreteur tourne dans le sens contraire de la sortie des produits, c'est-à-dire travaille à refouler les produits vers l'intérieur de la trémie 12 comme un organe de rabattement alors que l'extracteur 20 emporte ces mêmes produits en les évacuant vers le bas [32].

Cette association de moyens travaillant de cette façon procure toute satisfaction en ce qui concerne la sortie régulière des pneus déchiquetés, même lorsqu'ils se trouvent dans un état de forte imbrication.

Les produits peuvent ainsi sortir de la trémie par l'ouverture rectangulaire 18 à une vitesse contrôlée voisine de celle de l'extracteur car, grâce au tambour écreteur 21, on introduit une force dynamique de refoulement qui empêche le bourrage et repousse vers l'arrière du fond de la trémie les copeaux en trop présents à la sortie. Ceux-ci sont déplacés ou ramenés dans la couche d'évacuation naturelle qui s'avance en nappe par glissement vers la sortie.

C'est le rôle du tambour écreteur 21 qui débarrasse la sortie de toute surcharge de produits occasionnant un bourrage trémie 12 et le déverse sur un transporteur pondéral 29 de transfert ou transporteur-doseur à bande avec éventuellement des bords de contenance, équipé en extrémité d'une bascule intégratrice 30 qui contrôle le débit réel et régule la vitesse de l'extracteur 20 et celle du transporteur 29 en fonction du débit de manière à acheminer vers le four un flux continu à débit constant de copeaux.

Ce débit est souhaité le plus constant possible pour des raisons d'homogénéité de la production et de qualité du produit final.

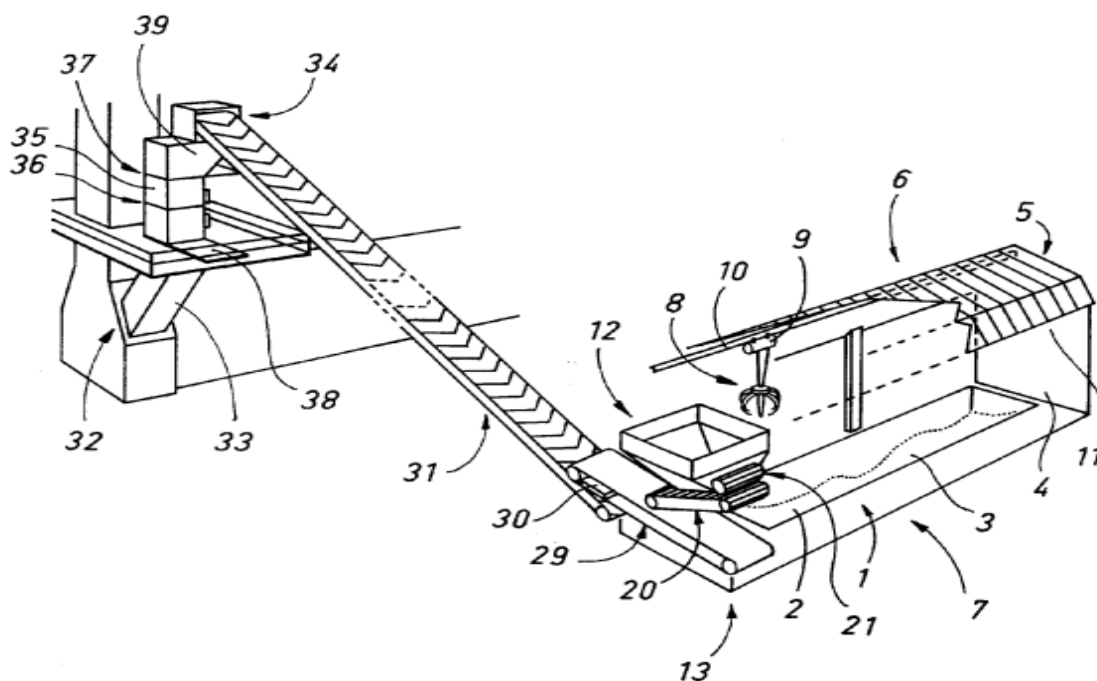
Les copeaux sont ensuite apportés au four par un ou plusieurs transporteurs classiques d'acheminement 31, par exemple à chevrons, en raison de la forte pente. Ils sont admis dans le four par une entrée auxiliaire 32 qui communique par une cheminée 33 d'alimentation



secondaire avec une entrée supérieure 34, entrée dans laquelle est engagée l'extrémité du ou des transporteur(s) d'acheminement 31.

La cheminée d'alimentation 33 comporte un volume de sécurité sous la forme d'un sas de sécurité 35 d'isolation et de dépression à zones d'entrée et de sortie séparées par deux trappes 36 et 37 en raison de la haute température régnant dans le four. Elle comporte également une trappe de sécurité 38[32].

Par ailleurs, et de façon optionnelle, l'entrée supérieure 34 dans la cheminée est décalée par rapport au trajet vertical de chute dans la cheminée par un bloc oblique 39 pour éviter à un éventuel retour de flamme d'atteindre l'extrémité haute du transporteur d'acheminement 31 [32].



*Figure 4- 8: une vue schématique d'ensemble en perspective de l'installation [32]*

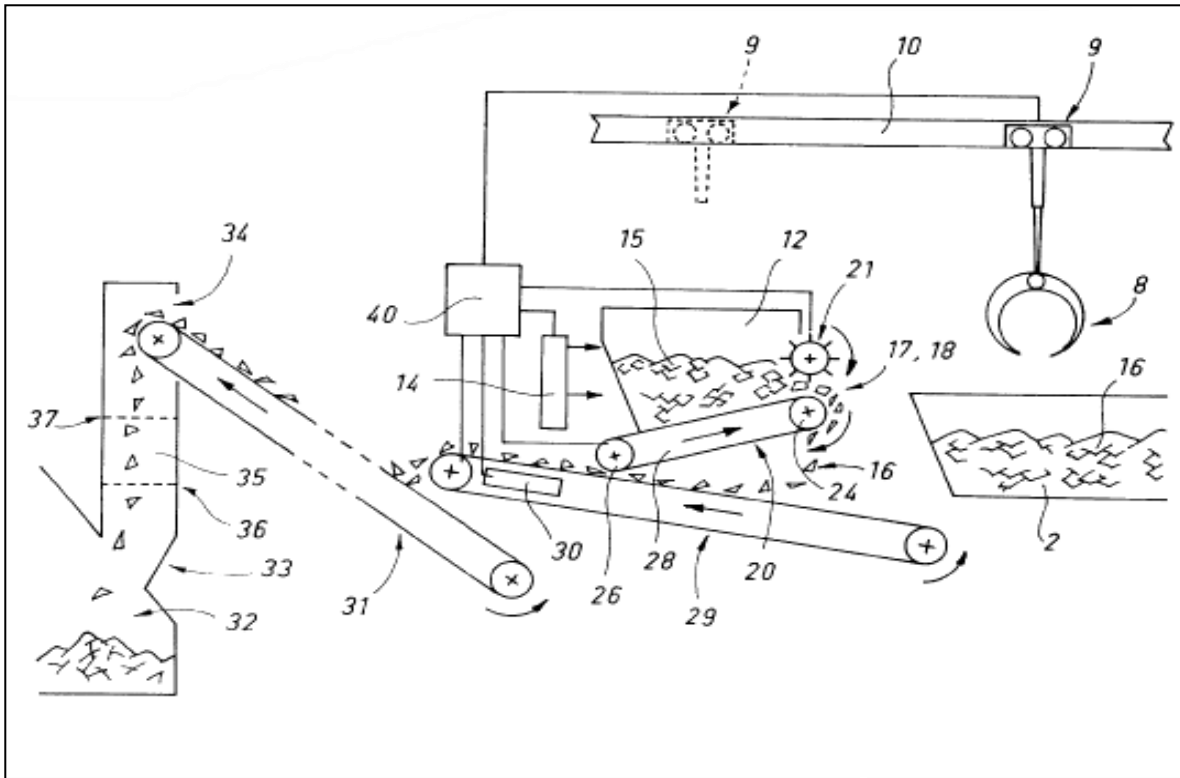


Figure 4- 10: Schéma de l'ensemble de l'installation [32]

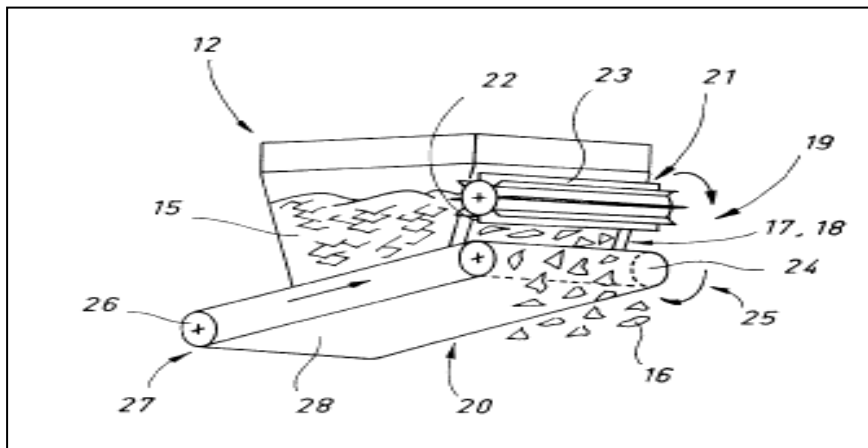


Figure 4- 9: Vue schématique en perspective de la trémie et de son dispositif d'évacuation [32]

#### **IV.5. Conclusion**

L'application de carburants de substitution pourrait être un défi concurrentiel en matière d'économie d'énergie et de coûts pour les cimenteries. Il en résulte une diminution du coût d'élimination des contaminations environnementales et des déchets solides [18].

Cependant, dans un pays en développement comme l'Algérie, il peut être très difficile de remplacer les pneus usés par des carburants traditionnels sans soutien juridique et environnemental, car les carburants traditionnels Algérienne, comme le gaz naturel, ne coûtent pas cher et l'investissement dans l'utilisation de carburants de substitution dans l'industrie du ciment n'est pas rentable.

La quantité de pneus usés en Algérie dépasse largement 1,5 millions pneus par an, ces quantités viennent s'ajouter aux millions qui encombrant notre environnement, ce qui pourrait être utilisé comme carburant alternatif dans les cimenteries Algériennes. Les pneus à combustion complète dans les fours à ciment ne dégagent pas de contaminants environnementaux, du fait que les matières organiques brûlent complètement dans les fours à ciment et que les métaux lourds sont piégés dans les filtres. Ces avantages permettent d'économiser des millions de mètres cubes de gaz naturel par an.

En plus, le procédé d'injection des pneus usés déchiquetés ne nécessite pas des coûts très importants, et sans aucun changement ni modification dans la ligne de production de ciment

# **Chapitre V : Analyse des modes de défaillance de leurs effets et de leur criticité (AMDEC)**

## V.1. Introduction

Dans le présent chapitre, nous allons faire une description de l'installation et son fonctionnement. IL existe plusieurs méthodes pour l'analyse fonctionnelle qui ont pour but de simplifier et faciliter la compréhension du processus [12]. Nous allons utiliser, en premier lieu, la méthode SADT (The Structured Analysis and Design Technique), pour mieux comprendre le fonctionnement de l'installation et le procédé d'alimentation d'un four de cimenterie en pneus usagés déchiqueté.

En deuxième lieu, l'application de la méthode d'analyse dysfonctionnelle (AMDEC) nous permet de mettre en évidence tous les modes de défaillance que peut subir le système, ainsi que leurs causes, leurs effets et leurs criticités.

## V.2. Méthode AMDEC

### V.2.1. Historique et domaine d'application

L'Analyse des Modes de Défaillance et de leurs Effets (AMDEC) a été employée pour la première fois dans le domaine de l'industrie aéronautique durant les années 1960.

Son utilisation s'est depuis largement répandue à d'autres secteurs d'activités tels que l'industrie chimique, pétrolière et nucléaire.

De fait, elle est essentiellement adaptée à l'étude des défaillances de matériaux et d'équipements et peut s'appliquer aussi bien à des systèmes de technologies différentes (systèmes électriques, mécaniques, hydrauliques...) qu'à des systèmes alliant plusieurs techniques [33].

### V.2.2. Déroulement

De manière très schématique, une AMDEC se déroule sous la forme suivante :

- **Point de départ** : Décomposition du système en plusieurs composants.
- **Étape 1** : Recensement des modes de défaillance de chaque composant.
- **Étape 2** : Effets et conséquences des modes de défaillances des composants.
- **Sortie** : Risques découlant des défaillances des composants.

Dans les faits, il est intéressant de se doter de tableaux tant en qualité de support pour mener la réflexion que pour la présentation des résultats (Tableau 5-1 ) [33].

*Tableau 5- 1 : Exemple d'un tableau de type AMDEC*

Élément	Fonction	Mode de défaillance	Causes	Effets	Détection	Évaluation				Actions
						F	G	D	C	

### V.2.3. Limites Et Avantages

L'AMDEC s'avère très efficace lorsqu'elle est mis en œuvre pour l'analyse de défaillances simples d'éléments conduisant aux défaillances globales du système [33].

De par son caractère systématique et sa maille d'étude généralement fine, elle constitue un outil précieux pour l'identification de défaillances potentielles et les moyens d'en limiter les effets ou d'en prévenir l'occurrence [33].

Comme elle consiste à examiner chaque mode de défaillances, ses causes et ses effets pour les différents états de fonctionnement du système, l'AMDEC permet d'identifier les modes communs de défaillances pouvant affecter le système étudié.

Les modes communs de défaillances correspondent à des évènements, qui de par leur nature ou la dépendance de certains composant du système, provoquent simultanément des états de panne sur plusieurs composants du système. Les pertes d'utilités ou des agressions externes majeurs constituent par exemple, en règle générale, des modes communs de défaillance.

Dans le cas de système particulièrement complexes comptant un grand nombre de composants, l'AMDEC peut être très difficile à mener et particulièrement fastidieuse compte tenu de volume important d'informations à traiter. Cette difficulté est décuplée lorsque le système considéré comporte de nombreux états de fonctionnement [33].

Par ailleurs l'AMDEC considère des défaillances simples et peut être ultimes complétée, selon les besoins de l'analyse par des méthodes dédiées à l'étude de défaillances multiples comme l'analyse par arbre des défaillances par exemple [33].

### V.3. Application de la méthode AMDEC :

Il s'agit d'une analyse critique qui se déroule en six étapes (figure 5-1):

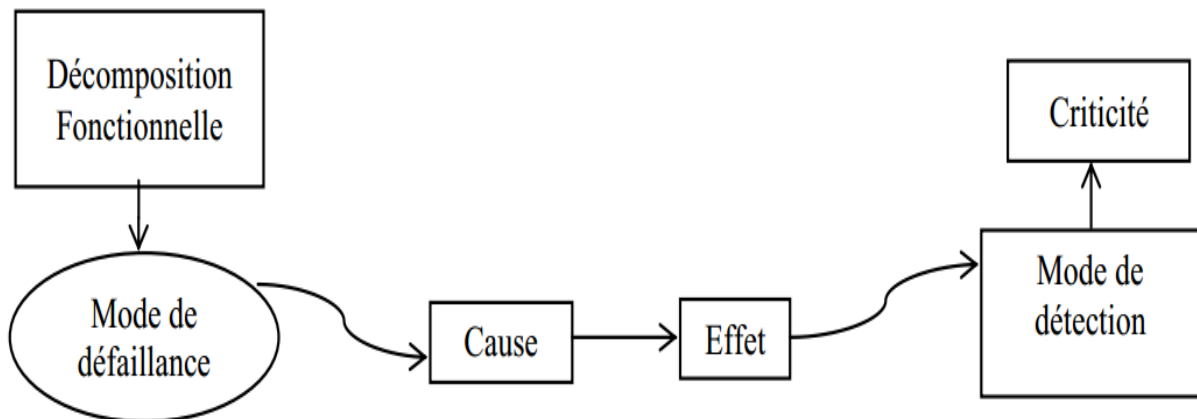


Figure 5- 1 : Etapes d'une analyse de type AMDEC [34]

#### V.3.1. Décomposition fonctionnelle

La décomposition fonctionnelle ayant pour but d'identifier les modes de défaillances en vue d'éliminer ou de minimiser leurs conséquences. C'est une étape indispensable car il est nécessaire de bien connaître les fonctions de l'installation pour en analysant ensuite les risques de dysfonctionnement [35].

##### V.3.1.1. Caractéristiques techniques des Convoyeurs à bandes

Un convoyeur à bande a pour fonction de transporter en continu des produits en vrac mélangés ou homogènes, sur des distances allant de quelques mètres à des dizaines de mètres [36].

Un convoyeur à bande se compose essentiellement des éléments présentés dans la figure 5-2 :

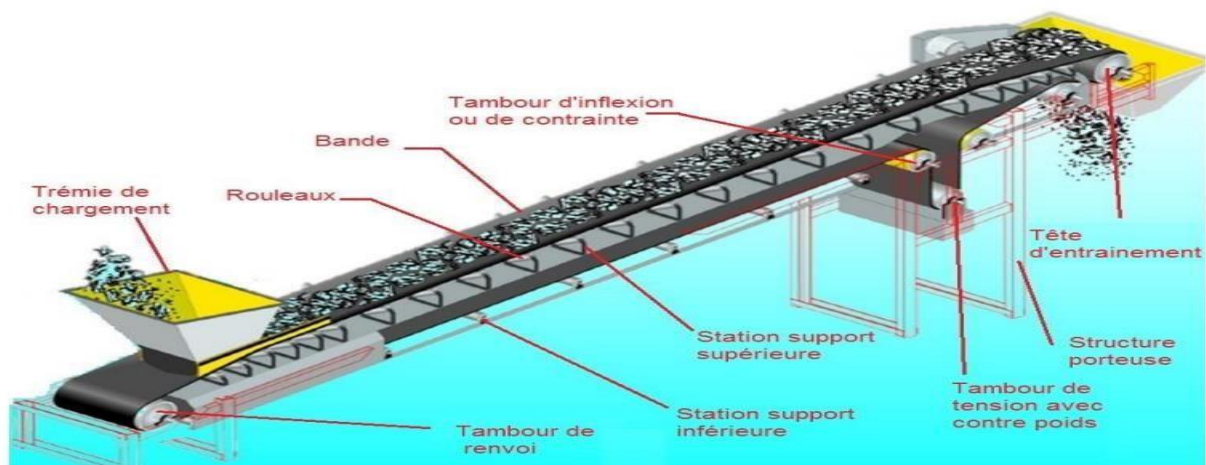


Figure 5- 2 : les éléments d'un système de transport avec un convoyeur [37]

### V.3.1.1.1. La bande transporteuse

La bande transporteuse (figure 5-3) est une courroie sans fin qui a été conçue à partir des techniques acquises dans la fabrication des câbles métalliques, des textiles, des synthétique et à partir de l'exploitation des différents types de transport. Le transport des matériaux du début jusqu'à la tête du convoyeur. Le transport se présente sous deux formes principales, forme en plate et en auge [38].

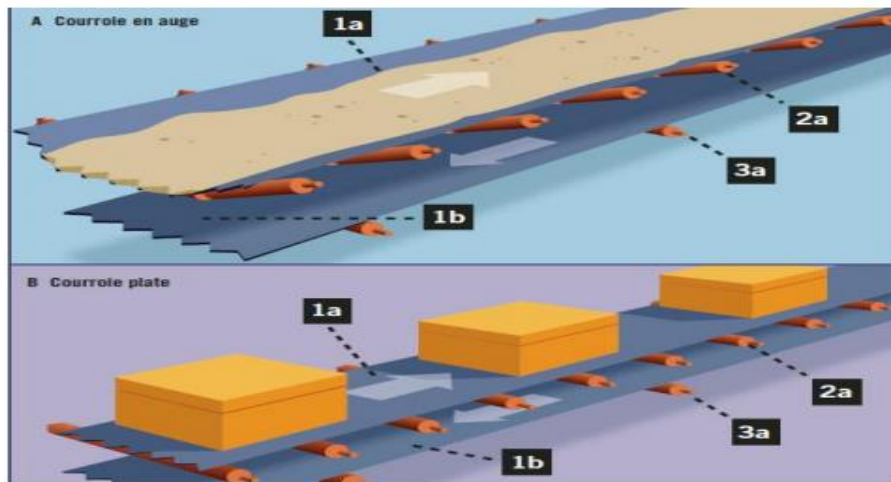


Figure 5- 3: *Convoyeur à bandes plates et en auges* [37]

Il existe deux types de face :

1. La face externe, qui est en contact avec les matériaux transportés,
2. La face interne qui est en contact avec les rouleaux et les tambours.

La courroie comporte aussi deux brins :

- Brin supérieur 1a (ou brin porteur)
- Brin inférieur 1b (ou brin de retour)

La bande transporteuse doit présenter les qualités suivantes :

- Une très grande flexibilité pour qu'elle s'enroule sans contrainte sur les tambours et qu'elle prenne la forme de l'auge.
- Une capacité de supporter la matière transportée.
- Une résistance à l'action des matériaux abrasifs, aux frottements dus à la mise en vitesse des matériaux, à la chaleur, aux chocs et au pliage.

L'un des principaux composants du convoyeur est la bande dont la fonction (figure 5-4) est:

- Recevoir le produit en vrac



- Transmettre la force nécessaire pour déplacer cette charge

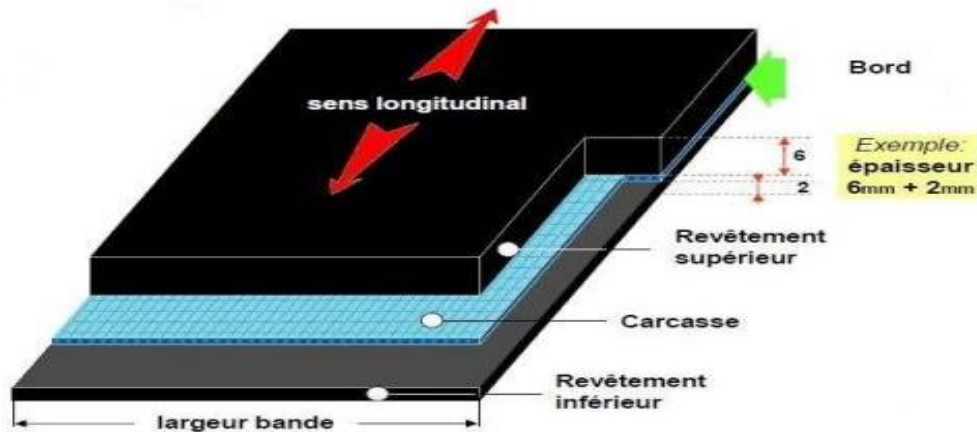


Figure 5- 4: Les composants d'une bande [37]

**La carcasse** : La carcasse a pour rôle d'assurer la résistance de la bande aux efforts de traction et à sa tenue dans le sens transversal et aussi d'absorber les impacts provoqués lors du chargement du produit et lors du passage de la bande chargée sur les rouleaux porteurs.

Ainsi on distingue deux types de bandes à carcasse :Textile (figure5-5) et métallique (fig5-6)

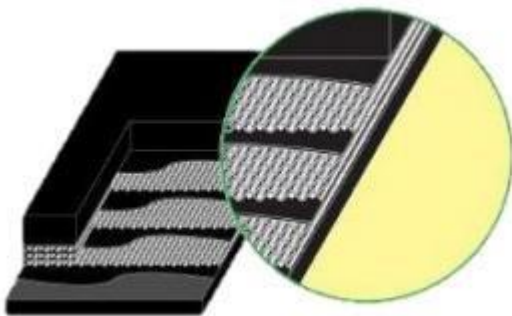


Figure 5- 5: Bande à carcasse textile

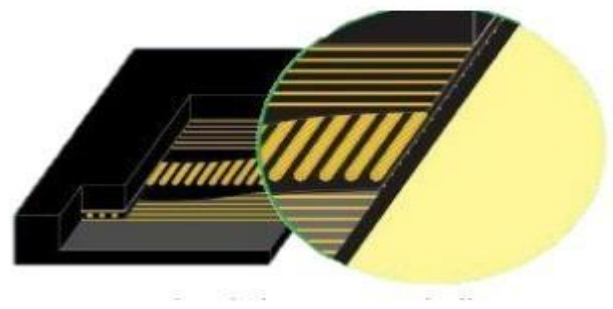


Figure 5- 6 : Bande à carcasse métallique

**Le revêtement** : Le revêtement a pour rôle de protéger la carcasse de certains effets néfastes comme :

- Le contact du matériau transporté avec la bande.
- Les frottements de la bande contre les tambours, les rouleaux, les patins de glissement...
- Les agents atmosphériques ou l'ambiance du travail (pluie, soleil, neige, froid, chaleur)

Ces effets provoquent des nuisances comme :

- L'abrasion ou la coupure des arêtes du matériau.

- Des agressions diverses (gras, hydrocarbures, produits corrosifs, produits inflammable...).
- La corrosion des carcasses métalliques.

### V.3.1.1.2. Les tambours

Les tambours utilisés dans les convoyeurs à bande ont pour fonction d'entraîner la bande ou l'amener à changer de direction [38].

Les tambours peuvent être recouverts d'une garniture afin d'augmenter le coefficient de frottement entre la bande et le tambour, de réduire l'usure par abrasion de ce dernier ou de créer un effet autonettoyant.

La figure 5-7 représente les différents tambours ainsi que les différents composants d'un convoyeur :

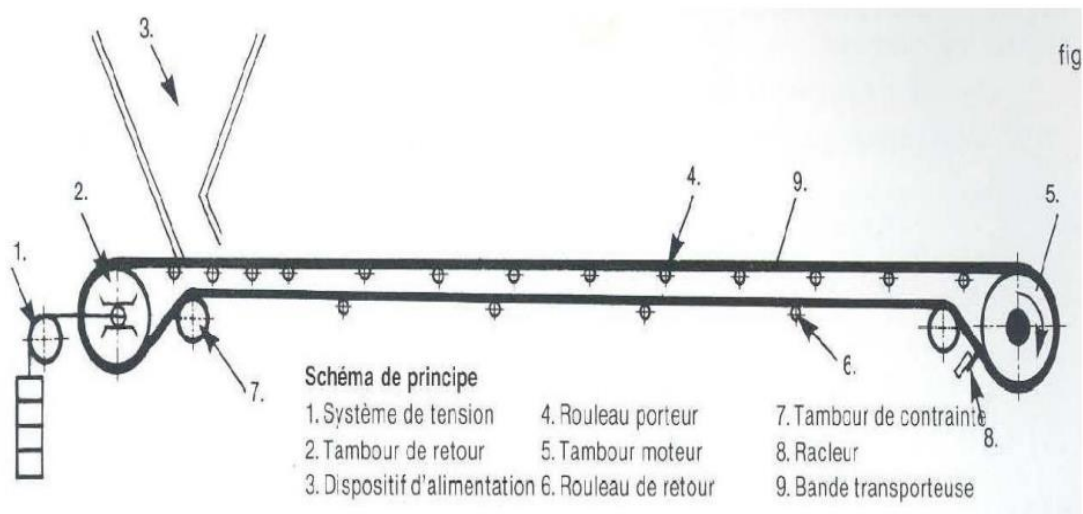


Figure 5- 7 : : Composants du convoyeur [35]

Il existe différents types de tambour :

- ✓ **Tambour d'entraînement** : mû par le moteur, il entraîne la bande.
- ✓ **Tambour contrainte** : en amont ou en aval d'un tambour, ramène ou maintient la bande en ligne avec le brin de retour.
- ✓ **Tambour tendeur** : maintient la tension de la bande au moyen d'un dispositif de tension par gravité ou autre.
- ✓ **Tambour de déviation** : ramène la bande à la hauteur du brin porteur.
- ✓ **Tambour de queue** : renvoie la courroie vers le brin porteur

#### V.3.1.1.3. Les rouleaux

Ils soutiennent la bande et tournent librement et facilement tout en réduisant la résistance au mouvement de la bande chargée (figure 5-8).

Ce sont les composants les plus importants du convoyeur et ils représentent une part considérable de l'investissement total. Il est fondamental de les dimensionner correctement pour garantir les performances de l'installation et une exploitation économique [36].

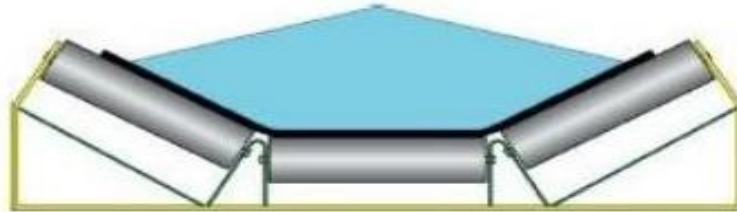


Figure 5- 8: *Fixation des rouleaux sur la station-support* [35]

##### V.3.1.1.3.1. Stations porteuses en auges

Les rouleaux porteurs en auges sont généralement fixés sur des pattes de fixation soudées à une traverse ou un châssis. L'angle d'inclinaison des rouleaux latéraux varie entre  $0^\circ$  et  $45^\circ$ .

##### V.3.1.1.3.2. Stations supports inférieures (brin de retour)

Ils peuvent comporter un seul rouleau sur toute la largeur ou bien deux rouleaux formant un "V" et inclinés à  $10^\circ$  (figure 5-9).

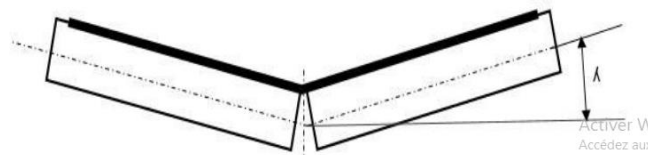


Figure 5- 9: *Rouleaux porteurs inférieures* [35]

##### V.3.1.1.4. Le châssis

Le châssis est la partie en métal sur laquelle s'installent les stations support du convoyeur.

Elle est généralement fixée sur le sol [38].



Figure 5- 10: *Châssis utilisé dans le transport des produits [35]*

#### V.3.1.1.5. Dispositifs de tension :

Ils assurent la tension requise dans la bande pour éviter qu'elle ne glisse sur le tambour d'entraînement :

- Par gravité : une masse guidée attaché au tambour tendeur assure la tension.
- Manuel ou automatique : actionné manuellement par des vis ou automatiquement par un système de commande.

#### V.3.1.1.6. Éléments mobiles de transmission d'énergie

Produire et transmettre l'énergie nécessaire au tambour d'entraînement afin de mouvoir ou de retenir la courroie (figure 5-11). Plusieurs configurations sont utilisées [39].

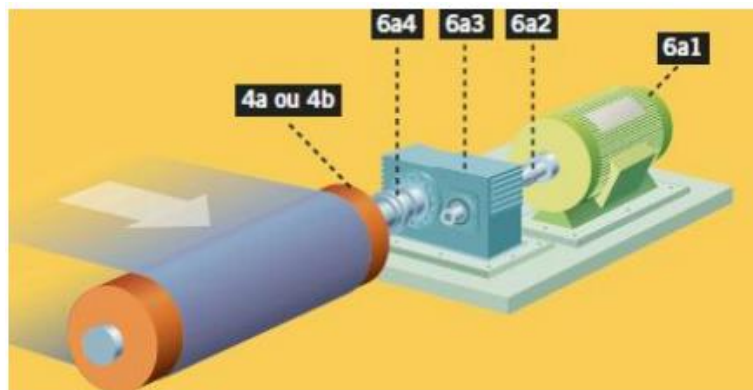


Figure 5- 11 : : *Système de transmission d'énergie [35]*

6a1 : Moteur.

6a2 : Accouplement du moteur et du réducteur.

6a3 : Réducteur.

6a4 : Accouplement du réducteur et du tambour d'entraînement.

4a : Tambour d'entraînement.

### V.3.1.1.7. Système de chargement

Guider et contrôler le débit des matériaux vers la bande, il peut prendre plusieurs formes :

- Trémie.
- Glissière.
- Chargeur automatique.
- Poussoirs.

#### V.3.1.1.7.1. Trémie

La trémie est conçue pour faciliter le chargement et le glissement du produit en absorbant les chocs de la charge et en évitant les colmatages et l'endommagement de la bande (figure 5-12). Elle permet un chargement immédiat du produit et résout les problèmes d'accumulation.

La trémie est constituée principalement des éléments suivants [36] :

- 7a : Corps de la trémie : un guide, contrôle le débit de matériaux.
- 7b : Lisse de guidage : centre le matériau ou les charges isolées sur la bande ou les diriger dans une direction donnée.
- 7c : Bavette d'étanchéité : empêche la fuite du matériau par les côtés (bavette d'étanchéité latérale) ou par l'arrière (bavette d'étanchéité arrière).
- 7d : Porte de régulation : contrôle le débit.

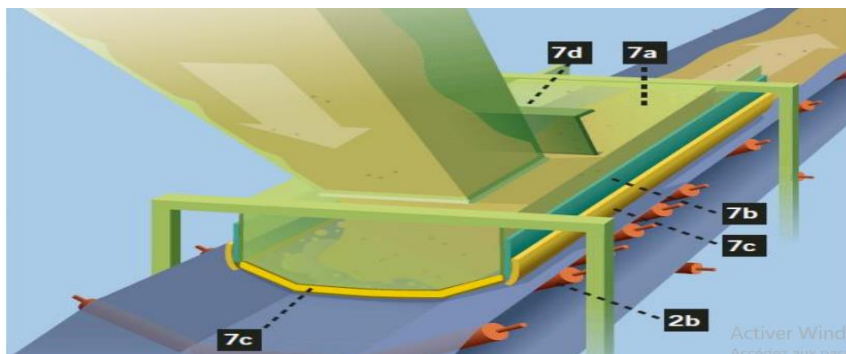


Figure 5- 12: *Système de chargement* [35]

#### V.3.1.1.8. Dispositif de nettoyage à racleur

Le dispositif de nettoyage à racleur (figure 5-13) permet d'enlever le produit qui adhère aux deux faces de la bande (face externe ou face interne) ou à un tambour. Il prend souvent la forme d'un grattoir ou d'une brosse [37] :

- Le dispositif de nettoyage de la face externe de la bande : se trouve généralement au point de déchargement.

- Dispositif de nettoyage de la face interne de la bande : se trouve généralement juste avant le tambour de queue.



Figure 5- 13: *Dispositif de nettoyage à racleur* [37]

### V.3.1.2. Description technique du broyeur

#### V.3.1.2.1. Définition d'un broyeur

Un broyeur est une machine de broyage des matériaux qui est réalisé par un mariage de deux parties suivantes (figure 5-14, tableau 5-1) [40] :

- Partie mécanique ; qui comporte une trémie, des axes, des outils de broyage (couteaux, lames, marteaux...etc.), un réducteur de vitesse, et une carcasse qui assure l'assemblage de tous ces éléments...etc.
- Partie électrique ; qui contienne un circuit de commande (tableau de commande), et un circuit de puissance (moteur électrique ou thermique).

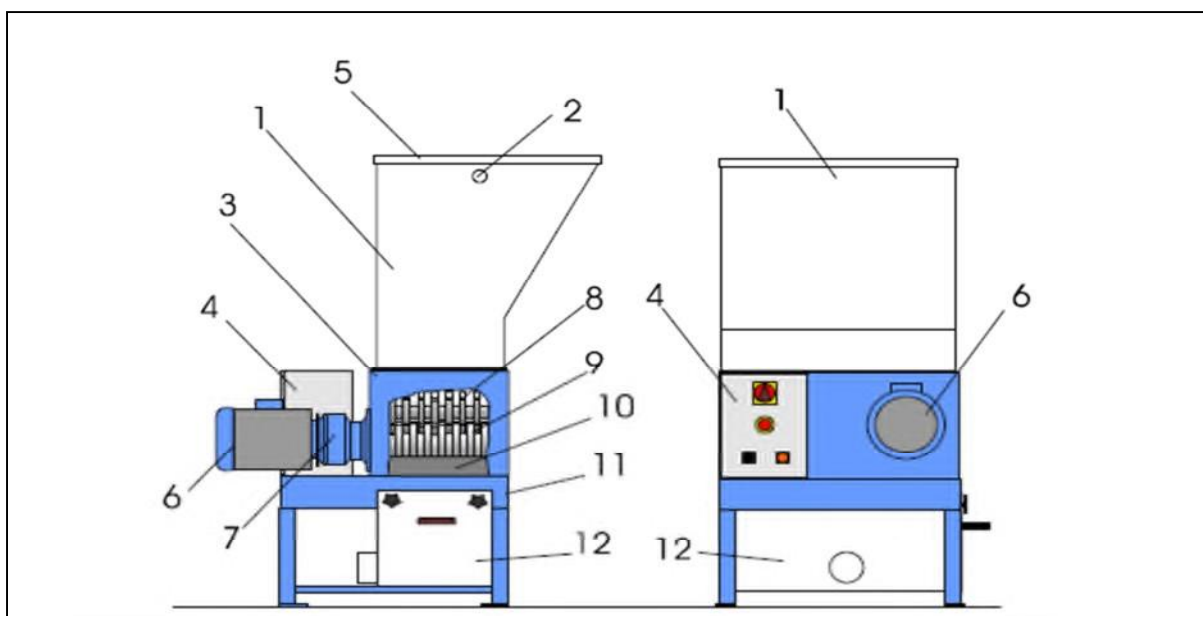


Figure 5- 14: *les différents éléments d'un broyeur* [40]

Tableau 5- 2: *les différents éléments d'un broyeur [40]*

<b>Elément</b>	<b>Description</b>
1	Trémie de chargement
2	Orifice de levage et de transport
3	Corps de la machine
4	Tableau électrique
5	Couvercle de la trémie
6	Moteur
7	Réducteur
8	Disques d'introduction
9	Groupe fraises
10	Grille
11	Base de la machine
12	Récipient avec goulot d'évacuation

#### **V.3.1.2.2. Caractéristiques du broyeur**

Les broyeurs de pneus sont utilisés par les sociétés dites éliminatrices, s'occupant du recyclage des pneumatiques usagés qui ne peuvent être mis en décharge, mais doivent être recyclés. Les broyeurs de pneus interviennent lors de la première étape du recyclage des pneumatiques usagés.

Les broyeurs de pneus sont adaptés pour le broyage de pneus de différentes tailles provenant des voitures ou des camions.

Les broyeurs sont caractérisés principalement :

- ✓ Par leur puissance,
- ✓ Leur débit massique et
- ✓ Le matériau auquel ils sont destinés ainsi que leur vitesse.

Ils sont dotés d'une unité de chargement qui est souvent une simple trémie, cette partie remplit une fonction qui n'est pas négligeable, en effet ; elle doit placer la matière le mieux possible dans le groupe de broyage afin d'éviter tout problème au cours de la trituration. L'action coupante du broyeur est réalisée par une série d'éléments tranchants (couteaux, lames...etc.) qui coupent les pneus en se croisant.



Les éléments principaux du système sont les arbres qui portent des couteaux ou des lames, et la motorisation du groupe de broyage est assurée habituellement par un moteur électrique asynchrone, qui permet à travers un réducteur de vitesse, de transmettre sa puissance aux arbres ayant les éléments tranchants, afin d'exercer les forces nécessaires au broyage [40].

### V.3.1.2. La méthode SADT

#### V.3.1.2.1. Principe de base de la méthode SADT

SADT est structurée selon la méthodologie de l'analyse qui suit une stratégie de décomposition fonctionnelle afin de créer un modèle hiérarchique du système. Le bloc de construction de base de ce modèle est une boîte noire représentant une opération ou une fonction du système. Cette boîte opérationnelle a quatre types d'interfaces qui se distinguent graphiquement (figure 5-15) :

- Les entrées de l'opération sont montrées entrant sur le côté gauche ;
- Les flux de commande sont affichés en haut ;
- Les résultats apparaissent sur le côté droit ;
- Des mécanismes, tels que des outils, sont prévus au niveau du fond.

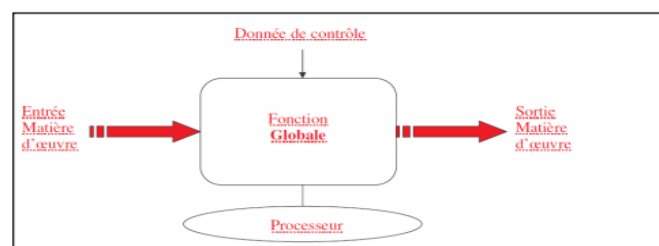


Figure 5- 15: *Modèle de diagramme de la méthode SADT*

Un modèle SADT représente :

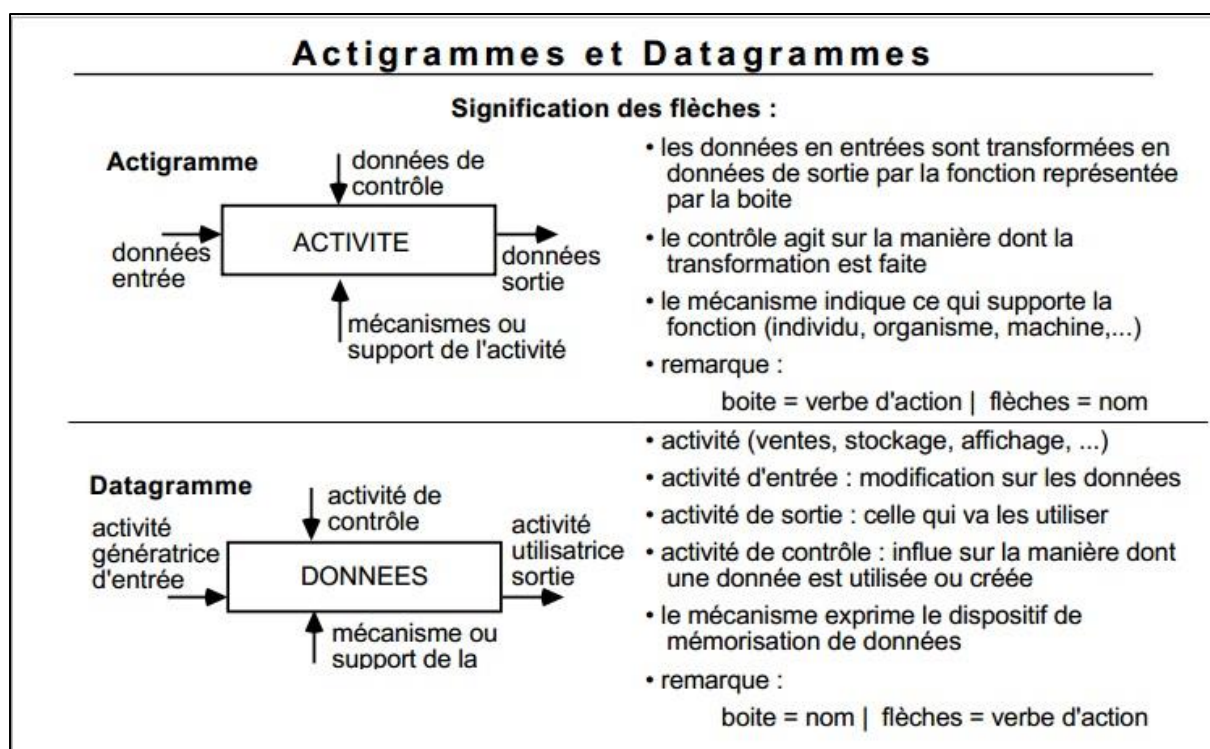
- Les données (objet du domaine) ;
- Les activités (opération).

L'utilisation de la méthode fait appel à deux diagrammes (figure 5-16):

- un actigramme qui privilégie les activités et
- un datagramme qui privilégie les données .



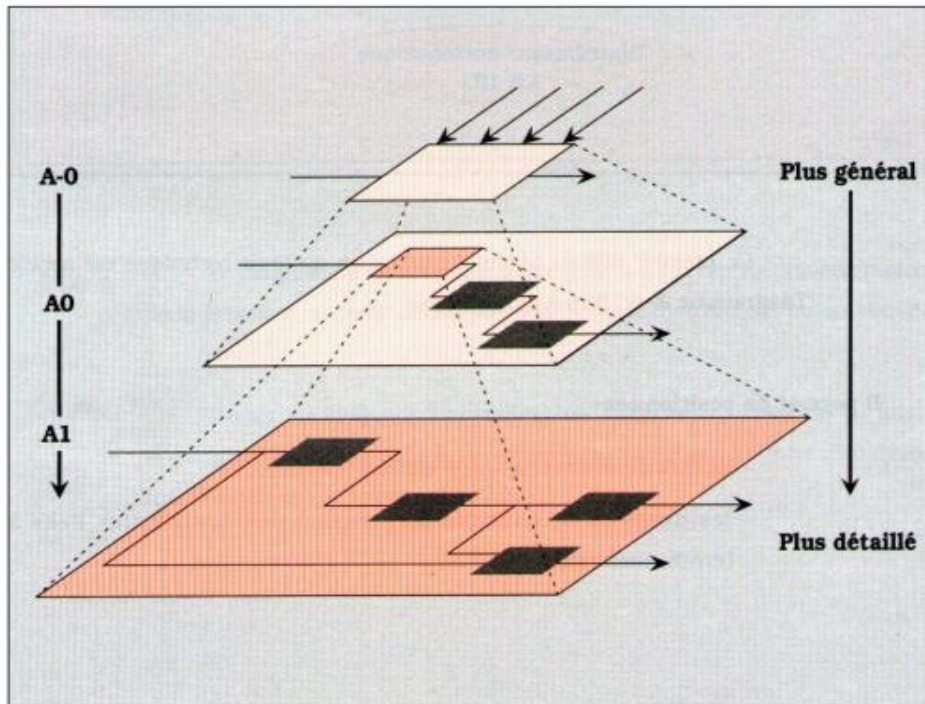
Dans notre cas l'intérêt se porte sur la circulation du carburant (pneus usagés) sous forme de flux de matière dans les différentes parties du processus. Nous avons utilisé la représentation des actigrammes pour le système d'alimentation du four.



**Figure 5- 16: Comparaison entre les représentations par Actigrammes et Datagrammes**

### V.3.1.2.2. Les niveaux de représentation de SADT :

Les modèles de SADT contiennent un ensemble coordonné de diagrammes, chacun avec la même forme graphique. Ces diagrammes se composent de texte ainsi que de deux types d'objets, boîtes et lignes dirigées. Un modèle se compose d'un ensemble de diagrammes et le niveau inférieur des diagrammes est une extension d'une seule boîte sur le diagramme de niveau supérieur. Le premier niveau est nommé niveau A-0, il représente la fonction principale du système, et les autres systèmes plus détaillés qui vont suivre par la suite (figure 5-17).

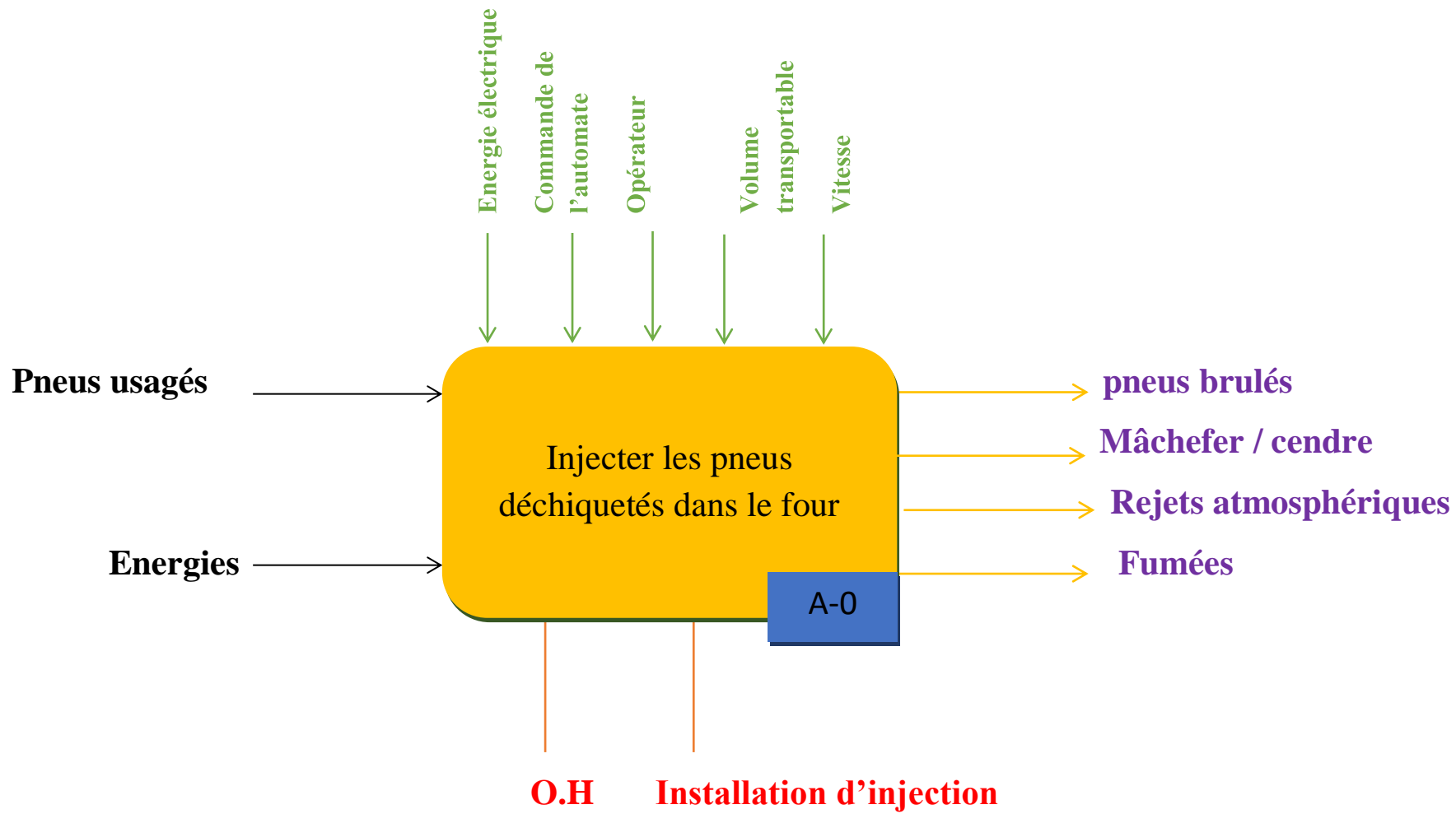


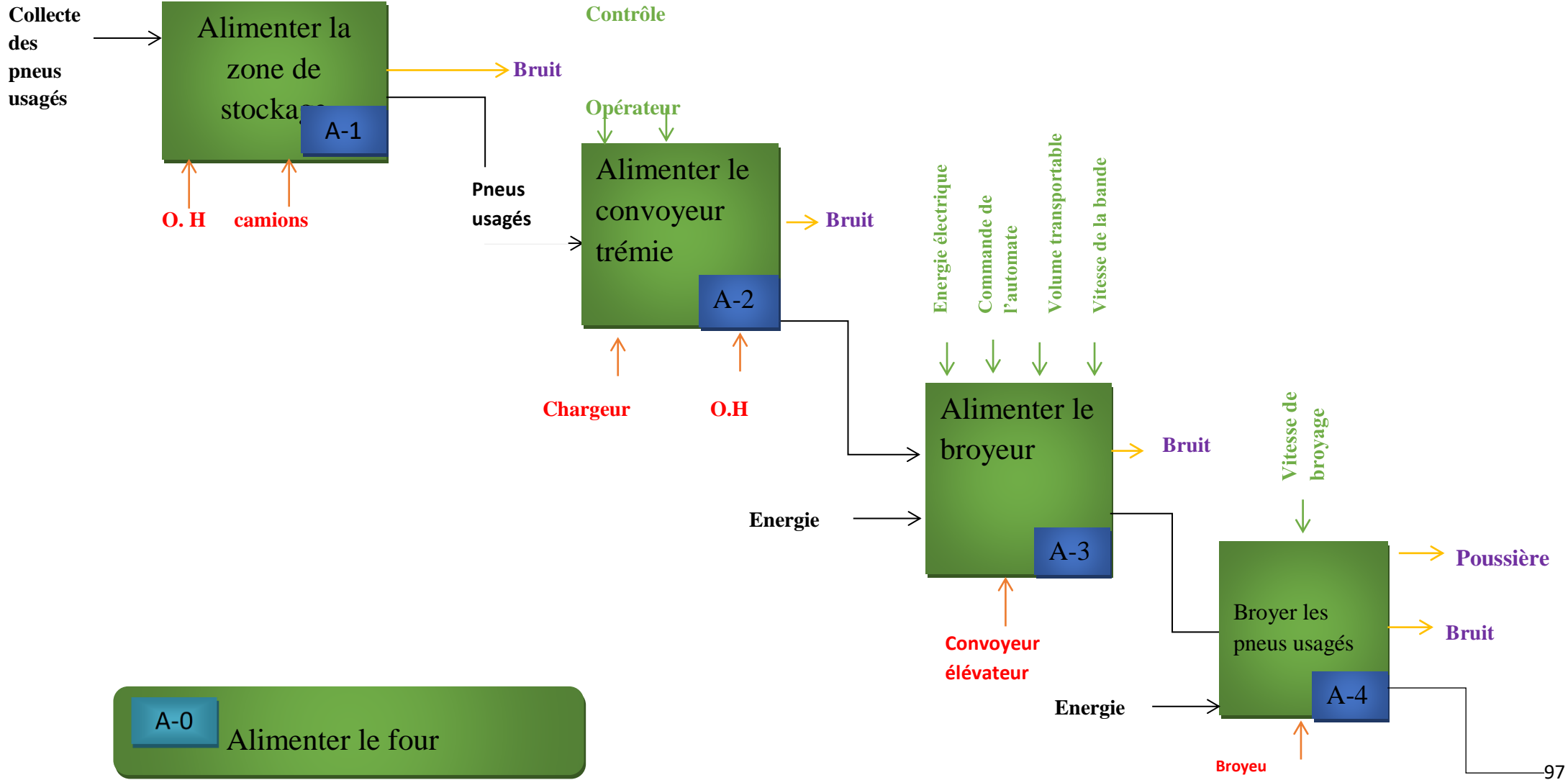
**Figure 5- 17: Hiérarchies des diagrammes des niveaux**

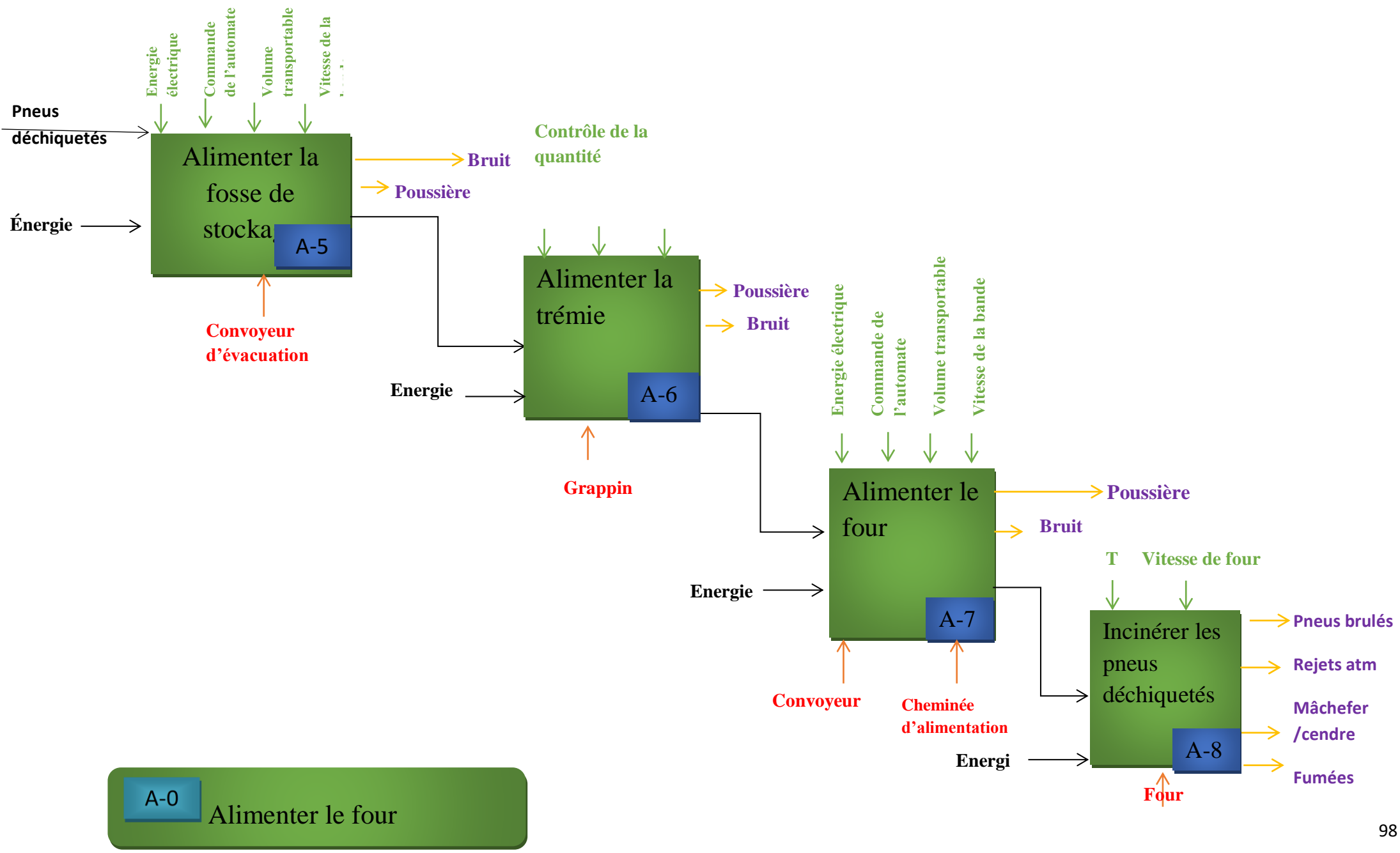
#### **V.3.1.2.3. Application de la méthode :**

La ligne d'alimentation du four par les pneus déchiquetés est composée de :

- ✚ Un convoyeur trémie qui assure l'alimentation en continue des déchets.
- ✚ Un convoyeur élévateur qui permet l'alimentation du déchiqueteur.
- ✚ Un déchiqueteur appelé aussi broyeur à cisailles rotatives.
- ✚ Un convoyeur qui évacue les déchets broyés avant l'incinération.
- ✚ Une fosse de stockage des pneus broyés.
- ✚ Un convoyeur qui assure l'alimentation du four.







### V.3.2. Modes de défaillance

Un mode de défaillance est la manière par laquelle un dispositif peut devenir défaillant, c'est à dire ne plus remplir sa fonction. On distingue :

- Plus de fonction : la fonction cesse de se réaliser.
- Pas de fonction : la fonction ne se réalise pas lorsqu'on la sollicite.
- Fonction dégradée : la fonction ne se réalise pas parfaitement (altération des performances).
- Fonction intempestive : la fonction se réalise alors qu'elle n'est pas sollicitée.

### V.3.3. Causes de défaillance

Une cause de défaillance est l'événement initial pouvant conduire à la défaillance d'un dispositif par l'intermédiaire de son mode de défaillance [41].

Il existe trois types de cause conduisant à une défaillance :

- Causes internes au matériel,
- Causes externes dues à l'environnement, au milieu et à l'exploitation...,
- Causes externes dues à la main d'œuvre.

### V.3.4. Effet de la défaillance

L'effet d'une défaillance est, par définition, la conséquence subie par l'utilisateur. Il est associé au couple mode-cause de la défaillance et correspond à la perception finale de celle-ci. Les tableaux 5-3 et 5-4 donnent la grille de cotation des fréquences et de gravité de défaillances pour AMDEC respectivement.

*Tableau 5- 3: Grille de cotation des fréquences de défaillances pour AMDEC [37]*

Type de défaillance	Critère de fréquence de l'occurrence	Valeur de fréquence (F)
Inexistante	N'a jamais survécu	1
Rare	Moins d'une fois par an	2
Peu fréquent	Au moins une fois par 3 mois	3
Fréquent	Au moins une fois par mois	4
Très fréquent	Au moins une fois par semaine	5

*Tableau 5- 4: Grille de cotation des gravités de défaillances pour AMDEC [37]*

Type de défaillance	Temps de remise en marche	Valeur de gravité (G)
Très faible	Ne dépasse pas une 2 heures	1
Sans dommage	Entre 2 heures et 8 heures	2
Moyenne	Entre 8 heures et 24 heures	3
Important	Nécessite plus qu'une journée	4
Catastrophique	Touche la sécurité des personnes	5

### **V.3.5. Mode de détection**

Le mode de détection est la manière par laquelle un utilisateur est susceptible de détecter la présence d'une défaillance. Le tableau 5-5 donne la grille de cotation de détection de défaillances pour AMDEC.

*Tableau 5- 5: Grille de cotation de détection de défaillances pour AMDEC [37]*

Type de défaillance	Temps de remise en marche	Valeur de détection (D)
Détection total	Signes avant-coureurs : l'opérateur peut détecter facilement la défaillance.	1
Détection exploitable	Peu de signe : la défaillance est détectable avec une certaine recherche.	2
Détection faible	Aucun signe : la recherche de la défaillance n'est pas facile.	3
Aucune détection	Expertise nécessaire : la défaillance n'est pas détectable, encore sa localisation nécessite une expertise approfondie	4

### V.3.6. Criticité

La criticité est une évaluation quantitative du risque constitué par l'analyse du scénario, mode cause-effet-détection de défaillance. La criticité est alors évaluation à partir de la combinaison de trois facteurs ( $C = F \times D \times G$ ) :

- La gravité de l'effet.
- La fréquence d'apparition du couple mode-cause.
- La possibilité d'utiliser des signes de détection

Elle permet de hiérarchiser les défaillances et de recenser celles dont le niveau de criticité est supérieur au seuil prédéfini.

Tableau 5- 6: Grille des criticités de défaillances pour AMDEC [37]

Valeur de la criticité	Action	Couleur
$C < 6$	Ne pas tenir en compte.	
$6 \leq c < 16$	Mise sous préventif à fréquence faible.	
$16 \leq c < 24$	Mise sous préventif à fréquence élevée.	
$24 \leq c < 36$	Recherche d'amélioration.	
$C > 36$	Reprendre la conception.	

### V.3.7. Résultats et interprétations :

Nous avons utilisé la méthode AMDEC pour une analyse approfondie des défaillances et la détermination des éléments critiques de l'installation, afin d'étudier et identifier les causes et les modes de défaillance, voir annexe A.

Les tableaux suivants synthétisent les résultats de l'analyse AMDEC de l'installation ; le classement d'ordre décroissant des différents modes de défaillances selon leur indice de criticité.



Sous-ensembles du broyeur	Eléments	Mode de défaillance	F	D	G	C
<b>Motoréducteur</b>	<b>Moteur</b>	Echauffement	2	2	4	16
		Blocage	2	1	4	8
		Vibrations	2	1	3	6
		Echec de démarrage	3	1	1	3
		Pas de rotation	1	1	1	1
		Rotation inversée	1	1	1	1
		Rotation lente	1	1	1	1
	<b>Accouplement élastique</b>	Désaxage entre l'entrée et la sortie	2	2	4	16
		Rupture de deux demi accouplements	2	2	2	8
		Rupture des tampons en caoutchouc	3	2	1	6
	<b>Réducteur</b>	Roulements endommagés	2	3	3	18
		Défaut d'engrènement	2	2	4	16
		Echauffement	1	2	3	6
	<b>Arbre</b>	Cassure, Fissure, Choc mécanique	3	2	4	24
		Usure au niveau du contact avec les roulements	3	1	3	9
	<b>Roulements</b>	-Ecaillage	2	2	3	12
		-Echauffement				
		-Vibration				
		<b>Trémie de chargement</b>	Bourrage	3	2	4

<b>Corps du broyeur</b>		Déformation	2	2	2	12
	<b>Châssis</b>	Déformation	2	2	3	12
		Corrosion	2	2	3	12

<b>Sous-ensembles du convoyeur à bande</b>	<b>Éléments</b>	<b>Mode de défaillance</b>	<b>F</b>	<b>D</b>	<b>G</b>	<b>C</b>
<b>Motoréducteur</b>	<b>Moteur</b>	Echauffement	2	2	4	16
		Blocage	2	1	4	8
		Vibrations	2	1	3	6
		Echec de démarrage	3	1	1	3
		Pas de rotation	1	1	1	1
		Rotation inversée	1	1	1	1
		Rotation lente	1	1	1	1
	<b>Accouplement élastique</b>	Désaxage entre l'entrée et la sortie	2	2	4	16
		Rupture de deux demi accouplements	2	2	2	8
		Rupture des tampons en caoutchouc	3	2	1	6
	<b>Réducteur</b>	Roulements endommagés	2	3	3	18
		Défaut d'engrènement	2	2	4	16
		<b>Tambour</b>	Présence de méplat, fissure	2	2	3

<b>Tambour de commande</b>		Usure de revêtement	2	3	2	12
	<b>Arbre</b>	Cassure, fissure	3	2	4	24
		Usure au niveau du contact avec les roulements	3	1	4	12
		Mauvaise liaison avec la clavette	3	1	4	12
	<b>Paliers</b>	Cassure, fissure	2	2	2	8
<b>Tambour de renvoi</b>	<b>Tambour</b>	Présence de méplat, fissure	2	2	3	12
		Usure de revêtement	2	3	2	12
	<b>Arbre</b>	Cassure, fissure	3	2	4	24
		Usure au niveau du contact avec les roulements	3	1	4	12
		Mauvaise liaison avec la clavette	3	1	4	12
	<b>Paliers</b>	Cassure, fissure	2	2	2	8
<b>Bande</b>	<b>Courroies</b>	Rupture	3	2	4	24
		Usure, brulure	3	2	4	24
		Tension insuffisante	5	2	2	20
		Allongement excessif de la bande	2	2	3	12
		Usure ou fissure longitudinales dans le revêtement	2	2	3	12
		Endommagement du centre de la courroie	2	2	3	12
		Décentrage de la courroie à la hauteur du tambour de queue	2	2	2	8
		Déformation de la bande par endroits, causant une déviation	2	2	2	8
		Glissement de la courroie	2	2	2	8

		Glissement de la courroie au démarrage				
	<b>Rouleaux</b>	Blocage et cassure	3	2	4	24
		Vibration des rouleaux	2	2	4	16
	<b>Châssis</b>	Déformation	2	2	3	12
		Corrosion	2	2	3	12

Sous système d'alimentation du trémie	Éléments	Mode de défaillance	F	D	G	C
	<b>Arbre de Transmission</b>	Rupture	3	2	3	18
	<b>Moteur</b>	Pas de couple en sortie moteur	2	2	3	12
<b>Motoréducteur</b>	<b>Alimentation électrique</b>	Perte de l'alimentation	2	2	3	12
	<b>Réducteur</b>	Perte de la fonction	2	2	2	8
<b>Grappin</b>	/	Fonctionnement irrégulier	2	2	3	12
		Perte de la fonction	3	1	2	6
		Blocage en position intermédiaire	3	1	2	6

Sous système d'entrée au four	Eléments	Mode de défaillance	F	D	G	C
Système d'entrée au four	Sas de sécurité	Refus d'ouverture	2	3	4	24
		Refus de fermeture	2	3	4	24
		Refus de fermeture	2	2	5	20
		Refus de fermeture	2	2	4	16
		Blocage en position intermédiaire	2	2	3	12
		Refus d'ouverture	2	1	3	6

Le pourcentage des défaillances recensés par la méthode AMDEC, sont classés dans la figure 5-21 selon leur criticité.

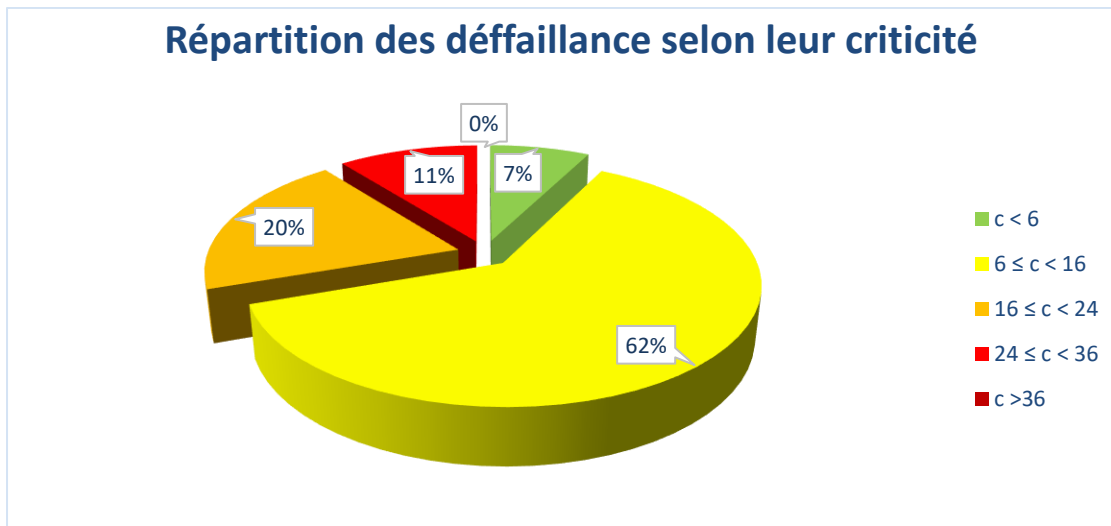


Figure 5- 18: répartition des défaillances selon leur criticité

La figure montre que 55% des défaillances de l'installation sont à faible criticité qui ne nécessite que un système préventif à fréquence faible.

Le nombre des défaillances recensés sont répartis sur les différents équipements de la chaîne d'alimentation, les résultats sont représentés dans la figure 5-19.

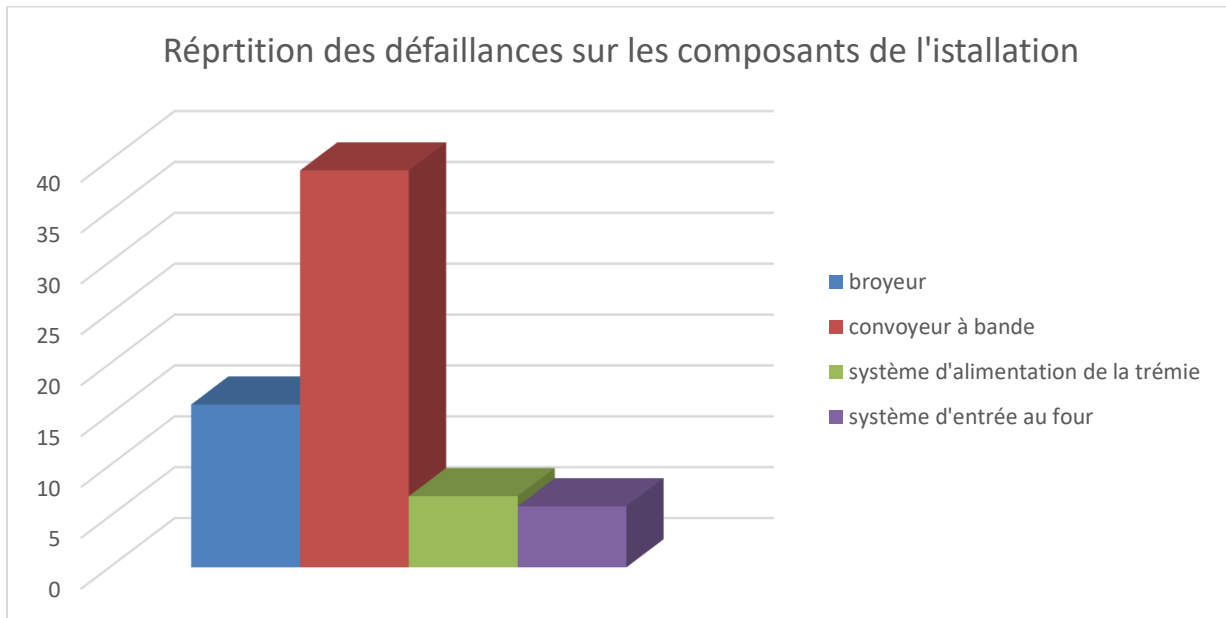


Figure 5- 19: Répartition des défaillances sur les composants de l'installation

La figure montre que les systèmes regroupant un nombre important de défaillance sont le convoyeur et le broyeur. En effet, le convoyeur est le moyen principal de transport dans la chaîne d’approvisionnement du four par les pneus broyés ( dichiquetés).

Les défaillances recensées sur le convoyeur à bande, selon le degré de criticité, sont représentées dans la figure 5-20.

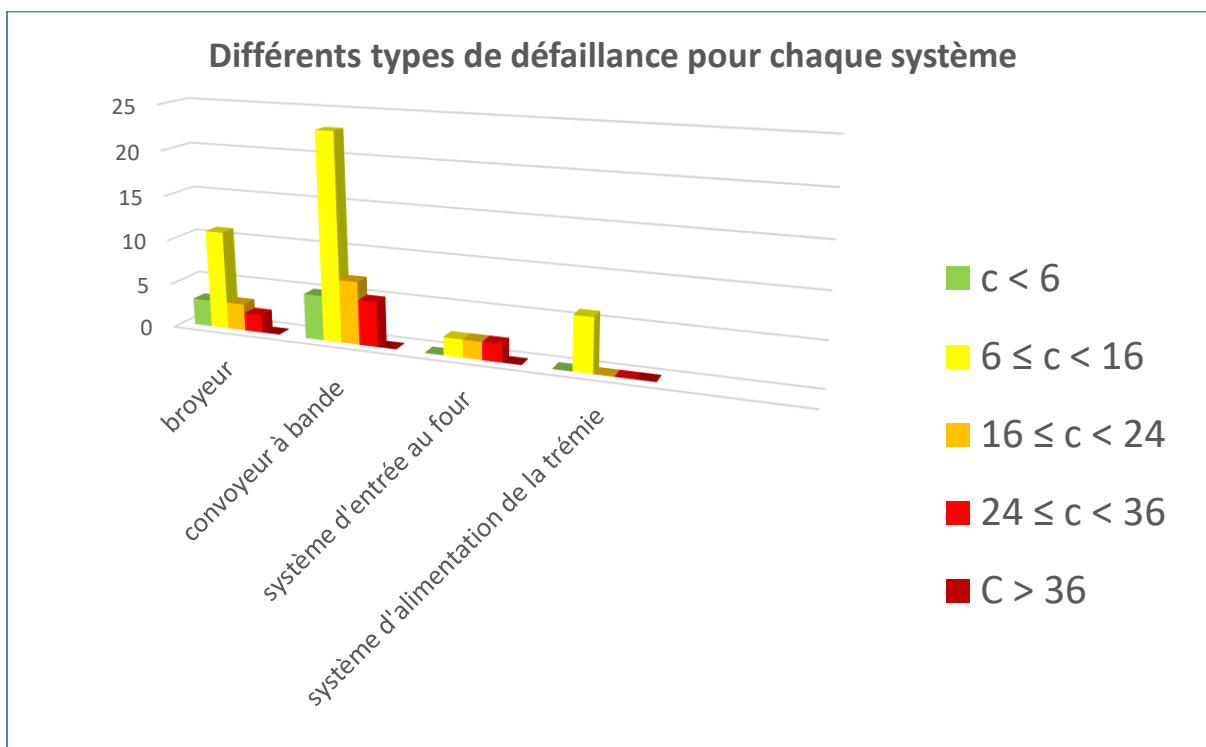


Figure 5- 20: Différents types de défaillance pour le convoyeur à bande

### **V.3.8. Maintenance et sécurité**

La maintenance et la sécurité sont indissociables, si la maintenance est inadéquate, il peut en résulter un dysfonctionnement du convoyeur et la nécessité d'une intervention à risques. Il est donc important d'endiguer les causes de dysfonctionnements à l'aide d'un programme de maintenance préventive approprié. On peut en citer, par exemple une lubrification adéquate des rouleaux permettant de prévenir le grippage et par conséquent empêcher l'usure du rouleau et le glissement ou décentrage de la courroie. L'entretien du dispositif de nettoyage aide à prévenir le glissement de la courroie, son décentrage et les déversements de la matière.

Les activités de maintenance se divisent en deux types, la maintenance corrective et la maintenance préventive. L'une comprend les activités qui visent à remettre le convoyeur défectueux en état de bon fonctionnement, généralement dans un bref délai (diagnostique et réparation immédiate), et l'autre comprend les activités qui visent à prévenir les défaillances (arrêt et réparation prévus).

Pour rendre la maintenance des convoyeurs facile, rapide et sécuritaire, il faut prévoir des aménagements des lieux de travail, des pièces de rechange, des outils et du personnel compétent. En somme, ce sont les dispositions à prendre pour atteindre la maintenabilité recherchée.

#### **V.3.8.1. Dispositions à prendre pour assurer la maintenabilité**

Au moment de la conception des lieux, il est important de prévoir des aménagements permettant d'effectuer les épissures, le remplacement de la courroie, le nettoyage, l'entretien du convoyeur, etc. Ces aménagements peuvent être permanents ou temporaires et le personnel doit être formé pour cela.

##### **V.3.8.1.1. Lieu pour effectuer des épissures et pour remplacer la courroie**

Afin de faciliter l'exécution des épissures, il faut :

- Que l'endroit soit assez vaste et que les conditions environnementales soient acceptables ;
- Que des accès soient prévus pour pouvoir y apporter le vulcanisateur ;
- Qu'il existe un moyen de détendre la courroie et de bloquer le dispositif de tension en position rétractée. Pour un dispositif de tension par gravité, un treuil et un dispositif de blocage en position haute doivent être disponibles en permanence sur les lieux ;
- Qu'il soit possible de tirer la courroie et de la bloquer à l'endroit prévu ;

- Que l'on dispose d'une surface droite et suffisamment longue pour déposer la courroie et effectuer une épissure droite ;
- Enfin, qu'une procédure sécuritaire écrite décrive la façon d'effectuer chaque type d'épissures.

Afin de faciliter le remplacement de la courroie, il est nécessaire de prévoir :

- Un accès permettant d'amener la nouvelle courroie à proximité du convoyeur et d'évacuer l'ancienne ;
- Un moyen de tirer la courroie à remplacer et d'enfiler la nouvelle courroie. S'il y a lieu, un moyen de faire avancer la courroie à l'endroit où sera effectuée l'épissure ;
- Un endroit assez vaste pour effectuer l'épissure ;
- Un moyen de détendre la courroie et de bloquer le dispositif de tension en position rétractée. Pour un dispositif de tension par gravité, un treuil et un dispositif de blocage en position haute doivent être disponibles en permanence sur les lieux ;
- Enfin, une procédure sécuritaire écrite qui doit décrire la façon de remplacer la courroie

#### **V.3.8.1.2. Lieux de nettoyage fréquent**

Malgré toutes les mesures prises pour réduire les déversements et les accumulations sous les convoyeurs et pour faciliter la récupération des matériaux, les interventions de nettoyage seront toujours nécessaires. De nombreux accidents sont survenus au cours des activités de nettoyage pendant que le convoyeur était en marche et que les zones dangereuses n'étaient pas protégées. Il est donc important de prévoir le mieux possible les endroits où les déversements se feront le plus fréquemment afin d'y aménager des zones de nettoyage sécuritaires.

Des zones de nettoyage devraient généralement se trouver dans les endroits suivants :

- A proximité des points de chargement ;
- Sur une certaine longueur du convoyeur juste après les points de chargement ;
- Sous les premiers rouleaux de retour

D'autres moyens peuvent aussi être utilisés en complément afin d'éloigner le personnel de la zone dangereuse et de rendre son travail plus facile : plan incliné qui amène le matériau déversé en un point.



Enfin, il est important de mettre en application un programme de nettoyage régulier afin de ne pas laisser les accumulations atteindre un certain niveau critique au-delà duquel certaines pièces peuvent être gênées dans leur fonctionnement

### V.3.8.2. Maintenance corrective

La maintenance corrective exige, entre autres, une bonne connaissance du fonctionnement et des dysfonctionnements du convoyeur afin de pouvoir remettre le convoyeur en état de marche le plus vite possible. Il ne faut pas oublier que les interventions pour corriger un dysfonctionnement du convoyeur sont causes d'accidents.

Le tableau 4-2 présentent les liens entre les dysfonctionnements des convoyeurs, et les solutions qui peuvent y être apportée.

Tableau 5-6 : Causes de dysfonctionnement et solutions recommandées

<b>Causes de dysfonctionnement et solutions recommandées</b>	
<b>Causes de dysfonctionnement</b>	<b>Solutions recommandées</b>
<b>La courroie est voilée.</b>	Au moment de l'entreposage, il faut bien enrouler la courroie (les bords du rouleau doivent être bien droits). Éviter l'entreposage dans des endroits humides. Si une nouvelle courroie ne se redresse pas pendant le rodage, il faut la remplacer.
<b>L'épaisseur de la courroie est de mauvaise facture ou inadéquate.</b>	Utiliser les agrafes qui conviennent. Resserrer les agrafes après avoir fait fonctionner le convoyeur pendant un certain temps. Enlever l'épaisseur et la refaire si elle a été mal exécutée. Instaurer un calendrier d'inspections régulières.
<b>La vitesse de la courroie est trop grande.</b>	Réduire la vitesse de la courroie.
<b>L'effort du tendeur est trop important.</b>	Recalculer l'effort nécessaire et faire les ajustements. Réduire la tension jusqu'au point de glissement de la courroie sur le tambour moteur, puis l'augmenter légèrement.
<b>L'effort du tendeur est trop faible.</b>	Recalculer l'effort requis et l'ajuster en conséquence. Ajuster le poids ou la vis de tension en conséquence.

<p><b>La courroie manque de tension à la hauteur du tambour moteur</b></p>	<p>Recalculer la tension maximale de la courroie et sélectionner une courroie adéquate.  Si la courroie s'allonge trop, envisager l'utilisation de deux convoyeurs avec un point de transfert.  Si la carcasse n'est pas assez rigide pour la charge, installer une courroie ayant la rigidité nécessaire.</p>
<p><b>Les bordures s'usent ou se brisent.</b></p>	<p>Réparer les bordures de la courroie. Enlever les sections sérieusement endommagées ou les remplacer par un nouveau morceau de courroie.</p>
<p><b>L'action des matériaux transportés (chocs ou abrasion) sur la courroie ou à la hauteur des agrafes est trop importante.</b></p>	<p>Utiliser des trémies d'alimentation appropriées.  Réduire la hauteur de chute des matériaux.  Faire des épissures vulcanisées.  Installer des rouleaux porteurs amortisseurs ou un berceau amortisseur sous la zone d'impact.  Si c'est possible, faire tomber les matières fines en dessous  Installer des détecteurs de déchirure de la courroie.  Quand le matériau est emprisonné sous la lisse de guidage, ajuster les bavettes à la distance minimale nécessaire ou installer des rouleaux tampons pour plaquer la courroie contre les bavettes d'étanchéité.  La distance entre les deux bavettes doit progressivement augmenter dans le sens de déplacement de la courroie pour prévenir le coincement.</p>
<p><b>L'axe des rouleaux ou des tambours n'est pas perpendiculaire à la direction du convoyeur.</b></p>	<p>Réaligner les rouleaux ou les tambours.  Installer des détecteurs de position latérale de la courroie.  Vérifier l'usure des roulements.</p>
<p><b>La capacité d'entraînement entre le tambour moteur et la courroie est insuffisante.</b></p>	<p>Augmenter l'angle d'enroulement à l'aide de tambours de contrainte.  Augmenter la tension du tendeur.  Utiliser une garniture adéquate sur le tambour moteur ou la remplacer si elle est usée.  Dans des conditions humides, utiliser des garnitures rainurées.  Installer un dispositif de nettoyage adéquat.</p>
<p><b>Il y a une accumulation de matériaux fins entre la courroie et le tambour.</b></p>	<p>Enlever les accumulations.  Installer un dispositif de nettoyage de la courroie, des racleurs et un racleur en « V » inversé pour empêcher l'insertion de matériaux entre la courroie et le tambour.  Installer une plaque de protection entre le brin porteur et le brin de retour.</p>

<b>Les garnitures des tambours s'usent.</b>	Remplacer les garnitures de tambour usées. Utiliser des garnitures rainurées dans des conditions humides. Ajuster ou refaire l'épissure mécanique. Ajuster la capacité de traction.
<b>La vitesse relative de la charge est trop grande ou trop faible.</b>	Ajuster les trémies d'alimentation ou corriger la vitesse de la courroie. Installer des rouleaux porteurs amortisseurs ou un berceau amortisseur sous la zone d'impact.
<b>La transition de la courroie est trop rapide.</b>	Installer des rouleaux supplémentaires et/ou augmenter la longueur de la zone de transition

### **V.3.8.3. Maintenance préventive**

Un programme de maintenance préventive doit être mis en œuvre pour limiter les interventions de maintenance corrective. Par exemple, les rouleaux grippés doivent être remplacés immédiatement, car ils peuvent user et couper la courroie et ainsi augmenter le risque de happement. Des inspections visuelles et des tests de vibration peuvent aussi être faits régulièrement afin de déceler toutes situations anormales.

#### **V.3.8.3.1. Maintenance des éléments en mouvement**

Un programme régulier de lubrification des éléments tournants ou en mouvement doit être instauré. Ce programme doit tenir compte du fait, entre autres, que les rouleaux situés à la hauteur de la zone de chargement peuvent nécessiter des graissages plus fréquents que ceux qui sont situés sur une section droite du convoyeur. Il en est de même pour les rouleaux se trouvant dans les zones de transition et d'inflexion, plus sollicités par la tension de la courroie.

Les rouleaux, les paliers, l'ajustement des roulements, le recouvrement ainsi que l'alignement des rouleaux par rapport à la courroie et au châssis doivent être soigneusement et régulièrement vérifiés.

### **V.3.9. Arbre des fautes**

L'arbre des fautes (AdF) est une méthode graphique d'analyse déductive qui permet de présenter la majorité des combinaisons d'événements qui peuvent être à l'origine d'un accident sur un convoyeur en marche. Cette méthode est également connue sous les noms d'arbre de défaillances et d'arbre des défauts.

### **V.3.9.1. Utilisation de l'AdF**

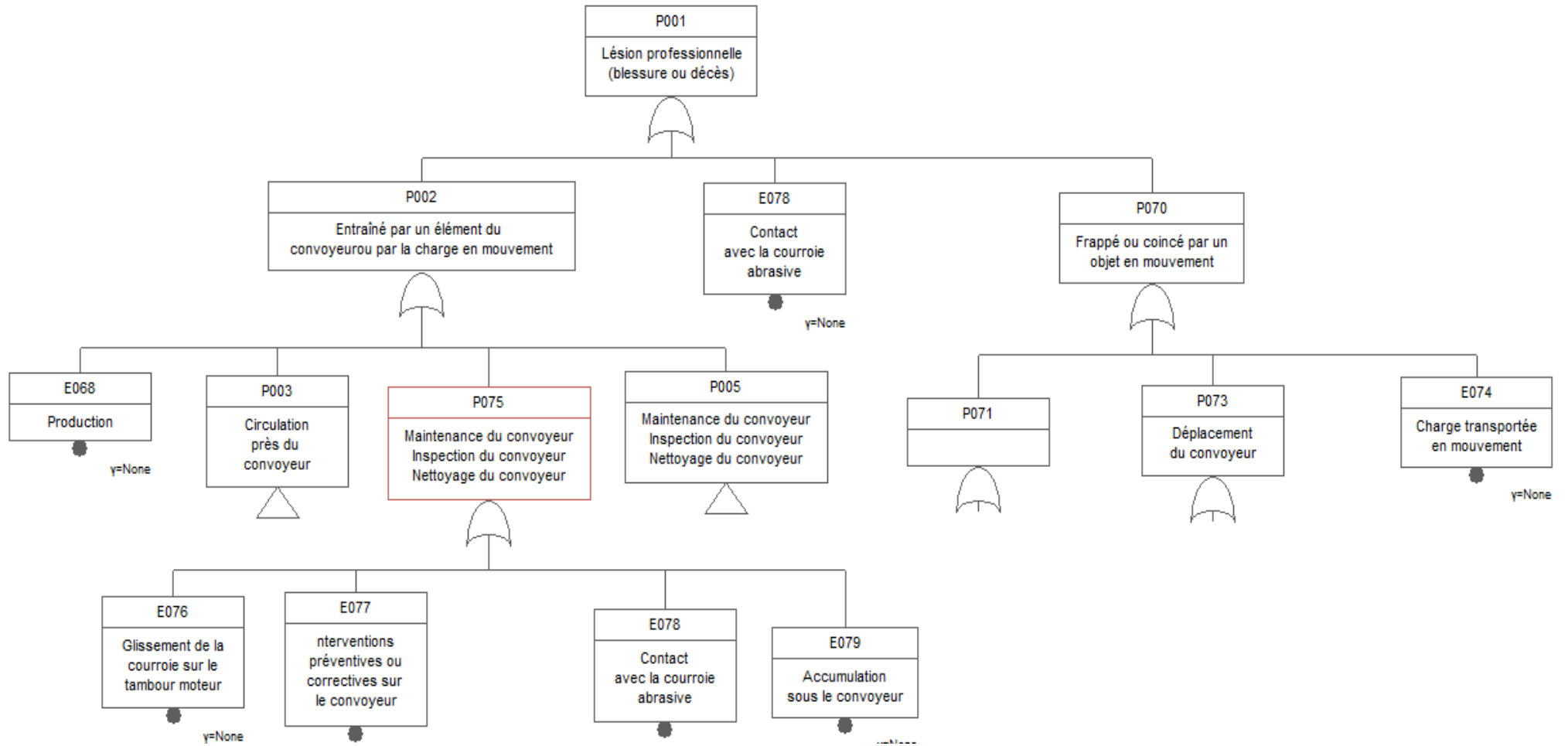
L'arbre des fautes doit être utilisé à l'étape de la conception ou au cours de travaux de maintenance visant à améliorer le convoyeur (maintenance améliorative) afin d'éliminer les causes d'accidents.

À l'étape de la conception, l'arbre des fautes permettra au concepteur de vérifier les principes de conception suivis, de façon à éliminer les causes possibles de mauvais fonctionnements du convoyeur. Au cours des travaux de maintenance (ou à la suite d'un accident), l'arbre des fautes permettra de corriger la conception du convoyeur afin d'éliminer des causes de mauvais fonctionnements. La réduction des mauvais fonctionnements diminuera le nombre d'interventions humaines sur le convoyeur, ce qui réduira les possibilités d'accidents.

À partir d'une cause donnée, le lecteur peut descendre dans l'arbre pour connaître les causes reliées à cet événement. S'il continue de descendre, ces causes l'amènent jusqu'aux causes premières.

### **V.3.9.2. L'AdF des convoyeurs à bande**

Les pages suivantes détaillent l'arbre des fautes des convoyeurs à courroie



## CONCLUSION

La valorisation des pneus usés dans le four de la cimenterie Biskria Ciment a été étudiée dans le présent travail. La production annuelle de pneus usés ne pouvait pas être entièrement réutilisée par le rechapage, le recyclage ou le réemploi ; un grand nombre de pneus usés est toujours destiné à l'enfouissement ou jetés dans les décharges sauvages. En effet, la valorisation énergétique des pneus hors d'usage est une solution alternative durable.

Ainsi, la solution alternative de brûler des pneus dans les cimenteries semble être une solution acceptable et faisable pour éliminer les gisements de pneus hors d'usage.

La valorisation énergétique des pneus, ou d'autres déchets, présente aussi l'avantage de conserver les combustibles non renouvelables.

La valorisation énergétique présente des avantages économiques pour les cimenteries. En effet, les cimenteries espèrent réduire les coûts de production, en utilisant des pneus et d'autres déchets comme combustibles.

A cet effet, nous avons montré, dans ce travail, que pour un taux de substitution de 25% de pneus, on peut réduire, pendant un fonctionnement sans arrêt du four rotatif pendant un mois, une quantité de gaz naturel de **36 531,18 Nm<sup>3</sup>**, pour une quantité équivalente de pneus estimé à environ 461 tonnes de pneus déchiquetés, soit une consommation de **15,365 tonnes/jour**. Cette quantité équivaut à **65 850** pneus de voiture légère ou **9 219** pneus de poids lourds,

Pour assurer l'approvisionnement de la chaîne de production en utilisant les pneus déchiquetés à 25% pour une durée d'un mois, la cimenterie doit réserver un volume de stockage de **947m<sup>3</sup>**. Devant cet état de fait, nous sommes, particulièrement pour des raisons de sécurité, tenu de réduire ce volume à un équivalent de 10 jours de stock, la quantité de pneus nécessaire pour assurer l'alimentation du four est ramené à environ **154 tonnes** de pneus broyés, occupant un volume d'environ **95m<sup>3</sup>**.

Il existe plusieurs formes pour l'utilisation des pneus hors usages dans les cimenteries, des pneus entiers, déchiquetés, ou sous forme de poudrettes. Des recherches bibliographiques montrent que, pour une cimenterie à voie sèche avec une tour de préchauffage, l'utilisation des pneus broyés en copeaux est le meilleur choix pour l'alimentation du four rotatif, l'injection se fait à travers le tour de préchauffage.

L'adaptation de l'installation cimentière pour utiliser les déchets est moins dispendieuse que la construction d'incinérateurs. Nous avons proposé un procédé d'alimentation du four rotatif de cimentier par les pneus usés déchiquetés. Cette installation ne nécessite pas des

systemes très compliqués à mettre en place. L'installation complémentaire se compose d'une fosse de réserve principale des pneus déchiquetés, d'un grappin chargeant par quantités prédéterminées, une trémie dont la sortie est équipée d'un extracteur spécifique amenant les copeaux de pneus sur un transporteur-doseur en vue de leur acheminement à débit pondéral constant vers le four et leur admission par une entrée secondaire équipé par un sas de sécurité.

D'après l'analyse des modes de défaillance par la méthode AMDEC, nous avons constaté que la majorité des défaillances sont au-dessous du seuil moyen de criticité, le convoyeur à bande est le système qui peut régénérer plus de 50% des défaillances, ce dernier ne nécessite que la mise place d'un programme de prévention à fréquence faible.

La solution qu'est la valorisation énergétique pour éliminer les pneus et les déchets ne doit toutefois pas être un frein au développement d'autres solutions comme le recyclage et la réduction à la source.

## **Références :**

- [1] Semlali. Z, et Ghassane. A, Y, Mise à niveau des méthodes de lubrification des équipements mécaniques, Université Sidi Mohammed Ben Abdellah – Fès, 2013.
- [2] Arib. S, Yalaoui. F, Zeroukane .M, Pour une amélioration de la gestion des déchets dans le milieu urbain, Mémoire pour l'obtention du diplôme de Master en Architecture, Université Abderrahmane Mira – Bejaia, 2017.
- [3] Kadri. M, Rouigueb. S, Chikh. H, Contribution à la réduction des émissions de CO2 et de la consommation énergétique dans l'industrie cimentaire par l'amélioration d'un système de production : Cas de la cimenterie de Béni-Saf ,mémoire de master Université Abou bekr Belkaid Tlemcen,2017.
- [4] Ghomari. F, Science des matériaux de construction, Cour en ligne, Université de Tlemcen, 2006.
- Saf (SCIBS), Université Abou Bekr Belkaid Tlemcen, 2017.
- [5] Ciments et Bétons ; Conception et réalisation, B51 : Am-principe Paris – Édition 2005  
Impression : Gibert-Clarey à Tours
- [6] Benhadda. A. Malti. O, Bentifour. M, Rapport de stage : la société des ciments de Beni
- [7] Pinel. P, perspectives d'amélioration du bilan environnemental des cimenteries Québécoises, Université de Sherbrooke - Canada, 2015.
- [8] Mishra. S, Siddiqui. N, A Review On Environmental and Health Impacts Of Cement Manufacturing Emissions, International Journal of Geology, Agriculture and Environmental Sciences? June 2014, Vol:2, Issue:3.
- [9] Yousef. S, H. Najjar, Gaseous Pollutants Formation and Their Harmful Effects on Health and Environment, 2011.
- [10] AÏDE. M. S, consommation des alternatifs fuel sur la ligne de cuisson a la cimenterie d'onigbolo : bilan énergétique, gains et impacts sur le plan environnemental, École Polytechnique D'Abomey – CALAVI, 2015.
- [11] Commission européenne. Directorate-General Joint Research Centre. Institute for Prospective Technological Studies (IPTS). Promoting Environmental Technologies: Sectoral Analyses, Barriers and Measures, Bruxelles, 2004.
- [12] Worrell. E, Price. L, Martin. N, Hendriks. C, and Ozawa. M. L, Carbon Dioxide Emissions From The Global Cement Industry, 2001
- [13] Directives sur les meilleures techniques disponibles et les meilleures pratiques environnementales en liaison avec l'article 5 et l'annexe C de la Convention de Stockholm sur



les polluants organiques persistants «Le brûlage de déchets dangereux dans les fours à ciment » , Octobre 2008.

[14] Kadem. D.E.D. Pollution des sols par les métaux lourds, Mémoire magistère : Ecologie, Université Mentouri Constantine – Algérie, 2000.

[15] Djemaci. B, La gestion des déchets municipaux en Algérie : Analyse prospective et éléments d'efficacité. Sciences de l'environnement. Université de Rouen, 2012.

[16] Mezouari. Sandjakdine. F, Conception et exploitation des centres de stockage des déchets en Algérie et limitation des impacts environnementaux thèse pour obtenir le grade de docteur de l'école polytechnique d'architecture et d'urbanisme en cotutelle avec l'université de Limoges, 2011.

[17] Djemaci B, Chertouk. M, La gestion intégrée des déchets solides en Algérie. Contraintes et limites de sa mise en œuvre, CIRIEC N° 2011/04,

[18] M. Malekiha, M. Hajiahmadi, 'Waste Tire as an Alternative Fuel of Cement Production Process in Iran', Foolad Technic International Engineering Company, Isfahan, Iran.

[19] Trouzine. H, Asroun. A, Asroun. N, Belabelouahab. F, Long N. T, Problématique des pneumatiques usagés en Algérie', Nature & Technologie . Juin 2011, n° 05, 28-35.

[20] Guigliano. M, Cernuschi. S, Ghezzil. U and Grosso. M, Experimental evaluation of waste tires utilization in cement kilns. Journal of the Air and Waste Management Association, 1995 49:(12) ,1405-1414.

[21] Lazizi. A, Trouzine. H, Asroun. A, Zadjouli. A, Belabelouahab. F, Approche analytique par changement d'échelle des caractéristiques mécaniques du multi matériau Pneus usés et sol , XXIXe Rencontres Universitaires de Génie Civil, Tlemcen, 2011.

[22] Rapport réalisé pour le compte de l'ADEME par Deloitte Développement Durable (Véronique MONIER, Katherine SALÈS, Philippe KUCH, Otto KERN) Novembre 2016.

[23] Bredin. N, étude de l'impact de la valorisation des pneus hors d'usage, dans une cimenterie, sur les émissions gazeuses par modélisation de la dispersion atmosphérique, thèse de doctorat, Sherbrooke (Québec) Canada, juin 1997.

[24] Pipilikaki, P, Katsioti, M, Papageorgiou, D, Fragoulis, D, and Chaniotakis, E, Use of tire derived fuel in clinker burning. Cement Concrete Compos, 2005,27:843–847.

[25] Nielsen, A. R..Combustion of large solid fuels in cement rotary kilns. Ph.D. Thesis, Department of Chemical and Biochemical Engineering Technical University of Denmark, 2012.

- [26] Jean-Michel. B, Aide-mémoire gestion des déchets. 2<sup>ème</sup> édition. Paris DUNOD, 2008, 31-38.
- [26] Nakomcic-Smaragdakis. B, Cepic. Z, Senk. N, Doric. J et Radovanovic. L, Use of scrap tires in cement production and their impact on nitrogen and sulfur oxides emissions, Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects, 2016 ,38:4, 485-493
- [27] Nakajima. Y, and Matsuyuki. M. Utilization of waste tires as fuel for cement production. Conserv. Recycl. 1981, 4:145–152
- [29] Constans. D, Gossman. D, Tire derived fuel use in cement kilns. GCI tech notes, Vol. 3, No. 9. A Gossman Consulting, Inc.Publication, 1997.
- [30] Ayadi. A, Elhafaia. M, Analyse Énergétique de la Cimenterie de Sour El Ghozlane : Bilan de la ligne de cuisson et solutions, ENP Alger, 2018.
- [31] Abdelhalim. T. I, valorisation énergétique des pneumatiques usagés non réutilisables, conférence, Centre des conventions d’Oran, du 23 au 25 octobre 2017 Centre des conventions d’Oran
- [32] Metz, Paul -Société Alsacienne d’appareils de manutention mécanique f-67400. Illkirch-Graffenstaden (FR). Installation et procédé d’alimentation d’un four de cimenterie en déchets, notamment en pneus usagés. Inventeur : Zuber, Jean-Marc, Wintz, Michel. 95440034.7  
Disponible à l'adresse <https://patentimages.storage.googleapis.com/pdfs/8bc74d87a56802cb2ad9/EP0690265A1.pdf>
- [33] INERIS DRA-73, Méthode d’analyse de risques générés par une installation industrielle oméga-7, 2006.
- [34] Bufferne. J, fiabiliser les équipements industriels, édition Eyrolles, 2008.
- [35] Chekkaf. Z et Ghezouani. M, Etude, analyse et synthèse d’un convoyeur à bandes (cas SCIBS BENI SAF), projet de fin d’études : Construction Mécanique, université de Tlemcen, 2018.
- [36] Melco. L, Informations techniques pour l’étude et la conception des convoyeurs à bande, Rulmeca, FRANCE, 1962.
- [37] Abdelhakim. K, Analyse critique et dimensionnement d’une nouvelle installation relative à un circuit d’extraction du fond : silo10. Projet de fin d’études : Conception Mécanique et Innovation, université Sidi Mohamed ben Abdellah Fès, 23 Juin 2016.
- [38] Bachiri. S et Ferhane. Z, étude et réalisation d’un broyeur pour les bouteilles en plastique. Projet fin d’études : électromécanique, université de Bejaia, 2012.

- [39] Ali. B, Amélioration des Conditions d'exploitation des Convoyeurs à Bande. Thèse de doctorat : option électromécanique, Université Annaba,
- [40] Haddad et Touati, Amélioration des caractéristiques techniques d'un broyeur pour les bouteilles en plastique, projet de fin d'études, électromécanique, université de Bejaia 2013.
- [41] CRTA, la méthodologie AMDEC, novembre 2004.
- [42] Process Compatible SO<sub>2</sub> Control in Cement Kilns, 2011, Online available at: <http://gcisolutions.com/gcitn0711.html> [accessed 13 May 2014].
- [43] Sayed. H, Reducing the SO<sub>2</sub> emission from a Cement kiln, 2008
- [44] Ebenezer. A, Mark. D, Gibson P.Chem, Courtney. W, Ellen. P and Michael. J, Pegg P.Eng, Use of scrap tires as an alternative fuel source at the Lafarge cement kiln, Brookfield, Nova Scotia, Canada, July 21, 2015.

## **Annexe**

Système : broyeur									
Sous-système : motoréducteurs									
Eléments	Fonction	Mode de défaillance	Causes de défaillance	Effets de la défaillance	Détection	Criticité			
						F	D	G	C
Moteur	Transformer l'énergie électrique en énergie mécanique.	Pas de rotation	-Chute de tension. -Court-circuit. -Défaut de connexion. -Défaut d'alimentation.	-Arrêt.	-Visuel.	1	1	2	2
		Rotation inversée	-Défaut de connexion. -Défaut de câblage.	-Bouchage de la charge. -Entrainement de problème sur le réducteur.	-Visuel.	1	1	1	1
		Rotation lente	-Défaut du pôle du moteur. - Couple résistant trop important.	-Entrainement insuffisant de la charge.	-Visuel. -Tachymètre.	1	1	1	1
		Echec de démarrage	-Défaut d'alimentation. - Absence de tension au niveau du jeu de barre. -Mauvais asservissement. -Mauvais contact. -Mauvais isolement.	-Arrêt.	-Visuel.	3	1	2	6
		Echauffement	-Colmatage des ailettes. -Surcharge thermique. -Frottements anormaux. -Défauts de lubrification.	-Bruit. -Grillage des roulements et des éléments voisins. - Dégradation du moteur.	Détection exploitable	2	2	4	16

		Blocage	<ul style="list-style-type: none"> <li>-Moteur grillé.</li> <li>-Défaillance des roulements.</li> <li>-Coincement du réducteur.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>-Arrêt.</li> <li>-Bruit.</li> <li>-Dégradation des éléments voisins.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>-Visuel.</li> <li>-Auditif.</li> </ul>	2	1	4	8

		Vibrations	-Desserrage des boulons. -Usure des éléments. -Défaut d'installation. -Défaut de montage. -Jeu axial excessif. -Défaut d'alignement.	-Bruit. -Désalignement de l'arbre. -Cisaillement des boulons de fixation. -Dégradation du matériel.	-Visuel. -Auditif. -Vibromètre.	2	1	3	6
Accouplement Elastique	Transmettre la puissance du moteur au réducteur.	Désaxage entre l'entrée et la sortie	-Défaut d'installation. -Défaut de montage. -Dysfonctionnement du réducteur.	-Bruit. -vibrations. -Usure des dentures du réducteur. -Rupture de l'accouplement.	Détection exploitable	2	2	4	16
		Rupture de deux demi accouplement	-Sur couple ou choc. -Usure avancée.	-Arrêt de l'reducteur.	Détection exploitable visuel	2	2	2	8
		Rupture des tampons en Caoutchouc	-Sur couple ou choc. -Usure avancée.	-Arrêt de l'alimentation.	Détection exploitable visuel	3	2	1	6
		Echauffement	-Grippage des roulements. -Défaut de lubrification : *Lubrification insuffisante. *Mauvaise qualité du lubrifiant. *Mauvaise étanchéité. -Défaut de montage. -Défaut d'engrènement.	-Dégradation du lubrifiant. -Détérioration des joints d'étanchéité.	Détection exploitable visuel	1	2	3	6

Réducteur	Réduire la vitesse d'entrée et augmenter le couple	Défaut d'engrènement	-déformation des profils des dents -interférence des dents -desserrage des boulons de fixation -défaut de montage -flexion de l'arbre d'entraînement -blocage	-Bruit -Vibrations -Désalignement de l'arbre -Cisaillement des boulons de fixation -Dégradation du matériel	Détection exploitable visuel	2	2	4	16
		Roulements endommagés	Désalignement	Vibrations	Détection faible	2	3	3	18
Arbre	Transmettre le mouvement de rotation	Usure au niveau du contact avec les roulements	-Manchon de roulement desserré. -bague intérieure du roulement usée.	-Mauvaise transmission de mouvement.	-Visuel. Auditif.	3	1	3	12
		-Cassure -Fissure, -choc mécanique	-Mauvais montage. -mauvaise qualité du matériau de l'arbre.	-Pas de transmission. - Arrêt du broyeur	Détection exploitable visuel	3	2	4	24
Roulements	Assurer le guidage en rotation	-Ecaillage -Echauffement -Vibration	- Corrosion liée au contact - Mauvais ajustement et jeu - Usure -Manque graissage	-Arrêt de la rotation -Mauvaise rotation du l'arbre -Un mauvais alignement	Détection exploitable	2	2	3	12



Système : broyeur									
Sous-système : corps du broyeur									
Eléments	Fonction	Mode de défaillance	Causes de défaillance	Effets de la défaillance	Détection	Criticité			
						F	D	G	C
Trémie de chargement	-Alimenter le broyeur par les pneus usagés	-déformation	-Choc mécanique -Collision	-Chute des pneus usagés  -Problème d'alimentation du broyeur	Détection exploitable visuel	2	2	3	12
		-Bourrage	-Débit d'alimentation irrégulier  -Les couteaux de broyage défectueux  -Mauvaise broyage des pneus  -le Système motoréducteur défectueux	-Arrêt du broyeur (Arrêt du procédé de broyage)	Détection exploitable visuel	3	2	4	24
Châssis	Supporter les composants du broyeur	Déformation	-Effort trop important. -Blocage de blocs de la matière dans le tiroir.	-Vibrations. -Détérioration de l'alimentateur à tiroir.	Détection exploitable visuel	2	2	3	12
		Corrosion	-L'agressivité du milieu. - Blocs du minerai accompagnés de l'eau.	-Dégradation du matériau.	-Visuel.	2	2	3	12

Système : Convoyeur à bande									
Sous-système : motoréducteurs									
Eléments	Fonction	Mode de défaillance	Causes de défaillance	Effets de la défaillance	Détection	Criticité			
						F	D	G	C
Moteur	Transformer l'énergie électrique en énergie mécanique.	Pas de rotation	-Chute de tension. -Court-circuit. -Défaut de connexion. -Défaut d'alimentation.	-Arrêt.	Détection total visuel	1	1	1	1
		Rotation inversée	-Défaut de connexion. -Défaut de câblage.	-Bouchage de la charge. -Entrainement de problème sur le réducteur.	Détection total visuel	1	1	1	1
		Rotation lente	-Défaut du pôle du moteur. - Couple résistant trop important.	-Entrainement insuffisant de la charge.	Détection total visuel.	1	1	1	1
		Echec de démarrage	-Défaut d'alimentation. - Absence de tension au niveau du jeu de barre. -Mauvais asservissement. -Mauvais contact. -Mauvais isolement. -Fusibles fondus.	-Arrêt.	Détection total visuel	3	1	1	3
		Echauffement	-Colmatage des ailettes. -Surcharge thermique. -Frottements anormaux. -Défauts de lubrification.	-Bruit. -Grillage des roulements et des éléments voisins. - Dégradation du moteur.	Détection exploitable visuel	2	2	4	16

		Blocage	-Moteur grillé. -Défaillance des roulements. -Coincement du réducteur.	-Arrêt. -Bruit. -Dégradation des éléments voisins.	Détection total visuel	2	1	4	8
		Vibrations	-Desserrage des boulons. -Usure des éléments. -Défaut d'installation. -Défaut de montage. -Jeu axial excessif. -Défaut d'alignement.	-Bruit. -Désalignement de l'arbre. -Cisaillement des boulons de fixation. -Dégradation du matériel.	Détection total visuel	2	1	3	6
Accouplement Elastique	Transmettre la puissance du moteur au réducteur.	Désaxage entre l'entrée et la sortie	-Défaut d'installation. -Défaut de montage. -Dysfonctionnement du réducteur.	-Bruit. -vibrations. -Usure des dentures du réducteur. -Rupture de l'accouplement.	Détection exploitable	2	2	4	16
		Rupture de deux demi accouplement	-Sur couple ou choc. -Usure avancée.	-Arrêt de réducteur	Détection exploitable visuel	2	2	2	8
		Rupture des tampons en Caoutchouc	-Sur couple ou choc. -Usure avancée.	-Arrêt de réducteur	Détection exploitable visuel	3	2	1	6

		Echauffement	-Grippage des roulements. -Défaut de lubrification : *Lubrification insuffisante. *Mauvaise qualité du lubrifiant. *Mauvaise étanchéité. *Bouchage du chemin de graissage. -Défaut de montage. -Défaut d'engrènement.	-Dégradation du lubrifiant. -Détérioration des joints d'étanchéité.	Détection exploitable	1	2	3	6
Réducteur	Réduire la vitesse d'entrée et augmenter le couple	Défaut d'engrènement	-déformation des profils des dents -interférence des dents -desserrage des boulons de fixation -défaut de montage -flexion de l'arbre d'entraînement -blocage	Bruit Vibrations Désalignement de l'arbre Cisaillement des boulons de fixation Dégradation du matériel	Détection exploitable	2	2	4	16

Système : Convoyeur à bande  
 Sous système: Tambour de commande

Eléments	Fonction	Mode de défaillance	Causes de défaillance	Effets de la défaillance	Détection	Criticité			
						F	D	G	C
Tambour	Entrainer la bande	Présence de méplat, fissure	-Absence de revêtement. Frottement.	-Déport bande. - Usure bande.	Détection exploitable	2	2	3	12
		Usure de revêtement	Présence de corps étrangers entre la bande et le tambour.	-Réduction vitesse bande. -Déport de bande.	Détection faible	2	3	2	12
Arbre	Transmettre le mouvement de rotation au tambour	Usure au niveau du contact avec les roulements	-Manchon de roulement desserré. -bague intérieure du roulement usée.	-Mauvaise transmission.	Détection total visuel	3	1	4	12
		Cassure, fissure	-Mauvais montage. - qualité du matériau de l'arbre.	-Pas de transmission.	-Visuel.	3	2	4	24
		Mauvaise liaison avec la clavette	-Usure rainure. -Usure clavette.	-Battement.	Détection total visuel	3	1	4	12
Paliers	Guider l'arbre en rotation	Usure, Cassure	-Manque d'étanchéité. - Mauvais montage. -Manque de graissage. -Fatigue.	-Bruit. -Arbre bloquée. - Température élevée.	-Visuel. -Auditif. -Olfactif. -Vibromètre.	2	2	2	8

Système : Convoyeur à bande									
Sous système : Tambour de renvoi									
Eléments	Fonction	Mode de défaillance	Causes de défaillance	Effets de la défaillance	Détection	Criticité			
						F	D	G	C
Tambour	Entrainer la bande	Présence de méplat, fissure	-Absence de revêtement. -Frottement.	-Déport bande. -Usure bande.	Détection exploitable	2	2	3	12
		Usure de revêtement	Présence de corps étrangers entre la bande et le tambour.	-Réduction vitesse bande. -Déport de bande.	Détection faible	2	3	2	12
Arbre	Transmettre le mouvement de rotation au tambour	Usure au niveau du contact avec les roulements	-Manchon de roulement desserré. - Bague intérieure du roulement usé.	-Mauvaise transmission.	Détection total visuel	3	1	4	12
		Cassure, fissure	-Mauvais montage. -Qualité du matériau de l'arbre.	-Pas de transmission.	Détection exploitable	3	2	4	24
		Mauvaise liaison avec la clavette	-Usure rainure. -Usure clavette.	-Battement.	Détection total visuel	3	1	4	12
Paliers	Guider l'arbre en rotation	Usure, Cassure	-Manque d'étanchéité. -Mauvais montage. -Manque de graissage. -Fatigue.	-Bruit, -Arbre bloquée. -Température élevée.	Détection exploitable	2	2	2	8

Système : Convoyeur à bande

Sous système : Bande

Eléments	Fonction	Mode de défaillance	Causes de défaillance	Effets de la défaillance	Détection	Criticité			
						F	D	G	C
Courroie	Recevoir les blocs de la matière et les transporter	Rupture	-Bande trop déportée. - Rupture collage ou rupture agrafage.	-Arrêt de production.	-Visuel.	3	2	4	24
		Usure, brulure	-Rouleaux défectueux. -Qualité bande. -Température élevée.	-Déport bande. -Bande trouée.	Détection exploitable	3	2	4	24
		Tension insuffisante	-Système de tension défectueux. -Bande trop longue. -Dilatation importante.	-Bande trainante. -Vitesse réduite.	Détection exploitable	5	2	2	20
		Décentrage de la courroie à la hauteur du tambour de queue	-L'effort du tendeur est trop faible -L'axe des rouleaux ou des tambours n'est pas perpendiculaire à la direction du convoyeur	- Endommagement de la bande -diversement de matière	Détection exploitable	2	2	2	8
		Déformation de la bande par endroits, causant une déviation	-La courroie est voilée -L'épaisseur de la courroie est de mauvaise facture ou inadéquate -Les bordures s'usent ou se brisent.		Détection exploitable	2	2	2	8

		Glissement de la courroie	La capacité d'entraînement entre le tambour moteur et la courroie est insuffisante		Détection exploitable	2	2	2	8
		Glissement de la courroie au démarrage	-Il y a une accumulation de matériaux fins entre la courroie et le tambour - La capacité d'entraînement entre le tambour moteur et la courroie est insuffisante		Détection exploitable	2	2	2	8
		Allongement excessif de la bande	- La tension dans la bande est trop forte - La courroie manque de tension à la hauteur du tambour moteur.	- Endommagement de la bande - coupure -mauvaise mouvement de la bande	Détection exploitable	2	2	3	12
		Usure ou fissure longitudinales dans le revêtement	- L'action des matériaux transportés sur la bande - Les garnitures des tambours s'usent. - La transition de la courroie est trop rapide		Détection exploitable	2	2	3	12
		Endommagement du centre de la courroie	- Le chargement est mal fait ou trop important - La vitesse relative de la charge est trop grande ou trop faible.		Détection exploitable	2	2	3	12



Rouleaux	Centrer et guider la bande	Blocage et cassure Joint du rouleau défectueux	-Roulement défectueux. -Présence de corps étrangers. -Frottement élevé.	-Usure bande. -Méplats sur les rouleaux.	Détection exploitable.	3	2	4	24
		Vibration des rouleaux	- L'arbre du rouleau, le roulement et son support sont désalignés	-Usure de la bande -diversement de matière - Endommagement Des rouleaux, déformation	Détection exploitable	2	2	4	16
Châssis	Supporter la bande, tambours et les rouleaux	Déformation	-Effort trop important. - Flambement.	-Vibrations. - Détérioration du convoyeur à bande.	Détection exploitable	2	2	3	12
		Corrosion	-L'agressivité du milieu	-Dégradation du matériau.	Détection exploitable	2	2	3	12

Système : système d'alimentation du trémie									
Eléments	Fonction	Mode de défaillance	Causes de défaillance	Effets de la défaillance	Détection	Criticité			
						F	D	G	C
Grappin	Transport des déchets de la fosse a la trémie	Perte de la fonction	Vieillessement Défaillance du système automatique	Arrêt d'alimentation de la trémie Perte de contrôle	Détection total visuel	3	1	2	6
		Blocage en position intermédiaire	Vieillessement Usure, Corrosion Choc mécanique	Dysfonctionnement du système Pas d'alimentation	Détection total visuel	3	1	2	6
		Fonctionnement irrégulier	Défaillance du système automatique	Surcharge de la trémie Débit d'alimentation irrégulier	Détection exploitable avec une certaine recherche	2	2	3	12
Alimentation électrique	Alimentation du système	Perte de l'alimentation	-Perte du réseau -Disjonction -Rupture interne	-Arrêt du moteur -Serrage des freins		2	2	3	12

Moteur	Assure l'entraînement de la chaîne cinématique. Couple fourni si alimenté	-Pas de couple en sortie moteur	-Pas d'alimentation Surintensité (surcharge) -Rupture axe	-Arrêt du moteur + Serrage des freins -Perte du couple de levage	Détection exploitable	2	2	3	12
Arbre de Transmission	Transmission du couple moteur ou du couple de freinage	Rupture	-Fatigue - Usure	-Pas de mouvement	Détection exploitable	3	2	3	18
Réducteur	Réduire la vitesse d'entrée et augmenter le couple	Perte de la fonction	- Défaillance du système automatique -Usure	- chute de la charge - Endommagent de matériel	Détection exploitable avec une certaine recherche	2	2	2	8

Système : système d'entrée au four

Eléments	Fonction	Mode de défaillance	Causes de défaillance	Effets de la défaillance	Détection	Criticité			
						F	D	G	C
Sas de sécurité	Isolation du système	Refus d'ouverture	Usure Vieillessement  Défaillance du système automatique	Pas d'injection de pneus déchiquetés	Détection total visuel	2	1	3	6
				Débordement de la matière		2	3	4	24
				Altération de la qualité de ciment	2	2	4	16	
		Refus de fermeture	Usure Vieillessement Défaillance du système automatique	Surcharge du four	Détection faible	2	2	4	16
				Changement du flux d'alimentation		2	3	4	24
				Altération de la qualité de ciment	2	2	5	20	
				Retour de flamme Incendie	2	2	3	12	
		Blocage en position intermédiaire	Usure Vieillessement Corrosion	Changement du flux d'alimentation	Détection exploitable avec une certaine recherche	2	2	3	12

