

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique



Université A. MIRA – BEJAIA



Faculté de Technologie

Département de Génie des Procédés

## ***MEMOIRE DE FIN D'ETUDES***

Réalisé par

**AFRITE Sara et BENMERZEG Kenza**

En vue de l'obtention du diplôme de

***Master***

Filière : Génie des Procédés

Spécialité : Génie des procédés de l'environnement

**Thème**

**Recyclage & valorisation des pneus usagés en poudrette de caoutchouc comme additif dans l'utilisation des Bitumes.**

Soutenu le : 05/10/2021, devant le jury composé de :

**Président : M<sup>r</sup> S.FATMI**

**Examinatrice : M<sup>me</sup> N.CHIBANI**

**Promoteur : M<sup>r</sup> M.AZZOUG**



## **Remerciements**

En guise de reconnaissances, nous tenons à remercier très sincèrement notre enseignant et encadrant Mr. AZZOUG pour ses valeureux conseils, son soutien permanent et son suivi tout au long de la réalisation de ce travail.

Nous tenons à remercier les membres de jurys pour avoir accepté d'examiner ce modeste travail.

Nos remerciements vont également à Mr DJEMAI Tarik chef de département environnement à la branche commercialisation de NAFTAL pour la proposition de ce thème. Nous adressons nos vifs remerciements à Mr DAMOU professeur à l'USTHB et président directeur général de la Sarl RECYTECH de nous avoir donné la chance d'effectuer un stage au sein de son entreprise et aussi pour tous les documents et conseils fournis.

Nous tenons à saisir cette occasion et adresser nos profonds remerciements et profondes reconnaissances au personnel de l'entreprise RECYTECH à leur tête Mr HEMRANI Youghorta, Mme MEZHOUD Razika, Mr MAGRI Sid Ahmed, Mr BEZIOUI Abdelmlek, Mr KOURBALI Belkacem et Bilal pour le climat agréable de travail qu'ils ont créé et aussi pour toutes les instructions et explications données.

Au final nous remercions toutes les personnes qui ont contribué de près ou de loin à la réalisation de ce travail.

## *Dédicace*

*Je dédie entièrement ce travail à mes très chers parents*

*Pour leur soutien, aide, amour et sacrifices*

*À mes frères, ma sœur Yasmine et son époux pour leur soutien moral et leurs  
conseils*

*À ma meilleure amie Tassadit qui n'a jamais cessé de m'encourager.*

*Kenza*

## *Dédicaces*

*Ce modeste travail est le fruit de tous les sacrifices que mes parents ont déployé pour mon éducation et ma formation, je le leurs dédie.*

*À tous ceux, qui ont un jour contribué de près ou de loin, à faire de moi la personne que je suis devenue aujourd'hui.*

*Sara*

## **Liste des abréviations**

**ACV** : Analyse du Cycle de Vie

**AND** : Agence Nationale des Déchets

**CTRA** : China Tyre Recycling Association

**EPA** : Environment Protection Agency

**ETRMA** : European Tire Recycling Rubber Association

**LCTP** : Laboratoire Central des Travaux Publiques

**PCI** : Pouvoir Calorifique Inférieur

**PL** : Poids Lourd

**PU** : Pneus Usagés

**PUNR** : Pneus Usagés Non Réutilisables

**RMA** : Rubber Modifier Asphalt

**UE** : Union Européenne

**UNEP** : United Nations Environment Program

**USTMA** : United States Tire Manufacturer Association

**VL** : Véhicules Leger

## Liste des figures

### Chapitre 1

<b>Figure 1.1</b> : Vue en coupe des constituants d'un pneumatique.....	4
<b>Figure 1.2</b> : Cycle de vie d'un pneu.....	5
<b>Figure 1.3</b> : Distribution des déchets pneumatiques dans le monde.....	6
<b>Figure 1.4</b> : Décharge sauvage de PU à Longford en Irlande.....	6
<b>Figure 1.5</b> : Moustique tigre ( <i>Aedes albopictus</i> ).....	7
<b>Figure 1.6</b> : Feux des stocks de pneus de Tracy (A) et de Westley (B) (Californie).....	8
<b>Figure 1.7</b> : Hiérarchie des modes de traitement selon l'impact environnemental.....	11
<b>Figure 1.8</b> : a) Pneus utilisés comme poids pour les bâches d'ensilage. b) pneus utilisés comme brise-lames.....	13
<b>Figure 1.9</b> : Chantier expérimental de Pneusol à Bou-Smail en Algérie.....	13
<b>Figure 1.10</b> : Produits et applications de la pyrolyse.....	17
<b>Figure 1.11</b> : Procédés de pyrolyse de copeaux (chips) de pneus.....	20
<b>Figure 1.12</b> : Procédés de pyrolyse de copeaux (chips) de pneus.....	21
<b>Figure 1.13</b> : Etapes de fabrication d'asphalte caoutchouté avec le processus humide.....	25
<b>Figure 1.14</b> : Schéma résumant les procédés d'incorporation du caoutchouc dans le bitume.....	26
<b>Figure 1.15</b> : Quantités produites et valorisées aux USA 2011-2019.....	31
<b>Figure 1.16</b> : Principales destinations des PUNR aux USA en 2013.....	31
<b>Figure 1.17</b> : Utilisations en valorisation énergétique en 2013.....	32
<b>Figure 1.18</b> : Utilisation des granulats en 2013.....	32
<b>Figure 1.19</b> : Quantités produites et traitées de PU (Tonnes) entre 2015 et 2018.....	33
<b>Figure 1.20</b> : Quantité de PU dans quelques pays européens.....	34
<b>Figure 1.21</b> : Quantité de pneus usagés traités dans quelques pays européens.....	35
<b>Figure 1.22</b> : Rapport entre les quantités produites et traitées (Tonnes) en 2018.....	36
<b>Figure 1.23</b> : Principales voies de valorisations en Europe.....	36

### Chapitre 2

<b>Figure 2.1</b> : Evolution des quantités de pneus usagés générés en Algérie.....	39
<b>Figure 2.2</b> : Répartition des tonnages de pneus usagés générés en Algérie dans différentes wilayas.....	40
<b>Figure 2.3</b> : Ratio national du Pneu/Véhicule./An.....	41

<b>Figure 2.4</b> : Organigramme de l'entreprise .....	42
<b>Figure 2.5</b> : Organigramme du département de production .....	42
<b>Figure 2.6</b> : Aire de réception, de stockage et de tri des PUNR au sein de Recytech.....	43
<b>Figure 2.7</b> : Schéma résumant tous les procédés et machines employés à RECYTECH .....	44
<b>Figure 2.8</b> : Flancs séparés de pneus .....	45
<b>Figure 2.9</b> : Photographie du reste du flanc .....	46
<b>Figure 2.10</b> : Séparation de la tringle enrobée dans la gomme .....	46
<b>Figure 2.11</b> : Photographie des pneus découpés .....	47
<b>Figure 2.12</b> : Arrachement du pneu.....	47
<b>Figure 2.13</b> : Découpeuse de pneus.....	48
<b>Figure 2.14</b> : Processus employé dans l'unité de production à RECYTECH.....	49
<b>Figure 2.15</b> : Lavage des morceaux de pneus sur le tapis convoyeur .....	50
<b>Figure 2.16</b> : Photo réelle de la partie supérieure d'un broyeur .....	50
<b>Figure 2.17</b> : Broyeur utilisé par RECYTECH .....	51
<b>Figure 2.18</b> : Photographie du Granulateur.....	52
<b>Figure 2.19</b> : Tables à fibres de séparation textile / caoutchouc .....	52
<b>Figure 2.20</b> : Photographie du nettoyer fin .....	53
<b>Figure 2.21</b> : Séparateur par gravité.....	54
<b>Figure 2.22</b> : Schéma du système à poudre.....	54
<b>Figure 2.23</b> : a)Vis sans fin horizontale et b) Vis sans fin verticale .....	55
<b>Figure 2.24</b> : Photographie des moulins à poudre.....	55
<b>Figure 2.25</b> : Schéma du premier cyclone.....	56
<b>Figure 2.26</b> : Schéma du Tamis tambour .....	56
<b>Figure 2.27</b> : Schéma du deuxième cyclone / remplissage des big bags.....	57
<b>Figure 2.28</b> : Photographie du filtre d'aspiration au sein de l'entreprise.....	58
<b>Figure 2.29</b> : Schéma de fonctionnement du filtre cylindrique.....	59
<b>Chapitre 3</b>	
<b>Figure 3.1</b> : Taux de pneus usagés utilisés A) en fonction du type et B) en fonction du poids ....	60
<b>Figure 3.2</b> : Schéma du bilan de matière du process de préparation.....	60
<b>Figure 3.3</b> : Bilan de matière dans le pré-broyeur.....	61
<b>Figure 3.4</b> : Bilan de matière dans le broyeur .....	62

<b>Figure 3.5</b> : Bilan massique dans le granulateur .....	62
<b>Figure 3.6</b> : Bilan massique des tables à fibres .....	63
<b>Figure 3.7</b> : Bilan massique et produits finaux dans le nettoyeur .....	63
<b>Figure 3.8</b> : Bilan massique dans les moulins .....	64
<b>Figure 3.9</b> : Bilan massique et matières récupérées dans le filtre .....	64
<b>Figure 3.10</b> : Taux des sous-produits issus de du recyclage des pneus usagés au sein de Recytech .....	65
<b>Figure 3.11</b> : Quantités de pneus usagés collectées en 2020 et début 2021 (Tonnes) .....	66
<b>Figure 3.12</b> : Quantités de pneus usagés préparées et quantités de caoutchouc produite en 2020 et début 2021 (Tonnes).....	67
<b>Figure 3.13</b> : Quantité de poudrette fine et des granulats en 2020 et début 2021 (Tonnes).....	68
<b>Figure 3.14</b> : Quelques pièces fabriqués à partir des sous-produits de pneus A) Aire de jeux, B) Acier utilisé dans le bâtiment, C) Pièces moulés et D) Echantillon de textile pour isolation.....	69

## Liste des tableaux

### Chapitre 1

<b>Tableau 1.1</b> : Composition des pneumatiques des VL et PL en Europe (% poids). .....	4
<b>Tableau 1.2</b> : Composition des fumées produites par les pneus entreposés dans des locaux dotés ou non d'extincteurs automatiques à eau de type sprinkler. ....	9
<b>Tableau 1.3</b> : Domaines d'utilisation des PU entiers .....	12
<b>Tableau 1.4</b> : Valeurs du PCI des PUNR et combustibles .....	15
<b>Tableau 1.5</b> : Caractéristiques des pyrolyses lentes et rapides .....	17
<b>Tableau 1.6</b> : Fraction massique et pouvoir calorifique du charbon et de l'huile pyrolytique en fonction de la température .....	18
<b>Tableau 1.7</b> : Rendement moyen des produits (% poids) en fonction de la température .....	19
<b>Tableau 1.8</b> : Avantages et inconvénients des différents procédés thermiques .....	21
<b>Tableau 1.9</b> : Techniques employées dans le procédé sec. ....	24
<b>Tableau 1.10</b> : Technologies utilisées dans le processus humide. ....	25
<b>Tableau 1.11</b> : Caractéristiques du bitume en fonction de la teneur de la poudrette de de caoutchouc ajouté.....	26
<b>Tableau 1.12</b> : Evaluation générale entre les deux types de bitume. ....	27
<b>Tableau 1.13</b> : Résultats de la comparaison entre la granulation et la co-incinération .....	29

### Chapitre 3

<b>Tableau 3.1</b> : Résultats des essais effectués sur le bitume-caoutchouc par le LCTP.....	70
---	----

## Sommaire

<b>1. Généralités sur le recyclage et la valorisation des pneus.....</b>	<b>3</b>
1.1. Définition et composition des pneus .....	3
1.2. Cycle de vie et déchets liés aux pneus.....	5
1.3. Impacts sanitaires et environnementaux.....	7
1.4. Législation environnementale.....	10
1.5. Les voies de recyclage et de valorisation des pneus usagés .....	11
1.6. Etude comparative de différentes voies de valorisation de pneus .....	27
1.7. Gestion et traitement des déchets pneumatiques dans le monde.....	30
<b>2. Recyclage et valorisation des pneus en Algérie : Cas de l'entreprise</b>	
<b>RECYTECH.....</b>	<b>39</b>
2.1. Pneus usagés en Algérie .....	39
2.2. Gestion et recyclage des pneus en Algérie-Cas de l'entreprise Recytech.....	41
2.3. Collecte et stockage des pneus usagés .....	43
2.4. Etapes de recyclage des pneus usagés au sein de Recytech .....	43
<b>3. Résultats et discussions .....</b>	<b>60</b>
3.1. Bilans de matières .....	60
3.2. Résultats des bilans .....	65
3.3. Essais préliminaires de la valorisation des pneus usagés en Algérie par leur incorporation dans le bitume.....	70

# *Introduction*

# INTRODUCTION

## Introduction

L'augmentation constante des déchets produits par les activités humaines dans le monde est l'un des enjeux les plus importants auxquels les sociétés modernes sont appelées à faire face, car intimement liée à la pollution mondiale (Letcher et Vallero, 2019 ; Cossu et Stegmann, 2019). Parmi ces déchets, le caoutchouc présente une partie très importante avec des gisements importants tant en volume qu'en poids provenant de différentes origines dont principalement les pneus usagés. Selon les rapports des plus grandes associations mondiales de fabricants de pneus et de produits en caoutchouc, la production mondiale annuelle de pneus usagés est d'environ 3 milliards d'unités, ce qui correspond à environ 29,1 millions de tonnes (WBCSD, 2018 ; ETRMA, 2018). La Chine, les pays de l'Union européenne, les États-Unis, le Japon et l'Inde en produisent les plus grandes quantités.

Les pneus usagés sont une catégorie de déchets dont le recyclage et le traitement sont extrêmement difficiles. Ceci est dû à leur structure très complexe, la composition diversifiée de la matière première, et la structure du caoutchouc à partir duquel le pneu a été fabriqué (Letcher et al., 2021). Ainsi, leur recyclage nécessite donc une dépense de temps et d'énergie élevée et l'application de procédés technologiques très complexes. Par conséquent, de nombreux pays ont choisi initialement la mise en décharge comme option pour gérer ces pneus usagés. Cependant, cette option a été rapidement abandonnée par les pays développés car les pneus occupent un volume énorme dans les décharges d'une part et d'autre part le stockage de longue durée des pneus, sans une gestion appropriée, peut entraîner des risques d'incendie, de pollution environnementale et des risques sanitaires (Shulman, 2004 ; Letcher et al., 2021). En effet, le problème le plus notable associé aux grandes décharges de pneus est le risque potentiel d'incendie qu'ils présentent et la pollution atmosphérique qui en découle. De plus, des maladies (encéphalite et dengue) peuvent être véhiculées à proximité des décharges de pneus, où des nuisibles tels que les moustiques, les rongeurs et les insectes vecteurs de maladies peuvent trouver un habitat idéal pour leur prolifération (Reschner, 2003).

En réponse à ces problématiques environnementales et de santé publiques induites par une mauvaise gestion des pneus usagés, la plupart des pays industrialisés ont mis en place une législation stricte pour aboutir à une gestion rationnelle des flux de ces déchets. L'objectif

## INTRODUCTION

principal étant d'exiger de restreindre ou d'interdire la mise en décharge et promouvoir la réutilisation, le recyclage et la valorisation des composants des pneus (Letcher et al, 2021). Cette législation a radicalement changé la filière de gestion des pneus. À titre d'exemple, en Union Européenne, environ 50 % des pneus usagés ont été envoyés en décharge il y a une vingtaine d'années, le chiffre n'est que de 4 % actuellement (ETRMA, 2018).

En Algérie, la quantité de pneus usagés produite chaque année est en augmentation constante et avoisine les 300 000 tonnes en 2018 (AND, 2020). Selon, le rapport de cette agence, seulement une proportion limitée des pneus est recyclée. Afin de promouvoir une politique de gestion et de valorisation des pneus usagés en Algérie, une petite entreprise (RECYTECH) a été créée à Bouira en vue de répondre à ces objectifs. Cette unité se charge de collecter et de recycler les pneus usagés pour produire une poudrette qui sera ensuite valorisée dans les asphaltes. Afin de nous permettre d'intégrer le monde de l'entreprise et de nous initier au domaine du recyclage des pneus usagés, nous avons intégré l'entreprise RECYTECH pour un stage pratique de 5 semaines dans le cadre de notre projet de fin d'étude. Au cours de ce stage, il a été question de suivre le cycle de recyclage des pneus depuis leur arrivée au niveau l'entreprise jusqu'à la production de la poudrette valorisable dans les asphaltes en suivant chaque étape de la chaîne de recyclage.

Notre présent travail s'organise autour de trois chapitres principaux : Le premier chapitre sera consacré à une synthèse bibliographique sur les pneus, leur composition, les procédés permettant de les recycler ainsi que les différentes voies de leur valorisation. Le deuxième chapitre traitera de la filière des pneus usagés en Algérie et la description de l'entreprise RECYTECH et sa chaîne de recyclage des pneus. Enfin, dans le troisième chapitre, nous présenterons les principaux résultats de ce stage pratique

# *Chapitre 1*

### 1. Généralités sur le recyclage et la valorisation des pneus

#### 1.1. Définition et composition des pneus

Le pneumatique est un produit complexe de plus d'un siècle de développements qui se poursuivent encore aujourd'hui. Au cours des années, le développement des pneus ne cessa d'évoluer grâce aux avancées chimiques. Ces derniers se doivent de répondre à des exigences fonctionnelles telles que : (i) la durabilité, (ii) la sécurité, (iii) résistance à l'abrasion et (iv) faible résistance au roulement. Ainsi, le pneu initialement fabriqué avec du caoutchouc naturel a été remplacé par un pneu constitué de plus de 200 matières premières, chacun lui conférant une propriété spécifique. On retrouve notamment les mélanges de gommages constituées de :

- Élastomères mélange de (i) caoutchouc naturel : issu de l'écorce de l'Hévéa, L'objectif de son utilisation est la réduction de l'échauffement interne tout en gardant une résistance mécanique importante ; et (ii) caoutchouc synthétique : fabriqué à partir d'hydrocarbures il apporte des propriétés spécifiques à la longévité, et la résistance au roulement. (Sadaka, 2010).
- Charges renforçantes constituées principalement de noir de carbone : c'est une charge purement organique issue de la combustion ou de la décomposition thermique partielle de gaz naturel ou d'hydrocarbures, il donne sa couleur au pneu et lui confère des propriétés favorisant sa résistance contre son usure.
- Plastifiants : généralement des résines ou des huiles.
- Soufre : un agent de vulcanisation il fait passer le caoutchouc d'un état plastique à un état élastique. (Bladé, 2012)

À côté des mélanges de gommages, on retrouve : (i) les renforts métalliques introduit par Michelin en 1934 pour les véhicules (PL), l'acier apporte de la résistance et de la rigidité et (ii) les renforts textiles qui sont d'une importance capitale, car ils permettent de rouler à très grande vitesse. Il est globalement accepté que la composition des pneumatiques produits pour le marché européen est la même pour tous les producteurs. Le profil de composition des matériaux présenté dans le tableau 1.1 peut être utilisé à titre indicatif. La différence entre la composition d'un pneu de véhicules léger (VL) et celui d'un poids lourd (PL) est dans la nature chimique des

## Chapitre I Généralités sur le recyclage et la valorisation des pneus

élastomères utilisés. Les fibres textiles qu'on retrouve seulement dans les VL sont ajoutées pour alléger ce dernier tout en conservant les propriétés d'endurance. (Cuong, 2010).

**Tableau 1.1** : Composition des pneumatiques des VL et PL en Europe (% poids).

Matériel	VL (%)	PL (%)
Élastomères / Caoutchouc	48	45
Carbone noir	22	22
Métaux	15	25
Textile	5	0
Oxydes de Zinc	1	2
Sulfures	1	1
Additifs	8	5

Si l'on opère une vue en coupe sur un pneu, on peut réaliser la complexité de ses constituants (Figure 1.1)



**Figure 1.1** : Vue en coupe des constituants d'un pneu. (Moulin, 2018).

À partir de la zone de contact extérieur jusqu'à l'intérieur, le pneu se compose de :

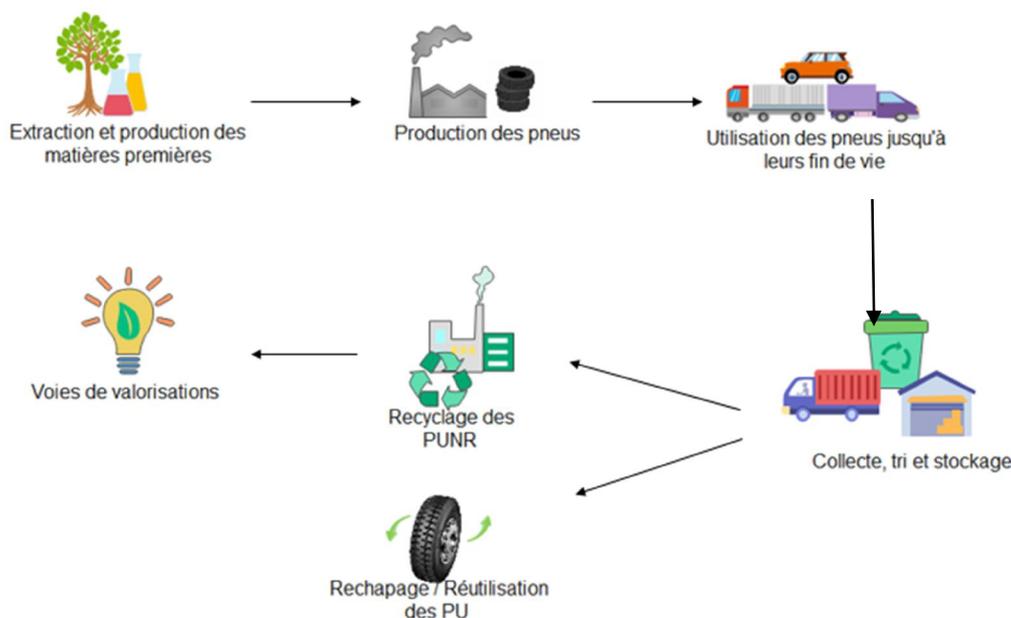
1. Bandes de roulement, fabriqué avec du caoutchouc naturel et synthétiques, elles garantissent un kilométrage important. (Continental, 2020).

## Chapitre I Généralités sur le recyclage et la valorisation des pneus

2. Flancs représentent la partie latérale du pneu, présentent une grande résistance aux attaques chimiques de l'oxygène et de l'ozone.
3. Tringles formées d'un enroulement de câbles d'acier enrobés dans du caoutchouc. (Bladé, 2012).
4. Nappe carcasse constitue le support de la bande de roulement. Elle est constituée de nappes en acier et en nylon enrobées de caoutchouc
5. Armature sommet se compose de plusieurs nappes d'acier et de nylon, très rigide, ces nappes ont un rôle primordial lors de la fabrication du pneu.
6. Gomme intérieure d'étanchéité c'est une couche de caoutchouc plaqué contre la carcasse. (Continental, 2020).

### 1.2. Cycle de vie et déchets liés aux pneus

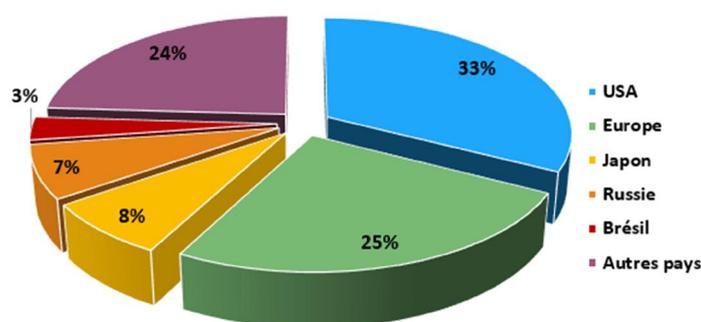
Le cycle de vie d'un pneu comprend traditionnellement 06 étapes : (i) extraction et production des matières premières, (ii) Production des pneus, (iii) utilisation des pneus jusqu'à leurs fin de vie, (iv) collecte, tri et stockage, (v) gestion des déchets liés aux pneus et (vi) voies de valorisation. (Figure 1.2).



**Figure 1.2** : Cycle de vie d'un pneu (Shanbag et Manjare, 2020)

## Chapitre I Généralités sur le recyclage et la valorisation des pneus

Il est signalé dans le rapport final de l'United Nations Environment Program (UNEP) que les pneus en fin de vie ou les pneus usagés (PU) sont l'un des flux de déchets dont la croissance est constante et devrait se poursuivre à l'avenir suite à la croissance démographique et le développement des pays. La production des déchets pneumatiques en 2013, par région était de : 4.4 millions de tonnes aux USA (RMA, 2014), 3.4 million de tonnes en Europe (ETRMA, 2014), 1.02 millions de tonnes au Japon (JATMA, 2014) ,1 million de tonnes en Russie (Yankovi et al., 2017) et 365.000 tonnes au Brésil. (RECICLANIP, 2015). La figure 1.3 montre la distribution des déchets pneumatiques dans le monde en 2013.



**Figure 1.3 :** Distribution des déchets pneumatiques dans le monde (Machin et al.,2017)

Les PU en fin de vie posent de sérieux problèmes. En effet, ils sont souvent déposés de manière incontrôlée, provoquant, par leur empilement une saturation rapide des terrains et des espaces dédiés aux décharges (Figure 1.4).



**Figure 1.4 :** Décharge sauvage de PU à Longford en Irlande

De plus, ces PU présentent également des risques pour l'environnement et la santé publique. Ainsi, dans de nombreux États, l'ensemble des pneus ont été bannis des décharges (Oikonomou et Mavridou, 2009 ; Ding, 2016).

### 1.3. Impacts sanitaires et environnementaux

#### 1.3.1. Impacts sanitaires

Lors de la conférence des parties à la convention de Bâle sur le contrôle des mouvements transfrontières de déchets dangereux et de leur élimination, les experts ont estimé que la mauvaise gestion des déchets de pneus constituent un abri idéal pour les rongeurs et un agite de reproduction pour les moustiques *Aedes aegypti* et *Aedes albopictus* communément appelé moustique de tigre (figure 1.5), vecteurs de la dengue et de la fièvre jaune, spécialement dans les régions tropicales et subtropicales. (Bertolini, 2003)



**Figure 1.5 :** Moustique tigre (*Aedes albopictus*)

En effet, l'accumulation d'eau à l'intérieur des pneus offre des conditions de température et d'humidité propices à la reproduction et à la propagation des moustiques, des souris, des rats et des insectes parasites

#### 1.3.2. Impacts environnementaux

L'impact environnemental des PU peut s'appréhender à travers l'écotoxicité et le lessivage de leurs composants chimiques ainsi que des feux non maîtrisés qui s'y déclenchent. L'écotoxicité des pneus est difficile à évaluer étant donné le large éventail de substances entrant dans leur composition. En 2003, des essais effectués en Californie sur des fragments de caoutchouc provenant d'une décharge de pneus ont montré que ceux-ci exerçaient des effets toxiques sur des bactéries, invertébrés, poissons et algues vertes mais cette toxicité baissait de 59 % après trois mois. (CIWMB, 2007 ; Mawhinney, 1990). De plus, lorsqu'un amas de pneus prend feu, les fumées qui en résultent sont dangereuses en raison des produits toxiques qu'elles

## Chapitre I Généralités sur le recyclage et la valorisation des pneus

contiennent dont : des cendres (riches en carbone, en oxydes de zinc et en métaux lourds), des composés sulfurés ; des hydrocarbures aromatiques polycycliques ; des huiles aromatiques et des particules fines (Reisman., 1997). Ces feux peuvent prendre des dimensions catastrophiques comme ce fut le cas au Canada sur le site d'Hagersville, dans le sud de l'Ontario au Canada en 1990. Cet accident a eu un impact négatif important sur les communautés locales, les activités agricoles et l'environnement. La colonne de fumée dense a généré des polluants atmosphériques et a conduit à l'évacuation d'une zone de 3 kilomètres. La Californie a connu aussi deux de ses plus grands incendies impliquant les stocks de pneus situés à Tracy en Aout 1998 et celui de Westley en Septembre 1999 (Figure 1.6). Des millions de pneus usés ont été impliqués dans les incendies, qui ont été causé par des orages (USEPA).



**Figure 1.6 :** Feux des stocks de pneus de Tracy (A) et de Westley (B) (Californie)

Le tableau suivant montre les quantités de composants toxiques des fumées dégagées d'un feu de pneus avec et sans utilisation d'extincteurs.

## Chapitre I Généralités sur le recyclage et la valorisation des pneus

**Tableau 1.2 :** Composition des fumées produites par les pneus entreposés dans des locaux dotés ou non d’extincteurs automatiques à eau de type sprinkler. (SNCP, 2007)

Composé	Taux de production en l’absence d’arrosage (g/kg de pneu brûlé)	Taux de production en présence d’arrosage (g/kg de pneu brûlé)
Dioxyde de carbone	1450	626
Monoxyde de carbone	35	42
Dioxyde d’azote	0,9	0,75
Monoxyde d’azote	3,2	1,6
Dioxyde de soufre	15	4
Acide cyanhydrique	4	0,6
Acide chlorhydrique	Non détectable	2
Imbrulés organiques totaux (dont benzène et toluène, en équivalent toluène)	23	61
Suies	285	20
Métaux (total), dont aluminium et zinc > 99 %	31,9	22,74
Hydrocarbures aromatiques polycycliques (total)	0,0633	0,093
Biphényles polychlorés (total)	$2,66 \times 10^{-4}$	$2,16 \times 10^{-5}$
Dioxines/furanes (total)	$6,44 \times 10^{-7}$	$1,9 \times 10^{-7}$
Composés recherchés mais pas détectés (taux inférieurs à la limite de détection analytique)	Formaldéhyde, acide chlorhydrique, acide bromhydrique, acroléine, ammoniac, étain	Formaldéhyde, acide bromhydrique, acroléine, ammoniac, étain

Ces incendies ont soulevé des inquiétudes quant à la nécessité de légiférer sur les modes de gestion des PU ainsi que et de développer et d'explorer des voies supplémentaires de gestion et de valorisation.

### 1.4. Législation environnementale

En Algérie, les pneus hors d'usage sont classés comme déchets spéciaux « classe S » sous le code « 16.1.1 » sans aucun critère de dangerosité. Par ailleurs il existe quelques lois dans le cadre législatif de la gestion des déchets pneumatiques.

- **Loi n°01-19 du 12/12/2001** relative à la gestion, au contrôle et à l'élimination des déchets, définit les principes de base qui conduisent à une gestion intégrée des déchets, de leur génération à leur élimination ;
- **Loi n°03-10 de la 19/07/2003** relative à la protection de l'environnement et au développement durable, consacre les principes généraux d'une gestion écologique rationnelle ;
- **Loi n°04-20 du 25 décembre 2004** relative à la prévention des risques majeurs et la gestion des catastrophes dans le cadre du développement durable, définit clairement les responsabilités de chacun des acteurs impliqués dans le domaine de la prévention au niveau des zones et des pôles industriels. (AND, 2018).

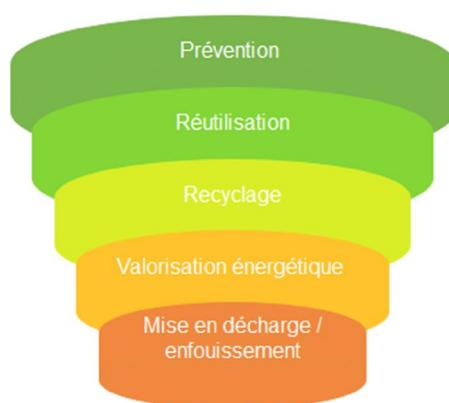
Au niveau de l'union européenne (UE), les réglementations relatives à la gestion des déchets pneumatiques ne cessent d'évoluer. Chaque pays est libre de mettre en place des initiatives nationales afin d'atteindre les objectifs de l'UE. Aujourd'hui, il existe au sein de l'UE trois systèmes différents de gestion des pneus en fin de vie, décrits ci-dessous :

- **Responsabilité du producteur** : La loi fixe le cadre juridique et attribue aux producteurs (fabricants et importateurs de pneus) la charge de structurer la chaîne de gestion des pneus en fin de vie.
- **Système fiscal** : Le système est financé par une taxe prélevée sur la production de pneus et répercutée ensuite sur le client, les producteurs paient une taxe à l'État, qui est à son tour responsable de l'organisation et de la facturation des pneus
- **Système de marché libre** : Dans ce système, la réglementation fixe les objectifs à atteindre par les acteurs responsables, de cette façon, tous les intervenants de la chaîne de

valorisation se livrent à des contrats dans des conditions de marché libre et agissent dans le respect de la législation (Jain, 2016).

### 1.5. Les voies de recyclage et de valorisation des pneus usagés

Les déchets pneumatiques qui sont très encombrants peuvent être gérés de différentes méthodes, qu'elles soient destructives (en cimenteries, aciéries, chaufferies ou fonderies) ou bien non destructives (gazon synthétique, aires de jeux, sols équestres). Le schéma suivant montre la hiérarchie des modes de traitement à privilégier selon l'impact environnemental. (Figure 1.7).



**Figure 1.7 :** Hiérarchie des modes de traitement selon l'impact environnemental (Moulin, 2018)

- Réutilisation : Lorsque les PU collectés et triés ne sont pas vendus comme pneus d'occasion (dans les pays avec une réglementation plus flexible), ils sont réutilisés à l'état brut dans le domaine du génie civil.
- Recyclage : La plupart des pneus recyclés trouvent des applications en tant que substitut dans divers domaines d'application.
- Valorisation énergétique : La voie la plus significative de valorisation car elle utilise le pneu pour son pouvoir calorifique pour générer de l'énergie.
- Mise en décharge / enfouissement : C'est la méthode qui a le plus d'impacts environnemental à cause des risques d'incendies.

#### 1.5.1. Réutilisation

La réutilisation des PU est considérée comme une solution afin de donner une deuxième vie aux pneus déjà utilisés soit par recreusage ou par rechapage une fois la bande de roulement très

## Chapitre I Généralités sur le recyclage et la valorisation des pneus

endommagée. Un pneu recreusé est un pneu dont la bande de roulement a été rénovée en creusant plus profondément que le profil précédent. C'est une technique qui s'effectue par des professionnels et avec des outils adaptés (uniquement avec des lames chauffées électriquement) (Good year, 2015) ; Tandis que le rechapage consiste à remplacer la vieille bande de roulement par une nouvelle bande permettant ainsi d'allonger considérablement la vie d'un pneu. Nous distinguons deux méthodes de rechapage, le rechapage à chaud (à une température d'environ 150 °C) appelé aussi rechapage à moule et le rechapage à froid (à 100 °C) (prémoulé). (Clark, 2018)

### 1.5.2. Valorisation de matière

La valorisation de la matière est le processus de traitement et de transformation des pneus pour de nouvelles utilisations sous d'autres formes (en broyats, granulats, poudrettes ou en pneu entier) (Ait Idir, 2017).

#### 1.5.2.1. Pneus entiers

Les pneus entiers peuvent être utilisés dans la valorisation de matière (figure 1.8), leurs propriétés et caractéristiques (élasticité, non décomposable et inerte) ont abouti à un certain nombre d'applications résumées dans le tableau suivant :

**Tableau 1.3** : Domaines d'utilisation des PU entiers (ALKHATIB, 2014)

<b>Domaines d'application</b>	<b>Exemples d'application</b>
Agriculture	Poids pour les bâches d'ensilage
Aménagement	Protection contre l'érosion des murs de barrage et des talus
Protection du littorale	Comme brise-lames
Ports et docks	Pare-chocs de quai et défenses de navires
Industrie de pêche	Récifs artificiels pour la reproduction des poissons
Foyers et communauté	Pare-chocs pour garages et les équipements de jeux



**Figure 1.8 :** a) Pneus utilisés comme poids pour les bâches d'ensilage. b) pneus utilisés comme brise-lames (ADEME, 2017)

### ➤ La technique PNEUSOL

D'après (Long, 1993), le PNEUSOL (inventé par le laboratoire central des ponts et chaussées) est classé comme une valorisation originale, formé de la combinaison de deux éléments, le pneu et le sol (figure 1.9). C'est une technique qui présente d'une part l'avantage de pouvoir améliorer de façon durable les propriétés mécanique du sol en donnant une souplesse d'adaptation ce qui permet de supporter les entassements différentiels importants, et d'autre part une valorisations des gisements importants de déchets pneumatiques.



**Figure 1.9 :** Chantier expérimental de Pneusol à Bou-Smail en Algérie. (Trouzine, 2011)

### 1.5.2.2. Pneus coupés et déchiquetés (chips)

La plupart des pneus destinés au recyclage et la valorisation subissent un prétraitement initial en utilisant une détringleuse pour enlever les tringles et un broyeur ou bien une

découpeuse. On obtient des morceaux grossiers  $> 300\text{mm}$  qu'on appelle des morceaux découpés, des déchiquetas de l'ordre de 50 à 300mm et des *chips*  $< 50\text{mm}$  de formes et dimensions irrégulières. Ces morceaux serviront principalement dans l'industrie du génie civil, la construction des routes et comme matière première pour des procédés de broyage futurs. (Shulman, 2004)

### 1.5.2.3. Granulats

Les granulats ont une taille de 1-10mm peuvent provenir de 02 procédés différents : (i) à température ambiante, mécaniquement grâce à des procédés physiques, utilisant des granulateurs. (ii) à température cryogénique le principe étant d'utiliser des liquides cryogéniques ou autres modes de réfrigération pour refroidir le caoutchouc. Ce dernier devient alors facile à casser et est réduit dans des broyeurs à marteaux jusqu'à atteindre les tailles désirées (Shulman, 2004 ; Bensbaa, 2009).

### 1.5.2.4. Poudrettes

Ce sont des particules de caoutchouc dont la taille est inférieure à 1mm, elles sont obtenues à température ambiante ou cryogénique mécaniquement grâce à un broyage calibré des granulats selon le cahier de charges, utilisés dans les asphaltes, domaine du génie civil et travaux publics (Bensbaa, 2009).

## 1.5.3. Valorisation par voie thermique

Au cours de ces dernières décennies, plusieurs études ont été menées afin de convertir des déchets organiques en produits réutilisables, utiles et économiques. Parmi les méthodes de valorisation des pneus usagés non réutilisables (PUNR) par voie thermique on retrouve : l'incinération, la pyrolyse et la gazéification (Biocochi et Tenza,2008).

### 1.5.3.1. Incinération

L'incinération des PUNR peut être définie comme la réduction des déchets organiques combustibles en résidus inertes par une combustion contrôlée à haute température (Haghi et al.,2019). Les PUNR présentent un taux de carbone de 60% qui peut atteindre les 70% dans les pneus de PL, ainsi par leur composition polymérique, ce sont de très bons combustibles, tel que : 3 tonnes de PUNR = 2 tonnes de fuel.

## Chapitre I Généralités sur le recyclage et la valorisation des pneus

L'énergie provenant de la combustion directe des PUNR peut être utilisée dans les usines métallurgiques, les aciéries, les papèteries et les usines de transformation du bois (Trouzine, 2011 ; Faure, 2016)

Le pouvoir calorifique inférieur (PCI) d'un matériau combustible est l'énergie dégagée sous forme de chaleur par la réaction de combustion en présence de l'oxygène, exprimée en MJ/kg. C'est la dimension physique qui permet de caractériser le potentiel énergétique des combustibles qu'ils contiennent. Le tableau 1.4 montre la valeur du PCI des PUNR et de quelques combustibles usuels.

**Tableau 1.4 :** Valeurs du PCI des PUNR et combustibles (Gonzalez et al., 2001)

<b>Combustible</b>	<b>PCI (MJ/KG)</b>
<b>Pneus</b>	<b>34.5</b>
Coke	28.5
Gasoil chauffage	35.87
Fuel lourd	38.16
Gaz butane	45.56
Gaz naturel pauvre	32.97

L'utilisation de pneus entiers ou de broyats comme combustibles alternatif pour la production d'énergie trouve des applications dans les industries de cimenteries et de fonderies.

### **A. Valorisation énergétique en cimenteries**

Depuis 40 ans, l'industrie cimentière s'est engagée à remplacer les combustibles fossiles par les différents combustibles de substitution, parmi lesquelles on retrouve les PU. En effet pour fabriquer du ciment il faut avoir du Clinker (Un produit qui résulte de la cuisson du calcaire et de l'argile à très haute température dans un long four rotatif, une opération très énergivore).(Aliapur, 2010). L'utilisation des PUNR en cimenteries revêt un double intérêt, d'une part les PUNR ont l'avantage de présenter un PCI proche de celui des combustibles fossiles, ce qui permet de réduire la facture énergétique, il a été considéré que 1 tonne de PUNR se substitue à 0,7 tonne de

coke et à 0,29 tonne de charbon. D'autre part, on limite l'ajout de minerai de fer par l'acier contenu dans les pneus indispensables à la production du clinker, c'est la valorisation de matière (Clauzade, 2012).

### **B. Valorisation énergétique dans les fonderies**

Les PUNR sont constitués de 15 à 25% de fer et de 60 à 70% de carbone selon leur type. Pour produire de la fonte, on recycle des ferrailles en présence de coke (combustible fossile) qui fournit la chaleur nécessaire à la fusion et le carbone, constituant essentiel de la fonte. Comme pour l'industrie cimentière l'utilisation des PUNR présente deux intérêts : la valorisation énergétique en limitant les apports en coke et la valorisation de matière en utilisant l'acier et le carbone des pneus (Faure, 2016). D'après le rapport final de l'ADEME de 2015, en enfournant 1000 tonnes de broyats on recycle 235 tonnes de ferrailles et on économise 550 tonnes de coke. En outre, après 05 campagnes d'analyses successives au sein d'une fonderie, aucune modification dans les rejets atmosphériques n'a été constatée. Les bilans économique et environnemental étant favorables, la valorisation dans les fonderies constitue une voie industriellement efficace et écologiquement sûre. (Philgea et Moringa, 2015).

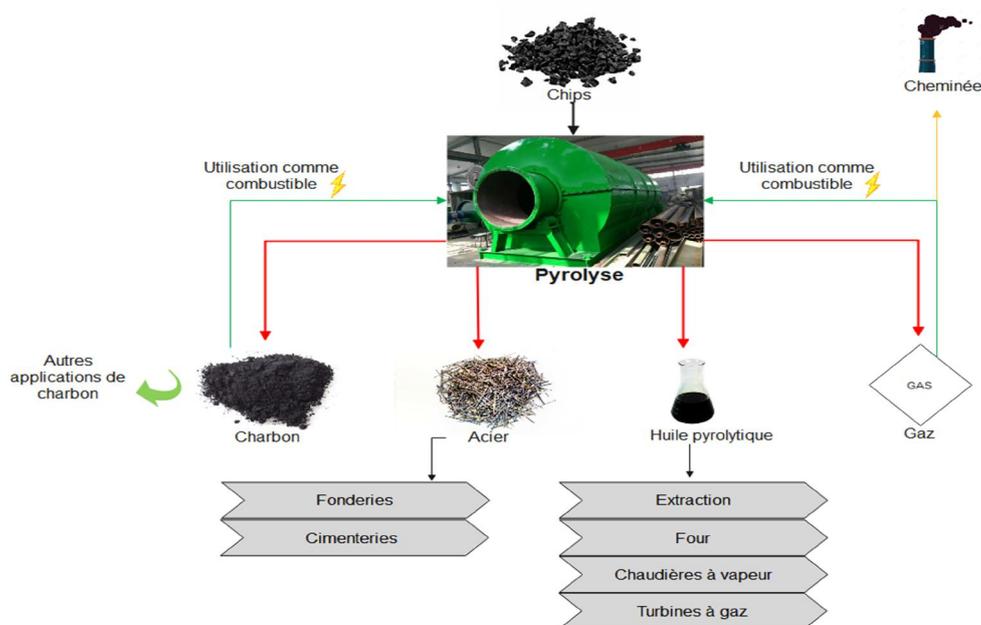
#### **1.5.3.2. Pyrolyse**

La pyrolyse est une méthode récupérative par voie thermique. La matière organique est dégradée en absence de l'oxygène, à haute température (250 - 800°C) (Martiner et al, 2013). L'étape de pyrolyse commence quand les hydrocarbures qui sont des matières volatiles s'évaporent à 150°C. C'est un traitement thermochimique dans une atmosphère inerte (non oxydante), la matière subit une décomposition thermique ou les liaisons chimiques sont brisées (Li et al., 2004). Martinez et al, 2013 ont établi une classification simple et générale ou on peut distinguer deux grandes catégories : pyrolyse lente et pyrolyse rapide. Le tableau 1.5 récapitule les principales caractéristiques de chacune des catégories.

**Tableau 1.5 :** Caractéristiques des pyrolyses lentes et rapides (Martinez et al, 2013)

Type de pyrolyse	Caractéristiques
<b>Pyrolyse lente</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Décomposition lente</li> <li>- Basses températures</li> <li>- Faible taux de chaleur</li> <li>- Temps de séjour long (quelques minutes à quelques heures)</li> <li>- Obtention du charbon favorisée</li> </ul>
<b>Pyrolyse rapide</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Décomposition rapide</li> <li>- Fortes températures <math>T &gt; 700^{\circ}\text{C}</math></li> <li>- Vitesse et taux de chauffe élevée</li> <li>- Dispositif spécifique pour éliminer les vapeurs libérées</li> <li>- Temps d'action court (de l'ordre de quelques millisecondes)</li> </ul>

Quatre principaux sous-produits sont obtenus suite à la pyrolyse. Ce sont des produits commercialisables. La figure 1.10 montre les sous-produits de la pyrolyse ainsi que leurs utilisations.



**Figure 1.10 :** Produits et applications de la pyrolyse (Rofiquel et al., 2010)

## Chapitre I Généralités sur le recyclage et la valorisation des pneus

L'huile pyrolytique et les gaz sont valorisés généralement comme alternatifs aux combustibles usuels selon leur pouvoir calorifique. Le tableau suivant montre la fraction massique et le pouvoir calorifique de ces deux produits en fonction de la température.

**Tableau 1.6 :** Fraction massique et pouvoir calorifique du charbon et de l'huile pyrolytique en fonction de la température (Gonzalez et al., 2001 ; Kyari et al., 2005 ; Ucar et al., 2005).

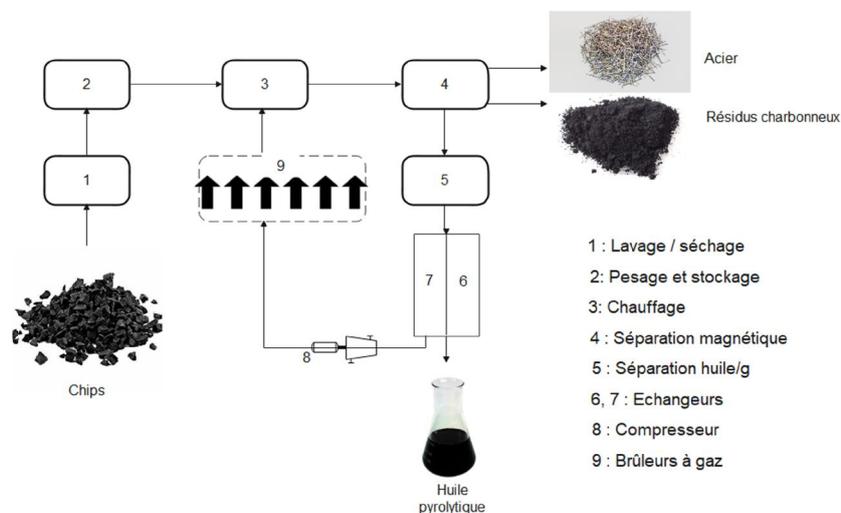
	Température (°C)	500	550	650
<b>Huile pyrolytique</b>	% Poids	38	46.10	48.40
	Pouvoir calorifique	42.10	43.27	41.60
<b>Charbon</b>	% Poids	37.9	37.60	41.70
	Pouvoir calorifique	Non déterminé	27.90	15.70

Le rendement des produits pyrolytiques dépend de la température. La conversion totale du pneu est atteinte à 500°C et à une pression atmosphérique, qui sont considérés comme conditions optimales de la pyrolyse. La majorité des industries de pyrolyse des pneus sont basées sur la technologie de pyrolyse lente couplée à des procédés catalytiques afin de maximiser le rendement de l'huile pyrolytique. Le tableau suivant illustre les différents rendements de l'huile pyrolytique (liquide), le gaz et le solide en fonction de la température.

**Tableau 1.7 :** Rendement moyen des produits (% poids) en fonction de la température  
(Martinez et al.,2013)

Température (°C)	Rendement des produits (% poids)		
	Liquide	Gaz	Solide
425	47	9	44
450	<b>58.1</b>	4.5	37.4
475	49	10	41
500	55.4	6	38.6
525	56.9	5.2	37.8
550	38.1	2.4	<b>49.1</b>
600	41.5	17.9	40.6
700	31.3	29.7	40.6
800	27.5	<b>31.5</b>	41

Une installation de pneus complètement automatique, fonctionnant en cycle continu est décrite dans la figure 1.11. Les PUNR subissent un prétraitement et sont réduits en chips. Après l'étape de lavage (1) et séchage, les chips sont envoyées au four (3). Les vapeurs pyrolytiques (gaz-huile) sont collectées et filtrées (5), et sont ensuite refroidies et condensées et séparées dans deux échangeurs de chaleur (vapeurs-eau) (6, 7). La fraction condensable (huiles) est dirigée vers le réservoir de stockage, la fraction incondensable (gaz de synthèse) quant à elle est recueillie et recyclée. Un autre convoyeur à vis est monté à l'extrémité du réacteur où le noir de carbone se sépare de l'acier (4) (Allred et al., 2000)

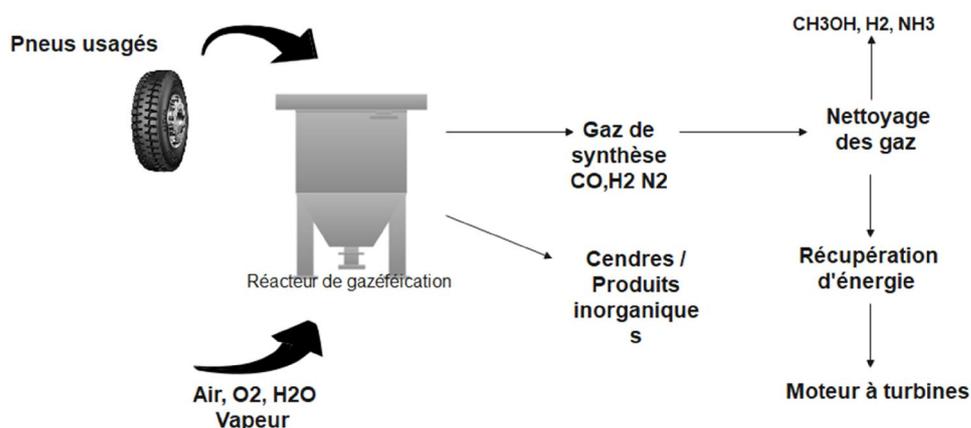


**Figure 1.11** : Procédés de pyrolyse de copeaux (chips) de pneus. (Allred et al., 2000)

### 1.5.3.3. Gazéification

Le développement des procédés de gazéification est parvenu en réponse à des crises pétrolières majeures. La gazéification est un traitement thermo-chimique réalisé à haute température ( $T > 2000^{\circ}\text{C}$ ) dans lequel l'air, l'oxygène pur, de l'air enrichi par l'oxygène ou de la vapeur d'eau sont injectés (HAGHI et al, 2019), (Leger et Lafortune, 2001). Le processus consiste à briser les molécules du combustible (PUNR) dans l'objectif de convertir l'énergie contenue dans les PUNR en un gaz (figure 1.12). Le gaz produit par la gazéification est connu sous le nom de gaz de synthèse ou *syngas* (riche en  $\text{CO}_2$ ,  $\text{CH}_4$ ,  $\text{H}_2$ ) utilisé comme combustible pour les turbines à gaz et les piles à combustible (Kordoghli, 2016 ; Kim et al., 2018)

## Chapitre I Généralités sur le recyclage et la valorisation des pneus



**Figure 1.12** : Procédés de pyrolyse de copeaux (chips) de pneus. (Allred et al., 2000)

Le tableau suivant montre les principaux avantages et inconvénients des méthodes de valorisation par voie thermique.

**Tableau 1.8** : Avantages et inconvénients des différents procédés thermiques (Shulman, 2004 ; CLAUZADE, 2012 ; Martinez et al., 2013 ; Kordoghli, 2014 ; Alkhatib, 2015 ; Machin et al., 2017).

	<b>Avantages</b>	<b>Inconvénients</b>
<b>Incinération</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Réduction des émissions de CO<sub>2</sub></li> <li>- Substituer aux énergies fossiles.</li> <li>- Valorisation de l'acier en cimenteries</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Dispositifs de traitement des émissions gazeuses coûteux.</li> <li>- Pas de valorisation de matière.</li> <li>- Pollution atmosphérique générée en cas de combustion incomplète.</li> </ul>
<b>Pyrolyse</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Faibles émissions gazeuses</li> <li>- Faible impact environnemental</li> <li>- Gestion facile des produits pyrolytiques</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Les bénéfices dépendent de la vente des produits pyrolytiques.</li> <li>- Procédé coûteux</li> </ul>

<b>Gazéification</b>	Coûts d'investissements faibles - Faible émission gazeuse - Technologie simple	Dispositifs de traitement des émissions gazeuses coûteux. - Obligation d'un broyage fin. - Utilisation des températures très élevées.
----------------------	--	---

### 1.5.4. Valorisation chimique

#### 1.5.4.1. Dévulcanisation

Considérée aussi comme une voie de valorisation de la matière ; c'est l'opération inverse de la vulcanisation. L'utilisation des caoutchoucs naturels ou synthétiques n'aurait pas été possible sans la vulcanisation, c'est grâce à l'ajout du soufre à haute température que des liens et jonction (nœuds de réticulations) sont créés entre les chaînes de polymères insaturées présentes dans le latex pour produire du caoutchouc naturel (elle peut être appliquée sur les caoutchoucs synthétiques). Ce procédé donne aux caoutchoucs certaines qualités comme l'élasticité, la force et la résistance aux dissolvants, au froid et à la chaleur. La vulcanisation s'effectue à une température comprise entre 150 et 200 °C pendant un temps allant de 2 à 15 minutes. (Markel et Lackner, 2020). La dévulcanisation consiste à détruire partiellement le réseau tridimensionnel créé, en cassant les liaisons carbone-soufre, soufre-soufre et carbone-carbone afin de faciliter la valorisation et le recyclage.

Il existe plusieurs procédés de dévulcanisation parmi lesquels nous citons :

- Thermomécanique : pendant le processus mécanique, une forte augmentation de température aura lieu ce qui aide à la dégradation du réseau tridimensionnel du caoutchouc. Dans ce cas il existe aussi plusieurs processus comme le mixage à grande vitesse et la récupération par extrusion (à l'aide d'une extrusion à double vis) (reclaimator process)
- Mécano-chimique : parmi les méthodes mécano-chimiques nous trouvons le procédé TCR (Trelleborg cold reclaiming), le processus De-Link et le processus de gonflement dans le benzène avec un sulfoxyde.
- d'autres techniques sont à exploiter telle que : ultrasons, four à microondes à énergie électromagnétique. (SADAKA, 2010)

### 1.5.5. Valorisation dans les asphaltes

L'asphalte est un mélange de proportions variables de sable, de granulat, de filler et de bitume. (Faure, 1985). La valorisation des PU dans les chaussées en asphalte a commencé il y a 170 ans avec une expérience impliquant le mélange du caoutchouc et du bitume visant à exploiter la nature flexible du caoutchouc afin d'obtenir une surface de pavage plus durable. Une application a été introduite par des entreprises suédoises qui ont produit un asphalte de surface avec l'ajout d'une petite quantité de caoutchouc provenant de PU afin de remplacer une partie de l'agrégats minéral et pour obtenir un mélange asphalte plus résistant. (Presti, 2013)

#### 1.5.5.1. Caractéristiques et propriétés des bitumes

Le bitume est un sous-produit d'hydrocarbures lourds, résidu noir de pétrole brut obtenu soit par distillation naturelle, soit par distillation en raffinerie, il est léger, ductile et souple doté de bonnes propriétés d'adhérence, de plasticité et d'élasticité ; peu réactif et insoluble dans l'eau.

#### 1.5.5.2. Incorporation du caoutchouc de pneus dans l'asphaltage

L'asphalte caoutchouté est un asphalte auquel une proportion de poudrette de caoutchouc est ajoutée selon deux procédés, à froid et à chaud. Dans ces deux processus d'incorporation, le bitume est chauffé entre 180 et 200 °C afin de permettre une certaine fluidité pour faciliter le mélange des différents constituants et pour maintenir la température adéquate des bitumes. D'autres additifs sont éventuellement incorporés aux bitumes tels que : le caoutchouc normal et des polymères ou des huiles de traitements (huiles d'unité d'extension). (Kebaili, 2017)

##### A) Procédé sec (Dry method)

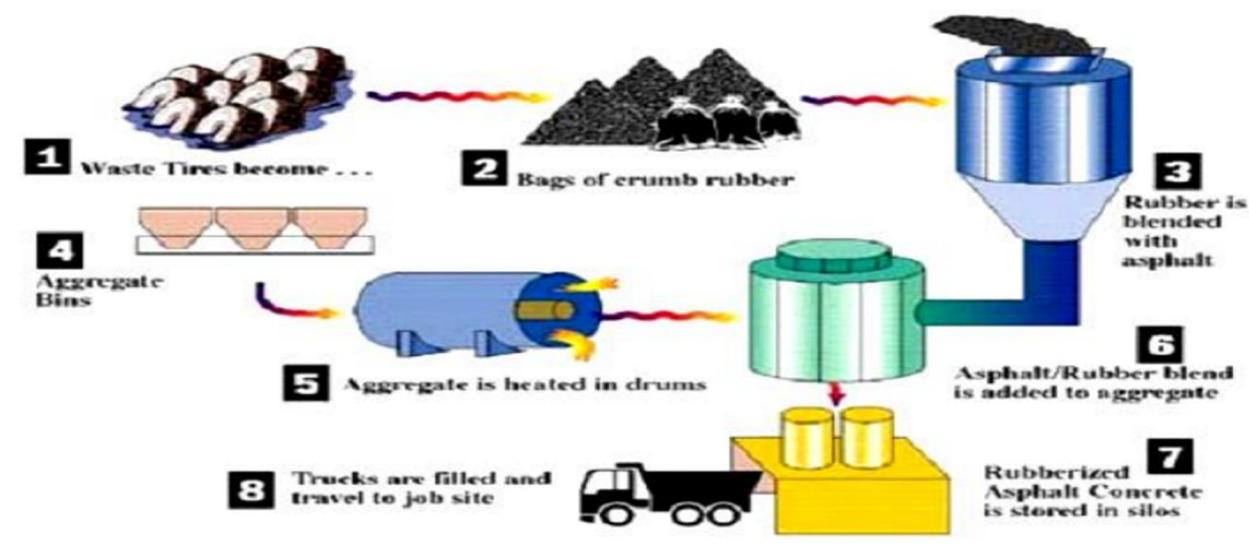
La technique à sec consiste à introduire une poudrette de caoutchouc de diamètre ne dépassant pas les 2 mm (à raison de 10 à 20 kg/tonne d'enrobé) dans les enrobés à chaud. Le caoutchouc étant mis en contact avec le bitume à une température et une durée de temps plus faible que celles du deuxième procédé. Deux techniques sont actuellement employées dans ce processus, résumées dans le tableau suivant :

**Tableau 1.9 :** Techniques employées dans le procédé sec. (Martinez, 2013)

Techniques	Caractéristiques
<b>Plus Ride</b>	<ul style="list-style-type: none"><li>- Utilisation des granulats de caoutchouc grossiers (2 à 6mm) et une fraction fine de poudrette de caoutchouc.</li><li>- CRM ajouté comme agrégat en caoutchouc à un agrégat gap-graded avant de se mélanger à l'asphalte.</li></ul>
<b>Sèche générique</b>	<ul style="list-style-type: none"><li>- Utilisation d'un pourcentage inférieur de CRM comparé à Plus Ride (1 à 3% en poids du mélange).</li><li>- La poudrette utilisée est de diamètre allant de 2 à 9.5mm.</li></ul>

### **B) Le processus humide (Wet method)**

Il consiste en un mélange de poudrette de caoutchouc avec le bitume à très haute température avec l'ajout d'une huile émoullente, aromatique ou polymère avant l'ajout des agrégats comme le montre la figure 1.13. La poudrette agit en tant que modificateur d'asphalte, elle est d'abord mélangée avec le bitume donnant un mastic bitume-caoutchouc avant d'entamer le mélange avec les granulats.



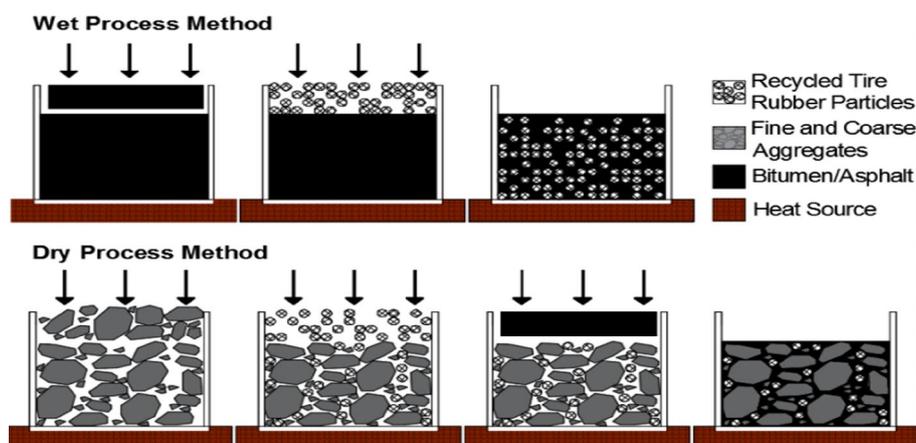
**Figure 1.13** : Etapes de fabrication d’asphalte caoutchouté avec le processus humide

Les deux technologies employées dans le processus humide sont résumées dans le tableau ci-dessous :

**Tableau 1.10** : Technologies utilisées dans le processus humide. (Ould-henia, 2005)

Technologies	Explications
Mc Donald	<ul style="list-style-type: none"> <li>- CRM mélange et réagi dans un réservoir avant l’ajout dans le mélange</li> <li>- 15 à 22% en caoutchouc moulu de taille 10 à 30mm sont mélangé à l’asphalte et réagissent pendant une demie à une heure.</li> </ul>
Mélange continu	<ul style="list-style-type: none"> <li>- L’asphalte est mélangé avec 5 à 20% de caoutchouc moulu.</li> <li>- L’utilisation d’une classe plus fine de poudrette permet de réduire le temps réaction entre CRM-Asphalte.</li> </ul>

La figure 1.14 résume le fonctionnement des deux procédés d’incorporation de la poudrette de caoutchouc dans les bitumes (procédé humide et procédé à sec).



**Figure 1.14 :** Schéma résumant les deux procédés d'incorporation du caoutchouc dans le bitume.  
(Presti, 2013)

### 1.5.5.3. Etude comparative entre un bitume ordinaire et un bitume modifié

La présente étude est réalisée par (Hachani et al., 2014) dans le but d'évaluer et de comparer la variation de certaines caractéristiques des enrobés bitumineux modifiés, en ajoutant de la poudrette de caoutchouc à des teneurs différentes, le procédé utilisé est le Wet process (procédé sec). Le tableau 1.11 représente les performances du bitume 0/14 utilisé avant (à 0%) et après l'ajout de la poudrette de caoutchouc :

**Tableau 1.11 :** Caractéristiques du bitume en fonction de la teneur de la poudrette de de caoutchouc ajouté

Teneur en poudrette (%)	Stabilité (KN)	Fluage (mm)	Compacité (%)	Quotient (KN/mm)
0	12.17	3.4	93.73	3.58
10	18.06	2.41	97.53	7.49
12	18.09	1.04	97.72	17.47
14	15.09	1.09	97.52	13.48
16	14	1.12	97.31	12.48

L'analyse du tableau précédent nous permet de constater une amélioration remarquable des caractéristiques mécaniques suite à l'ajout de la poudrette de caoutchouc au bitume.

## Chapitre I Généralités sur le recyclage et la valorisation des pneus

Les meilleures performances sont enregistrées à la teneur de 12% en poudrette, avec une augmentation de la stabilité (force maximale) de près de 49% et de la compacité (0.05%) et une diminution remarquable du fluage (déformation mesurée à la force maximale) d'ordre de 69%, d'après ces résultats nous constatons clairement que l'enrobé du bitume modifié est plus performant, dans le tableau suivant une évaluation générale des deux bitumes est résumée.

**Tableau 1.12 :** Evaluation générale entre les deux types de bitume. (Presti, 2013)

	Bitume ordinaire	Bitume modifié
<b>Caractéristiques mécaniques</b>	×	√√
<b>Compactage</b>	×	√√
<b>Simplicité de la mise en œuvre</b>	√√	√√
<b>Avantage économique</b>	×	√√
<b>Avantage environnemental</b>	×	√√

× : mauvais, √ : bon, √√ : très bon

### 1.5.5.3. Avantages du rajout de la poudrette dans les bitumes

En plus de la valorisation, plusieurs autres avantages sont offerts par l'incorporation du caoutchouc des PU dans les bitumes, ceux-ci se traduisent en :

- Augmentation de la force cohésive, la viscosité et la durabilité. Augmentation de la résilience : les caractéristiques élastiques de l'asphalte caoutchouc sont habituellement augmentées de 40 à 50% par rapport à l'asphalte conventionnel.
- Diminution de la température de rupture : les bitumes modifiés sont plus résistants à la fissuration à basses températures car ils présentent une température de rupture plus inférieure.
- Diminution du point de ramollissement (Carter, 2002)

### 1.6. Etude comparative de différentes voies de valorisation de pneus

Une étude menée par Franklin Associates pour le compte de Genan Business and Development A/S menée aux Etats-Unis en 2010 afin de comparer deux filières de valorisation sur le court terme (2009-2014) et long terme (2020). Les filières comparées sont

l'utilisation des granulats pour la production de bitumes modifiés (asphalt rubber) et la co-incinération des pneus en cimenterie.

### **Méthodologie et hypothèses :**

Afin de comparer les deux filières deux approches complémentaires ont été établies : Une Analyse du Cycle de Vie (ACV) attributionnelle pour comparer les impacts environnementaux des deux voies de valorisation actuelles et l'ACV conséquentielle pour évaluer les conséquences d'une réorientation des PU co-incinérés en cimenterie vers la valorisation matière avec l'hypothèse que les cimenteries utiliseront des combustibles fossiles conventionnels (charbon et pétrole) en remplacement des pneus. L'étude a pris comme référence une usine de granulation et une cimenterie basées au Texas aux Etats-Unis. Les impacts environnementaux ont été évalués selon sept indicateurs ramenés à l'unité d'une tonne de PU :

- Consommation d'énergie fossile,
- Consommation de fer, pouvoir de réchauffement global,
- Impact potentiel de toxicité aigüe des particules fines sur la santé humaine.
- Potentiel d'acidification,
- Potentiel d'eutrophisation,
- Potentiel de création d'ozone photochimique

Les principaux résultats de cette étude sont résumés dans le tableau 1.13

## Chapitre I Généralités sur le recyclage et la valorisation des pneus

**Tableau 1.13** : Résultats de la comparaison entre la granulation et la co-incinération (ADEME, 2015)

Catégorie d'impact	Facteur de caractérisation	Approche attributionnelle						Approche conséquentielle	
		Court terme			Long terme			Court terme	Long terme
		recyclage des matériaux	récupération d'énergie	Delta	recyclage des matériaux	Récupération d'énergie	Delta	Passer vers le recyclage des matériaux	Passer vers la récupération d'énergie
Réchauffement global	Kg CO2 éq	-1487	-501	-985	-1480	-503	-978	-999	-1.004
Consommation d'énergie	GJ	-56.6	-34.2	-22.5	-58.8	-35.5	-23.3	-22.3	-23.5
Consommation de fer	Kg	-178	-143	-35.2	-178	-143	-35.2	-35.2	-23.5
Acidification	H+ moles éq	-825	-277	-548	-822	-267	-555	-557	-568
Eutrophisation	Kg N a	-825	-277	-548	-822	-267	-555	-557	-568
Ozone photochimique	Kg NOx éq	-6.39	-1.52	-4.87	-6.40	-1.28	-5.11	-5.07	-5.22
Effets respiratoires	Kg PM2.5 éq	-1.71	-1.04	-0.68	-1.70	-1.02	-0.67	-0.67	-0.71

D'après l'ACV attributionnelle, la valorisation matière par granulation offre un meilleur bilan environnemental que la co-incinération en cimenterie sur l'ensemble des indicateurs. Les gains sont essentiellement liés aux économies d'énergie et aux émissions évitées grâce à la substitution de caoutchouc synthétique vierge par des pneus usagés pour la production de bitumes modifiés. L'ACV conséquentielle montre des gains légèrement moindres.

**Remarque :** les données de référence aux Etats-Unis peuvent difficilement s'extrapoler au contexte européen.

### 1.7. Gestion et traitement des déchets pneumatiques dans le monde

Afin de pallier aux problèmes de déchets pneumatiques, un programme de gestion de ces derniers doit être mis en exécution, chaque pays à son propre système de gestion (Jain, 2016). Toutefois, pour qu'un système soit efficace les nations unies ont souligné 05 clés directrices qu'il faut suivre :

- Politiques et réglementations ;
- Etablissements de renfort ;
- Mécanismes financiers appropriés ;
- Technologies nécessaires ;
- Participation des parties prenantes.

#### 1.7.1. Cas des Etats-unis

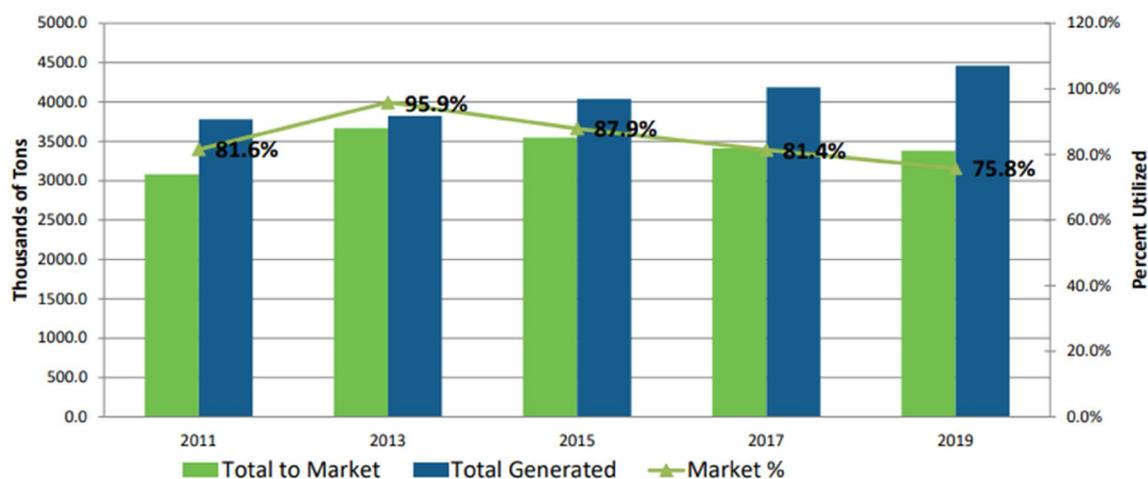
L'Agence de Protection de l'Environnement (EPA) a classé les PUNR parmi les « déchets et matériaux courants ». Les USA génèrent des millions de PU annuellement et possède la plus grande industrie de recyclage de déchets pneumatiques au monde, avec des marchés plus développés que dans n'importe quel autre pays. Aux Etats-Unis chaque état gère les pneus qui y sont générés selon une réglementation et programme spécifique (Jain, 2016). Toutefois, il existe certaines lignes directrices communes dont :

- Source de financement ;
- Exigences de licence ou d'enregistrement pour les transporteurs ;
- Manifeste pour les expéditions des PUNR ;
- Limitations concernant les personnes autorisées à manipuler les PUNR ;
- Exigences d'assurance financière pour les manipulateurs des PUNR ;
- les activités de développement du marché.

De façon générale les consommateurs sont amenés à payer 02 types de taxes une « State Tire Fee », versée au ministère de l'environnement ou encore au département d'Etat pour améliorer le système de gestion et la recherche et développement de nouvelles utilisations ; et un « Scrap Tire Recycling Charge », pour couvrir les coûts de transport et de traitement. Selon le type de pneus, les taxes sont de l'ordre de 0.5\$ à 5\$ (Jain, 2016). Le taux de recyclage aux USA

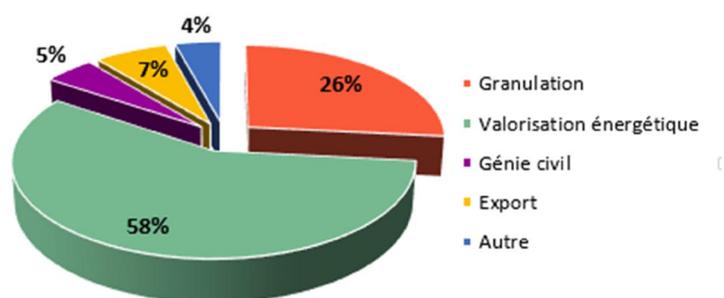
## Chapitre I Généralités sur le recyclage et la valorisation des pneus

n'a pas cessé d'augmenter depuis 1990 jusqu'en 2015 passant de 24.5% jusqu'à 87.9%. En 2020, L'USTMA a publié de nouvelles statistiques résumées dans la figure 1.15.



**Figure 1.15 :** Quantités produites et valorisées aux USA 2011-2019 (USTires, 2020)

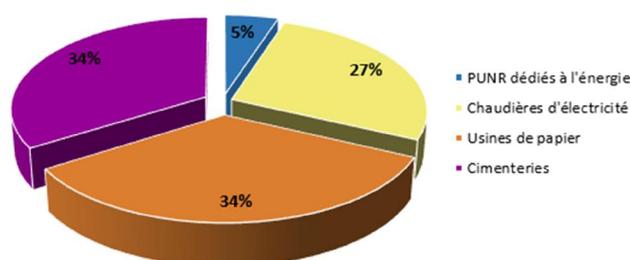
On remarque que le taux de recyclage est en baisse depuis 2015 avec un taux de 87.9% comparé à 81.4% et 75.8% en 2017 et 2019 respectivement. D'après l'USTMA, le problème n'est pas lié à une baisse dans la gestion et le recyclage mais plutôt à une augmentation dans la quantité des PUNR causé par un développement considérable du parc automobile. En 2013, 3.6 millions de PUNR ont été générés aux Etats-Unis dont 95.9% a été valorisé, la figure ci-dessous nous montre le pourcentage des différentes voies de valorisation.



**Figure 1.16 :** Principales destinations des PUNR aux USA en 2013 (RMA, 2014)

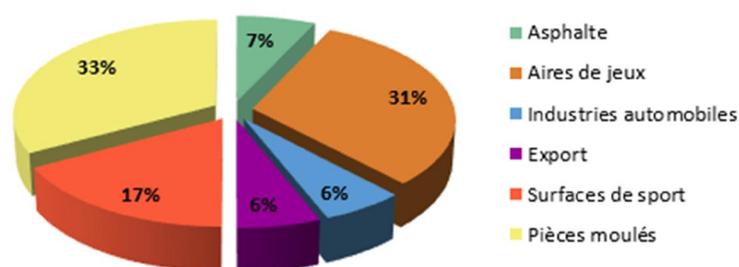
## Chapitre I Généralités sur le recyclage et la valorisation des pneus

On remarque que les premières voies de valorisation aux USA sont la voie énergétique et la granulation avec des taux de 58% et 26% respectivement. La figure ci-dessous nous montre les principales utilisations dans le domaine de la voie énergétique.



**Figure 1.17** : Utilisations en valorisation énergétique en 2013 (RMA, 2014)

On remarque que les principaux débouchés de la valorisation énergétique sont répartis entre les industries de ciment, de papier et les chaudières d'électricité. Par ailleurs, la figure 1.18 nous montre les principales utilisations des granulats de PUNR qui sont principalement : la fabrication de pièces moulés (antidérapants, anti-bruits), les aires de jeux et les surfaces de sport. Le petit tiers restant se partage entre les granulats exportés, dans les bitumes modifiés et les industries automobiles (parechoc).



**Figure 1.18** : Utilisation des granulats en 2013 (RMA, 2014)

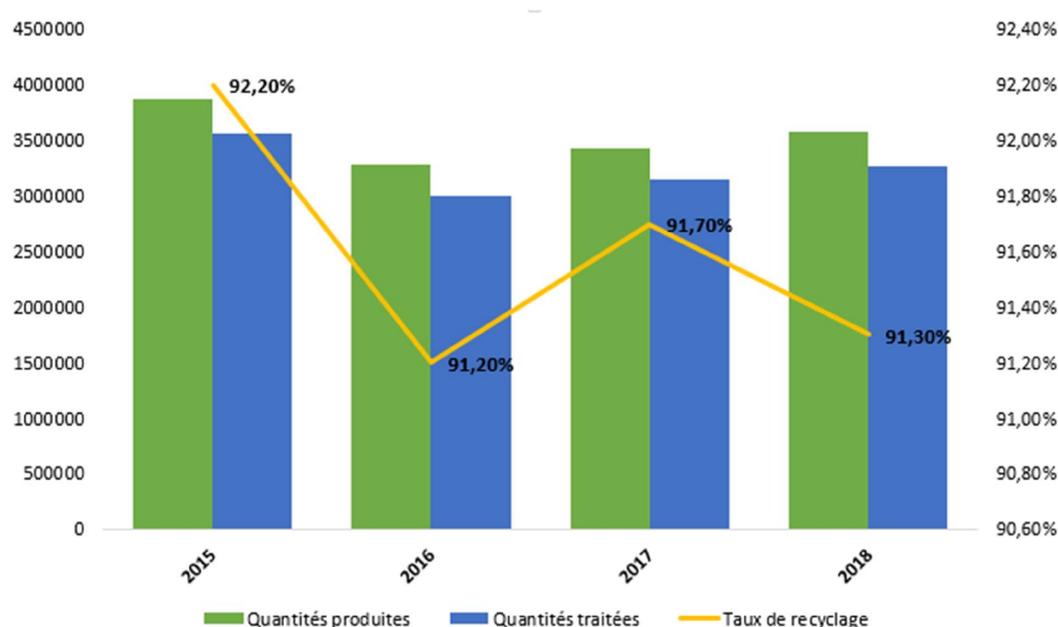
Les États-Unis se dirigent vers l'élimination des pneus mis au rebut en les utilisant comme mélanges d'asphalte pour les autoroutes. Parfois, les PU sont également incorporés dans les décharges, en tant que partie de la couverture (Jain, 2016).

## Chapitre I Généralités sur le recyclage et la valorisation des pneus

La norme ASTM D8-97 définit le rubber modified asphalt (RMA) comme un mélange de ciment bitumineux, de caoutchouc recyclé à partir de PU et de certains additifs, dans lequel le composant caoutchouc représente au moins 15 % en poids du bitume (dans les faits, le taux d'incorporation varie de 18 à 22 %) (Philgea et Moringa, 2015).

### 1.7.2. Cas de l'Europe

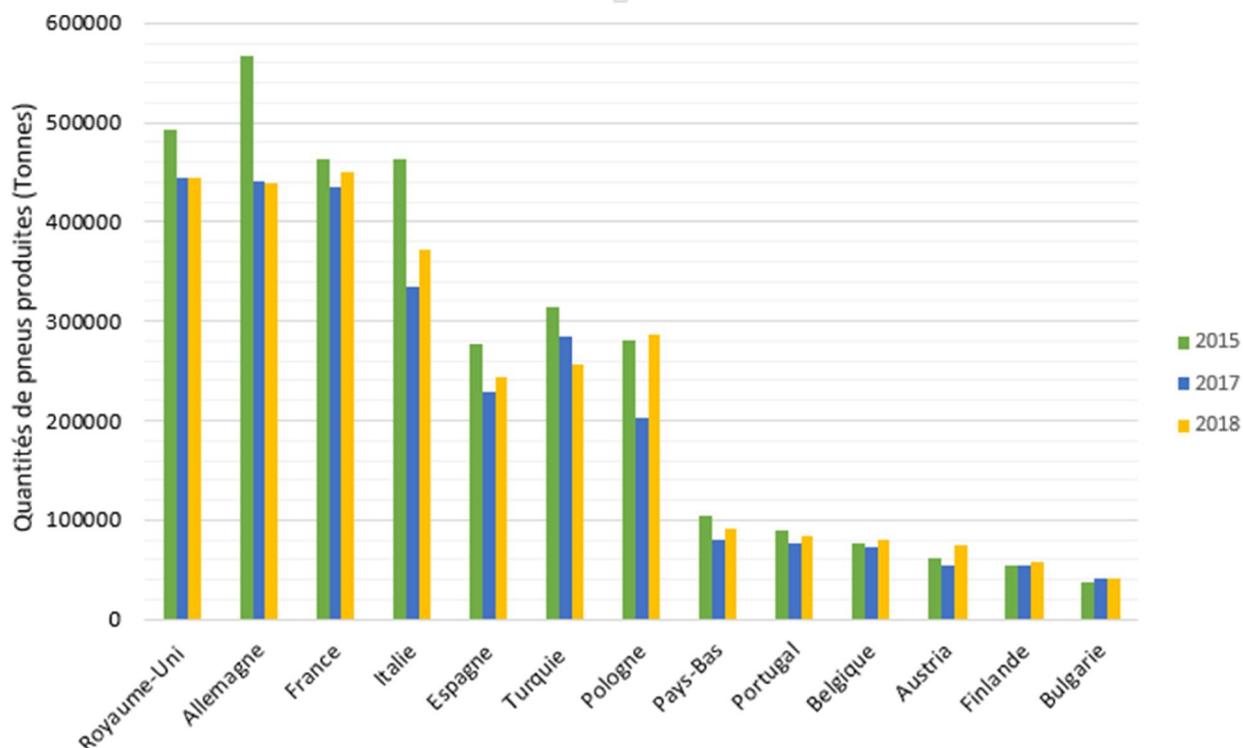
Dans les pays de l'Union Européenne, la définition des pneus hors d'usage comprend à la fois les pneus rechapables, ainsi que ceux qui ont atteint leur fin de vie (Jain, 2016). Les statistiques d'une étude concernant 32 pays en Europe (28 pays d'UE + Turquie, Serbie, Norvège et Suisse) faites par l'ETRMA illustrées sur la figure 1.19 montrent un taux de recyclage qui varie légèrement entre 2015 et 2018. Malgré des quantités de pneus assez considérables (entre 3.2 et 3.8 millions de tonnes), on remarque que les pays européens arrivent à atteindre des taux de traitement supérieur à 91% depuis 4 ans.



**Figure 1.19 :** Quantités produites et traitées de PU (Tonnes) entre 2015 et 2018 (ETRMA, 2019)

La figure 1.20 montre les quantités de PU produites dans quelques pays européens en 2015, 2017 et 2018.

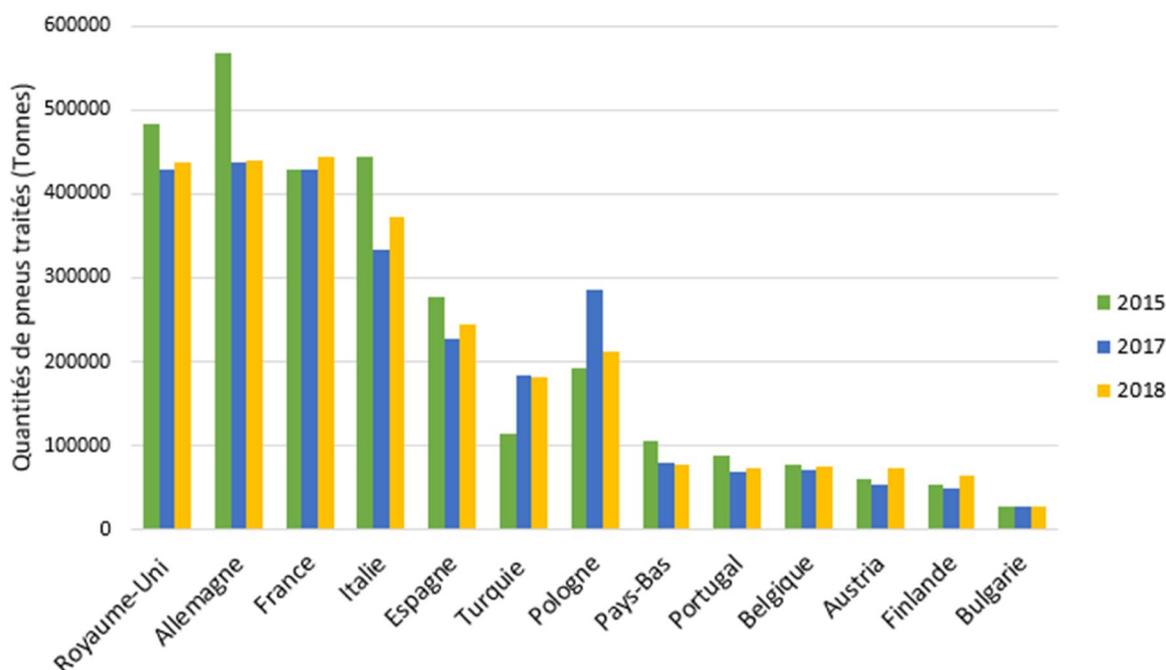
## Chapitre I Généralités sur le recyclage et la valorisation des pneus



**Figure 1.20 :** Quantité de PU dans quelques pays européens (ETRMA, 2019)

Il apparaît que les pays développés tels que l'Allemagne et le Royaume-Uni sont les principaux producteurs de déchets pneumatiques en Europe au vu de la croissance de leurs parcs automobiles. La figure 1.21 montre les quantités de pneus traitées dans ces pays pendant ces mêmes années.

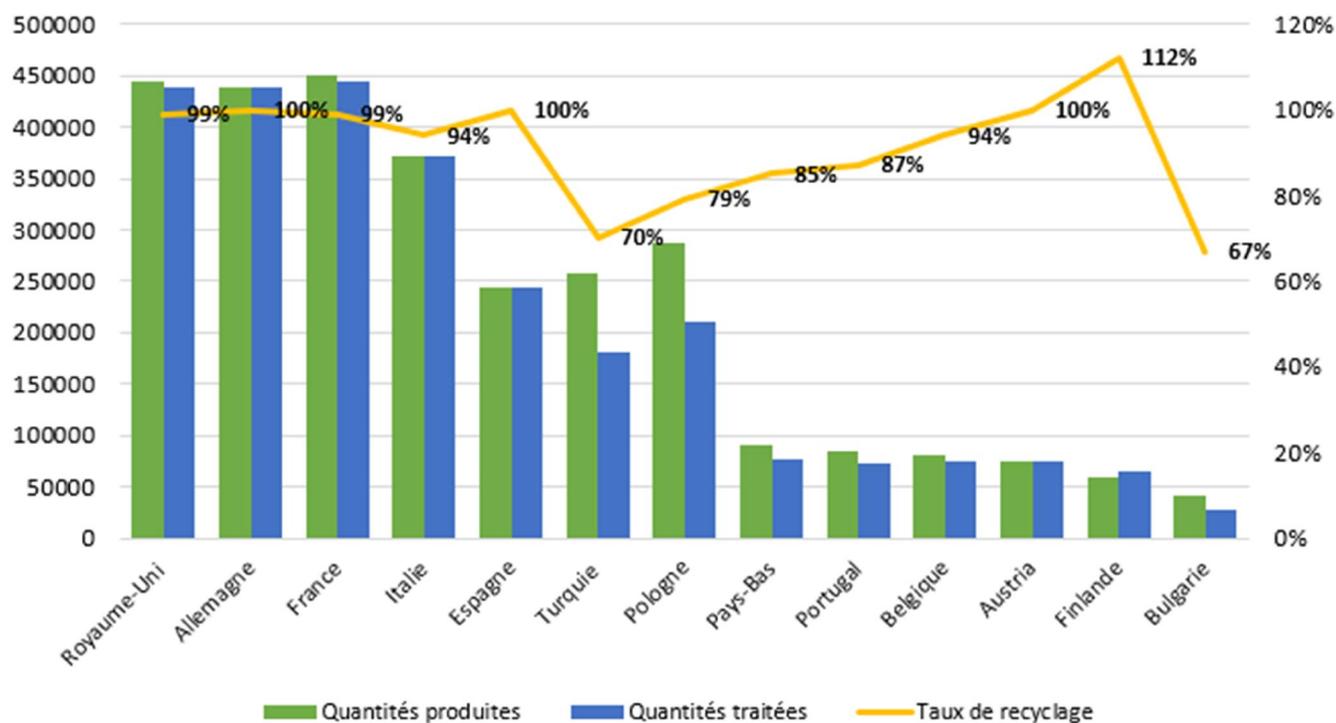
## Chapitre I Généralités sur le recyclage et la valorisation des pneus



**Figure 1.21 :** Quantité de pneus usagés traités dans quelques pays européens (ETRMA, 2019)

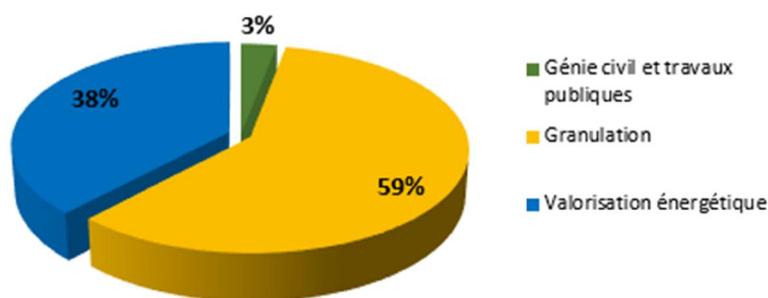
La figure 1.22 montre les quantités produites et traitées en tonnes ainsi que le taux de recyclage dans quelques pays européens. On remarque que dans les pays développés comme l'Espagne ou l'Allemagne grâce à leur technologies développées et savoir-faire présentaient en 2018 des taux de recyclage de 100%, la Finlande de son côté a atteint un taux de 112% (Cette dernière a importé près de 3000 tonnes de broyats de pneus qu'elle a recyclé en granulats). Par ailleurs, on remarque des taux moins élevés en Turquie et en Bulgarie.

## Chapitre I Généralités sur le recyclage et la valorisation des pneus



**Figure 1.22** : Rapport entre les quantités produites et traitées (Tonnes) en 2018 (ETRMA, 2019)

Les principales utilisations des produits issus des déchets pneumatiques pour les 32 pays de l'étude sont illustrées dans la figure 1.23. On remarque que la valorisation énergétique est la voie la plus utilisée.



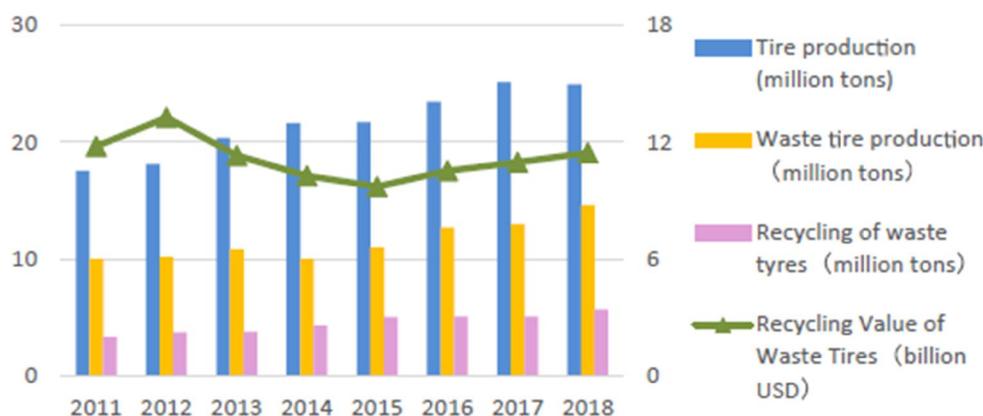
**Figure 1.23** : Principales voies de valorisations en Europe (ETRMA, 2019)

### 1.7.3. Cas de la Chine

Selon le ministère des transports chinois, la Chine a recensé environ 340 millions de véhicules sur les routes à la fin du premier semestre de 2019, cette augmentation du parc automobile oblige le pays à avoir une bonne stratégie de gestion des PU et en fait un réel défi. Dans un nouveau projet de directives la Chine s'est engagée à créer de nouvelles entreprises spécialisées dans la réutilisation et le recyclage de ses PU en caoutchouc (Jain, 2016). Des réglementations pertinentes sur la gestion des PU ont été publiées. Les principaux points règlementés sont liés au :

- Système de gestion ;
- La collecte ;
- Le transport ;
- Le recyclage et l'élimination ;
- L'import ;
- L'export.

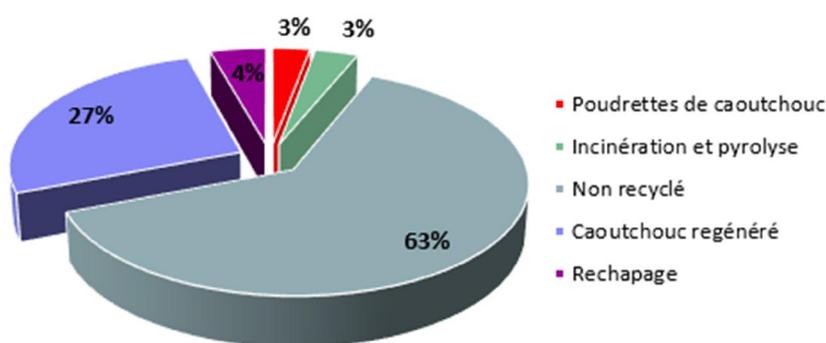
Selon la China Tyre Recycling Association (CTRA), si la Chine parvient à recycler les 13 millions de tonnes de PU produits chaque année, une chaîne industrielle d'une valeur de plus de 100 milliards de yuans (14,2 milliards de dollars) pourrait être créée. Les statistiques rapportées par Wang et al., 2020 englobent des données complètes sur le recyclage des PU archivées depuis 2011. Les principaux indices comprennent la production de pneus, production de PU, le volume de récupération, et la valeur de récupération, comme montré dans la figure 1.24.



**Figure 1.24 :** Production de pneus et recyclage 2011-2018 (Wang et al, 2020)

## Chapitre I Généralités sur le recyclage et la valorisation des pneus

Le poids total produit de 2011 à 2018 était de 172,82 millions tonnes, dont 4,493 milliards de pneus neufs et 96,41 millions de tonnes de déchets. Cependant, seuls 35,87 millions de tonnes de PU, soit 37,2 %, ont été récupérés ce qui a entraîné une accumulation de PU et de graves problèmes environnementaux. La production de PU a augmenté chaque année, alors que le recyclage de ces pneus est très en retard. Par conséquent, le développement d'approches plus avancées pour le recyclage de ces PU est crucial pour la protection de l'environnement. Les principales méthodes actuellement utilisées pour recycler sont montrés sur la figure 1.25.



**Figure 1. :** Principales utilisations des pneus usagés (Wang et al, 2020)

Les statistiques montrent que la récupération des PU (63%) est principalement utilisée pour le rechapage des pneus, 27% pour produire du caoutchouc récupéré. Les performances pratiques des produits recyclés et réutilisés n'est pas élevé, le taux d'utilisation de la poudre de caoutchouc, qui est la méthode sans pollution secondaire, n'est actuellement que de 3%. En résumé, l'industrie de la réutilisation et du recyclage des PU présente de grands avantages économiques et environnementaux. La Chine a un grand potentiel de réutilisation et de recyclage des PU et de brillantes perspectives. Elle a besoin du soutien du gouvernement, de la société et de nombreux autres aspects pour promouvoir la réutilisation et le recyclage des PU. (Wang et al, 2009)

## *Chapitre 2*

## 2. Recyclage et valorisation des pneus en Algérie : Cas de l'entreprise RECYTECH

### 2.1. Pneus usagés en Algérie

En Algérie, les pneus hors d'usages sont classés comme déchets spéciaux (classe S) sous le code 16.1.1 sans aucun critère de dangerosité selon le décret exécutif N°6 - 104 du 28 février 2006 fixant la nomenclature des déchets.

Le développement et la croissance du parc automobile impliquent l'évolution à la hausse de la quantité des déchets pneumatiques. Selon l'Agence Nationale de la Promotions du Commerce extérieure, l'Algérie importe 49.62 milliers de tonnes de pneus neufs en moyenne. Sachant qu'un pneu neuf génère un pneu usagé et si l'on tient compte de la perte de masse due à l'usure du pneu, on se retrouve en moyenne avec environs 45.65 milliers de tonnes de pneus usagés (Trousine, 2009).

Selon une enquête de l'Agence Nationale des Déchets (AND), pas moins de **288 216 tonnes** de pneus usagés ont été générés en 2018, contre environ **190 000 tonnes** en 2008, soit une augmentation constante au fil des années (Figure 2.1).

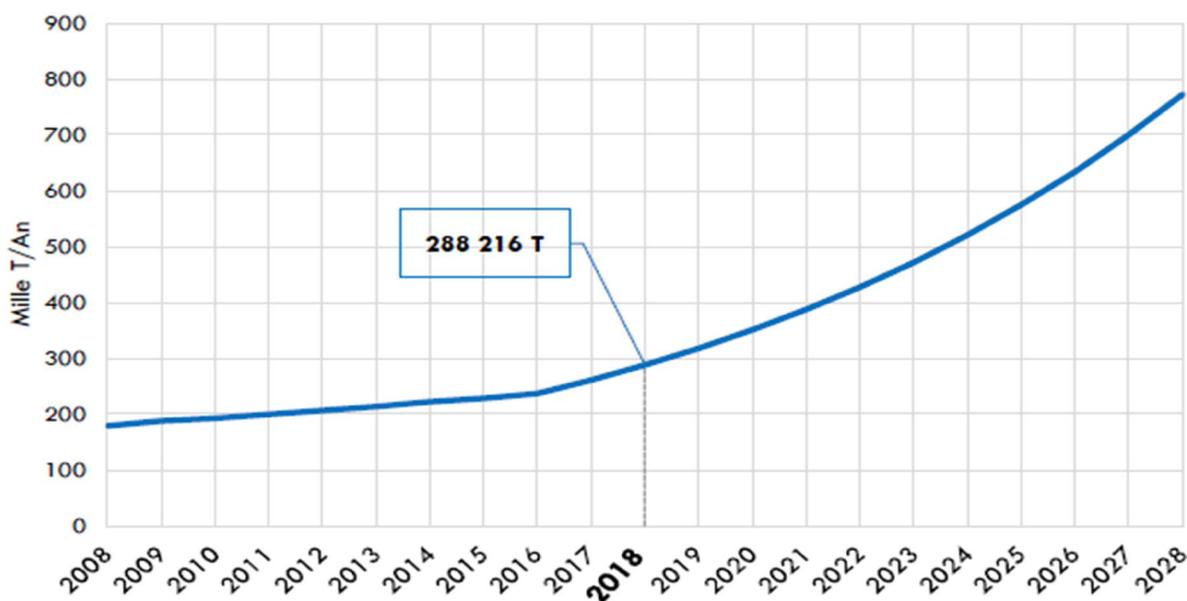


Figure 2.24 : Evolution des quantités de pneus usagés générés en Algérie (AND, 2018)

L'exploitation des données de la même source, couvrant le territoire national, met en évidence que les quantités de pneus usagés générées dans les wilayas du nord, notamment Alger

sont supérieures à celles des autres régions du fait d'une densité de population importante, avec quelques une des plus grandes agglomérations d'Algérie : Alger, Blida, Oran, Bejaia, Tizi-Ouzou (Figure 2.2).

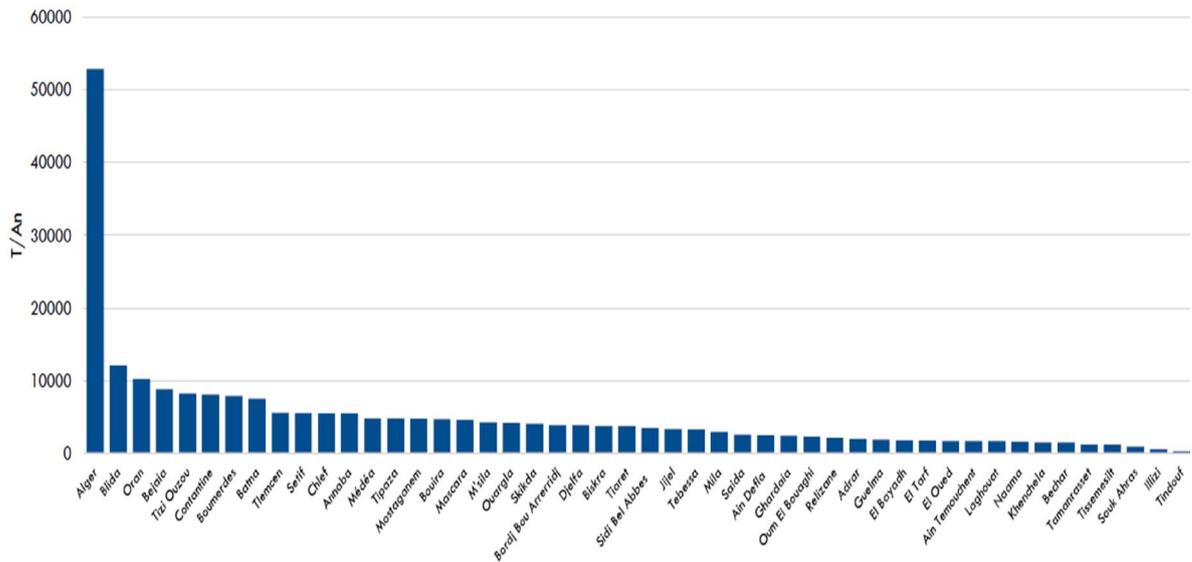
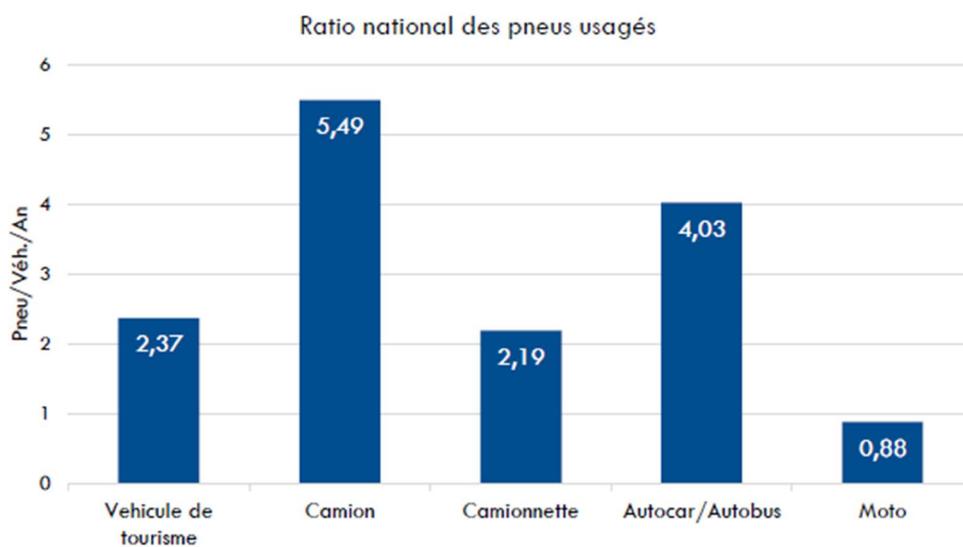


Figure 2.25 : Répartition des tonnages de pneus usagés générés en Algérie dans différentes wilayas (AND, 2018)

Par ailleurs, il est à noter que le ratio national du pneu/Véhicule./An montre que les pneus usagés générés par les camions et autobus sont plus conséquents que les véhicules de tourisme (Figure 2.3).



**Figure 2.26** : Ratio national du Pneu/Véhicule./An (AND, 2018)

## **2.2. Gestion et recyclage des pneus en Algérie-Cas de l'entreprise Recytech**

### **2.2.1. Historique et statut**

La Sarl **Recytech** est une usine algérienne moderne spécialisée dans le recyclage et la valorisation des pneus usagés créée en 2013. Cette entreprise est créée en application du décret exécutif n° 03-477 du 09 Décembre 2003 fixant les modalités et les procédures d'élaboration, de publication et de révision du plan national de gestion des déchets spéciaux. Elle est entrée en production en 2016.

Adoptant la politique « zéro déchet », Recytech est le principal organisme qui prend en charge le recyclage et la valorisation des PUNR en Algérie. L'entreprise prend en charge près de 12 000 tonnes de PUNR/an. Au-delà de l'aspect environnemental, Recytech a pour objectif de contribuer à la création d'une économie industrielle aux principes environnementaux. Elle vise à devenir un acteur important dans la chaîne d'approvisionnement régional, national et international en matières premières et produits dérivés en caoutchouc issus du recyclage. Son activité première est le recyclage mécanique qui permet de transformer le PUNR en quatre sous-produits :

- Granulés de caoutchouc de différents diamètres appelés SBR (Copolymère de Styène Butadiène Rubber) ;
- Poudrette de caoutchouc ;
- Fibres d'acier ;
- Fibres textiles.

### **2.2.2. La situation géographique de Recytech**

L'usine est située en bordure de la route de HAMMAM K'SENA – SEDDARA dans la commune D'EL-HACHIMIA, à 31km du centre de la wilaya de BOUIRA. Elle se situe à un carrefour du réseau routier national.

### **2.2.3. Structure de l'entreprise**

L'entreprise emploie plusieurs ouvriers, dont de nombreux ingénieurs qui se répartissent sur plusieurs départements comme illustré sur l'organigramme suivant (figure 2.4)

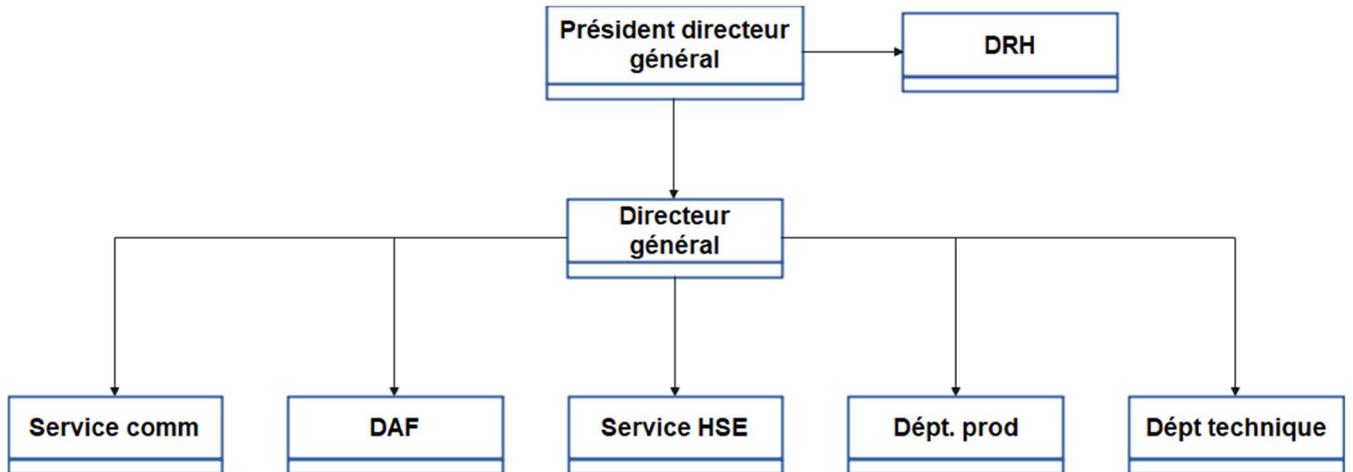


Figure 2.27 : Organigramme de l'entreprise

Afin d'augmenter les quantités produites, le département de production organise son travail en deux équipes (figure 2.5), une première équipe qui travaille de 6h à 13h et une deuxième de 13h à 21h.

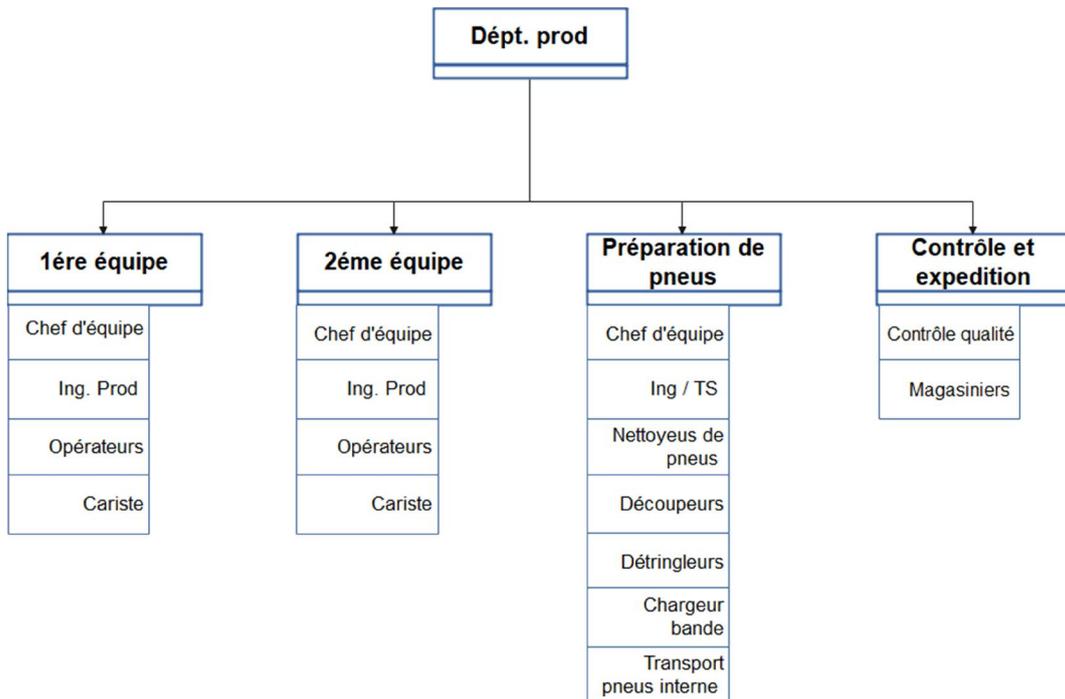


Figure 2.28 : Organigramme du département de production

### 2.3. Collecte et stockage des pneus usagés

Afin de récupérer les pneus usagés gratuitement, l'entreprise Recytech a signé des conventions avec des entreprises nationales telles que NAFTAL et ETUS Constantine. Par ailleurs, l'entreprise a établi aussi des conventions avec des entreprises privées GTP, NUMILOG, PEPSI... en vue de récupérer des pneus à des prix symboliques. Le prix dépend principalement de la distance entre le point de collecte et Recytech. En moyenne, il est de l'ordre de **0.5da/kg** à **1.50da/kg**. Quand la collecte est faite gratuitement, les PUNR sont quantifiés par unité, si cette dernière est payante, ils sont quantifiés par tonnes.

L'usine s'étend sur une surface de 12 000m<sup>2</sup>, dont une grande aire de réception des pneus usagés (figure 2.6).



**Figure 2.29** : Aire de réception, de stockage et de tri des PUNR au sein de Recytech

### 2.4. Etapes de recyclage des pneus usagés au sein de Recytech

Le recyclage des pneus comprend plusieurs étapes qui permettent de convertir un pneu en poudrette de caoutchouc. L'installation présente dans l'entreprise **RECYTECH** est livrée par l'entreprise allemande **KAUTZ VORRICHTUNGSBAU GMBH** (Figure 2.7), spécialisée dans la fabrication et l'installation des machines de recyclage des déchets. Elle comprend une technologie complète de la préparation du pneu jusqu'à obtention de fines particules de caoutchouc comme le montre **l'annexe 1**.

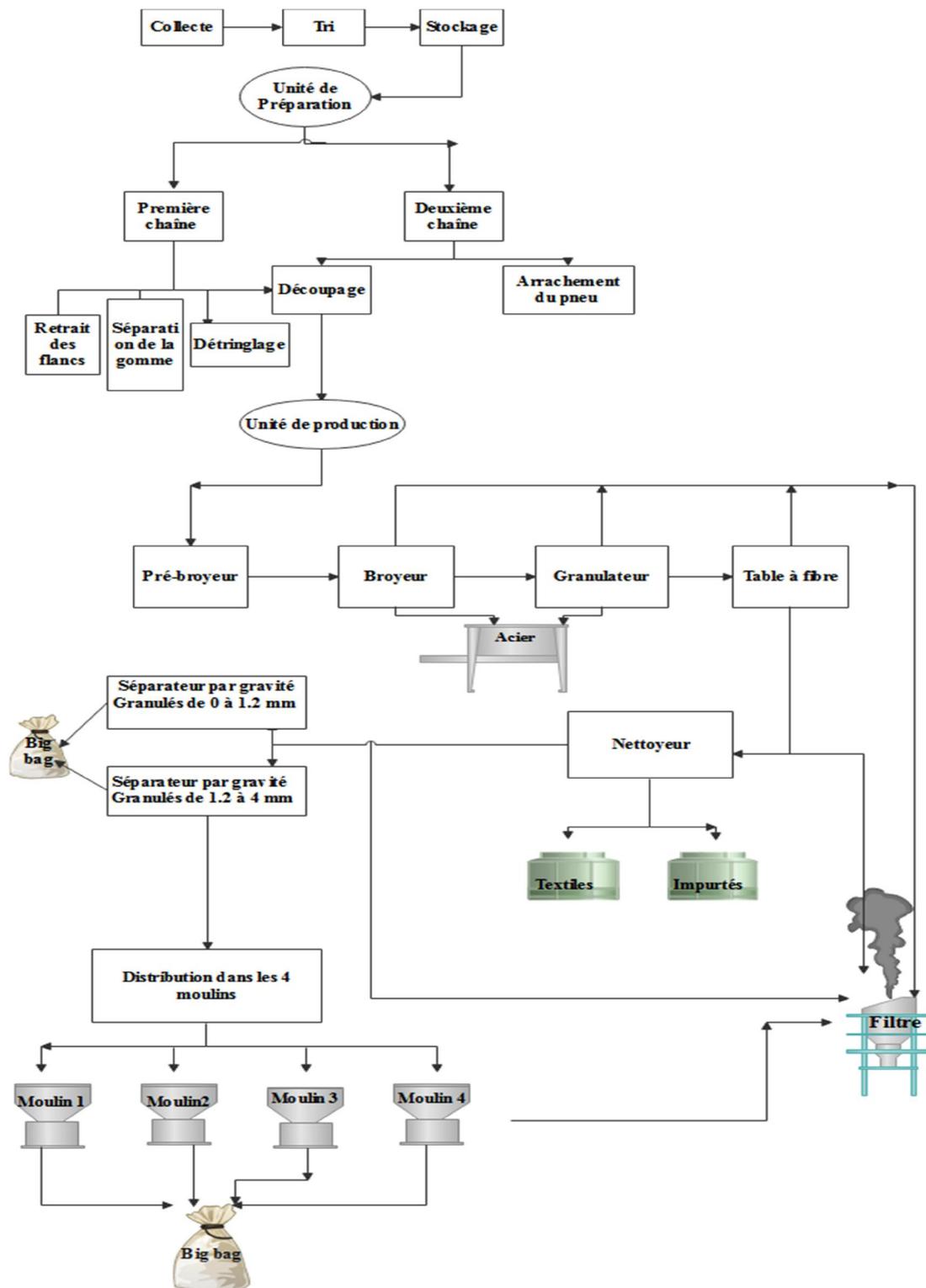


Figure 2.30 : Schéma résumant tous les procédés et machines employés à RECYTECH

### 2.4.1. Première étape : Prétraitement et préparation des PUNR

C'est une étape élémentaire et importante pour réussir le processus de recyclage et pour obtenir un produit final de haute qualité et enfin pour éviter d'endommager les machines conçues spécialement pour le recyclage des pneus usagés. Pour cette unité, RECYTECH utilise deux chaînes pour préparer les pneus usagés. La première chaîne (Technologie Chinoise) comporte les étapes suivantes :

#### ❖ Retrait des flancs

La première étape de préparation, consiste à séparer d'un pneu complet le flanc qu'il contient (partie latérale du pneu) (Figure 2.8)



Figure 2.31 : Flancs séparés de pneus

#### ❖ Séparation de la gomme

Le flanc séparé du reste du pneu contient une tringle d'acier enrobée dans une gomme. Au cours de cette étape la gomme contenant la tringle d'acier est séparée du reste du flanc, ce dernier est envoyé directement à la dernière étape afin de procéder au découpage (Figure2.9).



Figure 2.32 : Photographie du reste du flanc

❖ **Séparation de l'acier et de la gomme, détringlage**

La gomme obtenue dans la précédente étape subit elle aussi une opération de séparation appelée détringlage. Cette dernière consiste en la récupération de la tringle d'acier enrobée dans la gomme, afin de l'utiliser dans d'autres applications telle que la sidérurgie (Figure 2.10)



Figure 2.33 : Séparation de la tringle enrobée dans la gomme

❖ **Découpage**

Elle sert à découper la gomme et le reste des pneus en parties plus petites. Ces dernières sont ensuite coupées en petits chips pour faciliter le déroulement des opérations qui suivent (Figure 2.11).



**Figure 2.34 :** Photographie des pneus découpés

La deuxième chaîne (Technologie Allemande) présente dans l'entreprise RECYTECH comporte deux étapes seulement :

❖ **Le détringlage / arrachement du pneu**

Contrairement à la première chaîne, le flanc n'est pas séparé du reste du pneu mais en cette étape la tringle d'acier est arrachée du pneu complet et est récupérée pour d'autres utilisations tandis que le pneu est envoyé à la prochaine étape (Figure 2.12).



**Figure 2.35 :** Arrachement du pneu

❖ Le découpage du pneu

Le découpage s'effectue de la même manière que la première chaîne (figure 2.13)



Figure 2.36: Découpeuse de pneus

**2.4.2. Deuxième étape : Production des sous-produits**

Les techniques de recyclage visent à obtenir une qualité de matière première aux propriétés modifiées de sorte à créer une morphologie de surface dont la grande étendue et la structure poreuse permettent une réutilisation pour la production de pièces de haute technologie et apte à être utilisées comme charge ou comme constituant majoritaire dans un procédé de fabrication industriel.

La valorisation des pneus usagés par procédés mécaniques occupe une position importante entre les technologies de valorisation matière grâce à ses coûts d'investissements et de fonctionnement relativement bas comparée aux autres techniques. Les techniques de recyclages employées par RECYTECHE sont nombreuses et varient selon la demande des clients et la disponibilité des machines (absence de panne). La figure 2.14 montre le processus général utilisé par RECYTECH avec :

- 1 : Tapis convoyeur
- 2 : Pré-broyeur
- 3 : Broyeur
- 4 : Granulateur
- 5 : Tables à fibre
- 6 : Nettoyeur
- 7 : séparateurs par gravité

8 : Elévateur

9 : Système à moulins

10 : Filtre

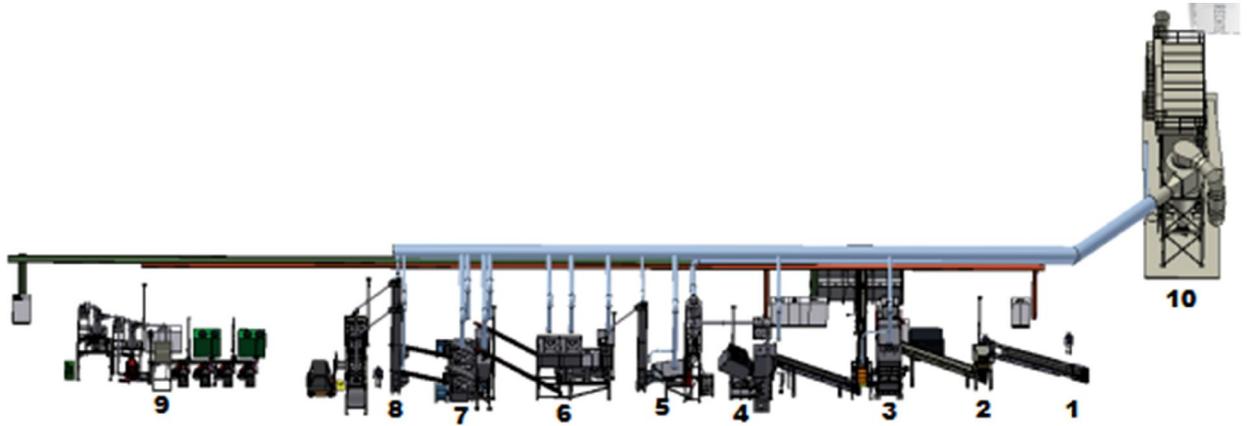


Figure 2.37 : Processus employé dans l'unité de production à RECYTECH

#### 2.4.2.1. Le Pré-broyage

En vue de leur valorisation, les parties reçues de la dernière étape de préparation des pneus (découpage) sont soumises à une étape initiale de réduction de leur taille (150 à 50 mm). Cette étape aboutit à l'obtention de fragments qui sont envoyés juste après à la deuxième étape qui est le broyage. Le pré-broyage est réalisé à température ambiante (éviter les risques d'incendies). Des pneus de voiture et morceaux de pneus sont d'abord lavés puis transportés à l'aide d'un tapis convoyeur vers un pré-broyeur de puissance de (15 kW) (Figure 2.15).



**Figure 2.38 :** Lavage des morceaux de pneus sur le tapis convoyeur

Le pré-broyeur est une sorte de cisaille rotative qui fait tourner en parallèle deux arbres de coupe à contre rotation avec une vitesse de rotation de 16 tours/min. Les arbres sont munis de griffes permettant d'entraîner au milieu les morceaux de pneus et permettent d'obtenir des morceaux broyés (Figure 2.16).



**Figure 2.39 :** Photo réelle de la partie supérieure d'un broyeur

#### 2.4.2.2. Le Broyage

C'est une opération qui a pour objectif de diviser les parties de pneus reçues du pré-broyeur (à l'aide d'un tapis convoyeur) en pièces plus petites, afin d'en augmenter leur surface spécifique (la surface par unité de masse) et donc leur réactivité. Cette division se fait à l'aide d'un broyeur d'une puissance de 160kW. Le broyeur est constitué d'un arbre du rotor sur lequel sont disposées au total 48 lames pour découper les morceaux de pneus en opérant à l'encontre des lames fixes. Un moteur d'entraînement hydraulique permet de mettre en rotation l'arbre du rotor. Ainsi, des fragments de caoutchouc de 25mm obtenus par le broyage retombent dans le conduit de vibration ; tandis que des fragments métalliques sont séparés par un crible pourvu de trous de 20mm avant qu'ils ne soient enlevés à l'aide d'un aimant et enfin amenés vers un conteneur via un convoyeur (Figure 2.17).



**Figure 2.40 :** Broyeur utilisé par RECYTECH

À noter que lors de l'opération de broyage, les températures augmentent rapidement au niveau de l'arbre du rotor (frottement) est pour cela son centre est alimenté en eau de refroidissement par l'intermédiaire du raccord d'eau.

#### **2.4.2.3. La Granulation**

C'est une technique de broyage plus poussée et plus fine qui permet de récupérer des broyats plus fins que lors de l'étape précédente, avec présence d'une minuscule quantité d'acier (déjà récupéré précédemment). La granulation se fait à l'aide d'un granulateur de puissance de 160kW. Il procède de la même manière que le broyeur mais avec une autre disposition des lames de tranchage, il produit des granulés de caoutchouc inférieur à 5 mm, et les matières dont le diamètre est supérieur à 5mm sont renvoyées vers le broyeur. La température de la matière est mesurée et contrôlée afin de prévoir des risques de sécurité. Les critères de la qualité technique des granulats résident en leur composition, granulométrie, le taux de fils métalliques résiduels, le taux de fibres de textiles résiduelles et leur morphologie (Figure 2.18).



Figure 2.41 : Photographie du Granulateur

#### 2.4.2.4. Table à fibres

C'est l'étape qui vient après la granulométrie. Les granulats exemptés de fer passent vers des tables à fibres dont l'objectif est de séparer le plus de fibres textiles possible grâce au mouvement des tables et à l'utilisation de tamis (Figure 2.19). Les fibres textiles sont envoyées vers des *big bag* pour y être stockées.



Figure 2.42 : Tables à fibres de séparation textile / caoutchouc

En Algérie, les fibres textiles ne trouvent pas de voies valorisation, leur accumulation au sein de l'entreprise pose un problème de stockage majeure mais aussi de sécurité à cause des risques d'incendies. Néanmoins plusieurs projets sont en cours de développement dans le but de remédier à ces problèmes.

#### 2.4.2.5. Nettoyeur fin

Après l'étape des tables à fibres, les granulats dont les dimensions sont  $> 5\text{mm}$  et ne contenant que peu de fibres textiles et pas de fer, passent avec une capacité de  $1.3\text{t/h}$  vers un nettoyeur fin, par le biais d'un élévateur à une trémie (à l'intérieur de cette dernière, on retrouve un vis sans fin afin de contrôler le débit) (figure 2.20).



**Figure 2.43 :** Photographie du nettoyeur fin

Au sein des tables à fibres, deux différentes opérations ont lieu :

- Séparation des fibres textiles restantes du caoutchouc grâce au mouvement et les vibrations des tables.
- Le caoutchouc sans fibres textiles est ensuite séparé en fonction des dimensions en utilisant 02 tamis de diamètres 1.5 et 4mm.

#### 2.4.2.6. Séparateurs par gravité

À la sortie du nettoyeur fin, on se retrouve avec deux produits de différentes dimensions (1.5 et 4mm). Ces derniers sont transportés avec des élévateurs, un élévateur pour chaque dimension de granulats vers 02 séparateurs par gravité. Les tables à gravités sont légèrement inclinées et en constante vibration (figure 2.21). Les granulats sont séparés selon leur poids. La vitesse de vibration est un facteur clé qu'on contrôle.



Figure 2.44 : Séparateur par gravité

#### 2.4.2.7. Procédé de production de la poudrette de caoutchouc

Le moulage est le système employé pour obtenir un granulat sous forme de poudrette. Ce système est composé de quatre moulins à poudre de puissance 30 kW/min et avec une capacité de 40 à 160 kg/h (Figure 2.22).

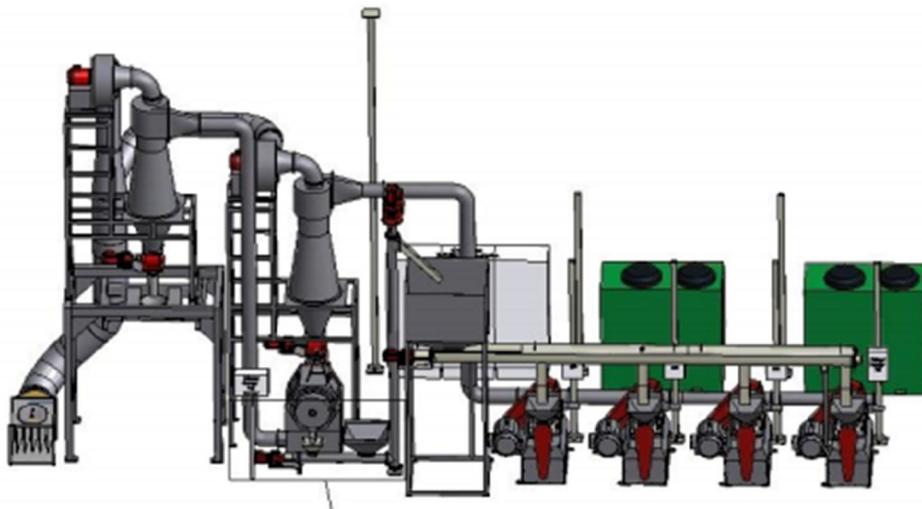
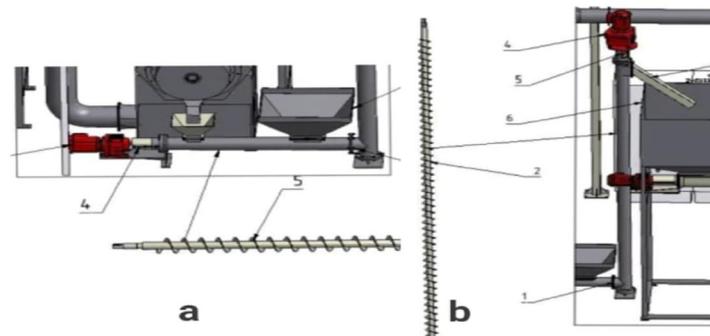


Figure 2.45 : Schéma du système à poudre

Pour l'obtention de la poudrette souhaitée, les granulats de 4 mm de diamètre passent par les étapes suivantes :

➤ **Transports**

Le granulat de caoutchouc est transporté de la vis sans fin horizontale vers la vis sans fin verticale, cette dernière s'occupe de transférer le granulat vers le réservoir, et le conduit de distributeur se charge de distribuer le granulé à poudre entre les moulins à poudre (Figure 2.23)



**Figure 2.46 :** a)Vis sans fin horizontale et b) Vis sans fin verticale

➤ **Moulins à poudre**

Les moulins broient le granulé de caoutchouc de 4 mm de diamètre entre un disque de broyage fixe et un disque de broyage en rotation (figure 2.24). Lorsque les granulés sont comprimés entre les disques, de petites lames disposées sur ces derniers hachent le granulé, et la poudre ainsi produite est éjectée des disques et est évacuée par un système d'évacuation vers un cyclone.



**Figure 2.47 :** Photographie des moulins à poudre

➤ **Séparation de la fibre textile (Cyclone)**

Le cyclone aspire la poudre évacuée, et en raison de la forme en colimaçon de la partie supérieure du cyclone, la poudre est projetée contre la paroi sous l'effet de la force centrifuge (Figure 2.25). Ainsi, les fibres de coton plus légères sont aspirées par le haut, et la poudre se dépose sur le fond. Cette dernière est transférée vers le tamis à tambour grâce au mouvement rotatif de la roue cellulaire.

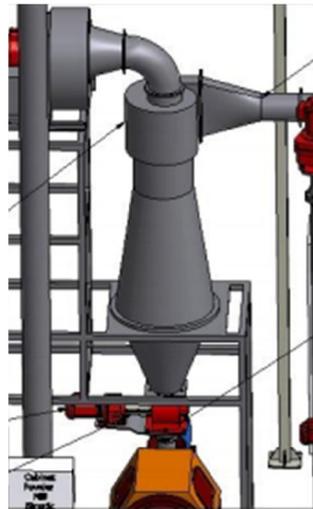


Figure 2.48 : Schéma du premier cyclone

➤ **Tamisage**

Le tamis à tambour sépare la poudre de caoutchouc d'une granulométrie inférieure à 1.0 mm des poudres de plus de 1.0 mm. Les poudres sont amenées par une vis sans fin vers le tamis à tambour. Les plus gros morceaux (>1 mm) tombent vers la sortie et peuvent retourner au système à poudre tandis que les plus petits éléments sont aspirés par un cyclone placé en aval (Figure 2.26).

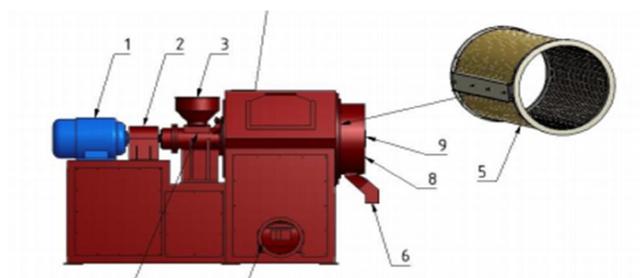
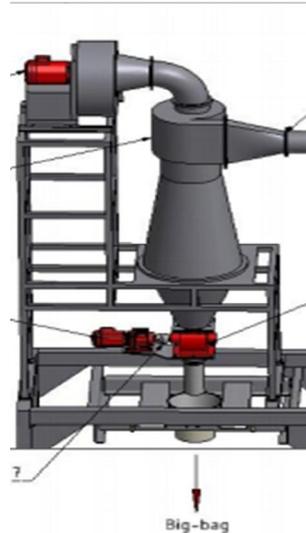


Figure 2.49 : Schéma du Tamis tambour

➤ Dernière séparation et remplissage dans des big bags

Un deuxième cyclone aspire la poudre tamisée et la sépare des fibres de coton (même principe que le premier cyclone). Vers la fin et grâce au mouvement rotatif de la roue la poudre de caoutchouc est acheminée vers les *big bags* installées en aval (Figure 2.27).



**Figure 2.50** : Schéma du deuxième cyclone / remplissage des big bags

#### 2.4.2. Système d'aspiration

Toute la chaîne de production dispose d'aspirateurs. A chaque étape du recyclage, les poussières, les fumées et les petits copeaux volants sont aspirés et sont emmenés vers un filtre séparateur qui se trouve à l'extérieur (figure 2.28). Les séparateurs cycloniques R&R de type RTZAxxxx dont Recytech dispose sont conçus pour la séparation de volumes de poussières et de copeaux issus d'un flux de gaz brut de l'aspiration des machines de production ou pour l'alimentation pneumatique.



**Figure 2.51** : Photographie du filtre d'aspiration au sein de l'entreprise

D'après le schéma de fonctionnement, dans le cylindre d'écoulement (Figure 2.29), le gaz brut est amené par soufflage tangentiel sur un couloir. De par le rétrécissement du cône qui est monté en-dessous, la vitesse de rotation augmente continuellement, de manière que les particules de poussière et les copeaux qui se trouvent dans le flux de gaz brut sont propulsés sur la paroi du cône par la force centrifuge. Elles sont tellement ralenties sur la paroi du cône par les forces de friction, qu'elles se libèrent du flux et tombent dans la vanne grâce à l'effet de l'apesanteur. Le flux d'air nettoyé quitte le cône par le tube plongeur du milieu par le haut.

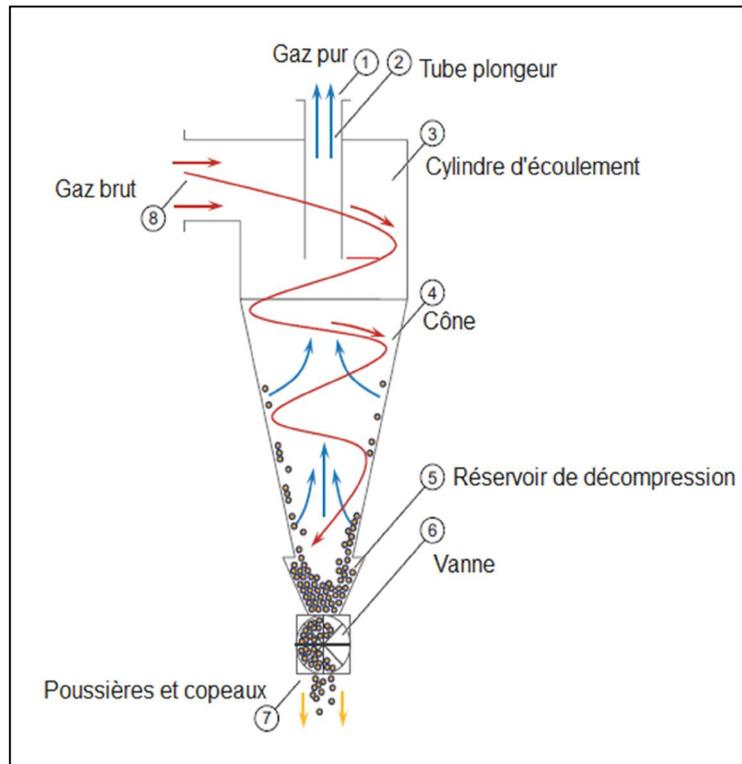


Figure 2.52 : Schéma de fonctionnement du filtre cylindrique

Les poussières et copeaux tombent dans des *big bags* et ne sont pas considérées comme déchets. Elles sont commercialisées comme poudrettes de deuxième choix. De ce fait, l'industrie respecte son principe « zéro déchet ».

# *Chapitre 3*

3. Résultats et discussions

3.1. Bilans de matières

Faire un bilan de matière revient à analyser les bilans massiques entre les entrées et les sorties de matières à travers les différents procédés employés au sein de l’entreprise. La différence entre les quantités entrantes et les quantités sortantes détermine les pertes engagées par le processus. Ces pertes sont ensuite récupérées et valorisées sous plusieurs formes. À leur arrivée à l’entreprise, les pneus sont triés selon leur tailles et types (VL ou PL). Afin d’illustrer un cas pratique d’un bilan de matière lors de notre présence sur le site de l’usine, une série de 148 pneus (104 VL et 44 PL), pesant 3.262 tonnes suivant l’annexe 2, a été suivie à travers son processus de recyclage. La figure 3.1 montre le pourcentage en nombre et en en masse de chacune des deux catégories dans la série.

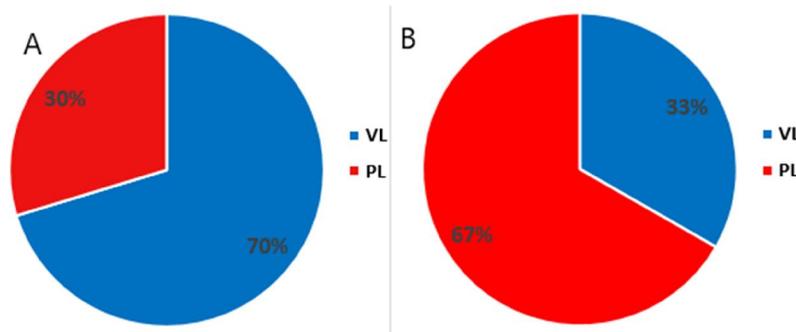


Figure 3.53 : Taux de pneus usagés utilisés A) en fonction du type et B) en fonction du poids

Le bilan de la figure 3.2 résume le process de préparation des pneus au recyclage, après les avoir triés et pesés.

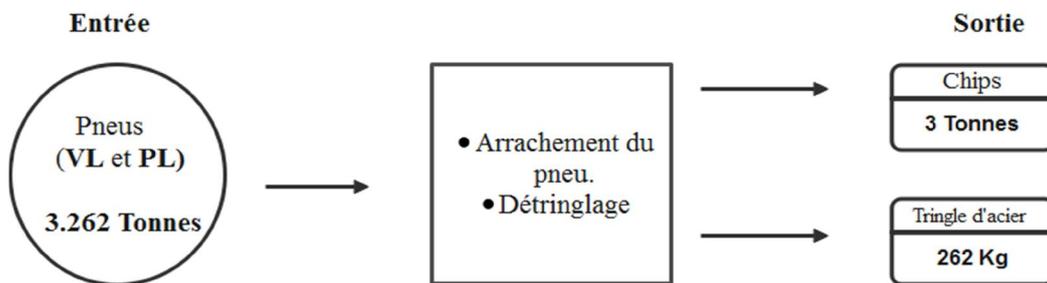
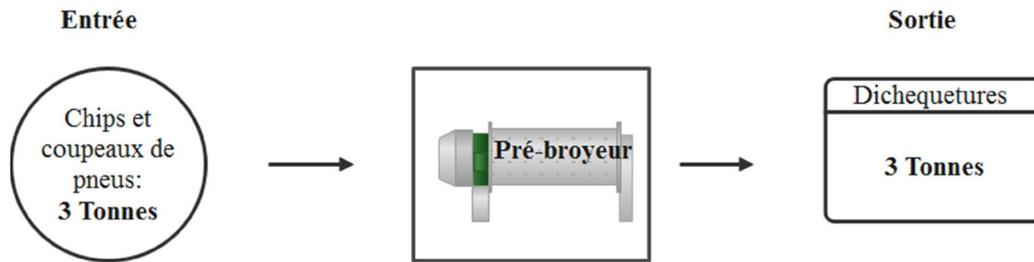


Figure 3.54 : Schéma du bilan de matière du processus de préparation

Une quantité de **3.262 tonnes** de pneus complets est introduite dans l'unité préparation afin de séparer la tringle d'acier du reste du pneu comme le montre la figure 3.2. A la sortie de cette étape, on obtient 3 tonnes de chips (flancs, et gomme) et **262 Kg de tringles d'acier**. Cette opération a pour objectif de réussir le recyclage, d'éviter d'endommager l'appareillage et enfin récupérer l'acier en matière seule pour d'autres utilisations. Le recyclage des pneus au sein de Recytech passe par plusieurs procédés, ce qui implique des pertes de masses dans chacun de ces procédés. Les bilans de matières faisant suite à la phase de préparation suscitée suivants résumant toutes les pertes possibles et toutes les transformations qui ont eu lieu.

### 3.1.1. Pré-broyage

Il s'agit de la première opération à proprement parler dans l'unité de recyclage. Après les avoir lavés, les pneus préparés sont transformés directement en déchiquetures dans le pré-broyeur. La figure 3.3 montre la transformation qui a lieu.



**Figure 3.55** : Bilan de matière dans le pré-broyeur

Cette étape s'opère sans perte de matière, dans la mesure où le pré-broyeur a pour unique objectif de réduire la taille de chips introduites à l'entrée.

### 3.1.2. Broyage

Dans cette étape, les déchiquetures reçues du pré-broyeur subissent quelques transformations comme le montre la figure 3.4, à noter que le broyeur est relié à un filtre.

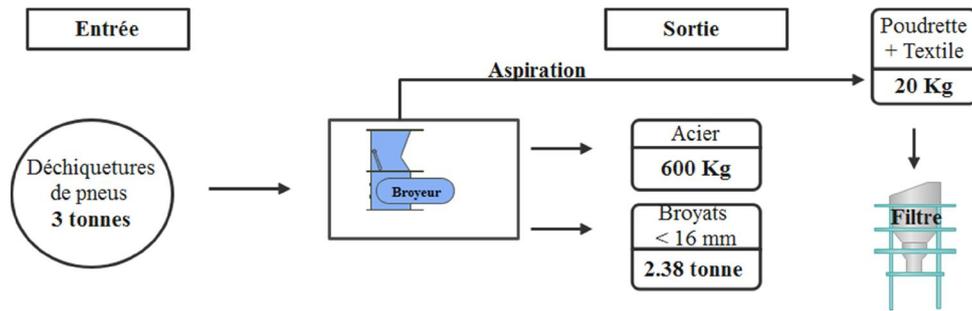


Figure 3.56 : Bilan de matière dans le broyeur

L'étape de broyage permet non seulement de réduire encore plus les déchetures reçues du pré-broyeur à moins de 16 mm, mais aussi d'éliminer la majorité de l'acier contenu dans les déchetures à l'aide d'un aimant en surplomb. Pour les quantités de déchetures on constate que la masse à la sortie est inférieure à celle de l'entrée, elle est passée de 3 tonnes à 2.38 tonnes. Cette diminution est expliquée par la récupération de près de 600 Kg d'acier et par l'aspiration de la poudrette fine et du textile par le filtre (20 Kg de poudre et de textile).

### 3.1.3. Granulation

La granulation est le dernier processus de broyage. Les broyats subissent une transformation à l'intérieur du granulateur comme on l'a schématisé dans la figure 3.5. Tout comme le broyeur, le granulateur est aussi relié à un filtre.

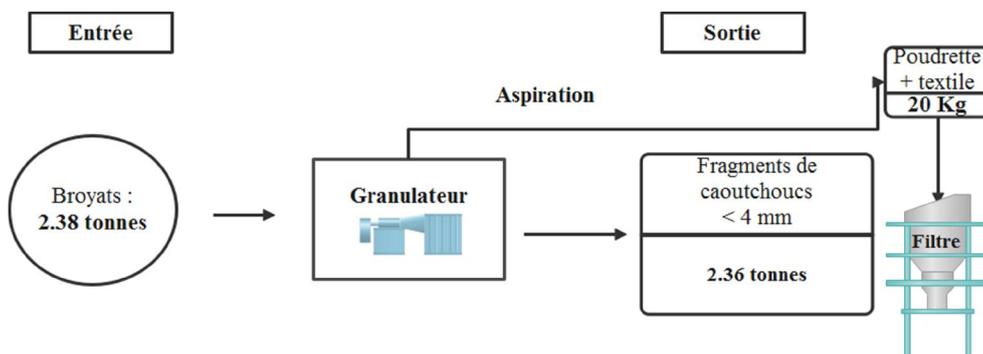


Figure 3.57 : Bilan massique dans le granulateur

Le granulateur étant la dernière étape dans le système de broyage, il permet de réduire d'une façon remarquable la taille des broyats à 4 mm). Une légère diminution de la quantité à la sortie (environ 20kg) de cette étape est constatée aussi et qui correspond à ce qui a été aspiré par le filtre.

3.1.4. Tables à fibre

Le bilan massique ainsi que les produits finaux obtenus sont montrés dans la figure 3.6.

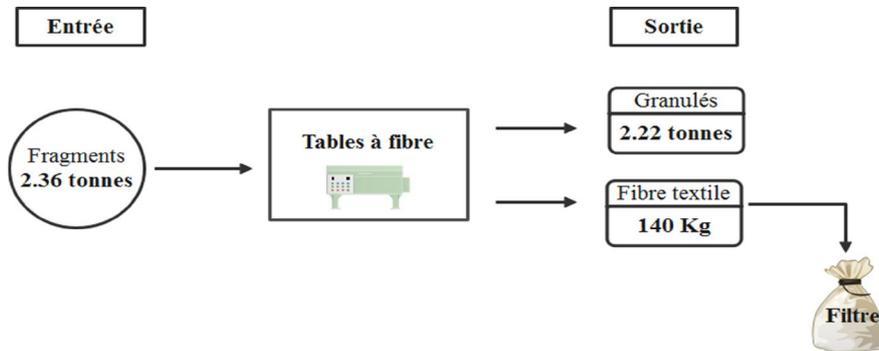


Figure 3.58 : Bilan massique des tables à fibres

Une fois arrivés aux tables de fibres, les déchetures sont débarrassées de leurs fibres résiduelles à l’aide des tamis. Une quantité de 140 Kg de fibre est récupérée, ensuite stockée, tandis que les 2.22 tonnes de granulés obtenus continuent leur chemin vers les processus de recyclage suivants.

3.1.5. Nettoyage

Le nettoyeur schématisé dans la figure 3.7 est appelé nettoyeur fin, car c’est au cours de cette étape que toutes sortes d’impuretés sont éliminées.

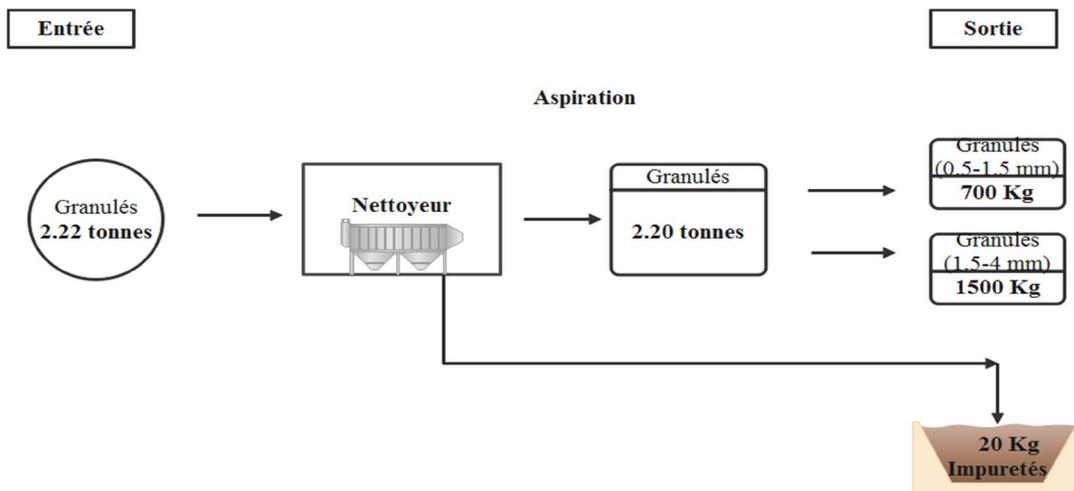


Figure 3.59 : Bilan massique et produits finaux dans le nettoyeur

A la sortie du nettoyeur, on a récupéré deux sortes de granulés : une est de dimension de 0.5-1.5 mm et l'autre est de 1.5-4.0 mm. Les dimensions peuvent être changées grâce à des tamis en fonction du cahier de charges. Environ 20 Kg d'impuretés sont éliminés au cours de cette étape sous forme de poussières et de fumées.

### 3.1.6. Système de poudre

Pour le dernier procédé, seuls les granulés de dimensions de 0.5-1.5 mm sont concernés par le passage dans les mouleuses comme le montre la figure 3.8.

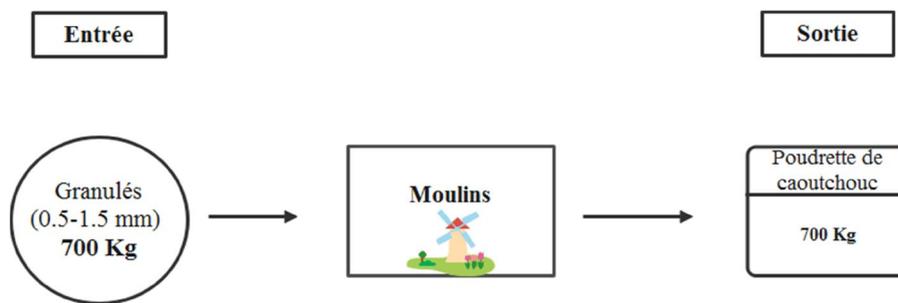


Figure 3.60 : Bilan massique dans les moulins

Au cours de cette étape, les granulés sont transformés en poudre sans perte de masse (Environ 700kg à l'entrée et à la sortie). Cette action est réalisée selon la demande du marché.

### 3.1.7. Filtre

Les quantités sortantes du filtre sont indépendantes du reste des produits finaux de l'entreprise, car elles sont mises à part et commercialisées comme produit de deuxième choix. La figure 3.9 résume les quantités récupérées dans les filtres placés dans les étapes de broyage et de granulation et leur destination.

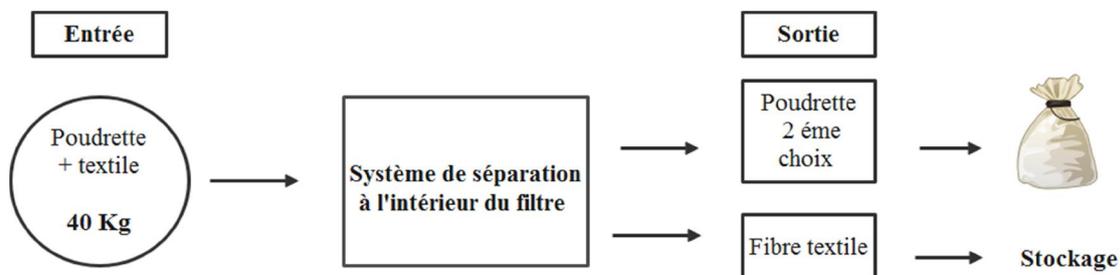
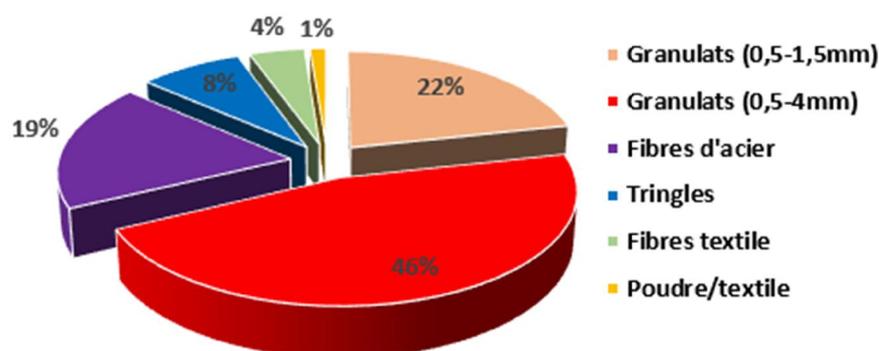


Figure 3.61 : Bilan massique et matières récupérées dans le filtre

Une quantité de 40 Kg est récupérée des filtres. Cette quantité a été aspirée du broyeur et du granulateur respectivement, avec une quantité de 20 Kg chacun. Les quantités de poudres récupérées sont commercialisées et les fibres textiles sont ajoutées à celles déjà stockées dans l'espoir de trouver des voies de valorisation et ainsi permettre à l'entreprise d'arriver à son objectif de zéro déchet. Après 2h, la totalité des chips a été converti en quatre principaux produits comme suit :

- Granulats et poudrettes de différentes dimensions ;
- Fibres d'acier ;
- Fibres textile ;
- Poudre / textile mélangé provenant du filtre.

La figure 3.10 illustre les taux de chaque produit pour une alimentation de 3.262 tonnes en pneus usagés.

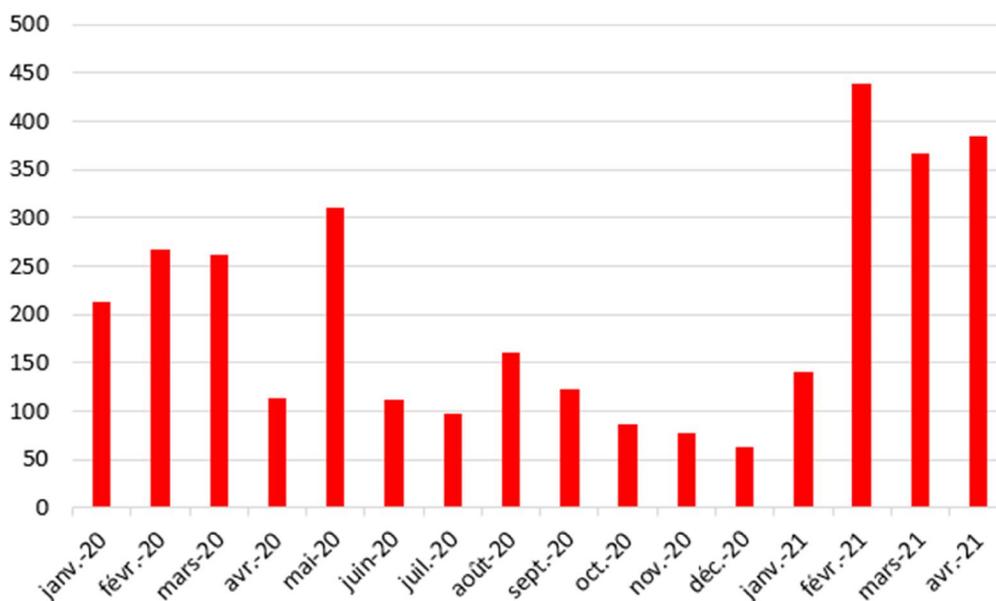


**Figure 3.62** : Taux des sous-produits issus de du recyclage des pneus usagés au sein de Recytech

## 3.2. Résultats des bilans

### 3.2.1. Quantités de pneus usagés collectés

Les campagnes de collecte de pneus usagés se font régulièrement et un bilan massique est établi en aval de la collecte et en amont de la préparation. La figure 3.11 représente les quantités collectées mensuellement en 2020 et début 2021.

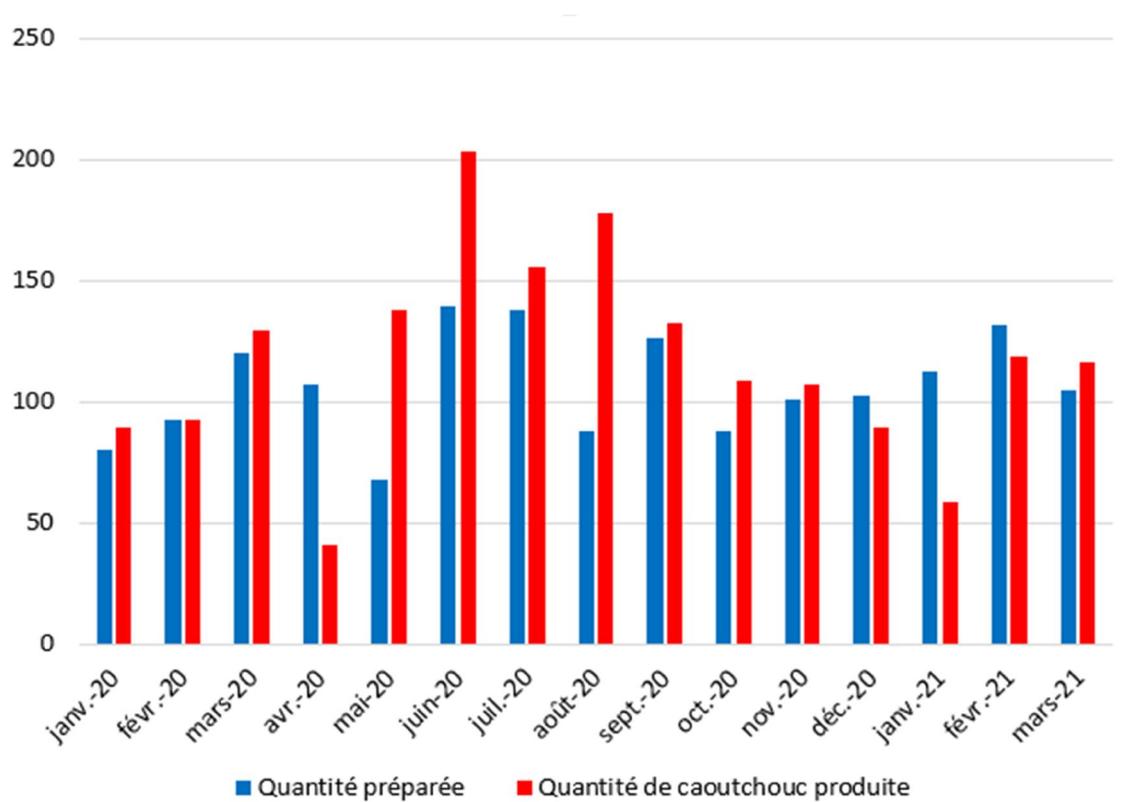


**Figure 3.63 :** Quantités de pneus usagés collectées en 2020 et début 2021 (Tonnes)

On remarque que les quantités collectées varient d'un mois à un autre. La collecte dépend principalement des conventions avec les organismes. Néanmoins, pendant l'année 2020, la baisse considérable de la quantité de pneus usagés collectés est liée au gel des activités commerciales suite à la pandémie Covid-19.

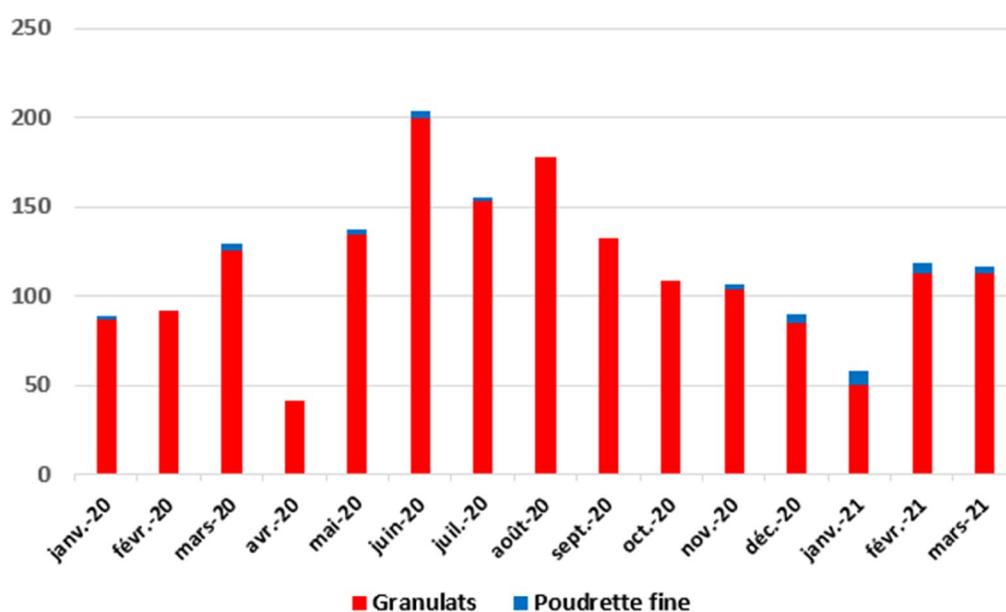
### 3.2.2. Bilans de pneus usagés préparés et quantités de caoutchouc produite

Suite aux différentes étapes de recyclage, les produits obtenus sont triés. Enfin, on obtient du caoutchouc, de l'acier et de la fibre textile. Le caoutchouc est le produit le plus commercialisable à cause du large éventail d'utilisations qu'il offre. La figure 3.12 montre les quantités de pneus usagés préparés contre les quantités de caoutchouc produite en 2020 et début 2021.



**Figure 3.64 :** Quantités de pneus usagés préparées et quantités de caoutchouc produite en 2020 et début 2021 (Tonnes).

Plusieurs facteurs ont une influence sur la quantité de caoutchouc recyclé. On remarque que pour certains mois (Mai 2020, Aout 2020) la quantité de caoutchouc produite est largement supérieure à la quantité préparée. Ceci s'explique par l'utilisation du stock de chips préparée les mois d'avant au préalable. En effet, l'atelier de préparation des pneus usagés est indépendant du cahier de charge et les machines utilisées ne nécessitent pas d'entretien en particulier, de ce fait les PU sont préparés en continu. Par contre, l'atelier de production qui est composé de machines modernes et sophistiquées nécessitant un entretien spécifique implique un arrêt de la chaîne (remplacement de lames du broyeur, nettoyages de tables...). Les dimensions de caoutchouc préparé dépendent de la demande des clients. La figure 3.13 montre la quantité de poudrette fine contre celle des granulats en 2020 et début 2021.



**Figure 3.65 :** Quantité de poudrette fine et des granulats en 2020 et début 2021 (Tonnes)

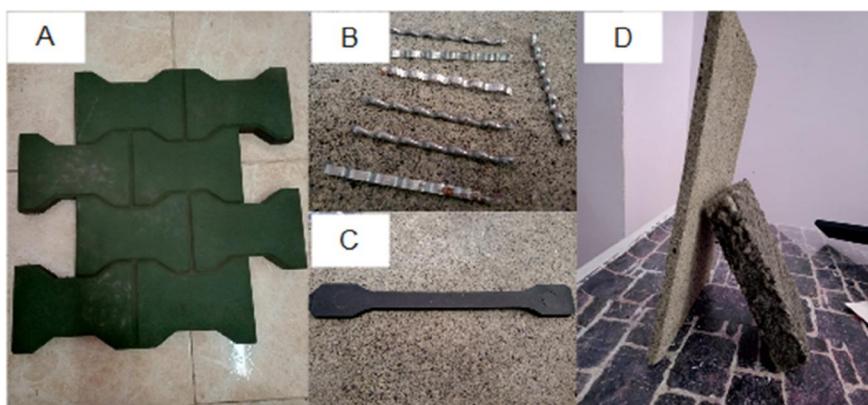
On remarque que la quantité de granulats produite au fil des mois de l'année 2020 est nettement plus supérieure que celle de la poudrette fine. Ceci s'explique par la demande préférentielle des clients pour les granulats à cause de :

- Leur large spectre d'utilisations ;
- Le prix des granulats est inférieur à celui de la poudrette

### 3.2.3. Principales applications des sous-produits de Recytech

En Algérie, les sous-produits des déchets pneumatiques trouvent des applications dans différents filière de la valorisation da matière (figure 3.14). Pour les granulats et la poudrette les applications dépendent de la granulométrie, d'autant plus que parfois on utilise des mélanges de granulats + poudrettes. On retrouve :

- Des tapis en caoutchouc produit à partir de mélanges de poudres de dimensions 0-0.7mm et granulats de dimensions 0.8-1.2mm à l'aide d'une presse et d'une colle résistante à plus de 20 tonnes. On peut utiliser juste la poudrette (0-0.7mm) afin d'obtenir des tapis fins, comme on peut mettre plusieurs couches de poudrette pour le haut et le bas du tapis et au centre on utilise des granulats (0.8-1.2mm) et on aura des tapis épais.
- Les tuyaux d'irrigations pour eau fabriqué à partir de 65% de caoutchouc.
- Remplissage de gazons de sport avec des granulats de dimensions de 0.5-2.5mm.
- Des tuiles à partir de granulats de 2.5-4mm.
- Les fibres d'acier et les tringles sont utilisées dans l'industrie du bâtiment afin de remplacer le tri soudé.
- Pièces moulés.
- L'industrie du bitume-caoutchouc utilise les poudrettes les plus fines 0-1mm.



**Figure 3.66 :** Quelques pièces fabriqués à partir des sous-produits de pneus A) Aire de jeux, B) Acier utilisé dans le bâtiment, C) Pièces moulés et D) Echantillon de textile pour isolation

### 3.3. Essais préliminaires de la valorisation des pneus usagés en Algérie par leur incorporation dans le bitume

Une des applications qui se développe actuellement en Algérie est l'utilisation des poudrettes fines de caoutchouc dans l'industrie d'asphalte. Afin de déterminer les caractéristiques des bitumes modifiés, des essais sont effectués au sein du Laboratoire Central des Travaux Publics (LCTP) selon l'annexe 3 en collaboration avec NAFTAL sur l'utilisation de la poudrette commercialisée par Recytech. Les résultats des essais sont présentés dans le tableau 3.1.

**Tableau 3.1 : Résultats des essais effectués sur le bitume caoutchouc par LCTP**

Désignation d'essais	Norme de référence	Unité	Résultats	Spécification Norme 14023
Essai de pénétrabilité à 25 °C	NF EN 1426	0.1 mm	<b>34.5*34.00*35.10</b>	10-40
Essai point de ramollissement (Billes et anneaux)	NF EN 1427	°C	<b>58.90-58.70</b>	≥ 55
Résistance au durcissement à 163°C		/	/	/
Essai de pénétrabilité restante	EN 12607-1	%	<b>76.76</b>	≥ 35
Augmentation du point de ramollissement sévérité		°C	<b>4.00</b>	≤ 8
Variation de masse		°C	<b>1.45</b>	≤ 1
Retour élastique à 25°C	NF EN 13398	%	<b>70.00</b>	≥ 70

L'analyse du tableau 3.1 obtenu par NAFTAL, nous permet de constater que les résultats de tous les essais effectués sont bien dans les normes expliquée dans l'**annexe 4**, sauf pour la variation de masse qui dépasse le seuil de la norme.

- Pour l'essai de pénétrabilité à 25 °C, le résultat de la mesure est la moyenne de trois piqûres effectuées successivement (34.5, 34.00, 35.10). Cette moyenne est estimée à  $34.5 \times 0.1$  mm. La valeur obtenue est inférieure à la valeur maximale autorisée car la dureté du bitume est d'autant plus élevée que la valeur de pénétrabilité est faible.
- Point de ramollissement : les deux températures enregistrées sont 58.90°C et 58.70°C. Le résultat final est la moyenne des deux températures enregistrées (en arrondissant à 0.2°C pour les températures  $\leq 80^\circ\text{C}$  et à 0.5 °C pour celles qui dépassent les 80 °C). Ces deux températures restent supérieures à 55°C et conformes à la norme 1427.
- Pour la pénétrabilité restante, point de ramollissement, sévérité et retour élastique à 25 °C , on remarque que les valeurs obtenues sont aussi conformes aux normes de qualité  $\geq 35\%$ ,  $\leq 8^\circ\text{C}$  et  $\geq 70\%$  respectivement.

Selon le LCTP, et d'après les résultats d'analyse obtenus les caractéristiques du bitume caoutchouc fabriqué à partir de déchets pneumatiques sont plus ou moins conformes. Cependant, afin d'améliorer les paramètres indiqués auparavant, le LCTP conseille à NAFTAL d'augmenter la durée du malaxage afin d'avoir un bon cisaillement et une bonne homogénéisation du produit dans la matrice bitume.

# *Conclusion*

## CONCLUSION

### Conclusion

Ce travail avait pour objectif de réaliser une immersion dans le monde professionnel en général, mais aussi dans le secteur du recyclage des pneus usagés en particulier. Pour ce faire, nous avons intégré toutes les étapes du recyclage des déchets pneumatiques depuis leur arrivée jusqu'à la valorisation des sous-produits, pendant une durée de quatre semaines au sein de la SARL RECYTECH sise à Bouira. Les résultats obtenus nous affirment qu'à l'heure où les pays développés ont atteint une maturité certaine dans ce domaine, l'Algérie n'est qu'à ses premiers pas. Avec une production de plus de **300000 tonnes / an** de déchets pneumatiques susceptibles à la hausse, Recytech, un des organismes pionniers dans le domaine du recyclage des pneus usagés non réutilisables, ne valorise que **12000 tonnes / an**, soit **4%**, un taux de recyclage très insuffisant.

Seules les voies de valorisations non destructives sont utilisées en Algérie, avec un taux majoritaire dans les aires de jeux, les gazons synthétiques, les travaux publics et de bâtiment. Afin de palier à ce problème, il est nécessaire de se pencher vers d'autres applications des sous-produits de pneus usagés qui soient économiquement rentable et environnementalement sûre en se basant sur l'expérience des pays développés. Les essais de l'utilisation des poudrettes fines de caoutchouc dans l'industrie d'asphalte ont montré des résultats assez concluants. La superficie du pays, ainsi que le vaste système d'autoroutes présentent une excellente alternative pour se débarrasser des déchets pneumatiques mis en rebut. Dans ce contexte, il est nécessaire de faire le point sur de nouvelles utilisations qui ont prouvé leur efficacité et qui sont porteuses d'avenir, on citera :

- La technologie de valorisation en aciéries à four électrique qui a fait ses preuves ces dernières années. Les pneus substituent à l'antracite, un produit composé de carbone et d'acier qu'on retrouve dans les pneus. Le taux de substitution est de 1,7 kg de pneus pour 1 kg d'antracite. (ADEME, 2006)
- L'utilisation de fibres textiles dans les enrobés routiers améliore à des niveaux différents les caractéristiques mécaniques, notamment la résistance à la fatigue. (Chavet et Oger, 2007).
- Des essais réussis, notamment dans quelques fonderies en France, ont démontré que l'utilisation de broyats de pneus n'altérerait ni les procédés de fusion ni la qualité et les propriétés de la fonte. En outre, les broyats diminuent les coûts de fabrication. (Aliapur, 2018).

## CONCLUSION

- La substitution des combustibles traditionnels (pétrole, charbon et gaz) par les PU a présenté de très bons résultats, de par la réduction de leurs quantités et leurs impacts mais aussi par les gains économiques constatés (Machin et al., 2017).

Une législation plus stricte, un développement en termes de technologies et de savoir-faire, une structure de l'engagement dans le domaine du recyclage des déchets tout en mettant l'accent sur la valorisation des sous-produits, tel est le défi de l'Algérie d'aujourd'hui. Un défi à la portée du pays, surtout s'il y a une coopération entre les organismes étatiques et les acteurs principaux du recyclage.

## Références

### A

**A.K.HAGHI, L. A.** (2019). *ENGINEERING TECHNOLOGIES FOR RENEWABLE AND RECYCLABLE MATERIALS*. Waretown, USA : Apple Academic Press, Inc.

**ADEME.** (2017). *COMMENT ORGANISER UNE OPÉRATION*. France.

**Aliapur.** (2010). *ANALYSE DU CYCLE DE VIE POUR 9 VOIES DE VALORISATION DES PNEUS USAGES NON REUTILISABLES*. Rapport R&D Aliapur.

**Alkhatib, R.** (2014). *Development of an alternative fuel from waste of used tires by pyrolysis (Doctoral dissertation, Ecole des Mines de Nantes)*.

**Allred, E., Coons, N. C., Finley, D. J., Shoemaker, J. M., Wilder, R. L., & Wilder, J. D.** (2000). *Large-scale recycling process for scrap tires and rubber products*. Society for the Advancement of Material and Process Engineering, *Revolutionary Materials : Technology and Economics(USA)*,, 398-408.

**AND.** (2018). *Déchets spéciaux et spéciaux dangereux*. <https://and.dz/site/wp-content/uploads/PU.pdf>

**ANIP.** *National association of the tire industry. Reciclanip. Disponible sur : www.reciclanip.com.br/?cont=ecopontos\_oquesao.*

### B

**Bensbaa, A.** (2009). *" Plan de gestion global d'un projet de conception et d'édification d'une entreprise industrielle, œuvrant dans le cadre de la logistique inverse" : étude de cas : recyclage et pré-valorisation des pneus en fin de vie.*

**Bertolini, G.** (2003). *Mouvements transfrontières de déchets, un dispositif de contrôle à consolider*. *ECONOMIE ET HUMANISME*, 91-95.

**BICOCCI, S. Tenza, A.** (2008). *COMBUSTIBLES SOLIDES DE RECUPERATION ETAT DES LIEUX ET PERSPECTIVES*.

**Bladé, T.** (2012). *Synthèse, caractérisation et évaluation en caoutchouc de nouvelles charges hybrides renforçantes (Doctoral dissertation, Bordeaux I)*.

## C

**Carter, A., & Perraton, D.** (2002). *La mesure du module complexe des enrobés bitumineux. In 2e Conférence spécialisée en génie des matériaux de la Société canadienne de génie civil (Vol. 10). (pp. 5-8). Montréal, Canada.*

**Clark, J. H.** (2018). *Rubber recycling challenges and developments. p. 117.*

**Clauzade, C.** (2009). *Utilisation des pneus usagés comme combustible alternatif : valeurs de référence et protocoles de caractérisation. Report, Aliapur, Lyon.*

**CLAUZADE, C.** (2012). *Bilan environnemental des solutions de valorisation des pneus usagés non réutilisables. Technique de l'ingénieur, 5.*

**Continental.** (2020). *Composants des pneus. Consulté le Mai 08, 2021, sur <https://www.continental-pneus.fr/pneus/tout-sur-les-pneus/l-essentiel-sur-les-pneus/composants-pneus>*

**Cossu, R., Stegmann, R.** 2019. *Solid Waste Landfilling: Concepts, Processes, Technology. Elsevier, 1119 p.*

**Cuong Ho, A.** (2010). *Optimisation de la composition et caractérisation d'un béton incorporant des granulats issus du broyage de pneus usagés. Application aux éléments de grande surface (Doctoral dissertation, Toulouse, INSA).*

## D

**Ding, K., Zhong, Z., Zhang, B., Wang, J., Min, A., & Ruan, R.** (2016). *Catalytic pyrolysis of waste tire to produce valuable aromatic hydrocarbons : an analytical Py-GC/MS study. Journal of Analytical and Applied Pyrolysis, 122, 55-63.*

## E

**ETRMA.** 2018. *End of Life Tyres Management—Europe.*

**ETRMA.** (2019). *End of Life Tyres Management - Europe 2018 Status. <https://www.etrma.org/library/europe-91-of-all-end-of-life-tyres-collected-and-treated-in-2018/>*

## F

**FAURE, M.** (1985). *Les utilisations routières de la poudrette de caoutchouc*. Dans L. C. Ferrand, *Journée technique ADEME Recyclage du caoutchouc et des matières plastiques*.

## G

**González, J. F., Encinar, J. M., Canito, J. L., & Rodríguez, J. J.** (2001). *Pyrolysis of automobile tyre waste. Influence of operating variables and kinetics study*. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, 58, 667-683.

**GOODYEAR.** (2015). *Excellente efficacité énergétique associée à une meilleure traction en toutes conditions*. [https://www.goodyear.eu/fr\\_fr/images/GY\\_FuelmaxGen-2\\_Brochure8p\\_FRA\\_web.pdf](https://www.goodyear.eu/fr_fr/images/GY_FuelmaxGen-2_Brochure8p_FRA_web.pdf)

## J

**Jain, A.** (2016). *Compendium of Technologies for the Recovery of Materials/Energy from End of Life (EoL) Tyres Final Report*. Nations, United Programme, Environment Environmental, International Centre, Technology.

**Janga, J. W., Yoob, T. S., Ohb, J. H., & Iwasakic, I.** (1998). *Discarded tire recycling practices in the United States, Japan and Korea, resources.*, 22, 1-14.

## K

**KEBAILI, N.** (2017) *Valorisation de la poudrette de caoutchouc en domaine routier- ASPHALTE CAOUTCHOUC (Doctoral dissertation, Ecole Nationale Supérieure des Travaux Publics-Francis Jeanson)*.

**Kim, J. K., Saha, P., Thomas, S., Haponiuk, J. T., & Aswathi, M. K. (Eds.)**. (2018). *Rubber recycling: challenges and developments*. Royal Society of Chemistry.

**KORDOGHLI, S.** (2016). *Mise au point d'un combustible innovant à partir des déchets de pneus usagés par pyrolyse*. Thèse.

**Kordoghli, S., Paraschiv, M., Kuncser, R., Tazerout, M., Prisecaru, M., Zagrouba, F., & Georgescu, I.** (2014). *Managing the environmental hazards of waste tires*. *Journal of Engineering Studies and Research*, 20(4), 1-11.

**Kyari, M., Cunliffe, A., & Williams, P. T. (2005).** *Characterization of oils, gases, and char in relation to the pyrolysis of different brands of scrap automotive tires. Energy & Fuels, 19(3), 1165-1173.*

## **L**

**Leger, S., Lafortune, F. (2001).** *Rapport sur la pyrolyse et la gazéification des pneus hors d'usage. Programme de gestion intégrée des pneus hors d'usage, Québec.*

**Letcher, T., Vallero, D. 2019.** *Waste – A handbook for management. Elsevier, 775p.*

**Letcher, T., Shulman, V., Amirkhanian, S. 2021.** *Tire Waste and Recycling, Elsevier, 650p.*

**Li, S. Q., Yao, Q., Chi, Y., Yan, J. H., & Cen, K. F. (2004).** *Pilot-scale pyrolysis of scrap tires in a continuous rotary kiln reactor. Industrial & engineering chemistry research, 43(17), 5133-5145.*

**Long, N. T. (1993).** *Le Pneusol : recherches-réalisations-perspectives. Institut National des Science Appliquées de Lyon, Lyon, France, Thèse de Doctorat.*

## **M**

**Machin, E. B., Pedroso, D. T., & de Carvalho Jr, J. A. (2017).** *Energetic valorization of waste tires. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 68, 306-315.*

**Markel, E., & Lackner, M. (2020).** *Devulcanization technologies for recycling of tire-derived rubber: A review. Materials, 13(5), 1246.*

**Martínez, J. D., Puy, N., Murillo, R., García, T., Navarro, M. V., & Mastral, A. M. (2013).** *Waste tyre pyrolysis—A review. Renewable and sustainable energy reviews, 23, 179-213.*

**Mawhinney, J. R. (1990).** *The Hagersville tire Fire - February 12 to 28. NRC Publications Archive(593).*

**Moulin, L. (2018).** *Vapothermolyse des pneus usagés. Valorisation du noir de carbone récupéré, relation procédé-produit (Doctoral dissertation, Ecole des Mines d'Albi-Carmaux).*

## **P**

**Philgea., Moringa. (2015).** *ETAT DES LIEUX DE LA FILIERE DE GRANULATION DES PNEUMATIQUES USAGES EN FRANCE, EUROPE ET DANS LE MONDE. Rapport final, ADEME.*

**Presti, D. L.** (2013). *Recycled tyre rubber modified bitumens for road asphalt mixtures: A literature review. Construction and Building Materials, 49, 863-881.*

## **R**

**Reisman, J. I.** (1997). *Air emissions from scrap tire combustion.*

**RMA (Rubber Manufacturers Association).** (2014). *2013 US scrap tire management summary.*

**Reschner, K., 2003.** *Scrap tyre recycling-Market overview and outlook. Waste Management World.*

**Rofiqul, I., Parveen, M., Haniu, H., & Sarker, M. I.** (2010). *Innovation in pyrolysis technology for management of scrap tire : a solution of energy and environment. International Journal of Environmental Science and Development, 1(1), 89.*

## **S**

**Sadaka, F.** (2010). *Etude de la dégradation contrôlée de polydiènes : application au recyclage des déchets pneumatiques (Doctoral dissertation, Le Mans).*

**USTIRES, Scrap Tires.** (2019). *ustires.org.*

<https://www.ustires.org/sites/default/files/2019%20USTMA%20Scrap%20Tire%20Management%20Summary%20Report.pdf>

**Shanbag, A., & Manjare, S.** (2020). *Life cycle assessment of tyre manufacturing process. Journal of Sustainable Development of Energy, Water and Environment Systems, 8(1), 22-34.*

**Shulman, V.** (2004). *Tyre recycling (Vol. 15). iSmithers Rapra Publishing.*

**SNCP.** (2007, décembre). *Incendie dans un entrepôt de stockage de pneumatiques équipé d'une installation Sprinkler. p. 6.*

## **T**

**Torretta, V., Rada, E. C., Ragazzi, M., Trulli, E., Istrate, I. A., & Cioca, L. I.** (2015). *Treatment and disposal of tyres: Two EU approaches. A review. Waste management, 45, 152-160.*

**Trouzine, H., Asroun, A., Asroun, N., Belabdelouhab, F., & Long, N. T.** (2011). *Problématique des pneumatiques usagés en Algérie. Nature & Technology, (5), 28.*

**Tyre Industry of Japan** 2014. *The Japan automobile tyre manufacturers association, Inc n:* 2014. Disponible sur : [www.jatma.or.jp/](http://www.jatma.or.jp/).

## U

**Ucar, S., Karagoz, S., Ozkan, A. R., & Yanik, J.** (2005). *Evaluation of two different scrap tires as hydrocarbon source by pyrolysis.* *Fuel*, 84(14-15), 1884-1892.

**USEPA.** (1998). *Tires, Open Burning.*

<https://nepis.epa.gov/Exe/ZyPURL.cgi?Dockey=9100RRP1.txt>

## W

**WANG, H. Z., He, X. U., & XUAN, X. J.** (2010). *Review of Waste Tire Reuse & Recycling in China—current situation, problems and countermeasures.* *Advances in Natural Science*, 2(1), 31-39.

**Wang, Q. Z., Wang, N. N., Tseng, M. L., Huang, Y. M., & Li, N. L.** (2020). *Waste tire recycling assessment: Road application potential and carbon emissions reduction analysis of crumb rubber modified asphalt in China.* *Journal of Cleaner Production*, 249, 119411.

**Wang, Z., Burra, K. G., Lei, T., & Gupta, A. K.** (2019). *Co-gasification characteristics of waste tire and pine bark mixtures in CO<sub>2</sub> atmosphere.* *Fuel*, 257, 116025.

**WBSCD.** 2018. *Global ELT Management – A global state of knowledge on collection rates, recovery routes, and management methods.*

## Y

**Yankovoy D, Bederov L, Ladygin K, Stompel S.** (2017). *All about tire recycling.* Disponible sur : [www.i-pec.ru/](http://www.i-pec.ru/)

# *ANNEXES*

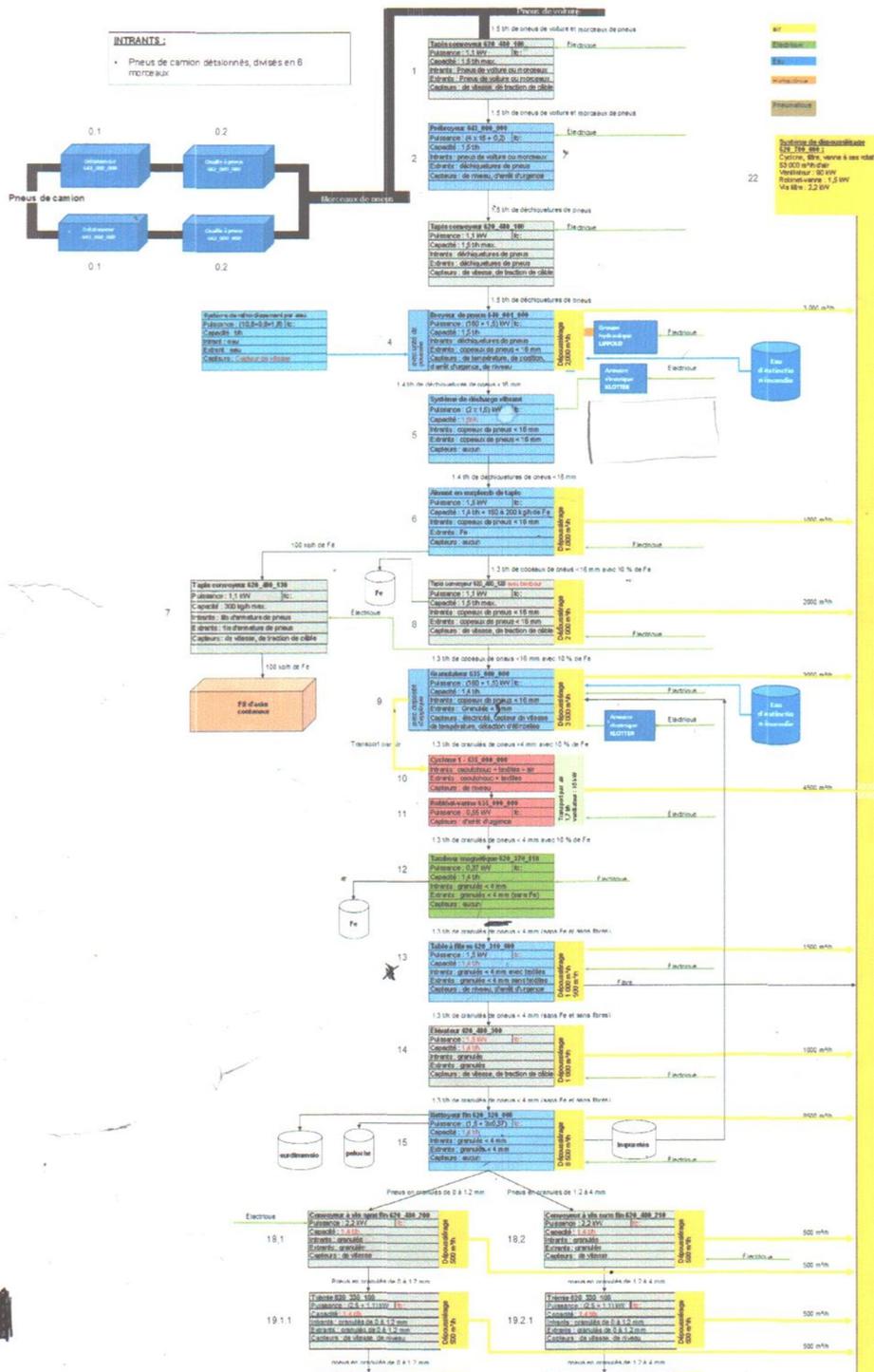
## ***Sommaire***

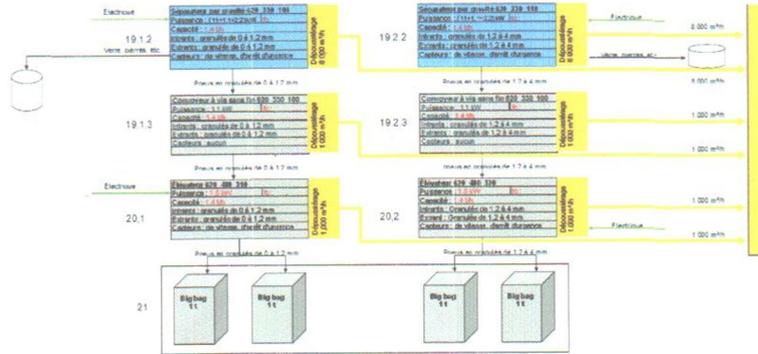
*ANNEXE 1* : plan général du processus de recycle suivi par RECYTECH

*ANNEXE 2* : Résultats obtenus en réalisant notre cas pratique au sein de l'entreprise Recytech

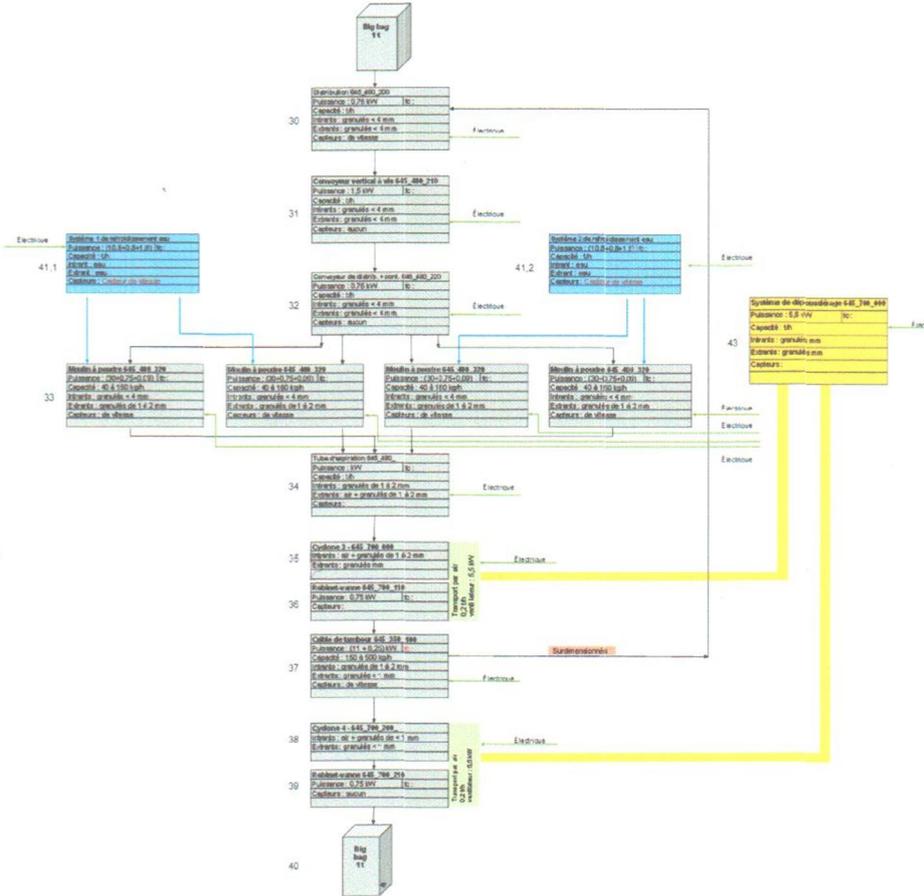
*ANNEXE 3* : Résultats obtenus par NAFTAL sur les essais d'ajout de la poudrette de caoutchouc dans le bitume par LCTP.

*ANNEXE 4* : les normes sur les caractéristiques des bitumes





- Pou fine  
- Filtes d'esp





# SARL RECYTECH

## RAPPORT DE PRODUCTION

Siège : Lotissement Ouest, Cité de la Révolution, Bâtiment D, N°50, Commune de BOUIRA, Wilaya de BOUIRA

Tél : 026.73.50.23 - Fax : 026.73.50.24 - Mobile : 05.53.19.00.77



Date,	Début ,	Fin,
dimanche 23 mai 2021	10:00	12:00

### Quantité de pneus usagés broyés

Types de pneus	Quantités		Observation
	Pneus	Tonne	
VL (véhicule léger)	104	1	Dimensions de matériau brut:
PL (poids lourds)	44	2	Morceaux PL : Ø 150 x 200 mm
Total	148	3	Chips PL : Ø 80 x 80 mm Morceaux VL : Ø 150 x 200 mm

Produits à fabriquer :	Quantité		Observation
1.1.Granulat de caoutchouc (0,5 - 1,5)	700 Kg	23%	l'utilisation variable des tamis (Nettoyeur modulaire UP-1500) permet de générer des produits différents.
1.2.Granulat de caoutchouc (1,5 - 04)	1500 Kg	50%	
Total	2200 Kg	73%	L'Etat de lames :Dégradation avancée (Débit du Granulateur, Broyeur selon l'état des lames).
2.1 . Acier ( fibres d'acier )	600 Kg	20%	Overband magnétique
2.2. Acier ( Tringle) ( VL 0,4 kg / pneu + PL 5 Kg / pneu )	262 Kg	%	ARRACHEUR DES PNEUS
3. Textile	140 Kg	4,66%	Nettoyeur à cribles PC-1500
4.Poudre / textile	40 Kg	%	Filtre
3. Poudre de caoutchouc	700 Kg		moulin a poudre

DIRECTEUR PRODUCTION

Directeur production  
Mourad Ouakli

DIRECTEUR

Mr. HAMRANI YOUGHOURTA  
Directeur d'unité

## I- INTRODUCTION :

Dans le cadre du contrat entre NAFTAL direction bitume et le laboratoire central des travaux publics le LCTP, à procéder à une analyse d'un échantillon de bitume caoutchouc, fabriqué à partir de déchets broyés de pneumatiques de camions et de voitures, a cheminé au laboratoire par les soins des éléments de Naftal.

## II- ESSAIS REALISES :

Les essais réalisés sur cet échantillon de bitume caoutchouc et les résultats obtenus sont présentés dans le tableau qui suit :

DESIGNATION ESSAIS	NORME DE REFERENCE	UNITE	RESULTATS	SPECIFICATIONS NORME 14023
Essai de Pénétrabilité à 25 °C	NF EN 1426	0.1mm	34.5*34.00*35.10	10-40
Essai Point de ramollissement *Billes et Anneaux*	NF EN 1427	°C	58.90 -58.70	≥ 55
Resistance au durcissement à 163°C	EN 12607-1	/	/	/
Essai de Pénétrabilité restante		%	76.76	≥ 35
Augmentation du Point de ramollissement sévérité		°C	4.00	≤ 8
Variation de masse		°C	1.45	≤ 1
Retour élastique à 25 °C *	NFEN13398	%	70.00%	≥ 70

### III- COMMENTAIRES :

Sur la base de ses résultats obtenus, on peut conclure que les caractéristiques de ce bitume caoutchouc de point de vue pénétrabilité conformes à l'indice de classement «2», retour élastique«4», par contre la TBA «7» de la norme des bitumes modifiée EN 14023.

Toutefois, pour améliorer l'ensemble de ces paramètres, nous recommandons à l'entreprise d'augmenter la durée du malaxage pour avoir un bon cisaillement et une bonne homogénéisation du produit dans la matrice du bitume.

وقيس عيسى  
قيد المراسم

## **Les normes sur les caractéristiques des bitumes**

### **1. La norme NF EN 1426, Essai de pénétrabilité**

Il s'agit d'une norme européenne qui définit une méthode pour la détermination de la consistance des bitumes et des liants bitumineux. La caractéristique présentée sous le nom de pénétrabilité à l'aiguille, qui est exprimée en dixième de millimètre (0.1 mm), représente la mesure de la pénétration dans un échantillon de bitume au bout d'un temps de 5 secondes, d'une aiguille dont le poids avec son support est de 100g, la pénétrabilité la plus couramment utilisée est celle mesurée à 25 °C. Plus le bitume est dur plus sa valeur de pénétrabilité est faible.

### **2. La norme NF EN 1427 :**

La norme européenne EN 1427 définit la méthode de détermination du point ramollissement des bitumes dans la plage des températures 28 °C à 150 °C. Cette méthode sert tester le comportement du bitume à des températures élevées. Comme les bitumes n'ont pas un point de fusion franc, leur consistance décroît progressivement lorsque la température s'élève, ainsi la température de ramollissement bille et anneau (TBA) est déterminée lorsqu'un disque de bitume inclus dans un anneau métallique de 19 mm de diamètre, subit une déformation sous le poids d'une bille d'acier de 3.5 et de 9.5 mm de diamètre sous l'augmentation de la température l'ensemble est chauffé à température constante (5 °C /mn). Le point de ramollissement bille et anneau est la température à laquelle le poids de la bille imprime à l'échantillon une déformation verticale de 25 mm.

### **3. La norme NF EN 12607-1**

La présente norme européenne prescrit une méthode qui permet de mesurer les effets combinés de la chaleur et de l'air sur un film mince de bitume. Elle simule le durcissement que subit un liant bitumineux au cours du malaxage.

### **4. La norme EN 13398**

Il s'agit du retour élastique d'un bitume, qui est un indicateur qui permet de caractériser la capacité du liant à retrouver ses caractéristiques géométriques d'origine à la suite d'une déformation, il est déterminé à l'aide d'un appareillage ductilimètre.

## **Résumé**

L'essor industriel de la fabrication des produits en caoutchouc, en particulier ceux utilisés dans l'industrie automobile, est responsable d'une grande quantité de déchets, principalement sous forme de pneus usagés, dont plus de 29 millions de tonnes sont produites dans le monde. La gestion des pneus en fin de vie est un enjeu important, en raison des risques potentiels pour l'environnement et la santé humaine. Les progrès réalisés ces dernières années dans la gestion et le recyclage des pneus ont conduit les pays développés (UE, USA, Japon) à les utiliser comme combustibles alternatifs ou encore comme nouveaux matériaux polymères. Afin de s'inscrire dans la même démarche, l'Algérie s'est dotée de la première usine de recyclage des pneus (RECYTECH) sise à Bouira et ce en vue de produire une poudrette de pneus, valorisable comme adjuvant dans les asphaltes. Dans ce mémoire de fin d'étude, comprenant un stage pratique au sein de l'entreprise RECYTECH, nous présentons une revue pertinente décrivant les différentes approches dans la gestion des pneus usagés et leur valorisation dans différents pays. De plus, une description détaillée des flux de pneus usagés au sein de l'entreprise RECYTECH et les grandes étapes de leur recyclage est présentée.

**Mots clés :** Pneus usagés, valorisation énergétique, Asphalte caoutchouteux, Recytech

## **Abstract**

The industrial development of rubber products, especially those used in the automotive industry, is responsible for a large amount of waste, mainly in the form of used tires, of which more than 29 million tons are produced worldwide. The management of end-of-life tires is an important issue because of the potential risks to the environment and human health. The progress made in recent years in the management and recycling of tires has led developed countries (EU, USA, Japan) to use them as alternative fuels or as new polymer materials. In order to follow the same approach, Algeria has equipped itself with the first tire recycling plant (RECYTECH) located in Bouira, with a view to producing a tire powder that can be used as an additive in asphalt. In this thesis, which includes a practical internship in the RECYTECH company, we present a relevant review describing the different approaches in the management of used tires and their recovery in different countries. In addition, a detailed description of the used tire flows within the RECYTECH company and the main stages of their recycling is presented.

**Key words:** Used tires, energy recovery, rubber asphalt, Recytech

## المخلص

النمو الصناعي لتصنيع منتجات المطاط، وعلى وجه الخصوص تلك المستخدمة في صناعة السيارات، هو المسؤول عن كمية كبيرة من النفايات، وذلك أساسا في شكل الإطارات المستعملة، ويتم إنتاج أكثر من 29 مليون طن في العالم. نهاية الحياة إدارة الإطارات هي قضية هامة، وذلك بسبب المخاطر المحتملة على البيئة وصحة الإنسان. وقد أدى التقدم المحرز في السنوات الأخيرة في إدارة ومعالج الإطارات الدول المتقدمة (الولايات المتحدة الأمريكية، اليابان) لاستخدامها كوقود بديل أو المواد البوليمرية جديدة. من أجل تسجيل في نفس النهج، تملك الجزائر أول محطة لإعادة تدوير الإطارات روسيتاك الواقعة في البويرة وهذا من أجل إنتاج مسحوق الإطارات قيمة ومساعد في في الأسفلت. في هذه الأطروحة النهائية، بما في ذلك التدريب العملي داخل الشركة روسيتاك نقدم مجلة ذات الصلة التي تصف المناهج المختلفة في إدارة الإطارات المستعملة وتثمينها في مختلف البلدان. وبالإضافة إلى ذلك، وصفا مفصلا عن المراحل الرئيسية لإعادة التدوير

**الكلمات الأساسية:** الإطارات المستعملة، استرداد الطاقة، المطاط الأسفلت