

Revue des procédés visant la valorisation matière des déchets caoutchoutiques



**REVUE DES PROCÉDES VISANT LA VALORISATION MATIÈRE
DES DÉCHETS CAOUTCHOUCIQUES**

RAPPORT FINAL

juin 2012

V. MONIER, M. HESTIN, M. TRARIEUX, S. AIT-SAID
- Bio Intelligence Service



Créée en 1989 à l'initiative du Ministère en charge de l'Environnement, l'association RECORD – REseau COopératif de Recherche sur les Déchets et l'Environnement – est le fruit d'une triple coopération entre industriels, pouvoirs publics et chercheurs. L'objectif principal de RECORD est le financement et la réalisation d'études et de recherches dans le domaine des déchets et des pollutions industrielles.

Les membres de ce réseau (groupes industriels et organismes publics) définissent collégalement des programmes d'études et de recherche adaptés à leurs besoins. Ces programmes sont ensuite confiés à des laboratoires publics ou privés.

Avertissement :

Les rapports ont été établis au vu des données scientifiques et techniques et d'un cadre réglementaire et normatif en vigueur à la date de l'édition des documents.

Ces documents comprennent des propositions ou des recommandations qui n'engagent que leurs auteurs. Sauf mention contraire, ils n'ont pas vocation à représenter l'avis des membres de RECORD.

- ✓ Pour toute reprise d'informations contenues dans ce document, l'utilisateur aura l'obligation de citer le rapport sous la référence :
RECORD, Revue des procédés visant la valorisation matière des déchets caoutchoutiques, 2012, 70 p, n°10-0911/1A
- ✓ Ces travaux ont reçu le soutien de l'ADEME (Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Energie)
www.ademe.fr

© RECORD, 2012

RÉSUMÉ

Cette étude a eu pour objectifs d'une part de dresser un photographie de la filière des déchets caoutchoutiques en France (gisements, modalités de collecte), et d'autre part, de recenser et étudier les procédés visant leur valorisation matière sous leurs aspects techniques, environnementaux et économiques, et à une échelle internationale.

Il ressort qu'au niveau national, l'essentiel du gisement de déchets caoutchoutiques faisant l'objet d'une collecte et d'une valorisation organisées est constitué de pneumatiques usagés. Le mode de valorisation le plus répandu actuellement est la valorisation énergétique.

Les pratiques de gestion des déchets caoutchoutiques hors pneumatiques apparaissent comme plus hétérogènes, dans la mesure où les gisements sont difficilement évaluables et où il n'existe pas de réelle filière de collecte et de valorisation de ces déchets.

En termes de procédés de valorisation matière existants, les procédés reposant sur des techniques de broyage et granulation sont prépondérants à l'échelle industrielle. De nombreux projets de recherche et développement sont toutefois en cours afin de développer la valorisation matière des caoutchoucs.

MOTS CLÉS

Caoutchouc, élastomère, valorisation matière, recyclage, régénération, devulcanisation

SUMMARY

The objectives of the study were two-fold. Firstly, the study sought to develop a panorama of the waste stream composed of rubber-related waste in France (quantities, collection methods). Secondly, the study sought to identify recovery procedures for rubber-related waste at an international level and to study their technical, environmental, and economic aspects.

It appears that at a national level, used tires constitute the bulk of rubber-related waste which is subject to organised collection and recovery efforts. Energy recovery is currently the most widely used form of recovery for this waste stream.

Management of rubber-related waste other than tires is more heterogeneous, since quantities are difficult to estimate and there is no dedicated collection and recovery system in place.

In terms of processes currently used for material recovery, processes relying on shredding and granulation techniques are predominantly used on an industrial scale. Numerous R&D projects are currently underway to develop material recovery for rubber-related waste.

KEY WORDS

Rubber, elastomer, material recovery, recycling, regeneration, devulcanisation

SOMMAIRE

TABLES DES FIGURES	5
TABLES DES TABLEAUX	6
I. CONTEXTE ET OBJECTIFS DE L'ÉTUDE	7
I.1 Contexte	7
I.2 Objectifs et déroulement de l'étude	8
I.3 Champ de l'étude.....	8
II. ÉTAT DES LIEUX DE LA FILIÈRE (GISEMENTS ET COLLECTE).....	9
II.1 Typologies utilisées	9
II.2 Inventaire des gisements.....	11
II.2.1 Déchets de fabrication.....	11
II.2.2 Déchets en fin de vie	18
II.3 Filières de collecte	20
II.3.1 Déchets de fabrication.....	21
II.3.2 Déchets en fin de vie	23
III. PROCÉDÉS DE VALORISATION.....	27
III.1 Les principales voies de valorisation des déchets caoutchoutiques.....	27
III.2 Organisation des acteurs de la valorisation matière	28
III.3 Fiches procédés	29
III.3.1 Fiches Broyages.....	30
III.3.2 Fiches Régénération	42
III.3.3 Fiche Pyrolyse	54
III.3.4 Autres procédés.....	59
IV. BILAN ET SYNTHÈSE	62
IV.1 Synthèse des fiches procédés	62
IV.2 Valorisation des déchets caoutchoutiques en France	64
IV.3 Freins et leviers	65
V. CONCLUSION	66
VI. GLOSSAIRE.....	67
ANNEXES.....	68
Annexe I. Enquête INSEE 2008 - Méthodologie	68
Annexe II. Bibliographie.....	69
Annexe III. Liste d'acteurs identifiés	69
Annexe IV. ACV Corti & Lombardi 2004.....	70

TABLES DES FIGURES

<i>Figure 1 : Structure de la production de la branche du caoutchouc industriel en France (en milliers de tonnes)...</i>	9
<i>Figure 2 : Répartition des gisements de déchets caoutchoutiques</i>	11
<i>Figure 3 : Enquête INSEE 2008 - Répartition du nombre d'établissements ayant déclaré avoir produit des déchets caoutchoutiques.....</i>	12
<i>Figure 4 : Répartition des tonnages de déchets caoutchoutiques déclarés produits par type de déchets (en tonnes)</i>	12
<i>Figure 5 : Enquête INSEE 2008 - Répartition par nombre et par taille d'établissements producteurs de déchets caoutchoutiques.....</i>	16
<i>Figure 6 : Enquête INSEE 2008 - Répartition par tonnages et par taille d'établissements producteurs de déchets caoutchoutiques.....</i>	16
<i>Figure 7 : Enquête INSEE 2008 - Répartition par région des établissements producteurs de déchets caoutchoutiques.....</i>	17
<i>Figure 8 : Enquête INSEE 2008 - Répartition par région des tonnages de déchets caoutchoutiques produits par les établissements industriels.....</i>	17
<i>Figure 9 : Organisation des filières de collecte de déchets caoutchoutiques en France.....</i>	20
<i>Figure 10 : Lieux de regroupement Aliapur.....</i>	24
<i>Figure 11 : Filière d'élimination des pneumatiques usagés, d'après les déclarations des producteurs</i>	25
<i>Figure 12 : Répartition géographique des tonnages de pneus usagés ramassés en 2009.....</i>	26
<i>Figure 13 : Schématisation des principaux modes de valorisation des déchets caoutchoutiques</i>	27

TABLES DES TABLEAUX

<i>Tableau 1 : Membres du comité de suivi de l'étude.....</i>	<i>8</i>
<i>Tableau 2 : Production de la branche caoutchouc en France en 2010.....</i>	<i>9</i>
<i>Tableau 3 : Composition moyenne d'un pneu de véhicule léger.....</i>	<i>13</i>
<i>Tableau 4 : Composition moyenne d'un pneu poids lourds.....</i>	<i>13</i>
<i>Tableau 5 : Composition moyenne d'un pneu d'avion.....</i>	<i>13</i>
<i>Tableau 6 : Composition moyenne d'un pneu de vélo.....</i>	<i>13</i>
<i>Tableau 7 : Enquête INSEE 2008 - Répartition du nombre d'établissements et des tonnages par secteurs d'activités.....</i>	<i>15</i>
<i>Tableau 8 : Répartition des tonnages de pneumatiques mis sur le marché national et des tonnages déclarés éliminés par les producteurs en 2009.....</i>	<i>18</i>
<i>Tableau 9 : Enquête INSEE 2008 - Lieu de traitement des déchets caoutchoutiques produits par les établissements industriels.....</i>	<i>22</i>
<i>Tableau 10 : Enquête INSEE 2008 - Mode de traitement des déchets caoutchoutiques produits par les établissements industriels.....</i>	<i>22</i>
<i>Tableau 11 : Enquête INSEE 2008 - Lieu et mode de traitement des déchets caoutchoutiques produits par les établissements industriels - Distinction par type de déchets.....</i>	<i>23</i>
<i>Tableau 12 : Comparaison des filières de valorisation des pneus usagés selon les producteurs entre 2008 et 2009.....</i>	<i>24</i>

I. CONTEXTE ET OBJECTIFS DE L'ÉTUDE

I.1 CONTEXTE

Les déchets caoutchoutiques (pneumatiques ou industriels) constituent un gisement important (de plusieurs centaines de milliers de tonnes annuelles à l'échelle de la France), qui peut être valorisé¹ selon différents procédés.

Compte tenu de leur fort pouvoir calorifique, leur valorisation énergétique directe est historiquement pratiquée, en général par co-combustion, en cimenterie ou dans l'industrie papetière par exemple, pour la fourniture d'énergie calorifique (chaleur, vapeur, etc.). En raison de leurs caractéristiques spécifiques telles la souplesse, la conductivité hydraulique forte, la légèreté, ces déchets peuvent également faire l'objet d'une valorisation matière sous forme de recyclage², réemploi³ (telle que la deuxième monte d'un pneu), ou réutilisation⁴ (par exemple, l'utilisation des pneus de voiture pour protéger la coque des bateaux).

Le caoutchouc qui a subi une valorisation matière peut être utilisé dans de nombreuses applications dans les travaux publics (bassins de rétention et d'infiltration, enrobés routiers, murs de soutènement, remblais allégés) ou dans les applications hors travaux publics (aires de jeux, sol sportif, plate-forme de tramway, écrans acoustiques, gazon synthétique, etc.).

Trois constats principaux relatifs aux déchets caoutchoutiques viennent ici d'être évoqués : l'importance du gisement, la diversité des formes de valorisation et des applications pour le caoutchouc valorisé.

Afin de compléter ces éléments préalables et de bien comprendre l'objet de cette étude (détaillé ci-après), il est important de préciser que plusieurs freins à la valorisation des déchets caoutchoutiques en général, et à la valorisation matière en particulier, ont d'ores-et-déjà été constatés par les différentes parties prenantes du secteur. On peut ainsi citer les contraintes suivantes (dont la liste n'est pas exhaustive et est complétée plus loin dans cette étude) :

- Une quantité de caoutchouc trop faible dans certains produits, réduisant fortement l'intérêt de son extraction d'un point de vue économique et rendant l'action plus compliquée d'un point de vue technique.
- Une contamination de certains produits caoutchoutiques liée aux substances qu'ils ont transportées (courroies transporteuses par exemple).
- Une collecte complexifiée du fait d'un éparpillement et d'une diversité (de taille et de poids) trop grande des pièces en caoutchouc.
- Une présence de nombreux autres matériaux dans les objets en caoutchouc, ce qui complique la valorisation.

De plus, il est constaté que la valorisation matière perd de son importance au profit de la valorisation énergétique depuis le milieu des années 2000.

¹ Au sens de l'Article L541-1-1 du Code de l'environnement (Section 1, Chapitre 1er, Titre IV, Livre V), on entend par « valorisation » : toute opération dont le résultat principal est que des déchets servent à des fins utiles en substitution à d'autres substances, matières ou produits qui auraient été utilisés à une fin particulière, ou que des déchets soient préparés pour être utilisés à cette fin, y compris par le producteur de déchets.

² Recyclage : toute opération de valorisation par laquelle les déchets, y compris les déchets organiques, sont retraités en substances, matières ou produits aux fins de leur fonction initiale ou à d'autres fins. Les opérations de valorisation énergétique des déchets, celles relatives à la conversion des déchets en combustible et les opérations de remblaiement ne peuvent pas être qualifiées d'opérations de recyclage.

³ Réemploi : toute opération par laquelle des substances, matières ou produits qui ne sont pas des déchets sont utilisés de nouveau pour un usage identique à celui pour lequel ils avaient été conçus.

⁴ Réutilisation : toute opération par laquelle des substances, matières ou produits qui sont devenus des déchets sont utilisés de nouveau.

I.2 OBJECTIFS ET DÉROULEMENT DE L'ÉTUDE

L'objectif de la présente étude est de réaliser un état de l'art des techniques et procédés visant à la valorisation matière des déchets caoutchoutiques.

Au vu des éléments du précédent contexte, l'objectif de l'étude est double : d'une part, dresser une photographie de la filière à l'échelle de la France et, d'autre part, réaliser une analyse des procédés de valorisation matière (pour la France et l'international).

L'étude s'est décomposée en deux grandes phases dont les objectifs respectifs ont été les suivants :

- L'objectif de la première phase a été d'obtenir une cartographie précise de la filière des déchets caoutchoutiques (gisements, collecte, types de procédés existants).

Les résultats de la première phase sont présentés dans le chapitre II « *État des lieux de la filière (gisements et collecte)* ».

- L'objectif de la seconde phase a été d'établir une analyse approfondie des différents procédés de valorisation matière existants, afin d'en connaître les aspects techniques, environnementaux et économiques.

Les résultats de la seconde phase sont présentés dans le chapitre III « *Procédés de valorisation* ».

L'étude a été réalisée en concertation avec les membres du comité de suivi, présentés dans le tableau ci-dessous.

Tableau 1 : Membres du comité de suivi de l'étude

ORGANISME	IDENTITÉ	FONCTION
ADEME	Élodie BUSCOZ	Direction Consommation Durable et Déchets
EDF	Coryse COUDRAY-DECOCK	R&D - Groupe Gestion de l'Envt & Expertise Déchets
HUTCHINSON SA CENTRE DE RECHERCHE	Benoît LE ROSSIGNOL	Directeur Développement Matériaux
GROUPE SÉCHÉ ENVIRONNEMENT	Hugues LEVASSEUR	Directeur du Marketing
MEDDTL (BUREAU DE LA PLANIFICATION ET DE LA GESTION DES DÉCHETS, DIRECTION GÉNÉRALE DE LA PRÉVENTION DES RISQUES)	Loïc LEJAY	Chargé de mission Développement des activités liées au recyclage et à la valorisation des déchets (Programme Filières Vertes)
RECORD	Bénédicte COUFFIGNAL	-
RENAULT	Juliette BEAULIEU et Fabrice ABRAHAM	Direction Ingénierie des Matériaux, TCR LAB 252
SARP INDUSTRIES	Gilles SCOTTE, puis Cyrille VERONNEAU	Ingénieur procédés senior
SITA RECYCLAGE	Frédéric BONAMY, puis Marie-Claire MAGNIÉ	Direction Industrielle
SOCOTEC	Lauro CIMOLINO	Direction des Techniques et Méthodes
UT COMPIEGNE / RECORD	Gérard ANTONINI	Correspondant Scientifique

I.3 CHAMP DE L'ÉTUDE

► PÉRIMÈTRE TECHNIQUE

L'étude porte sur les procédés de valorisation matière, c'est-à-dire tout mode de traitement des déchets qui permet le réemploi, réutilisation ou recyclage, de tous les types de déchets caoutchoutiques.

► PÉRIMÈTRE GÉOGRAPHIQUE

L'étude porte sur le territoire français en ce qui concerne la situation des gisements et des filières de collecte. Quant à l'étude des procédés de valorisation matière, elle est étendue à l'international.

NB : malgré les moyens mis en œuvre pour cette étude, et plus particulièrement pour l'analyse des procédés existants, seule une petite partie des acteurs mobilisés a été disponible pour s'impliquer dans cette étude.

II. ÉTAT DES LIEUX DE LA FILIÈRE (GISEMENTS ET COLLECTE)

II.1 TYPOLOGIES UTILISÉES

► DONNÉES SUR LA PRODUCTION

Afin d'établir des hypothèses de calcul visant notamment à compléter des données manquantes, les données globales relatives à la production de caoutchouc en France ont été collectées.

Le tableau ci-dessous présente la structure de la production de la « branche » caoutchouc en France.

Tableau 2 : Production de la branche caoutchouc en France en 2010⁵

BRANCHE	EN MILLIERS DE TONNES
PNEUMATIQUES	500
CAOUTCHOUC INDUSTRIEL	375
TOTAL	875

La figure ci-dessous présente la structure de la production de la branche du caoutchouc industriel en France en 2010.

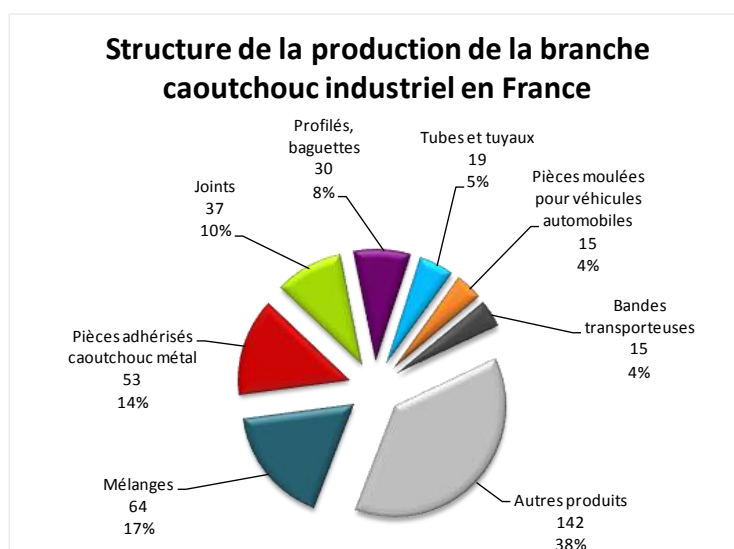


Figure 1 : Structure de la production de la branche du caoutchouc industriel en France (en milliers de tonnes)⁶

La France représente 13 % de la production européenne de pneumatique (UE des 27) et 12 % de la production de caoutchouc industriel.

L'étude des gisements et de la collecte de déchets caoutchoutiques a été réalisée selon les deux origines principales des déchets identifiées : déchets de fabrication et déchets en fin de vie.

► DÉCHETS DE FABRICATION

Les déchets suivants ont été intégrés dans les déchets de fabrication :

- Pièces rebutées, non conformes aux spécifications (pneus compris) ;
- Pièces prélevées pour les contrôles généralement destructifs (pneus compris) ;
- Carottes d'injection, nappes de moulage et tout autre type de chutes générées au cours de l'étape de mise en forme des caoutchoucs par injection, moulage, extrusion, etc. (pneus compris) ;
- Chutes de rechapage de pneumatiques.

⁵ Source : SNCP d'après des données INSEE

⁶ Source : SNCP d'après des données INSEE en volume

► DÉCHETS EN FIN DE VIE

Les déchets suivants ont été intégrés dans les déchets en fin de vie :

- Pneumatiques usagés ;
- Autres déchets caoutchoutiques issus de VHU (joints d'isolation, joints moteurs, etc.) ;
- Déchets en fin de vie d'autres pièces caoutchoutiques (mousses, pièces pour le transfert de fluides, cales et supports antivibratoires, pièces pour l'isolation thermique et acoustique, gants, etc.).

Une classification simplifiée par type de déchets a été réalisée pour l'étude détaillée des gisements et de la collecte des déchets caoutchoutiques en France, comme indiqué ci-dessous.

► DÉCHETS DE VÉHICULES⁷

Le nombre de pièces en caoutchouc dans une voiture est estimé à 1 400⁸.

Les déchets de véhicules correspondants peuvent être répartis entre :

▪ **Les déchets de pneumatiques**

Les déchets de pneumatiques étudiés sont les suivants :

- Pneumatiques de véhicules légers ;
- Pneumatiques poids lourds ;
- Pneumatiques ferroviaires ;
- Pneumatiques aéronautiques ;
- Autres pneus.

▪ **Les déchets de véhicules hors pneumatiques**

Les autres pièces caoutchoutiques présentes dans les véhicules peuvent être classées comme suit :

- Joints d'étanchéité (fenêtre, porte, etc.) ;
- Joints moteurs ;
- Courroies ;
- Pièces pour le transfert de fluides (fluides frigorigènes, huiles moteurs, etc.) ;
- Suspensions, amortisseurs.

► DÉCHETS HORS VÉHICULES

Face au manque manifeste d'informations relatives aux déchets de caoutchouc hors véhicules, il n'a pas été systématiquement possible de distinguer finement les gisements de déchets par type.

Dans les cas où une distinction a été possible, les déchets suivants ont été étudiés :

- Déchets caoutchoutiques du BTP ;
- Déchets caoutchoutiques de pièces techniques ;
- Déchets à destination des organismes de santé ;
- Autres déchets.

⁷ Est considéré comme véhicule tout élément mobile permettant de déplacer des personnes ou des charges d'un point à un autre.

⁸ Les applications du caoutchouc, Syndicat national du caoutchouc et des polymères.

II.2 INVENTAIRE DES GISEMENTS

La figure ci-dessous récapitule la répartition des gisements de déchets caoutchoutiques en France telle qu'estimée dans le cadre de cette étude.

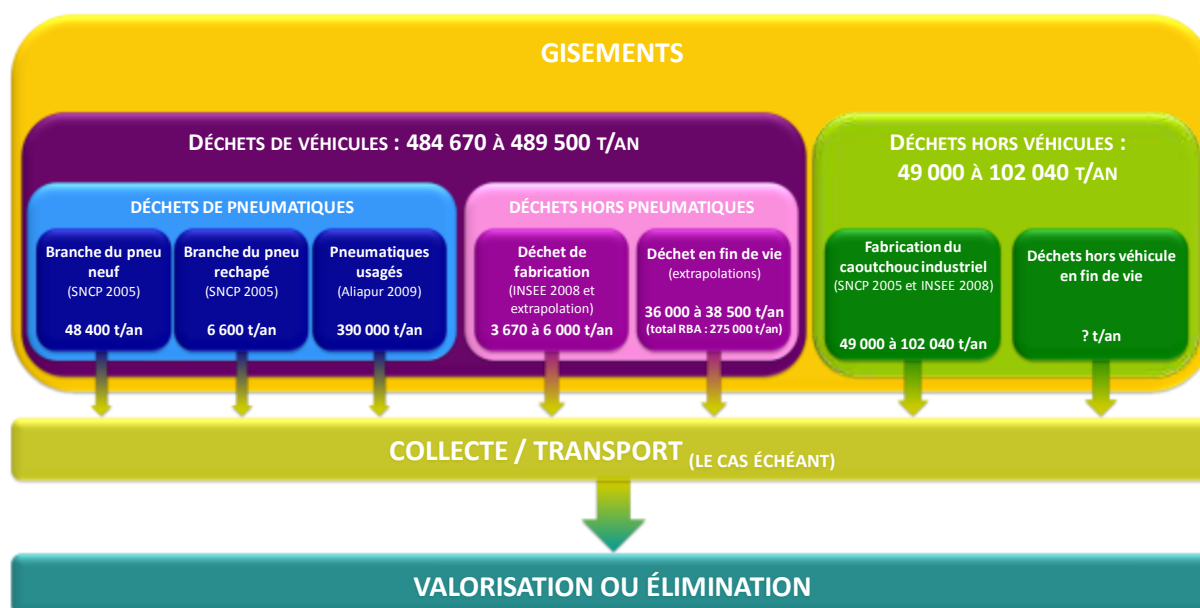


Figure 2 : Répartition des gisements de déchets caoutchoutiques

Les sources et hypothèses de calcul des gisements présentés ci-dessus sont détaillées dans les chapitres suivants.

NB : il est important de préciser que les chiffres présentés ci-dessus correspondent à des sources documentaires parfois anciennes et dans certains cas, à des extrapolations.

Il est également nécessaire d'indiquer que ces gisements ne représentent pas les gisements de déchets caoutchoutiques effectivement récupérables et réellement collectés.

Enfin, compte tenu de leur caractère approximatif, les chiffres présentés dans la Figure 2 sont arrondis par rapport aux chiffres précis obtenus par calcul et présentés dans les chapitres ci-dessous.

II.2.1 DÉCHETS DE FABRICATION

L'étude bibliographique couplée aux entretiens structurants a permis de définir le gisement des déchets de production.

Les données disponibles se répartissent globalement en deux types de sources différentes.

► **DONNÉES DES PROFESSIONNELS ET FÉDÉRATIONS**

Selon le SNCP, le rapport entre la quantité de déchets et la quantité brute de mélange utilisé s'étend de 2 à 30 %, en fonction du type de produit concerné et du procédé utilisé. Sur la base des données de production présentées dans le chapitre II.2 « *Inventaire des gisements* », **le gisement potentiel de déchets de fabrication/production serait donc compris entre 17 500⁹ et 262 500¹⁰ tonnes**. Ces données font figure de données complémentaires aux informations présentées ci-après et ne seront pas réutilisées par la suite.

On constate ainsi une évolution qui suit la tendance générale de l'industrie avec le déploiement des méthodes du « LEAN Manufacturing » (tous secteurs d'activités confondus) : ramenées à leur

⁹ 2% de 875 milliers de tonnes

¹⁰ 30% de 875 milliers de tonnes

production, les industries produisent de moins en moins de déchets lors de la fabrication des différents éléments : en 2003, le SESSI¹¹ indique en effet que le gisement pour la branche caoutchouc industriel est évalué à 13 % de la production. Un entretien avec un acteur majeur de la fabrication de caoutchoucs et élastomères permet d'obtenir une seconde fourchette de l'ordre de 5 % de la production industrielle (hors pneumatique).

Il est à noter que de façon générale, peu de données chiffrées sont disponibles dans la littérature issue des fédérations et associations professionnelles concernant les déchets de production.

► ENQUÊTES INSEE SUR LA PRODUCTION DE DÉCHETS NON DANGEREUX DANS L'INDUSTRIE

Il est possible d'obtenir des informations complémentaires grâce aux données disponibles via l'enquête INSEE sur la production de déchets non dangereux dans l'industrie menée en 2008¹².

Cette enquête (à caractère obligatoire) vise à estimer la production nationale de déchets non dangereux des établissements industriels en 2008, en quantités physiques et avec un détail par type de déchet, par secteur d'activité et par région. Il permet notamment de répondre au Règlement Statistique Européen relatif aux statistiques sur les déchets.

Le détail de la méthodologie adoptée pour cette enquête est présenté en Annexe I « Enquête INSEE 2008 - Méthodologie ».

Cette enquête indique qu'un total de **117 468 tonnes de déchets caoutchoutiques a été déclaré produit en 2008 par 1 241 établissements industriels**. Les données de cette enquête sont réutilisées partiellement dans la suite de l'étude (sélection des données de production de déchets caoutchoutiques de certains secteurs d'activités uniquement).

Les figures ci-dessous présentent la répartition des établissements et des tonnages par type de déchets caoutchoutiques.

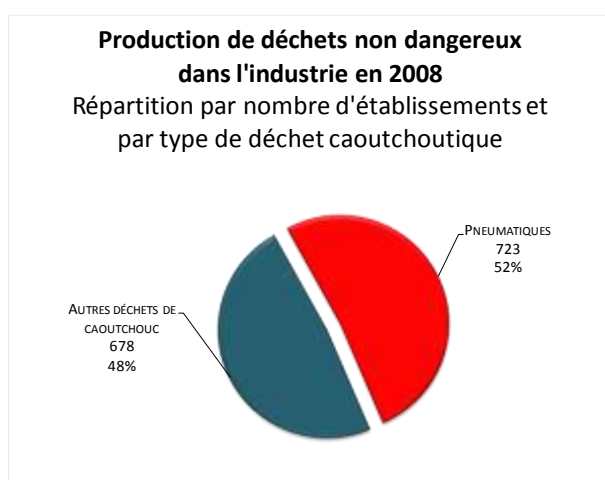


Figure 3 : Enquête INSEE 2008 - Répartition du nombre d'établissements ayant déclaré avoir produit des déchets caoutchoutiques¹³

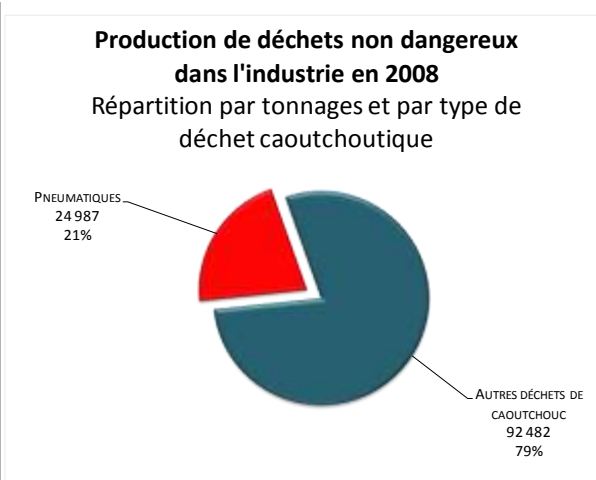


Figure 4 : Répartition des tonnages de déchets caoutchoutiques déclarés produits par type de déchets (en tonnes)¹⁴

Cette enquête présente toutefois la limite de ne pas indiquer avec certitude si les déchets produits sont des déchets de fabrication ou en fin de vie.

Des hypothèses ont toutefois pu être réalisées notamment sur les secteurs d'activités concernés par cette enquête afin d'obtenir des informations complémentaires relatives aux déchets de fabrication.

Les hypothèses de calcul sont présentées ci-dessous.

¹¹ <http://www.insee.fr/sessi/4pages/pdf/4p176.pdf>

¹² http://www.insee.fr/fr/themes/detail.asp?req_id=99&ref_id=dechets

¹³ Source : INSEE

¹⁴ Source : INSEE

II.2.1.1 DÉCHETS DE FABRICATION DE VÉHICULES

II.2.1.1.1 DÉCHETS DE PNEUMATIQUES

Le gisement des déchets de fabrication de pneumatiques est estimé à 55 000 tonnes/an par le Centre Français du Caoutchouc et des Polymères. Ces déchets se décomposent comme suit¹⁵ :

- 48 400 tonnes/an pour la fabrication de pneumatique neuf ;
- 6 600 tonnes/an pour la fabrication de pneumatique rechapé.

La composition matière de 4 types de pneumatique est présentée ci-dessous¹⁶.

Au vu de la composition des différents pneumatiques, les déchets de fabrication de pneumatiques seront essentiellement composés de caoutchoucs IR, NR et de SBR.

Tableau 3 : Composition moyenne d'un pneu de véhicule léger

MATÉRIAU/ÉLÉMENTS	PROPORTION
Caoutchouc (essentiellement mélange de caoutchouc naturel et de butadiène-styrène (SBR))	48%
Noir de carbone	22%
Acier	15%
Textile	5%
Oxyde de zinc	1%
Soufre	1%
Additifs	8%

Tableau 4 : Composition moyenne d'un pneu poids lourds

MATÉRIAU/ÉLÉMENTS	PROPORTION
Caoutchouc naturel	30%
Caoutchouc de synthèse	5%
Caoutchouc butyle halogéné	4%
Autres produits chimiques (matières auxiliaires, plastifiants, antioxydants, agents de vulcanisation)	37%
Fil de tringle (fil d'acier à revêtement galvanisé)	6%
Tissu de nylon	1%
Câbles métalliques (câbles d'acier à revêtement galvanisé)	17%

Tableau 5 : Composition moyenne d'un pneu d'avion

MATÉRIAU/ÉLÉMENTS	PROPORTION
Caoutchouc (essentiellement NR)	50%
Tissu	40%
Acier	5%

Tableau 6 : Composition moyenne d'un pneu de vélo

MATÉRIAU/ÉLÉMENTS	PROPORTION
Caoutchouc (IR et NR)	40-60%
Matières de remplissage (Noir de carbone, craie, silice)	15-30%
Huiles et graisses, amines aromatiques, soufre, oxyde de zinc, pigments et colorants.	20-35%

La valorisation par rechapage quant à elle est actuellement de moins en moins pratiquée en France, et concerne principalement les pneus de poids lourds, majoritairement composés de caoutchouc naturel.

II.2.1.1.2 DÉCHETS DE VÉHICULES HORS PNEUMATIQUES

À la date de l'étude des gisements et de la collecte, aucune source récente d'informations sur les déchets de production spécifiques à l'industrie automobile en France n'a été identifiée.

Néanmoins, sur la base des informations communiquées par un acteur majeur de la fabrication de caoutchoucs et d'élastomères, et en estimant à 5 % le poids total des déchets de production, on obtient un poids de déchets de production pour les éléments des véhicules hors pneumatique de l'ordre de **6 000 tonnes**¹⁷.

¹⁵ http://www.cd2e.com/sections/fr/bourse/liste_des_dechets/fiches_dechets/pneumatiques_caoutch/

¹⁶ Source : Aliapur

¹⁷ « Chaque année, environ 120 à 130 000 tonnes de mélanges de caoutchoucs sont utilisés pour la fabrication de pièces type pièce auto (exemple : support moteur, tuyaux, joints extérieurs, courroies, et joints moulés pour des applications « moteur ») ».

Ces 6 000 tonnes pourraient être recoupées avec l'ordre de grandeur des tonnages de déchets de production de l'industrie automobile estimés via les données issues de l'enquête INSEE 2008 (total des tonnages de déchets caoutchoutiques déclaré à l'INSEE par les établissements industriels : 117 468 tonnes).

Il existe toutefois une limite du fait de la présence de données non communicables en raison des règles de secret statistique¹⁸ : les données détaillées relatives aux quantités produites par les industries automobiles sont ainsi indisponibles. Les autres secteurs dont les données détaillées sont indisponibles sont les secteurs « **Pharmacie, parfumerie et entretien** » et « **Production de combustibles et de carburants** ».

En prenant l'hypothèse que les tonnages de déchets caoutchoutiques issus des secteurs d'activités « Pharmacie, parfumerie et entretien » et « Production de combustibles et de carburants » sont négligeables, les **déchets de caoutchoucs produits par les établissements de l'industrie automobile peuvent être évalués à environ 3 668 tonnes**¹⁹.

Cet ordre de grandeur (3 668 tonnes) ne semble pas correspondre à l'ordre de grandeur des tonnages totaux de déchets caoutchoutiques liés à la fabrication de pièces destinées aux véhicules estimés sur la base des données obtenues au cours d'un entretien réalisé avec un acteur majeur de la fabrication de caoutchoucs et d'élastomères (6 000 tonnes).

Cet écart pourrait notamment s'expliquer par la répartition des établissements enquêtés par l'INSEE dans certaines catégories d'activités : certains acteurs procédant à de la fabrication de pneumatiques et autres pièces caoutchoutiques de véhicules n'apparaissent peut-être pas sous le secteur d'activité « Industries automobiles » mais peuvent par exemple être comptabilisés dans le secteur « Chimie, caoutchouc, plastiques ».

II.2.1.2 DÉCHETS DE FABRICATION HORS VÉHICULES

Le gisement des déchets de fabrication issus de la fabrication de caoutchouc industriel est estimé en 2005 à 55 000 tonnes par an²⁰, auxquelles doivent être retirés les tonnages estimés de déchets de fabrication de pièces de véhicules hors pneumatiques, soit des tonnages allant de 3 668²¹ à 6 000. Les estimations de gisements déchets de fabrication hors véhicules sont donc probablement comprises entre 49 000²² et 51 332²³ tonnes par an.

Il est possible de recouper ces informations avec les données issues de l'enquête INSEE 2008.

¹⁸ Source INSEE : « Ces règles interdisent [...] la publication de données qui permettraient une identification indirecte des répondants et de leur réponse, concept appelé « impossibilité d'identification ». [...] »

Pour les entreprises, on ne publie aucun résultat qui concerne moins de trois entreprises, ni aucune donnée pour laquelle une seule entreprise représente 85% ou plus de la valeur obtenue. Cependant, il est admis que la diffusion de listes extraites du répertoire des entreprises ou des établissements peut mentionner l'activité économique, une classe d'effectifs et une tranche de chiffres d'affaires ».

¹⁹ Total des tonnages de déchets caoutchoutiques déclaré à l'INSEE en 2008 - Totalité des tonnages de tous les secteurs d'activité hors Industrie Automobile = Tonnages des déchets caoutchoutiques produits par l'Industrie Automobile + Tonnages des déchets produits par les autres secteurs dont les données sont soumises au secret statistique (« Pharmacie, parfumerie, entretien » et « Production de combustibles et de carburants »).

L'hypothèse effectuée est : Total des tonnages de déchets caoutchoutiques déclaré à l'INSEE en 2008 (117 468 tonnes) - Totalité des tonnages de tous les secteurs d'activité hors Industrie Automobile (113 800 tonnes) ≈ Tonnages des déchets caoutchoutiques produits par l'Industrie Automobile (3 668 tonnes)

²⁰ http://www.cd2e.com/sections/fr/bourse/liste_des_dechets/fiches_dechets/pneumatiques_caoutch/

²¹ Dans le cas où la totalité des tonnages estimés produits par les établissements du secteur « Industries Automobiles » via les données de l'enquête INSEE 2008 correspondrait à des déchets de véhicules hors pneumatiques

²² 55 000 - 6 000

²³ 55 000 - 3 668

En effet, dans la mesure où les informations relatives aux nombres d'établissements et aux tonnages de déchets produits sont ventilées par catégories d'activités²⁴, il est envisageable d'extraire uniquement les informations relatives aux **secteurs d'activités correspondant à des établissements procédant de manière probable à de la fabrication ou manufacture de produits caoutchoutiques** et dont les déchets peuvent être a priori considérés comme des déchets de fabrication.

Ces secteurs d'activité sont au nombre de cinq :

- Construction navale, aéronautique et ferroviaire ;
- Industrie des équipements mécaniques ;
- Industries des équipements électriques et électroniques ;
- Chimie, caoutchouc, plastiques ;
- Industrie des composants électriques et électroniques.

Le tableau ci-dessous présente la répartition par secteur d'activité du nombre d'établissements industriels et les quantités produites de déchets caoutchoutiques associées :

Tableau 7 : Enquête INSEE 2008 - Répartition du nombre d'établissements et des tonnages par secteurs d'activités

SECTEUR D'ACTIVITÉ	NOMBRE D'ÉTABLISSEMENTS	%	QUANTITÉS PRODUITES (EN TONNES)	%
INDUSTRIE AGRICOLE ET ALIMENTAIRE	202	16,3%	1 093	0,9%
HABILLEMENT, CUIR	30	2,5%	2 325	2,0%
EDITION, IMPRIMERIE, REPRODUCTION	4	0,3%	502	0,4%
PHARMACIE, PARFUMERIE ET ENTRETIEN	Secret statistique	-	Secret statistique	-
INDUSTRIE DES ÉQUIPEMENTS DU FOYER	39	3,1%	2 470	2,1%
INDUSTRIE AUTOMOBILE	37	3,0%	Secret statistique	-
CONSTRUCTION NAVALE, AÉRONAUTIQUE ET FERROVIAIRE	21	1,7%	89	0,1%
INDUSTRIE DES ÉQUIPEMENTS MÉCANIQUES	223	17,9%	910	0,8%
INDUSTRIES DES ÉQUIPEMENTS ÉLECTRIQUES ET ÉLECTRONIQUES	25	2,0%	124	0,1%
INDUSTRIE DES PRODUITS MINÉRAUX	284	22,9%	2 829	2,4%
INDUSTRIE TEXTILE	28	2,3%	378	0,3%
INDUSTRIE DU BOIS ET DU PAPIER	70	5,6%	151	0,1%
CHIMIE, CAOUTCHOUC, PLASTIQUES	200	16,1%	100 317	85,4%
MÉTALLURGIE ET TRANSFORMATION DE MÉTAUX	57	4,6%	2 018	1,7%
INDUSTRIE DES COMPOSANTS ÉLECTRIQUES ET ÉLECTRONIQUES	18	1,5%	596	0,5%
PRODUCTION DE COMBUSTIBLES ET DE CARBURANTS	Secret statistique	-	Secret statistique	-

En sélectionnant uniquement les cinq secteurs d'activité listés ci-avant, on obtient un total de **102 035 tonnes de déchets caoutchoutiques, soit près de 87 % du total déclaré à l'INSEE²⁵**.

Les caractéristiques des caoutchoucs utilisés par d'autres industries que l'industrie automobile sont très variées, ce qui rend les gisements difficilement exploitables.

²⁴ Cette ventilation n'est pas effectuée par région ou par taille d'établissements.

²⁵ Plus de 85 % du total des tonnages déclarés correspondent à des établissements du secteur « Chimie, caoutchouc, plastiques »

II.2.1.3 RÉPARTITION GÉOGRAPHIQUE ET PAR SECTEUR D'ACTIVITÉS DES GISEMENTS

Les données obtenues via les entretiens structurants et dans la documentation publiée par les professionnels et fédérations ne permettent pas d'établir une répartition claire des gisements de déchets notamment par zone géographique.

Cette analyse peut toutefois être menée grâce aux données INSEE. En effet, bien que les données INSEE ne soient pas accessibles avec une ventilation par secteur d'activité et par région, ou par secteur d'activité et par taille d'établissements, une analyse globale des données **par tranches d'effectif et par région** peut être pertinente dans la mesure où les cinq secteurs sélectionnés représentent une part largement majoritaire des données INSEE (près de 90 % du total déclaré).

La figure ci-contre représente la répartition par nombre et par taille d'établissements, des établissements producteurs de déchets caoutchoutiques.

Cette approche permet ainsi d'obtenir une vision globale des caractéristiques et de la répartition des établissements et des gisements potentiels de déchets caoutchoutiques en France.

En termes de répartition par nombre et par taille d'établissements, il apparaît un nombre majoritaire d'établissements de moins de 100 salariés parmi les producteurs de déchets caoutchoutiques.

Cette répartition n'est toutefois pas vérifiée au niveau des tonnages de déchets produits.

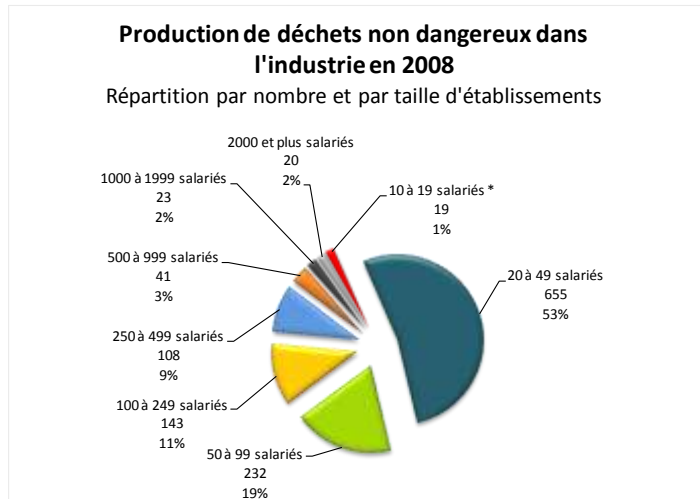


Figure 5 : Enquête INSEE 2008 - Répartition par nombre et par taille d'établissements producteurs de déchets caoutchoutiques²⁶

La figure ci-contre représente la répartition par tonnages et par taille d'établissements des établissements producteurs de déchets caoutchoutiques.

En effet, les établissements de moins de 100 salariés représentent moins de 12 % de la totalité des tonnages de déchets caoutchoutiques déclarés produits en 2008 alors qu'ils représentent près de 85 % du nombre d'établissements.

Quant aux établissements de plus de 500 salariés qui représentent moins de 7 % du nombre total d'établissements ayant déclaré avoir produits des déchets caoutchoutiques, ils déclarent 79 238 tonnes de déchets caoutchoutiques produits en 2008, soit près de 67 % du tonnage total déclaré.

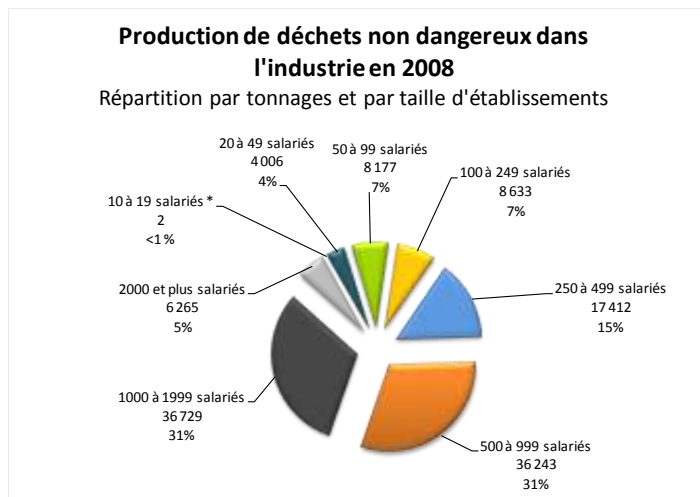


Figure 6 : Enquête INSEE 2008 - Répartition par tonnages et par taille d'établissements producteurs de déchets caoutchoutiques²⁷

²⁶ * Seuls les établissements de l'industrie agro-alimentaires figurent dans la catégorie « 10 à 19 salariés »

²⁷ * Seuls les établissements de l'industrie agro-alimentaires figurent dans la catégorie « 10 à 19 salariés ».

En termes de répartition régionale, comme l'illustre la Figure 7 ci-contre, la majorité des établissements ayant déclaré avoir produit des déchets caoutchoutiques se concentre dans les régions Rhône-Alpes, Pays-de-la-Loire et dans une moindre mesure, dans le Limousin.

De la même manière que pour la répartition par tranches d'effectif, la corrélation entre le nombre d'établissements et les tonnages produits par région n'est pas établie.



Figure 7 : Enquête INSEE 2008 - Répartition par région des établissements producteurs de déchets caoutchoutiques ²⁸

La figure ci-contre représente la répartition par région des tonnages de déchets caoutchoutiques déclarés produits par les établissements industriels en 2008.

Il apparaît que la majorité des tonnages de déchets caoutchoutiques sont produits dans les régions Auvergne, Bretagne et Champagne-Ardenne.

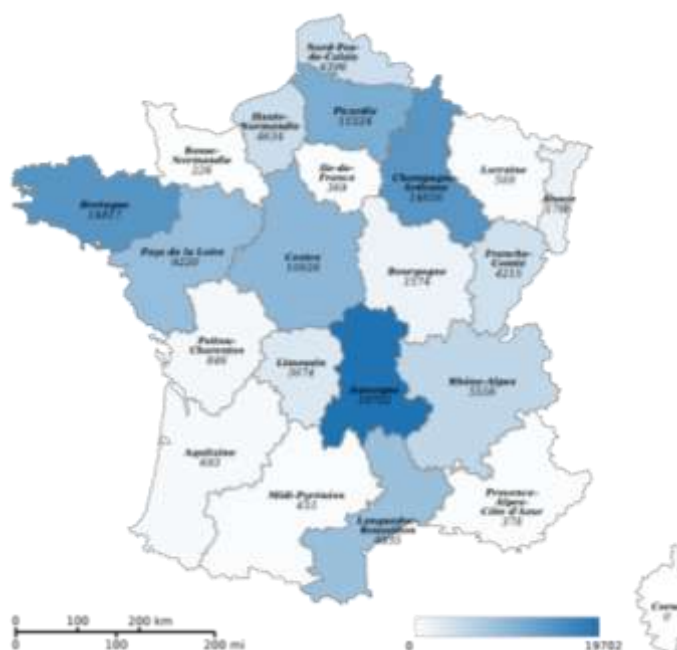


Figure 8 : Enquête INSEE 2008 - Répartition par région des tonnages de déchets caoutchoutiques produits par les établissements industriels ²⁹

²⁸ Les établissements de la Corse ont été comptabilisés avec les établissements de la région Provence-Alpes-Côte d'Azur

²⁹ Les établissements de la Corse ont été comptabilisés avec les établissements de la région Provence-Alpes-Côte d'Azur

II.2.2 DÉCHETS EN FIN DE VIE

II.2.2.1 DÉCHETS EN FIN DE VIE DE VÉHICULES

Le secteur des transports est le producteur principal des déchets caoutchoutiques, en particulier en raison des déchets de pneumatiques.

II.2.2.1.1 DÉCHETS DE PNEUMATIQUES

L'Observatoire des pneus usagés mis en place par l'ADEME en 2004 permet d'obtenir une vision assez précise du gisement de caoutchouc représenté par les pneus³⁰ :

Tableau 8 : Répartition des tonnages de pneumatiques mis sur le marché national et des tonnages déclarés éliminés par les producteurs en 2009

	TOTAL MIS SUR LE MARCHÉ NATIONAL	%	TOTAL DÉCLARÉ ÉLIMINÉ PAR LES PRODUCTEURS	%
POIDS COMPRIS ENTRE 3 ET 15 KG (VL)	253 478	71%	280 676	72%
POIDS COMPRIS ENTRE 15 ET 60 KG (PL)	71 251	20%	76 926	20%
POIDS COMPRIS ENTRE 60 ET 200 KG (AGRI-C1)	21 069	6%	18 272	5%
POIDS SUPÉRIEUR À 200 KG	9 831	3%	10 294	3%
POIDS INFÉRIEUR À 3 KG	2 786	1%	1 622	0%
TOUTES TRANCHES DE POIDS (AVIONS, HÉLICOPTÈRES) (AV)	812	0%	1 583	0%
TOTAL	359 227	100%	389 373	100%

La composition des déchets de pneumatiques en fin de vie est a priori similaire à celle des pneumatiques neufs (cf. chapitre II.2.1.1 « *Déchets de fabrication de véhicules* ») dans la mesure où les pneumatiques sont des déchets caoutchoutiques dont les risques de pollution, notamment par des fluides dangereux et/ou corrosifs (exemple : huiles moteur) sont moindres par rapport aux autres pièces caoutchoutiques d'un véhicule.

II.2.2.1.2 DÉCHETS DE VÉHICULES HORS PNEUMATIQUES

► CAS DES VOITURES

Les pièces en caoutchouc représentent en moyenne sur un véhicule de 7 CV un poids de 70 kg, dont la moitié environ pour les pneumatiques, et représentent environ 5 % du poids total du véhicule³¹.

Les types de caoutchouc présents sur un véhicule sont variés ce qui en rend la valorisation délicate : il s'agit pour l'essentiel de pièces de petites dimensions, produites en caoutchouc ou associés à d'autres matériaux (métal, plastique, tissu, etc.). On peut citer notamment les pièces d'étanchéité de la carrosserie (joints de vitrage, lécheurs et coulisses de vitre, joints de porte et de coffre), les balais d'essuie-glaces, les pièces moteur (courroies, soufflets, raccords, joints, supports antivibratoires, etc.), ainsi que les pièces présentes dans l'habitacle (tapis de sol, manchons de boîtes à vitesse, airbag, etc.) ou encore les pièces liées au système de freinage et de liaison au sol³².

► EXTRAPOLATION

L'entretien mené avec un acteur majeur de la fabrication de caoutchoucs et d'élastomères a permis de déterminer que l'ordre de grandeur des quantités de caoutchouc utilisées pour la fabrication de pièces automobiles hors pneumatiques est de 120 000 à 130 000 tonnes.

Cette information peut être recoupée avec les données issues du SNCP indiquant une répartition pour moitié entre le poids du caoutchouc dans les pneumatiques et le poids du caoutchouc dans le reste du véhicule pour une voiture.

³⁰ Source : Rapport annuel 2009 de l'Observatoire des Pneumatiques Usagés de l'ADEME

³¹ Source : SNCP

³² SNCP : Les applications du caoutchouc : http://www.lecaoutchouc.fr/IMG/pdf/Applications_du_caoutchouc.pdf

Considérant que les pneus sont changés dix fois sur la durée de vie d'une voiture³³, le poids de caoutchouc dans une voiture hors pneu correspondrait au dixième du poids des pneumatiques produits chaque année. En extrapolant cette information à tous les types de véhicules routiers (véhicules légers et poids lourds), et en considérant comme négligeable la part du caoutchouc dans les autres types de véhicules, **on obtient une quantité de déchets de véhicules hors pneumatique de l'ordre de 36 000 tonnes par an.**

Il est également possible de comparer les quantités de déchets caoutchoutiques en fin de vie hors pneumatiques obtenues au cours de l'entretien avec un acteur majeur de la fabrication de caoutchoucs et d'élastomères (120-130 000 tonnes) et via extrapolation (36 000 tonnes) aux données issues de l'Observatoire de la filière VHU de l'ADEME.

L'Observatoire VHU indique que 1 100 000 véhicules hors d'usage ont été pris en charge par des acteurs agréés en 2008, soit un **gisement potentiel de 38 500 tonnes de déchets caoutchoutiques hors pneumatiques**³⁴ qui se présentent en mélange dans les résidus de broyage, avec d'autres éléments non métalliques (fraction résiduelle constituée de plastiques, verres, caoutchoucs, minéraux, et considérée comme entrant dans la catégorie des déchets d'activités économiques (DAE) non dangereux (anciennement dénommés déchets industriels banals, DIB).

Le gisement potentiel de résidus de broyage automobile (RBA) pouvant être estimé à partir du poids moyen d'un VHU (1 tonne³⁵), du nombre de VHU pris en charge par des acteurs agréés (1 100 000 en 2008) et de la fraction représentée par les RBA (estimée à environ 25 % en masse³⁶), s'élève à environ 275 000 tonnes. On peut donc estimer que la **fraction caoutchoutique des RBA s'élève à 13-14 % en masse**³⁷.

Ces ordres de grandeurs sont à appréhender avec précaution dans la mesure où d'autres biais peuvent exister, et notamment le fait que les broyeurs de VHU broient aussi et indistinctement, d'autres flux de déchets à dominante métallique (meubles, encombrants, électroménager) : la fraction caoutchoutique se retrouve donc au sein d'un ensemble encore plus complexe de résidus de broyage.

De récentes évolutions réglementaires imposant notamment aux constructeurs de véhicules légers³⁸ de s'organiser eux-mêmes pour récupérer tous les pneus démontés lors du traitement de VHU à hauteur de ce qu'ils ont mis sur le marché, peuvent également faire évoluer la composition de la fraction caoutchoutique des résidus de broyage. En effet, dans la mesure où les RBA peuvent être constitués d'une part de déchets de pneumatiques qui devront désormais être récupérés avant broyage, ces mesures vont vraisemblablement faire diminuer la part caoutchoutique globale des RBA.

Il faut également prendre en compte le fait que les pièces souillées par des produits industriels dangereux (huiles de moteur par exemple) pourraient être considérées comme des déchets dangereux. Le potentiel de récupération de ces caoutchoucs doit donc être envisagé avec prudence.

Peu de chiffres sont actuellement connus pour évaluer précisément, dans ces conditions, le gisement des déchets caoutchoutiques de véhicule hors pneumatique.

II.2.2.2 DÉCHETS EN FIN DE VIE HORS VÉHICULES

Le gisement pour les déchets de fin de vie hors véhicules est plus difficilement identifiable et peu connu. De plus, la composition des caoutchoucs industriels peut varier de manière importante, rendant difficile le tri et la récupération en fin de vie.

Le gisement est donc difficile à estimer et les potentielles voies de valorisation complexes à étudier dans la mesure où ces déchets peuvent être des pièces techniques soumises à d'importantes contraintes physicochimiques, et donc susceptibles d'être fortement polluées.

³³ En prenant l'hypothèse que « durée de vie d'un véhicule » = « durée de vie du moteur » et en fixant cette dernière à 250 000 km et que durée de vie pneumatique = 25 000 km.

³⁴ En prenant l'hypothèse que les VHU pris en charge étaient exclusivement des véhicules légers : 1 100 000 véhicules x 70 kg = 77 000 000 kg de déchets caoutchoutiques, pneumatiques compris.

Hors pneumatiques : 77 000 tonnes / 2 = 38 500 tonnes.

³⁵ Source : ADEME

³⁶ Source : Cahiers Industries du Ministère de l'Économie, des Finances et de l'Industrie (<http://www.industrie.gouv.fr/biblioth/docu/kiosque/cahiers/pdf/c0023.pdf>)

³⁷ $36\ 000 / 275\ 000 = 13\ %$ et $38\ 500 / 275\ 000 = 14\ %$

³⁸ À la date de l'étude, exonérés d'éco-contribution pour les 5 pneus neufs équipant des véhicules neufs.

II.3 FILIÈRES DE COLLECTE

Les déchets caoutchoutiques étant considérés comme des DAE non dangereux, la réglementation concernant ces déchets est peu contraignante. Peu de filières de collecte ont été mises en place, si bien que l'on peut faire la classification suivante pour la collecte de ces déchets :

- **Déchets de pneumatiques** : la collecte des pneumatiques est sujette à une obligation réglementaire. Ainsi, depuis 2002, il est interdit de mettre en centre de stockage des déchets ultimes des pneus usagés. Face à la réglementation, les fabricants de pneumatiques se sont fédérés pour créer un total de sept éco-organismes³⁹, dont ALIAPUR en est le plus important.
- **Déchets de véhicules hors pneumatiques** : ces déchets sont organisés autour d'une filière de récupération. Depuis 2006, les propriétaires de véhicules hors d'usages (VHU) doivent ainsi les remettre à des exploitations agréées, ce qui permet d'en assurer le suivi.
- **Autres déchets** : il n'y a pas de filière organisée pour la collecte des autres déchets. Des opérations de collecte existent toutefois via des initiatives individuelles des acteurs concernés (mobilisation d'un prestataire, gestion en interne, transfert à la collectivité en charge de la collecte des déchets ménagers et assimilés, etc.).

Le schéma ci-dessous illustre la classification qui a été faite :

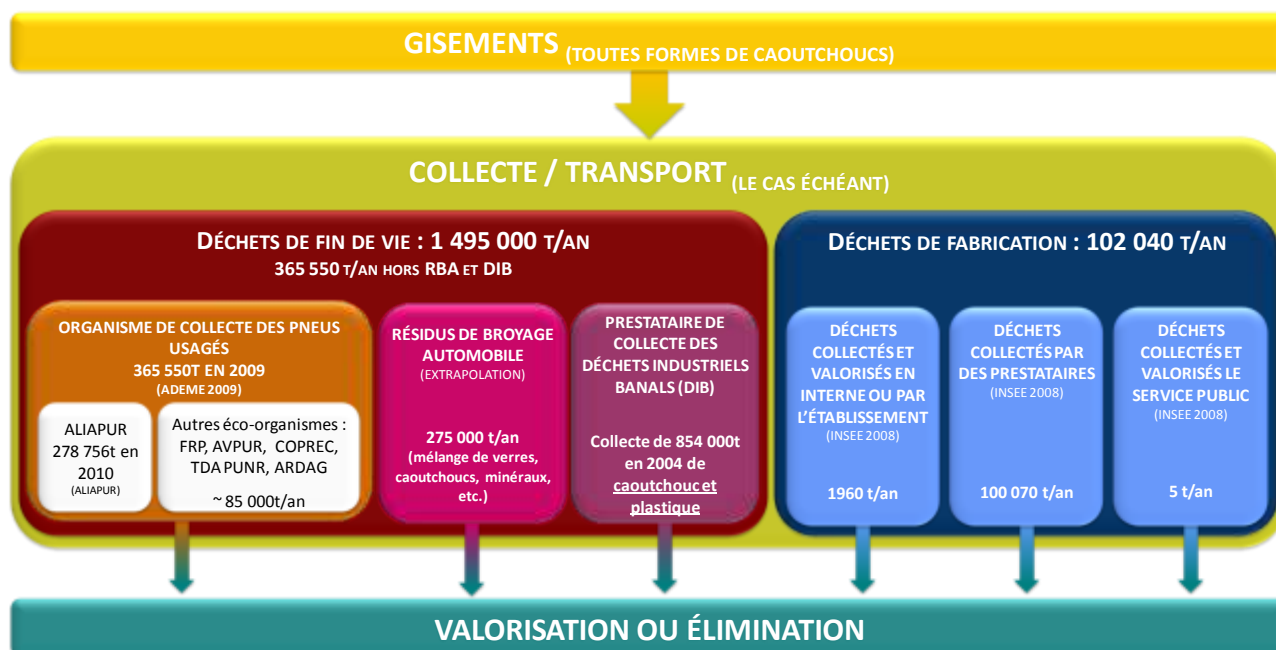


Figure 9 : Organisation des filières de collecte de déchets caoutchoutiques en France

NB : De la même manière que pour la schématisation des gisements, il est important de préciser que les chiffres présentés ci-dessus correspondent à des sources documentaires parfois anciennes et, dans certains cas, à des extrapolations et que les tonnages indiqués ne représentent pas la collecte réelle de déchets caoutchoutiques en France.

Compte tenu de leur caractère approximatif, les chiffres présentés dans la Figure 9 sont arrondis par rapport aux chiffres précis obtenus par calcul et présentés dans les chapitres ci-dessous.

³⁹ Trois en France métropolitaine : ALIAPUR, FRP, COPREC. Quatre dans les DOM : AVPUR, TDA PUNR, ARDAG

II.3.1 DÉCHETS DE FABRICATION

Le cas de la collecte pour les déchets de fabrication est très spécifique. En effet, ces déchets sont concentrés au niveau des sites de production des pièces caoutchoutiques ce qui en rend la collecte par des collecteurs privés plus facilement déployable. Toutefois, principalement pour des raisons de coûts mais également de sécurité, certains de ces déchets sont valorisés en interne.

Différents entretiens et recherches bibliographiques ont permis de faire la distinction entre ces différents cas et de connaître les principaux types de démarches menées pour les déchets de fabrication.

► VALORISATION INTERNE

Certains fabricants de pièces en caoutchouc peuvent décider de valoriser leurs déchets de production en interne. Les raisons invoquées pour ce choix (stratégique) sont liées à une volonté de réduire les coûts (valorisation énergétique participant au procédé de fabrication par exemple), mais également pour des questions de sécurité (limitation du transport des déchets).

Dans ces conditions, il n'est donc pas conduit d'opération de collecte des déchets.

Dans le cas particulier d'un acteur majeur de la fabrication de caoutchoucs et d'élastomères interrogé, il a été décidé de s'intéresser à la valorisation de deux grands types de déchets de fabrication :

- **Les produits dits « gros volumes »** : ces gisements sont essentiellement composés de caoutchoucs relativement peu coûteux⁴⁰ par rapport aux caoutchoucs spéciaux et très spéciaux, et sont en particulier constitués d'EPDM (élastomère). Ces produits représentent environ 60 % des tonnages de pièces en caoutchouc produites par cet acteur.
- **Les caoutchoucs onéreux** : ces caoutchoucs peuvent coûter plus de 15 € / kg⁴¹. Pour ces caoutchoucs, l'acteur interrogé s'intéresse à leur valorisation même à faibles volumes. Ce sont essentiellement des caoutchoucs fluorés, utilisés dans l'environnement moteur (fortes contraintes physiques, chimiques et mécaniques imposant l'utilisation d'un matériau très technique).

Les méthodes de valorisation varient en fonction de ces deux principaux types de déchets de fabrication :

- Pour les installations produisant des déchets issus de la fabrication de « pièces gros volumes », une partie de la valorisation pourrait s'effectuer en interne comme suit : un broyage des déchets de fabrication serait effectué, puis les broyats seraient réincorporés dans les réacteurs.

Les produits issus de ces chaînes de production peuvent présenter de légers défauts d'aspects, mais les joints issus de ces mélanges devront se situer à des endroits non visibles du véhicule ou de l'équipement.

Ces défauts d'aspects sont observés même lorsque de faibles quantités de poudrettes issues du broyage des déchets de fabrication sont introduites dans le mélange réactionnel (1-2 % de la charge totale). Il est a priori nécessaire d'arriver à un taux beaucoup plus important (de l'ordre de 15-20 %) pour observer des contraintes d'ordres mécaniques.

- Dans les usines produisant des déchets de caoutchoucs onéreux, issus de la fabrication de type « petits volumes », ou dans le cas où les produits sont trop diversifiés : un tri à la source est difficilement réalisable, et les déchets devraient être traités directement par l'usine avec une filière propre, essentiellement en valorisation énergétique (vente des déchets caoutchoutiques d'un site à une cimenterie située à proximité par exemple).

⁴⁰ Importantes fluctuations entre 2010 et 2011, avec des prix variant de 1 à 3€ / kg en 2011

⁴¹ Caoutchoucs dits « spéciaux » : polychloroprène (~4.5€), nitrile/nitrile hydrogéné, etc.
Caoutchoucs dits « très spéciaux » : silicone, fluorosilicones polyacrylate etc.

La solution du stockage est parfois choisie dans le cas où il apparaît une impossibilité à valoriser certains déchets de caoutchoucs (par exemple, pour les produits chlorés difficiles à valoriser en cimenterie).

Privilégier une valorisation en interne par rapport à la mise en place d'un système de collecte et de valorisation externe aux sites de production, permet notamment de limiter la mobilité des déchets.

Dans certains cas, les usines peuvent également vendre leurs déchets de fabrication à des broyeurs/granulateurs, qui vont par la suite revendre ces broyats à d'autres sociétés les utilisant par exemple pour des applications de type sols sportifs, semelles pour sols équestres, etc.

► **COLLECTE PRIVÉE**

Dans le cas de certains types de caoutchouc, la collecte est effectuée par des sociétés privées qui achètent les déchets de production des industries caoutchoutiques afin de les valoriser.

Il n'a pas été identifié d'informations disponibles permettant de connaître les tonnages concernés ou les modalités de collecte spécifiques⁴².

► **DONNÉES INSEE 2008 : LIEU ET MODE DE TRAITEMENT DES DÉCHETS CAOUTCHOUTIQUES PRODUITS PAR LES ÉTABLISSEMENTS INDUSTRIELS**

Sur la base des données déclarées à l'INSEE par les établissements produisant des déchets caoutchoutiques, il est possible d'obtenir les principaux modes de traitement par type de déchets caoutchoutiques.

Seules les quantités des secteurs d'activité suivants ont été sélectionnées⁴³ :

- Construction navale, aéronautique et ferroviaire ;
- Industrie des équipements mécaniques ;
- Industries des équipements électriques et électroniques ;
- Chimie, caoutchouc, plastiques ;
- Industrie des composants électriques et électroniques.

Le tableau ci-dessous présente les informations relatives au lieu de traitement des déchets de pneumatiques et d'autres caoutchoucs produits par les établissements industriels des cinq secteurs d'activités précités.

Tableau 9 : Enquête INSEE 2008 - Lieu de traitement des déchets caoutchoutiques produits par les établissements industriels⁴⁴

NOMBRE D'ÉTABLISSEMENTS PRODUISANT CE DÉCHET	QUANTITÉ PRODUITE	LIEU DE TRAITEMENT			
		Sur site	Hors site, collectés par :		
			un prestataire	les services municipaux	l'établissement
-	<i>en tonnes</i>	<i>en tonnes</i>	<i>en tonnes</i>	<i>en tonnes</i>	<i>en tonnes</i>
486	102 035	754	100 072	5	1 204

Il apparaît que la majeure partie des tonnages produits sont collectés par un prestataire (100 072 tonnes, soit 98 % du total produit par les établissements des 5 secteurs d'activités sélectionnés).

En termes de modes de traitement, l'enquête INSEE 2008 permet d'obtenir une vision globale sur les modes de traitement des déchets de pneumatiques et d'autres caoutchoucs produits par les établissements industriels.

Tableau 10 : Enquête INSEE 2008 - Mode de traitement des déchets caoutchoutiques produits par les établissements industriels

NOMBRE	QUANTITÉ	MODE DE TRAITEMENT
--------	----------	--------------------

⁴² Source : SESSI (<http://www.insee.fr/sessi/4pages/pdf/4p176.pdf>)

⁴³ Données des Industries automobiles soumis à secret statistique

⁴⁴ Pas de distinction disponible entre collecte sélective et collecte en mélange

D'ÉTABLISSEMENTS PRODUISANT CE DÉCHET	PRODUITE	Recyclage, valorisation matière, épandage	Valorisation énergétique	Incineration sans valorisation énergétique	Mise en décharge	Centre de tri ou déchèterie
-	<i>en tonnes</i>	<i>en tonnes</i>	<i>en tonnes</i>	<i>en tonnes</i>	<i>en tonnes</i>	<i>en tonnes</i>
486	102 035	50 046	17 860	1 043	31 126	1 961

La distinction entre les déchets de pneumatiques et les déchets hors pneumatiques peut également être étudiée :

Tableau 11 : Enquête INSEE 2008 - Lieu et mode de traitement des déchets caoutchoutiques produits par les établissements industriels - Distinction par type de déchets

	NOMBRE D'ÉTABLI- SEMENTS	QUANTITÉ PRODUITE <i>en tonnes</i>	LIEU DE TRAITEMENT				MODE DE TRAITEMENT				
			sur site <i>en tonnes</i>	hors site, collectés par			recyclage valorisation matière, épandage <i>en tonnes</i>	valorisation énergétique <i>en tonnes</i>	incinération sans valorisation énergétique <i>en tonnes</i>	mise en décharge <i>en tonnes</i>	centre de tri ou déchèterie <i>en tonnes</i>
				un prestataire <i>en tonnes</i>	les services municipaux <i>en tonnes</i>	l'établissement <i>en tonnes</i>					
PNEUMATIQUES	169	23 655	0	22 839	4	812	14 259	8 449	0	814	133
AUTRES DÉCHETS DE CAOUTCHOUS	362	78 380	754	77 233	1	393	35 786	9 411	1 043	30 312	1 828

La répartition en termes de lieu de traitement est globalement identique pour les pneumatiques et pour les autres déchets de caoutchoucs.

En termes de modes de traitement, il apparaît que près de 50 % des tonnages sont recyclés ou font l'objet d'une valorisation matière (pour les pneumatiques et pour les autres déchets de caoutchoucs). On observe toutefois des différences pour la mise en décharge ou l'incinération sans valorisation énergétique.

II.3.2 DÉCHETS EN FIN DE VIE

Les déchets de fin de vie sont par nature plus dispersés que les déchets de fabrication. Les modalités de collecte sont donc particulières et dépendent du type de déchets, comme indiqué dans la typologie présentée ci-après.

II.3.2.1 DÉCHETS EN FIN DE VIE DE VÉHICULES

II.3.2.1.1 DÉCHETS DE PNEUMATIQUES

► LA COLLECTE

Les déchets de pneumatiques sont dispersés sur le territoire, mais la bonne connaissance des lieux de récupération, les tonnages importants et le fort potentiel de valorisation rendent la collecte de ces déchets plutôt aisée.

Le taux de collecte des pneumatiques usagés, toutes catégories confondues, est de 95 % en 2009. Il est inférieur à 100 %, possiblement car les producteurs/détenteurs de pneus peuvent transférer directement leurs pneumatiques à des entreprises d'élimination (entreprises de TP, rechangeurs ou vente d'occasion) sans utiliser la filière de collecte des collecteurs agréés.

Aliapur assure la grande majorité du devenir des pneus usagés en France :

- La collecte auprès de plus de 40 000 détenteurs et distributeurs sur tout le territoire (principalement des points de vente : garages et centres auto) ;
- Le tri sur les sites industriels de 35 collecteurs de pneus usagés ;
- Le regroupement et la préparation à la valorisation (broyage, etc.) sur 13 sites de transformation.



Figure 10 : Lieux de regroupement Aliapur

► DESTINATION DES PNEUMATIQUES APRÈS RAMASSAGE

Environ 64 % des quantités de pneumatiques usagés ramassés en 2009 sont acheminés vers une plateforme de préparation, broyage ou découpage. Ce taux est supérieur à 2008 (61 %). Cette augmentation pourrait s'expliquer par la progression de la filière énergétique, nécessitant une préparation préalable des pneumatiques usagés.

Environ 36 % des quantités ramassées sont acheminées vers des éliminateurs. La filière d'élimination conduit à de la valorisation matière, énergétique, en travaux, à de la réutilisation ou autres (dont l'ensilage). Une faible part (0,5 %) des quantités ramassées est dirigée vers un centre de tri-regroupement, mais la grande majorité des collecteurs effectuent eux-mêmes le tri-regroupement.

En comparant l'évolution entre 2008 et 2009 des filières d'élimination d'après les déclarations des producteurs auprès de l'Observatoire des pneumatiques usagés, les résultats suivants sont observés :

Tableau 12 : Comparaison des filières de valorisation des pneus usagés selon les producteurs entre 2008 et 2009⁴⁵

	2008		2009		VARIATION DES TONNAGES ENTRE 2008 ET 2009
	Tonnages	%	Tonnages	%	
VALORISATION MATIÈRE	119 915	29 %	102 181	26 %	- 15 %
VALORISATION ÉNERGÉTIQUE	122 170	30 %	147 315	38 %	+ 21 %
UTILISATION EN TRAVAUX	100 424	25 %	76 523	20 %	- 24 %
RÉUTILISATION	62 660	15 %	62 022	16 %	- 1 %
AUTRES	3 904	1 %	1 333	<1 %	- 66 %
TOTAL	362 586	100 %	370 491	100 %	- 5 %

La part de valorisation matière diminue notablement entre 2008 et 2009, au profit de la valorisation énergétique. Les filières de valorisation énergétique progressent également aux dépens de la filière d'utilisation en travaux publics et génie civil.

À titre de comparaison, le rapport annuel d'activités 2009 d'Aliapur (représentant près de 75 % des tonnages déclarés éliminés par les producteurs en 2009) indique la répartition suivante :

- 50 % des tonnages en valorisation énergétique ;
- 30 % des tonnages en valorisation matière ;

⁴⁵ Source : ADEME.

- 15,2 % en réutilisation.
- 4,8 % des tonnages en utilisation en TP et génie civil.

D'après les déclarations des producteurs à l'Observatoire présentées dans la figure ci-dessous, une vision globale plus précise des filières d'élimination des pneumatiques usagés (toutes catégories incluses) peut être obtenue.

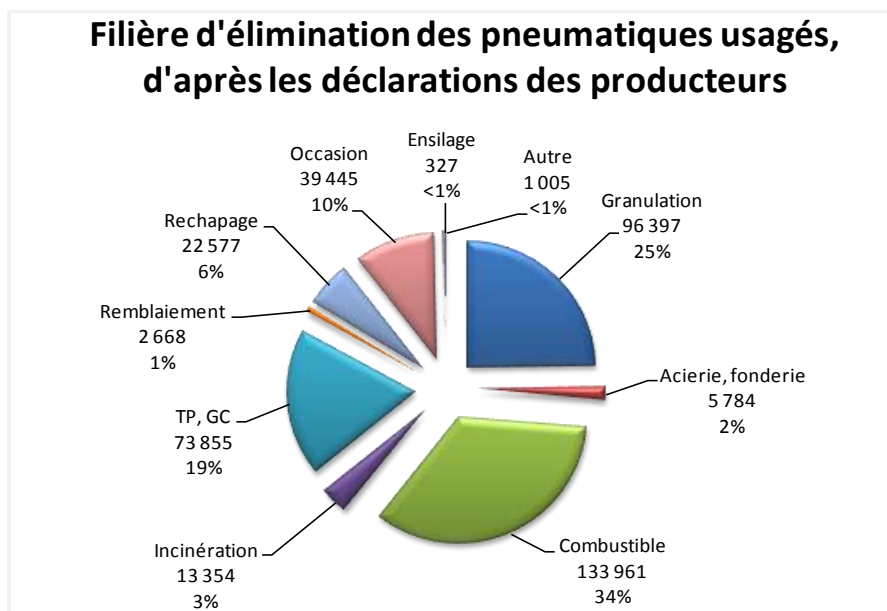


Figure 11 : Filière d'élimination des pneumatiques usagés, d'après les déclarations des producteurs

II.3.2.1.2 DÉCHETS DE VÉHICULES HORS PNEUMATIQUES

Pour ce qui est des déchets de véhicules hors pneumatiques, il apparaît actuellement hors de portée d'en retirer manuellement une grande quantité à l'étape du démantèlement.

Durant l'étape de post-broyage, le développement du sur-tri des résidus de broyage via des techniques de tri automatique (à des fins de recyclage matière ou à des fins de fabrication de combustible solide de récupération) pourrait être envisagé dans certaines conditions.

II.3.2.2 DÉCHETS EN FIN DE VIE HORS VÉHICULES

Ces déchets sont très dispersés et en très petite quantité.

Concernant les déchets en fin de vie autres que les déchets de pneumatiques, un important problème de collecte se pose car les gisements sont très éclatés, et pas uniquement au niveau des casses automobile ou des démolisseurs (profilés de bâtiment, joints de machines à laver, tuyaux de gaz, joints de porte, ascenseur, toutes machines : support, bandes transporteuses, etc.).

De plus, dans l'éventualité où une collecte permettrait de récupérer ces déchets, un problème bloquant lié à la formulation se poserait également : en effet, les compositions étant très variables d'un produit à un autre, un mélange de tous les caoutchoucs en vue d'un recyclage serait très complexe.

II.3.2.3 ORGANISATION GÉOGRAPHIQUE DE LA COLLECTE

Les quantités de pneus ramassés en France durant l'année 2009 sont présentées par département⁴⁶ :

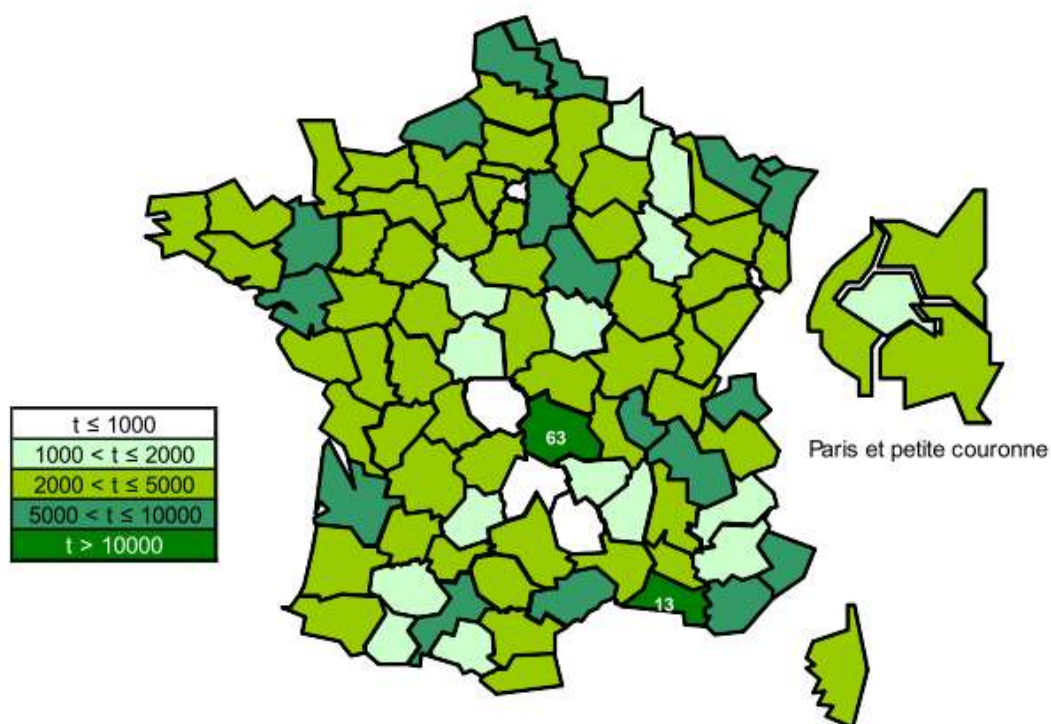


Figure 12 : Répartition géographique des tonnages de pneus usagés ramassés en 2009

Cette carte met en évidence un ramassage homogène sur l'ensemble du pays. La couverture sur la totalité du territoire français est bien assurée.

⁴⁶ ADEME, 2010. Rapport annuel de la mise en œuvre des dispositions réglementaires relatives aux pneumatiques usagés. Situation en 2009.

III. PROCÉDÉS DE VALORISATION

III.1 LES PRINCIPALES VOIES DE VALORISATION DES DÉCHETS CAOUTCHOUTIQUES

Le schéma ci-après représente, d'une part, les principaux types de caoutchoucs existants et, d'autre part, les voies de valorisation potentielle existantes.

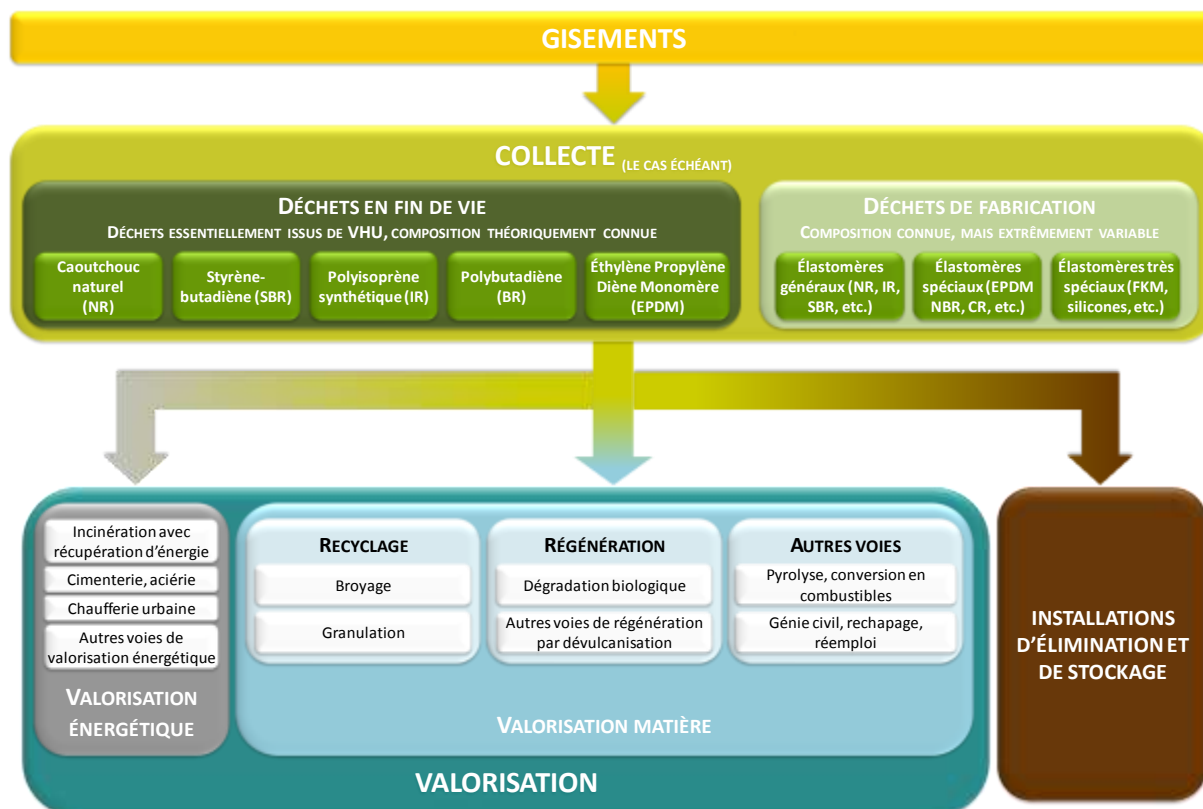


Figure 13 : Schématisation des principaux modes de valorisation des déchets caoutchoutiques

NB : il est important de préciser que l'étude des procédés n'a pas pu être réalisée en fonction du type de caoutchouc, et plus particulièrement dans le cas des déchets caoutchoutiques en fin de vie, dont la composition est complexe à déterminer (contrairement aux déchets de fabrication).

En l'absence d'une classification uniformisée officielle et communément admise des procédés de valorisation matière des caoutchoucs, la classification suivante en trois principaux modes de valorisation matière a été établie :

- **Recyclage** : les techniques de recyclage visent à obtenir une qualité de matière première apte à être utilisée comme charge ou comme constituant majoritaire dans un procédé de fabrication industriel ;
- **Régénération** : les techniques de régénération identifiées visent à la dévulcanisation des caoutchoucs traités. La régénération peut notamment être effectuée par voies chimique et mécano-chimique ;
- **Autres voies** : les autres voies de valorisation identifiées concernent essentiellement les techniques permettant d'obtenir des combustibles à l'issue d'un traitement thermique. Les techniques de rechapage ou de réutilisation sont présentées dans la Figure 13 mais n'ont pas été retenues dans l'étude des procédés de valorisation matière.

Cette classification a été établie sur la base des entretiens et recherches bibliographiques, et peut ne pas faire consensus au sein de l'ensemble des parties prenantes de cette filière.

III.2 ORGANISATION DES ACTEURS DE LA VALORISATION MATIÈRE

Les différents acteurs de la valorisation matière identifiés sont les suivants.

▶ ACTEURS DE LA FILIÈRE AUTOMOBILE (TRAITEMENT DES VHU NOTAMMENT)

Parmi les principales étapes identifiées pour le traitement des VHU et l'extraction, on distingue :

1. **Dépollution des véhicules** (extraction des fluides du véhicule, du pot catalytique et de la batterie notamment).
2. **Extraction des pièces détachées réutilisables pour leur mise en vente ;**
3. **Broyage de la carcasse ;**
4. **Tri des broyats** (par tri optique et par flottation) **et éventuelle récupération des caoutchoucs et plastiques.**

Il est à noter que les déconstructeurs / démolisseurs en charge de ces opérations ne procèdent a priori à aucune étape de recyclage des caoutchoucs (ou mélanges de caoutchoucs et autres plastiques) récupérés et que ces derniers se retrouvent pour l'essentiel broyés avec les carcasses métalliques, puis dirigés en installations de stockage de déchets non dangereux (ISDND) et plus rarement valorisés en cimenterie ou en chaufferie.

▶ BROYEURS / GRANULATEURS

Les principales étapes de valorisation des déchets caoutchoutiques identifiées sont les suivantes :

1. **Tri des déchets caoutchoutiques réceptionnés ;**
2. **Broyage/Granulation ;**
3. **Purification/lavage ;**
4. **Séparation ;**
5. **Conditionnement.**

Les caoutchoucs traités par les granulateurs correspondent en règle générale à des caoutchoucs en fin de vie, et plus spécifiquement à des pneumatiques usagés.

Les granulats et poudrettes issus de ce traitement sont ensuite destinés à diverses applications : sols industriels et sportifs, gazons synthétique, bitumes, pièces isolantes, etc.

▶ FABRICANTS DE CAOUTCHOUCS

La valorisation des caoutchoucs par les fabricants consiste essentiellement en une valorisation des déchets de fabrication (pièces rebutées, pièces prélevées pour contrôles, etc.) via broyage puis réincorporation sous forme de poudrettes dans les mélanges réactionnels, ou par une valorisation énergétique auprès de cimentiers par exemple. L'étape de broyage peut être réalisée en interne ou via un prestataire externe.

▶ ÉTABLISSEMENTS SPÉCIALISÉS DANS LA VALORISATION DES CAOUTCHOUCS

Quelques acteurs spécialisés dans la valorisation de caoutchoucs uniquement ont été identifiés en France. Ces derniers utilisent principalement des techniques de broyage spécifiques dédiés aux caoutchoucs.

Des acteurs spécialisés dans la valorisation des caoutchoucs mettant en place d'autres techniques de valorisation (procédés biologiques, dévulcanisation mécano-chimique, etc.) ont également été identifiés en France mais surtout à l'étranger.

III.3 FICHES PROCÉDÉS

Toute action de valorisation matière fait appel à une succession d'opérations fondamentales intrinsèquement distinctes et indépendantes du procédé en lui-même : les opérations unitaires. Les procédés sont définis comme une succession d'opérations unitaires.

L'étude de chaque procédé identifié présente une arborescence propre à chaque technique.

Ces fiches présentent toutefois une structure globale permettant de distinguer :

- La collecte, le transport et le conditionnement de la matière ;
- La préparation / transformation de la matière ;
- La séparation et la purification de la matière.

Les fiches procédés réalisées sont les suivantes :

- Fiches Broyages :
 - Fiche Broyage / Granulation (chapitre III.3.1.1, page 30) ;
 - Fiche Cryobroyage (chapitre III.3.1.2, page 36) ;
- Fiches Régénération :
 - Présentation générale (chapitre III.3.2.1, page 42) ;
 - Fiche procédé mécano-chimique (chapitre III.3.2.2, page 44)
 - Fiche procédés biologiques (chapitre III.3.2.3, page 47) ;
 - Fiche valorisation en milieux supercritiques (chapitre III.3.2.4, page 51) ;
- Fiche Pyrolyse (chapitre III.3.3, page 54) ;
- Autres procédés :
 - Métactivation (chapitre III.3.4.1, page 59) ;
 - Techniques spécifiques de tri (chapitre III.3.4.2, page 61)
 - Solvolysé (chapitre III.3.4.3, page 61).

Un rappel de quelques définitions élémentaires de termes courants de la chimie des polymères apparaissant au sein des fiches procédés est situé en chapitre VI « Glossaire ».


III.3.1 FICHES BROYAGES

III.3.1.1 FICHE BROYAGE / GRANULATION

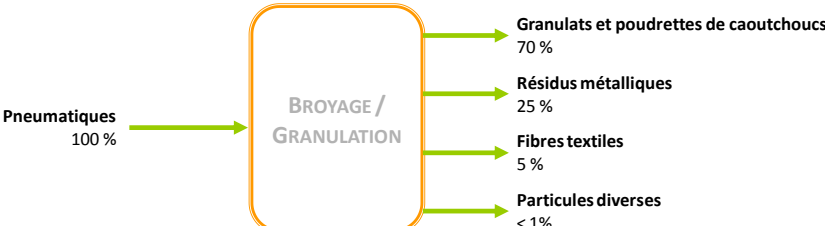
► SYNTHÈSE

DÉNOMINATION DU PROCÉDÉ		Broyage – Granulation
TYPE DE TRAITEMENT		Mécanique
EN QUOI CONSISTE LE PROCÉDÉ		<p>Le broyage est une opération ayant pour objectif de diviser un solide, afin d'en augmenter sa surface spécifique⁴⁷ et donc sa réactivité.</p> <p>Ce type de traitement peut être réalisé à température ambiante, mais peut également être assisté thermiquement.</p> <p>La granulation désigne les techniques visant à produire des granulats, assemblage hétérogène de particules multiples.</p>
COMMERCIALISATION	ENTREPRISES COMMERCIALISANT LE PROCÉDÉ	<p>Entre autres, le procédé est appliqué par les acteurs suivants :</p> <ul style="list-style-type: none"> ▪ Tyres Herco SA, www.herco.gr (Grèce) ▪ J Allcock and Sons, www.allcocks.co.uk (Angleterre) ▪ Deutsche Gumtec AG, http://www.gum-tec.de (Allemagne) ▪ Delta Gom, www.delta-gom.com (France) ▪ ROLL GOM, http://www.roll-gom.com/fr (France) ▪ REGENE (Sita), www.sita.fr/regene (France) ▪ EL DAN Recycling, http://www.eldan-recycling.com (Inde)
	NOMBRE D'UNITÉS	<p>► <u>TYRES HERCO SA</u></p> <ul style="list-style-type: none"> ▪ Nombre d'unités : 1 (capacité de traitement de 20 000 tonnes de pneumatiques par an, produisant environ 13 000 tonnes de granulats et poudrettes) ▪ Localisation : Grèce ▪ Date de mise en route : 2006 <p>► <u>J. ALLCOCK AND SONS</u></p> <ul style="list-style-type: none"> ▪ Nombre d'unités : 1, (capacité annuelle de traitement de caoutchoucs standards non connue précisément, de l'ordre de quelques dizaines de milliers de tonnes par an. Capacité de traitement de caoutchoucs spéciaux et très spéciaux : 50 tonnes de FKM, et moins d'une tonne de FFKM) ▪ Localisation : Royaume-Uni ▪ Date de création de l'entreprise : 1924. J. Allcock & Sons a racheté en 1999 la société Wellington Rubber Company, valorisant les déchets caoutchoutiques depuis les années 1960. <p>► <u>DEUTSCHE GUMTEC AG</u></p> <ul style="list-style-type: none"> ▪ Nombre d'unités : 1 (capacité de traitement de 100 à 150 kg de déchets caoutchoutiques par heure) ▪ Localisation : Allemagne ▪ Date de mise en route : 2000 <p>► <u>DELTA GOM</u></p> <ul style="list-style-type: none"> ▪ Nombre d'unités : 1 (capacité de traitement de 9 000 tonnes par an) ▪ Localisation : France ▪ Date de mise en route : 2000 <p>► <u>ROLL GOM</u></p> <ul style="list-style-type: none"> ▪ Nombre d'unités : 1 (capacité de traitement de l'ordre de 30 000 tonnes de pneumatiques par an) ▪ Localisation : France ▪ Date de mise en route : 1985

⁴⁷ La surface spécifique est une mesure appliquée aux solides granulaires ou particulaires. C'est la surface par unité de masse. La mesure est importante parce que de nombreux processus physiques et chimiques se déroulent à la surface des solides

	<ul style="list-style-type: none"> ▶ REGENE (SUD) <ul style="list-style-type: none"> ▪ Nombre d'unités : 2 (40 000 tonnes de produits finis par an pour les deux installations) ▪ Localisation : France ▪ Date de mise en route : 2003 et 2007 ▶ ELDAN RECYCLING <ul style="list-style-type: none"> ▪ Nombre d'unités : 1 (jusqu'à 5 tonnes de pneumatiques par heure) ▪ Localisation : Inde ▪ Date de mise en route : 2012
ZONES GÉOGRAPHIQUES OÙ LE PROCÉDÉ EST APPLIQUÉ	Monde entier
ÉTAT DE DÉVELOPPEMENT	 <p>Technologie mature et standardisée, employée à l'échelle industrielle pour traiter de gros volumes de déchets caoutchoutiques.</p>
ÉVOLUTIONS ENVISAGÉES	<p>Le broyage / granulation va vraisemblablement garder sa position dominante entre les technologies de valorisation matière dans les prochaines années grâce à ses coûts d'investissements et coûts de fonctionnement relativement bas comparativement aux autres techniques.</p> <p>En fonction de l'évolution du contexte économique et du prix des matières premières, il est toutefois vraisemblable que le broyage et la granulation puissent perdre des parts de marché au profit de technologies émergentes à plus haute valeur ajoutée comme le cryobroyage ou la pyrolyse (sous réserve que ces dernières présentent une adéquation entre les intérêts économiques et techniques).</p>
FREINS	Les principales limites des techniques de broyage / granulation résident dans le fait que les coûts des équipements augmentent de manière très importante pour atteindre des granulométries de plus en plus fines.

▶ **BILAN MATIÈRE**

	
FLUX ENTRANTS	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Type(s) de caoutchouc(s) : tout type de caoutchoucs (et plus généralement, tout type de matériaux élastomères et de plastiques) ▪ Format et taille : les déchets à traiter sont broyés de plus en plus finement. En fonction des entreprises utilisant de telles techniques, le format et la taille des déchets caoutchoutiques à traiter peuvent varier du pneumatique usagé entier, aux déchets pré-broyés en granulés grossiers (un à plusieurs centimètres), en passant par des « chips » de caoutchoucs de plusieurs centimètres. ▪ Critères d'exclusion : en fonction des débouchés souhaités par chaque industriel, des critères d'exclusion peuvent être nécessaires. Par exemple la nécessité d'avoir des caoutchoucs exempts de métaux et textiles, ou encore le refus des caoutchoucs halogénés. Ces critères peuvent être fixés par les spécifications des produits sortants (exemple des granulats très purs « Green-Gom » produits par Delta-Gom, et devant être exempts de polluants ou du produit « Horse-Gom » devant être exempts de métaux). Ces critères peuvent également avoir pour origine la nature des déchets entrants : un industriel traitant essentiellement des pneumatiques ne traitera pas de caoutchoucs halogénés dans la mesure où les pneumatiques n'en contiennent pas.

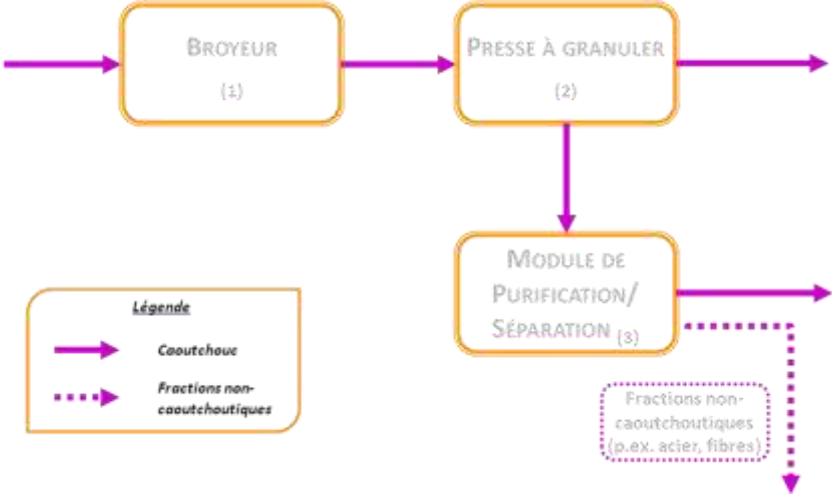
	GISEMENT(S) CONCERNÉ(S)	<p>Une large variété de déchets caoutchoutiques peut être valorisée par le broyage et la granulation.</p> <p>Les principaux gisements de déchets traités par les technologies utilisées en Europe sont constitués de déchets en fin de vie et plus précisément de pneumatiques usagés.</p> <p>En fonction du tissu économique local, des déchets de fabrication vierges issus de producteurs locaux de caoutchouc peuvent être traités.</p>
	PROVENANCE	France et tout pays de l'Union Européenne, Amérique du Nord.
FLUX SORTANTS	CARACTÉRISTIQUES PHYSICO-CHIMIQUES	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Format : les caoutchoucs traités par broyage / granulation sont restitués sous forme de poudrettes ou de granulés. ▪ Taille : la granulométrie des poudrettes et granulés est extrêmement variable, et s'étend de 100 à plusieurs millimètres voire centimètres. ▪ État de réticulation : les poudrettes et granulés en sortie de procédé sont en règle générale constitués de caoutchouc vulcanisé. <p>Il existe toutefois des techniques spécifiques de broyage permettant une dévulcanisation partielle des déchets caoutchoutiques.</p>
	DÉBOUCHÉS / APPLICATION DES DÉCHETS VALORISÉS	<p>Selon les industriels interrogés, il existerait deux voies principales en termes d'application des déchets valorisés par le broyage / granulation :</p> <ul style="list-style-type: none"> ▪ Ré-intégration des poudrettes comme substituts dans des composites plastiques, ou pour la production de caoutchouc vierge. <p>En fonction de la qualité de la poudrette, la proportion incorporée à de la matière vierge peut varier de quelques pourcents à 15-20 %.</p> <ul style="list-style-type: none"> ▪ Manufacture de pièces moulées. Il s'agit principalement de produits pour l'agriculture, le sport (sols sportifs), l'industrie automobile (colmatages, etc.), les travaux publics (dos-d'âne, etc.).
	DÉCHETS NON VALORISÉS PAR LE PROCÉDÉ	<p>Aucun. La totalité des déchets peut être traitée par broyage / granulation.</p> <p>Les débouchés ne seront toutefois pas les mêmes en fonction de la qualité des déchets traités : en effet, des déchets présentant des granulométries irrégulières et/ou des impuretés ne pourront être utilisés après valorisation dans des applications à fort potentiel technique.</p>

► COLLECTE, TRANSPORT, CONDITIONNEMENT

PRINCIPE / DESCRIPTION GÉNÉRALE	<p>La gestion de la collecte dépend des déchets traités.</p> <p>Pour les déchets de pneumatiques, la collecte est normalement organisée et financée par les éco-organismes des pneumatiques.</p> <p>Pour les déchets industriels, la collecte est coordonnée localement par le producteur industriel/générateur des déchets et le recycleur.</p> <p>Pour les déchets de pneumatiques en particulier, des phases de démontage du pneu peuvent être nécessaires afin de séparer le caoutchouc des pièces métalliques et textiles. Cette étape peut être directement prise en charge par les installations de broyage / granulation.</p>
ÉQUIPEMENTS REQUIS	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Camions ▪ Containers ▪ Sacs <p>Ces équipements sont similaires à ceux pouvant être utilisés pour les étapes de collecte, transport et conditionnement de déchets traités par cryobroyage.</p> <p>En termes de transport, pour des poudrettes caoutchoutiques de granulométrie inférieure à 1 mm, et contenant environ 20 % de fibres textiles, la masse volumique apparente de ces poudrettes est de l'ordre de 180 kg/m³.</p>

► PRÉPARATION / TRANSFORMATION DE LA MATIÈRE

PRINCIPE / DESCRIPTION GÉNÉRALE	<p>Les déchets caoutchoutiques sont tout d'abord découpés mécaniquement en pièces de 50 à 150 mm (dites « chips »).</p> <p>S'ensuit l'étape de granulation des chips, dans une presse à granuler, pour obtenir des poudrettes/granulés dont le calibre variera de 0,1 à 20 mm environ, en fonction des spécifications requises.</p>
--	---

	<p>Les procédés visant à obtenir des granulés et ceux visant à obtenir de la poudre de caoutchouc sont globalement similaires. Ils diffèrent par le nombre de broyeurs et/ou micronisateurs installés en chaîne.</p> <p>Le nombre d'étapes supplémentaires varie de manière importante en fonction de l'industriel utilisant ce type de technologie.</p> <p>Le broyage / granulation est réalisé en règle générale à température ambiante. Il peut toutefois être assisté thermiquement (cryobroyage).</p>
<p>SCHÉMATISATION, ILLUSTRATION DES OPÉRATIONS</p>	
<p>ÉQUIPEMENTS REQUIS</p>	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Broyeur(s) ▪ Presse à granuler ▪ Module de purification/séparation (dans le cas où les déchets contiennent différentes fractions de matériaux) <p>Les broyeurs utilisés sont principalement à couteaux.</p> <p>Les principaux équipementiers cités par les acteurs interrogés sont Pallmann (www.pallmann.eu), Amandus Kahl (www.amandus-kahl-group.de) et Phénix Industries (www.phenix-industries.com).</p>
<p>PERFORMANCE / RENDEMENT MATIÈRE</p>	<p>La totalité des déchets entrants peut théoriquement être traitée.</p> <p>Il s'avère toutefois qu'en fonction des spécifications requises, une certaine proportion des tonnages traités (proportion pouvant atteindre 15 %) peut ne pas respecter certains critères granulométriques et nécessiter un nouveau broyage ou un autre type de valorisation que celle initialement prévue.</p>
<p>MATIÈRES PREMIÈRES SECONDAIRES GÉNÉRÉES</p>	<p>Les principales matières premières secondaires générées par le procédé sont :</p> <ul style="list-style-type: none"> ▪ poudrettes et granulés de caoutchoucs ne répondant pas aux spécifications requises ▪ autres fractions non caoutchoutiques contenues dans les déchets traités (exemple : acier et fibres textiles dans les pneumatiques).

► SÉPARATION / PURIFICATION DE LA MATIÈRE

<p>PRINCIPE / DESCRIPTION GÉNÉRALE</p>	<p>Généralement, les procédés de broyage / granulation comprennent une étape de séparation des fractions caoutchoutiques des fractions non-caoutchoutiques (généralement métalliques).</p> <p>Par exemple, la granulation des pneus comporte une séparation des fibres textiles par des méthodes de soufflerie et/ou de tamisage et une séparation d'acier par des outils magnétiques.</p>
<p>ÉQUIPEMENTS REQUIS</p>	<p>En fonction du type de caoutchouc traité et des différents matériaux annexes composant les différents déchets (textiles, métaux), les éléments suivants peuvent être nécessaires pour purifier le caoutchouc :</p> <ul style="list-style-type: none"> ▪ séparateurs magnétiques ▪ séparateurs de métaux non-ferreux ▪ tamis ▪ cribles <p>Ces équipements sont similaires à ceux pouvant être utilisés pour les étapes de séparation / purification de déchets traités par cryobroyage.</p>

▶ PERFORMANCES ET IMPACTS ENVIRONNEMENTAUX

CONSOMMATION ÉNERGÉTIQUE	<p>Pas d'information chiffrée identifiée.</p> <p>Les industriels interrogés soulèvent toutefois le fait que la consommation énergétique par tonne de caoutchouc broyé dépendrait fortement de la granulométrie souhaitée et du type de caoutchouc entrant.</p>
IMPACTS ENVIRONNEMENTAUX DU PROCÉDÉ	<p>Les données ci-dessous sont extraites de l'ACV « End life tyres: Alternative final disposal processes compared by LCA » (Corti et Lombardi, 2004). Des précisions relatives aux objectifs et aux hypothèses formulées sont disponibles en Annexe IV.</p> <p>Pour une tonne de pneumatiques usagés entrant :</p> <p>▶ <u>POLLUTION DE L'EAU ET DE L'AIR, CHANGEMENT CLIMATIQUE :</u></p> <ul style="list-style-type: none"> ▪ Potentiel de réchauffement climatique : 122 kg éq CO₂ ▪ Potentiel de déplétion de la couche d'ozone : -0,042 g éq CFC11 ▪ Potentiel d'acidification : 0,474 g éq SO₂ ▪ Potentiel d'eutrophisation : 1 g éq PO₄ <p>▶ <u>RISQUES TOXIQUES :</u></p> <ul style="list-style-type: none"> ▪ Métaux lourds : 4g éq Pb ▪ Composés organiques volatiles : -0,05 g éq Benzo(a)pyrène <p>▶ <u>RESSOURCES :</u></p> <ul style="list-style-type: none"> ▪ Consommation d'eau : 6 087 kg ▪ Énergie primaire : 4 968 MJ ▪ Déchets solides : -1 196 kg <p>Les procédés de valorisation par broyage / granulation produisent également des particules fines, en théorie récupérées par des équipements dédiés.</p>
QUANTITÉS ET NATURE DES DÉCHETS PRODUITS	<p>La totalité des déchets caoutchoutiques peut théoriquement être broyée/granulée.</p> <p>En fonction des spécifications requises toutefois, une certaine part du flux sortant peut nécessiter une nouvelle étape de broyage/granulation.</p> <p>Enfin, dans le cas des pneumatiques plus particulièrement, une fraction non caoutchoutiques et non métallique, essentiellement constituée de fibres textiles, est générée.</p> <p>Elle représente environ 1 % des flux entrants, et présente un faible intérêt économique.</p>

▶ ASPECTS ÉCONOMIQUES ET COMMERCIAUX

COÛT DES ÉQUIPEMENTS	Les investissements s'élèvent à environ 5 millions d'euros pour une installation complète, d'une capacité d'environ 20 000 tonnes de déchets traités par an.
COÛTS ÉNERGÉTIQUES	Pas d'information identifiée.
COÛTS DES DÉCHETS CAOUTCHOUTIQUES ENTRANTS	<p>D'ordinaire, les déchets caoutchoutiques sont fournis gratuitement aux recycleurs.</p> <p>Dans certains cas, les producteurs de déchets ou éco-organismes paient aux acteurs de la valorisation un prix de reprise de l'ordre de 30 à 50 €/t.</p>
PRIX DE REPRISE ESTIMATIF DU CAOUTCHOUC VALORISÉ	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Granules caoutchoutiques classiques: de 200 à 450 €/t pour de l'EPDM. Les coûts peuvent s'élever jusqu'à 1 000€/t, notamment en France, Royaume-Uni et Allemagne. <p>Des prix de reprise estimatif inférieurs (de 50 à 200 €/t) ont été obtenus auprès d'un acteur situé en Grèce.</p> <ul style="list-style-type: none"> ▪ Granules caoutchoutiques plus rares (p.e. FKM, FFKM) : peut aller jusqu'à plus que 5 000 €/t. Le traitement de ces déchets semble avantageux dans la mesure où le ratio matière vierge / matière est très important : le coût de la matière vierge dans le cas de ce type d'élastomère très spéciaux pouvant s'élever à plus de 200 €/kg, le ratio matière vierge / matière recyclée s'élèverait à près de 4.
PRIX DE REPRISE ESTIMATIF DES MATIÈRES PREMIÈRES SECONDAIRES GÉNÉRÉES	<p>Les principales matières secondaires générées et leurs prix de reprise estimatifs sont les suivants :</p> <ul style="list-style-type: none"> ▪ Acier (généré par le broyage des pneus) : à condition qu'il ne soit pas pollué par du caoutchouc, l'acier est repris au cours actuel, soit environ 175€/t (prix exposé à d'importantes fluctuations) ▪ Fibres textiles (générées par le broyage des pneus) : il n'existe quasiment pas de

marché pour cette fraction. Par conséquent, sa valeur économique est très basse (environ 0-10 €/t), et peut même représenter un coût supplémentaire dans le cas où les fibres textiles doivent être éliminées

► QUALITÉ, RÉGLEMENTATION ET CINDYNIQUE

RISQUES INDUSTRIELS ET SANITAIRES LIÉS AU PROCÉDÉ	<p>► <u>RISQUES INDUSTRIELS :</u></p> <ul style="list-style-type: none"> ▪ Risques industriels d'ordre opérationnel (machinerie, étape de prébroyage, etc.) : ▪ Risque incendie lié aux caoutchoucs en eux-mêmes (stocks de caoutchoucs). ▪ Risque d'explosion de poussières. <p>► <u>RISQUES SANITAIRES :</u></p> <ul style="list-style-type: none"> ▪ Risques sanitaires liés aux poussières. ▪ Afin de palier ces risques, la société J.Allcock & Sons a mis en place un système vacuum afin de limiter au maximum les émissions de poussières.
---	---

► OBSERVATIONS GÉNÉRALES, AUTRES POINTS ABORDÉS


POINTS FORTS	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Coûts d'investissement et de fonctionnement relativement bas ▪ Technologie standardisée, bien maîtrisée et sûre (peu de risques sanitaires et industriels) ▪ Un marché global intéressant pour les matériels valorisés ▪ Faibles impacts environnementaux
POINTS FAIBLES	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Le broyage ambiant n'est pas adapté au traitement de caoutchoucs trop malléables (risques de fusion dans les équipements tels que les presses et broyeurs).

► SOURCES UTILISÉES

SOURCES, ORIGINES DES INFORMATIONS, CONTACTS	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Site, documentation et entretien de Deutsche Gumtec AG ▪ Site, documentation et entretien de Tyres Herco SA ▪ Site, documentation et entretien de J Allcock and Sons Ltd. ▪ Pegg, M. J., Amyotte, P. R., Fels, M., Cumming, C. R.R. & Poushay, J. C. (2007). An assessment of the use of tires as an alternative fuel. Halifax : Department of Process Engineering and Applied Science Faculty of Engineering, Dalhousie University. ▪ End life tyres: Alternative final disposal processes compared by LCA - A. Corti, L. Lombardi (2004), Dipartimento di Energetica "Sergio Stecco", Università degli Studi di Firenze, Via Santa Marta 3, Florence ▪ Integrated Waste Management Board California (2003). <i>Assessment of Markets for Fiber and Steel Produced From Recycling Waste Tires</i>. Sacramento, California : Integrated Waste Management Board. ▪ Glossaire des nanomatériaux la Commission Européenne : http://ec.europa.eu/health/scientific_committees/opinions_layman/nanomaterials/fr/glossary/ ▪ Benazzouk A., Douzane O., Langlet T., Mezreb K., Labbani F., Roucoult J.-M.. <i>Effet des granulats de caoutchouc sur les propriétés d'un mortier de ciment</i>, Université de Picardie Jules Verne, IUT d'Amiens, Département génie civil.
--	---

III.3.1.2 FICHE CRYOBROYAGE

► SYNTHÈSE

DÉNOMINATION DU PROCÉDÉ		Cryobroyage
TYPE DE TRAITEMENT		Thermomécanique
EN QUOI CONSISTE LE PROCÉDÉ		Le cryobroyage consiste à refroidir les déchets caoutchoutiques avant de les broyer plus ou moins finement. Le cryobroyage est une des principales techniques pour microniser (broyer en très fines particules, inférieures à 500 µm) des déchets plastiques.
COMMERCIALISATION	ENTREPRISES COMMERCIALISANT LE PROCÉDÉ	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Air Products (www.airproducts.fr) ▪ 3R (http://www.3rrecycling.eu) ▪ RTI Cryogenics (http://www.rticryo.com)
	NOMBRE D'UNITÉS	<p>► AIR PRODUCTS</p> <ul style="list-style-type: none"> ▪ Groupe présent dans plus de 40 pays. La technologie proposée par Air Products permettrait de traiter jusqu'à 160 kg de déchets par heure (technologie brevetée PolarFit®) ▪ Localisation : lancement à Bobingen (Allemagne) d'un centre d'essais et de démonstrations d'un cryobroyeur permettant d'obtenir des particules ultrafines (de 45 à 250 µm) ▪ Date de mise en route : 2011 <p>► 3R</p> <ul style="list-style-type: none"> ▪ Nombre d'unités : 1 ▪ Localisation : 3650 Dilsen-Stokkem - Belgique ▪ Date de mise en route : 1994 <p>► RTI CRYOGENICS</p> <ul style="list-style-type: none"> ▪ Nombre d'unités : 14 (capacité de traitement de 2,7 à 4,5 tonnes par heure) ▪ Localisation : Siège principale à Cambridge, Canada
ZONES GÉOGRAPHIQUES OÙ LE PROCÉDÉ EST APPLIQUÉ		Europe (marché principal), Amérique du Nord, Amérique du Sud, Asie, Afrique, Moyen-Orient.
ÉTAT DE DÉVELOPPEMENT		 <p>Technologie mature et standardisée, employée à l'échelle industrielle. Elle reste toutefois assez coûteuse et ne représente pas la première technologie utilisée pour la valorisation matière de déchets caoutchoutiques.</p>
ÉVOLUTIONS ENVISAGÉES		Le cryobroyage présente vraisemblablement de bonnes perspectives de développement dans la mesure où tout type d'élastomère peut être traité et où ces procédés existent de longue date.
FREINS		Les principaux freins à l'évolution du cryobroyage sont : <ul style="list-style-type: none"> ▪ les coûts, notamment énergétiques, importants ; ▪ le rendement relativement bas au premier passage : 50-60 % de taux de conversion en moyenne. Les déchets non convertis au premier passage peuvent toutefois être réincorporés en début de procédé.

► BILAN MATIÈRE

FLUX ENTRANTS	CRITÈRES D'ENTRÉE	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Type(s) de caoutchouc(s) : tout type de caoutchoucs (et plus généralement, tout type de matériaux élastomères) ▪ Format : les déchets doivent être pré-broyés grossièrement avant cryobroyage ▪ Taille : < 10 mm ▪ Critères d'exclusion : de la même manière que pour le broyage, des critères d'exclusion peuvent naturellement découler des spécifications techniques des produits sortants (absence de textile ou de métal en particulier).
	GISEMENT(S) CONCERNÉ(S)	Les principaux gisements sont constitués de déchets de fabrication (non pollués) issus des producteurs de caoutchouc, mais également de déchets en fin de vie, essentiellement des pneumatiques.
	PROVENANCE	France et tout pays de l'Union Européenne (les entreprises identifiées étant basées en Union Européenne).
FLUX SORTANTS	CARACTÉRISTIQUES PHYSICO-CHIMIQUES	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Format : les caoutchoucs sortent sous forme de poudrettes à l'issue du traitement. ▪ Taille : la granulométrie des poudrettes est variable, et s'étend de 100 à 800 µm. Une granulométrie inférieure à 50µm est complexe à atteindre par cryobroyage. ▪ État de réticulation : les poudrettes en sortie de procédé sont constituées de caoutchouc vulcanisé.
	DÉBOUCHÉS / APPLICATION DES DÉCHETS VALORISÉS	<p>En fonction de la qualité de la poudrette et de l'application souhaitée, elle peut être mélangée en plus ou moins grande proportion (d'ordinaire entre 5 % à 10 %) à du caoutchouc vierge ou à d'autres plastiques.</p> <p>Les applications des poudrettes issues du cryobroyage peuvent être distinguées en deux catégories :</p> <ul style="list-style-type: none"> ▪ poudrettes « activées » : ces poudrettes sont dévulcanisées (a minima partiellement) et peuvent être utilisées sous cette forme en tant que matière première secondaire à part entière ; ▪ composés secondaires dans des CMO (composites à matrices organiques)⁴⁸.
	DÉCHETS NON VALORISÉS PAR LE PROCÉDÉ	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Déchets caoutchoutiques/plastiques : les granulats plus grossiers peuvent être valorisés auprès de manufacturiers (sols sportifs par exemple). ▪ Autres déchets (métal, textiles, autres) : les déchets métalliques peuvent être valorisés auprès des recycleurs spécialisés. Pas de débouchés identifiés pour les autres types de déchets, en particulier textiles.

► COLLECTE, TRANSPORT, CONDITIONNEMENT

PRINCIPE / DESCRIPTION GÉNÉRALE	<p>Les caoutchoucs valorisés par les acteurs utilisant des techniques de cryobroyage sont en général réceptionnés sous forme de granules grossières (« pré-broyées »).</p> <p>La collecte, le transport et le conditionnement peuvent être assurés soit directement par le producteur des déchets caoutchoutiques à valoriser, soit par un prestataire.</p> <p>Ces prestations peuvent être assurées par des acteurs mettant également en place des actions de valorisation à proprement parler.</p> <p>Ainsi, outre ses activités de valorisation, la société 3R, travaille en partenariat avec Jakobs Rubber Recycling⁴⁹ pour proposer des services logistiques aux producteurs de déchets caoutchoutiques (essentiellement des producteurs caoutchoutiers ou pneumaticiens) souhaitant les faire valoriser : mise à disposition de containers vides, transports des containers pleins pour valorisation, etc.</p>
--	---

⁴⁸ Un composite à matrice organique est composé d'une matrice polymère et d'un renfort pouvant se présenter sous forme de : particules, mats, fibres courtes, longues ou continues, etc.

⁴⁹ Industriel du recyclage du caoutchouc, proposant notamment des services <http://www.jakobsrubber.com>

ÉQUIPEMENTS REQUIS

- Camions
- Containers
- Sacs

Ces équipements sont similaires à ceux pouvant être utilisés pour les étapes de collecte, transport et conditionnement des déchets traités par broyage / granulation.

PRÉPARATION / TRANSFORMATION DE LA MATIÈRE

En dessous d'une température dite de transition vitreuse, les élastomères deviennent durs et cassants.

La technique de cryobroyage repose sur un abaissement de la température des déchets caoutchoutiques en deçà de leur température de transition vitreuse, typiquement par l'emploi d'azote liquide (-196°C).

Suite à cette étape de refroidissement, le caoutchouc passe par un broyeur où il est cassé en minuscules structures cristallines de taille régulière (de 100 à 800 µm).

La structure et la taille des particules obtenues dépendent, d'une part, de la nature du flux entrant de caoutchouc et, d'autre part, de la température à laquelle est abaissé le caoutchouc et au type de broyeur utilisé.

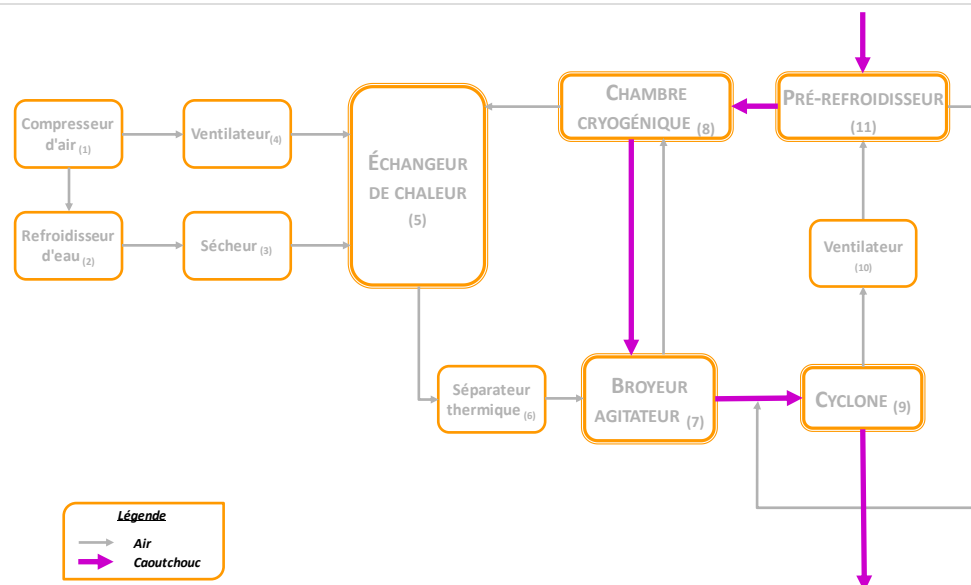
Trois types de procédés reposant sur un abaissement de la température du déchet couplé à un broyage ont été identifiés :

1. **Broyage à température contrôlée** : pour ce type de broyage, la température utilisée est contrôlée tout au long du procédé afin d'éviter toute dégradation thermique du caoutchouc (ou lorsqu'il est nécessaire d'améliorer l'étape de broyage pour des produits dont la surface devient rapidement homogène).
L'azote liquide peut être utilisé soit directement avec le caoutchouc à traiter au niveau du dispositif d'alimentation, de l'équipement de transfert, soit directement dans le broyeur.
2. **Broyage cryogénique ou cryobroyage** : à l'inverse du broyage à température contrôlée, le cryobroyage ne cherche pas qu'à limiter la dégradation thermique du caoutchouc, mais vise à le fragiliser pour en faciliter le broyage.
3. **Broyage sous atmosphère inerte** : ce type de broyage sous atmosphère inerte (ou contrôlée), est un procédé courant utilisé lorsque les matériaux à traiter :
 - se dégradent facilement en atmosphère riche en oxygène ;
 - sont des substances potentiellement dangereuses ;
 - présentent des risques (risques explosifs ou risque d'explosion de poussières).

Toute matière organique réduite à l'état de particules très fines présente des risques d'explosion accrus ; l'utilisation d'azote afin d'inertiser l'atmosphère lors du procédé de broyage permet de réduire au global les risques d'explosion.

PRINCIPE / DESCRIPTION GÉNÉRALE

SCHEMATISATION, ILLUSTRATION DES OPÉRATIONS DE SÉPARATION / PURIFICATION



ÉQUIPEMENTS REQUIS	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Compresseur d'air (1) ▪ Refroidisseur à eau (2) ▪ Sécheur (3) ▪ Systèmes de ventilation/ventilateurs (4 et 10) ▪ Échangeur de chaleur (5) ▪ Séparateur thermique (6) ▪ Broyeur agitateur (7) ▪ Chambre cryogénique (8) ▪ Cyclone⁵⁰ (9) ▪ Pré-refroidisseur (11) <p>Un ou plusieurs réservoirs de stockage pour le réfrigérant (azote ou dioxyde de carbone en général) sont également nécessaires.</p> <p>Des convoyeurs de refroidissement spécifiques, dimensionnés et contrôlés en fonction des déchets caoutchoutiques devant être broyés, sont à prévoir.</p> <p>Les broyeurs utilisés sont en règle générale des broyeurs à marteaux.</p>
PERFORMANCE / RENDEMENT MATIÈRE	<p>Le taux de conversion par cryobroyage est de l'ordre de 60 %. Les 40 % non traités, peuvent toutefois être réintroduits en entrée.</p> <p>En termes de consommation d'azote liquide, de 2 à 3 kg d'azote liquide sont nécessaires pour le traitement d'un kg de caoutchouc.</p> <p>Pour traiter les déchets non complètement broyés après un premier passage et réintroduits en début de cycle, la consommation en azote liquide peut augmenter jusqu'au double.</p>
MATIÈRES PREMIÈRES SECONDAIRES GÉNÉRÉES	<p>Poudrettes et granulats de caoutchoucs n'ayant pu être broyés (calibre supérieur à 800 µm environ).</p>

► SÉPARATION / PURIFICATION DE LA MATIÈRE VALORISÉE

PRINCIPE / DESCRIPTION GÉNÉRALE	<p>À l'issue du broyage cryogénique des déchets caoutchoutiques, un traitement complémentaire peut être nécessaire afin de purifier les poudrettes obtenues.</p> <p>Les principales méthodes séparatives utilisées pour des séparations solides/solides sont des techniques mécaniques (telles que le tamisage), ou magnétiques, pour extraire les éléments ferreux.</p>
ÉQUIPEMENTS REQUIS	<p>En fonction du type de caoutchouc traité et des différents matériaux annexes composant les différents déchets (textiles, métaux), les éléments suivants peuvent être nécessaires pour purifier le caoutchouc :</p> <ul style="list-style-type: none"> ▪ séparateurs magnétiques ▪ séparateurs de métaux non-ferreux ▪ tamis ▪ cribles <p>Ces équipements sont similaires à ceux pouvant être utilisés pour les étapes de séparation / purification de déchets traités par des techniques de broyage / granulation.</p>

► PERFORMANCES ET IMPACTS ENVIRONNEMENTAUX

CONSOMMATION ÉNERGÉTIQUE	<p>La consommation énergétique totale d'un procédé de cryobroyage est de l'ordre de 1 000 à 1 500 kWh par tonne de caoutchouc traité (ordre de grandeur valable à l'échelle européenne).</p> <p>Des valeurs beaucoup plus faibles, situés aux alentours de 120-150 kWh/t environ ont été identifiées pour des technologies d'origine chinoise.</p>
IMPACTS ENVIRONNEMENTAUX DU PROCÉDÉ	<p>Les données ci-dessous sont extraites de l'ACV « End life tyres: Alternative final disposal processes compared by LCA » (Corti et Lombardi, 2004).</p> <p>Pour une tonne de pneumatiques usagés entrant :</p>

⁵⁰ Cette unité permet d'appliquer une rotation rapide à un gaz, et permet d'en extraire les particules fines solides qui y sont mélangées.

	<ul style="list-style-type: none"> ▶ <u>POLLUTION DE L'EAU ET DE L'AIR, CHANGEMENT CLIMATIQUE :</u> <ul style="list-style-type: none"> ▪ Potentiel de réchauffement climatique : 455 kg éq CO₂ ▪ Potentiel de déplétion de la couche d'ozone : 0,292 g éq CFC11 ▪ Potentiel d'acidification : 3 g éq SO₂ ▪ Potentiel d'eutrophisation : 129 g éq PO₄ ▶ <u>RISQUES TOXIQUES :</u> <ul style="list-style-type: none"> ▪ Métaux lourds : 144 g éq Pb ▪ Composés organiques volatiles : 31 g éq Benzo(a)pyrène ▶ <u>RESSOURCES :</u> <ul style="list-style-type: none"> ▪ Consommation d'eau : 93 503 kg ▪ Énergie primaire : 10 641 MJ ▪ Déchets solides : -724 kg
QUANTITÉS ET NATURE DES DÉCHETS PRODUITS	<p>Peu de déchets sont générés, et sont essentiellement :</p> <ul style="list-style-type: none"> ▪ poussière et caoutchoucs résiduels ▪ autres déchets (textiles et métaux essentiellement)

▶ **ASPECTS ÉCONOMIQUES ET COMMERCIAUX**

COÛT DES ÉQUIPEMENTS	<p>Aucune information relative aux coûts des équipements des principaux acteurs du cryobroyage de caoutchouc n'a pu être obtenue.</p> <p>Des broyeurs cryogéniques de plastiques d'origine asiatique (de capacité variant de 80 à 200 kg de matière traitée / jour) dont les prix varient de 29 000 à 33 000 € ont été identifiés. Cet ordre de grandeur ne représente toutefois certainement pas l'ordre de grandeur des équipements de plus grande envergure répondant aux normes européennes.</p>
COÛTS ÉNERGÉTIQUES	130 à 290 €/t ⁵¹
AUTRES COÛTS	Le coût d'un litre d'azote liquide est de l'ordre de cinq centimes d'euros, soit environ 62€ la tonne ⁵² (le prix varie selon la quantité et le service associé).
PRIX DE REPRISE ESTIMATIF DU CAOUTCHOUC VALORISÉ	Le prix de reprise estimatif du caoutchouc valorisé par cryobroyage s'étend de 1,10 à 2,50 €/kg, en fonction du caoutchouc traité.

▶ **QUALITÉ, RÉGLEMENTATION ET CINDYNIQUE**

RISQUES INDUSTRIELS ET SANITAIRES LIÉS AU PROCÉDÉ	<ul style="list-style-type: none"> ▶ <u>RISQUES INDUSTRIELS :</u> <ul style="list-style-type: none"> ▪ Risque incendie lié aux caoutchoucs en eux-mêmes (stocks de caoutchoucs par exemple). ▪ Risque d'explosion de poussières (risque atténué en cas de procédé réalisé en atmosphère contrôlée). ▪ Risque d'endommagement voire d'éclatement des équipements dû à l'important volume d'expansion de l'azote liquide en azote gazeux. ▶ <u>RISQUES SANITAIRES :</u> <ul style="list-style-type: none"> ▪ L'azote est un constituant majeur de l'air et ne présente pas intrinsèquement de risque toxique particulier pour l'homme. ▪ Les principaux risques rencontrés liés à l'utilisation d'azote liquide sont : <ul style="list-style-type: none"> - gelures, dues à la très basse température de l'azote à l'état liquide (-196°C) - hypoxie puis asphyxie : l'évaporation de l'azote liquide génère un important volume gazeux, entraînant une réduction du taux d'oxygène de l'air.
--	---

⁵¹ Estimation effectuée sur la base d'un coût énergétique de 1 000 à 1 500 kWh/t, avec un prix de 100kWh électriques fixé à 12,80 € (source MEDDTL),

⁵² Masse volumique de l'azote liquide ~0,81 kg/l, soit (1000 x 0,05)/0,81 ~ 62 €/t

- En dessous d'une teneur en O₂ de 18 %, des effets néfastes sur la santé humaine apparaissent : diminution des performances physiques et intellectuelles (réversible), altération voire perte de conscience, lésions cérébrales (irréversibles).
- L'azote liquide étant **incolore** et **inodore**, les risques sanitaires présentés par son utilisation sont accrus par rapport à d'autres gaz plus facilement identifiables.
- Comme pour les procédés de broyages / granulation classiques, le cryobroyage présente des risques sanitaires liées aux poussières.

► OBSERVATIONS GÉNÉRALES

POINTS FORTS	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Haute qualité du matériau généré : <ul style="list-style-type: none"> - permet d'obtenir des tailles de particules différentes, pour une large gamme d'applications - permet d'obtenir des particules de granulométrie inférieure à 400 µm (jusqu'à 100 µm), pouvant être introduites dans des mélanges de matériaux de premier emploi, sans trace visible. ▪ Homogénéité des particules obtenues (granulométrie et surface des particules très homogènes). ▪ Permet de broyer une grande variété de caoutchoucs (pneus de voiture, de camion autre déchets caoutchoutiques). ▪ Améliore le débit de l'opération de broyage. ▪ Permet d'obtenir des particules à surface homogène. ▪ La cryogénie permet de broyer des caoutchoucs très souples, contrairement au broyage ambiant qui peut être moins adapté (risque de fusion du caoutchouc).
POINTS FAIBLES	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Coût plus élevé que le broyage mécanique simple ▪ Risques opérationnels


► SOURCES UTILISÉES

SOURCES, ORIGINES DES INFORMATIONS, CONTACTS	<ul style="list-style-type: none"> ▪ A novel cryogenic grinding system for recycling scrap tire peels, S. B. LIANG and Y. C. HAO, 2000 ▪ The Rubber Industry and Extended Producers Responsibility Framework - Opportunities and Threats for Swedish Rubber Manufacturers, Deniz KOCA, 1999 : http://www.lumes.lu.se/database/alumni/97.98/theses/koca_deniz.pdf ▪ Rubber Recycling - A cryogenic solution to a hot problem, P. Gujral, F. Burmester, J. Griffiths, 1996 (Tiré du livre « Rubber in the environmental Age: progress in recycling, Rapra Technology Ltd) ▪ Altreifen-Recycling, Eine Zusammenfassung wichtiger Entsorgung und Verwertungsverfahren, Kurt Reschner, 2006 : http://www.entire-engineering.de/Altreifenrecycling.pdf ▪ End life tyres: Alternative final disposal processes compared by LCA - A. Corti, L. Lombardi (2004), Dipartimento di Energetica "Sergio Stecco", Università degli Studi di Firenze, Via Santa Marta 3, Florence ▪ Site, documentation et entretien de Air Products : http://www.airproducts.com ▪ Site et documentation de 3R : http://www.3rrubber.eu ▪ Site et documentation de RTI Cryogenics : www.rticryo.com ▪ Agence Nationale de Sécurité Sanitaire, de l'Alimentation, de l'Environnement et du Travail - Fiche Azote Liquide : http://www.afsset.fr/index.php?pageid=1129&parentid=424 ▪ An assessment of the use of tires as an alternative fuel - M. J. Pegg, P. R. Amyotte, M. Fels, C.R.R. Cumming, J.C. Poushay, Department of Process Engineering and Applied Science, Canada, 2007 ▪ Producing Ground Scrap Tire Rubber: A Comparison Between Ambient and Cryogenic Technologies, M. H. Blumenthal, Senior Technical Director, Rubber Manufacturers Association
---	--

III.3.2 FICHES RÉGÉNÉRATION

III.3.2.1 PRÉSENTATION GÉNÉRALE

► GÉNÉRALITÉS

DÉNOMINATION DU PROCÉDÉ	Régénération (dévulcanisation)
TYPES DE TRAITEMENT	Il existe différents types de procédés permettant de dévulcaniser des caoutchoucs : <ul style="list-style-type: none"> ▪ Procédés thermo-mécaniques ▪ Procédés utilisant des ultrasons ▪ Procédés chimiques, pouvant être distingués en : <ul style="list-style-type: none"> - Procédés thermochimiques - Procédés mécano-chimiques ▪ Procédés biologiques ▪ Procédés de valorisation en milieux supercritiques
EN QUOI CONSISTE LES PROCÉDÉS	La dévulcanisation consiste à rompre les liaisons permettant la réticulation du caoutchouc (rupture de ponts disulfures en règle générale).
COMMERCIALISATION / DÉVELOPPEMENT DU PROCÉDÉ	<p>► INDUSTRIELS</p> <ul style="list-style-type: none"> ▪ Levgum, www.levgum.com (Israël) ▪ Recyclatech, http://www.recyclatech.com (Écosse) ▪ Mercurhone, www.wasterubberactivation.org (France) <p>► LABORATOIRES</p> <ul style="list-style-type: none"> ▪ Projet ReMould, http://www.remould.org.uk (Royaume-Uni) ▪ Projet DevulCO₂, (http://www.devulco2.net) (Royaume-Uni) ▪ Chemical Engineering Department, University of Groningen (Pays-Bas) ▪ Polymer Science and Engineering Department University of Massachusetts Amherst (Etats-Unis) ▪ Institute of Polymer Engineering, The University of Akron, Ohio (Etats-Unis)
ZONES GÉOGRAPHIQUES OÙ LE PROCÉDÉ EST DÉVELOPPÉ / ÉTUDIÉ	Europe (principalement au Royaume-Uni et en France), États-Unis, Israël.
ÉTAT DE DÉVELOPPEMENT	 <p>Niveau de développement variable en fonction du procédé.</p>
ÉVOLUTIONS ENVISAGÉES	Les activités de recherche menées sur la dévulcanisation semblent en croissance à l'échelle internationale, et plus particulièrement sur les méthodes mécano-chimiques qui permettent une dévulcanisation (partielle ou complète dans certains cas) à des coûts relativement bas et une réutilisation du caoutchouc traité dans la production du caoutchouc vierge.

► DESCRIPTION DES PROCÉDÉS

PRINCIPE / DESCRIPTION GÉNÉRALE	<p>On peut distinguer plusieurs types de procédés permettant de régénérer des caoutchoucs :</p> <p>► PROCÉDÉS THERMO-MÉCANIQUES</p> <p>Les procédés mécano-thermiques sont les procédés les plus simples techniquement. Ils appliquent au caoutchouc des forces mécaniques et de la chaleur afin d'obtenir la dévulcanisation par des réactions mécano-thermiques. Durant le broyage du caoutchouc, les efforts mécaniques provoquent de l'échauffement.</p> <p>► PROCÉDÉS UTILISANT LES ULTRASONS</p> <p>Les procédés de dévulcanisation basés sur les ultrasons reposent sur la transmission d'énergie aux caoutchoucs, par l'action des ultrasons.</p>
---------------------------------	---

► PROCÉDÉS CHIMIQUES

Les procédés chimiques supposent l'utilisation d'un ou plusieurs agents de dévulcanisation, dont au moins un est de nature chimique. Il existe deux types de procédés de dévulcanisation chimique : les procédés thermochimiques et les procédés mécano-chimiques.

- Les **procédés thermochimiques** sont des procédés généralement conduits dans un autoclave chauffé par de la vapeur. La chaleur et la pression sont donc les facteurs principaux de la dégradation des caoutchoucs. Les agents utilisés peuvent être des plastifiants, des solutions d'hydroxyde de sodium ou tout autre agent capable d'attaquer les liaisons du polymère à dévulcaniser.
- Les **procédés mécano-chimiques** utilisent l'action des forces mécaniques combinées avec l'action d'un agent chimique dans une extrudeuse ou un moulin. Toutefois, il faut ici distinguer l'ajout d'un produit chimique comme agent de dévulcanisation de l'ajout d'un agent pour le traitement de la poudrette comme un plastifiant ou un lubrifiant (De et al. 2005).

Une « Fiche procédé mécano-chimique » détaillée est disponible en chapitre III.3.2.2, page 44.

► PROCÉDÉS BIOLOGIQUES

Certains micro-organismes, tels que Thiobacillus et Sulfolobus acidocaldarius (bactéries participant à la dégradation de composés soufrés et pouvant supporter des pH extrêmement acides), sont capables d'extraire le soufre contenu dans les caoutchoucs et de l'oxyder en sulfates.

La poudrette est maintenue dans un bioréacteur en présence des bactéries à une température et une pression convenables durant une dizaine à une centaine de jours. Le produit est ensuite traité pour éliminer les bactéries et les sécher. (UNEP, 2008).

Une « Fiche procédés biologiques » détaillée est disponible en chapitre III.3.2.3, page 47.

► PROCÉDÉ DE VALORISATION EN MILIEUX SUPERCRITIQUES

Le traitement de déchets caoutchoutiques en milieux supercritiques permet de provoquer une réaction chimique qui décompose le caoutchouc en différentes fractions à l'état gazeux, liquide et solide.

Les procédés de valorisation en milieux supercritiques permettent de dévulcaniser, dépolymériser voire de décomposer complètement le caoutchouc.


Une « Fiche valorisation en milieux supercritiques » détaillée est disponible en chapitre III.3.2.4 page 51.

D'autres techniques de dévulcanisation, notamment par traitement à haute température dans des huiles, existent à l'heure actuelle.

Ces procédés n'ont pas fait l'objet de la rédaction d'une fiche détaillée dans la mesure où elles ne semblent pas intéresser les industriels français et européens, devant répondre à des critères précis de qualité et à des réglementations.

III.3.2.2 FICHE PROCÉDÉ MÉCANO-CHIMIQUE

► SYNTHÈSE

DÉNOMINATION DU PROCÉDÉ	Procédé mécano-chimique (Levgum)
TYPE DE TRAITEMENT	Traitement mécano-chimique
EN QUOI CONSISTE LE PROCÉDÉ	Les déchets caoutchoutiques sont traités dans une extrudeuse ou un moulin, avec adjonction d'un agent de dévulcanisation.
COMMERCIALISATION / DÉVELOPPEMENT DU PROCÉDÉ	Levgum (www.levgum.com) <ul style="list-style-type: none"> ▪ Nombre d'unités : 1 (capacité ; 10 000 tonnes de déchets traités par an) ▪ Localisation : Israël ▪ Date de mise en route : 2002 L'établissement Rubber Resources B.V. (www.rubber-resources.com) aux Pays-Bas utiliserait le même type de procédé.
ZONES GÉOGRAPHIQUES OÙ LE PROCÉDÉ EST APPLIQUÉ	Israël. Licenses acquises en Inde, Turquie, Grèce, Italie, Espagne, Afrique du Sud et États-Unis.
ÉTAT DE DÉVELOPPEMENT	 <p>Cette technologie est développée depuis 2002 par Levgum. Aujourd'hui, sept autres acteurs ont acquis la licence permettant d'exploiter cette technologie. Levgum leur fournit l'agent de dévulcanisation qu'il a breveté.</p>
ÉVOLUTIONS ENVISAGÉES	D'autres acquisitions de licences pourraient être à prévoir dans les années à venir.

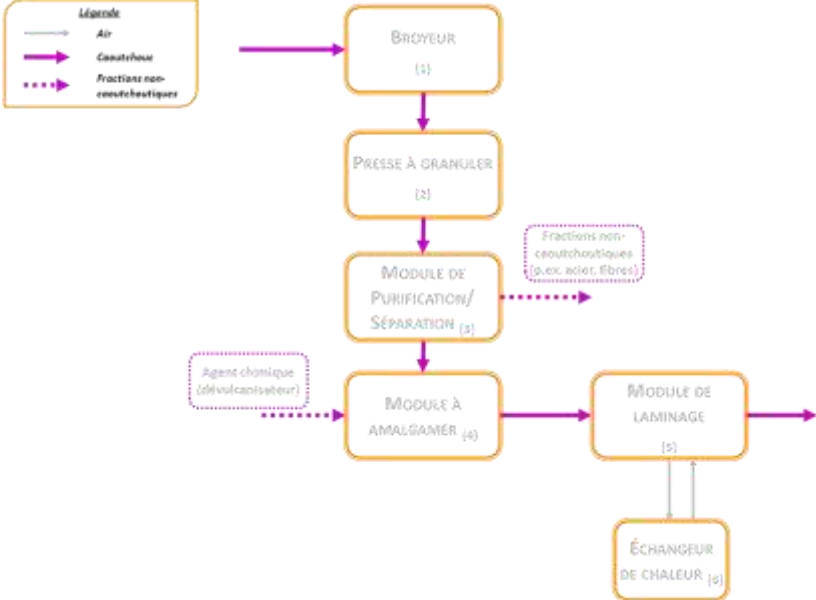
► BILAN MATIÈRE

FLUX ENTRANTS	CRITÈRES D'ENTRÉE	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Type(s) de caoutchouc(s) : tout type de caoutchoucs vulcanisés ▪ Format : les déchets doivent être pré-broyés avant traitement ▪ Taille : <2-4 mm
	GISEMENT(S) CONCERNÉ(S)	Les déchets traités sont essentiellement les déchets de pneumatiques usagés, mais également les déchets de fabrication
FLUX SORTANTS	CARACTÉRISTIQUES PHYSICO-CHIMIQUES	Les caoutchoucs traités sont partiellement dévulcanisés.
	DÉBOUCHÉS / APPLICATION DES DÉCHETS VALORISÉS	<p>Les déchets valorisés peuvent être réutilisés dans la production du caoutchouc où ils peuvent se substituer :</p> <ul style="list-style-type: none"> ▪ entre 10 et 20 % au caoutchouc vierge dans la production des pneumatiques ▪ entre 30 et 70 % au caoutchouc vierge dans nombreuses autres applications <p>Le caoutchouc valorisé peut ainsi être utilisé pour la production des applications suivantes par exemple :</p> <ul style="list-style-type: none"> ▪ Pneumatiques ▪ Autres éléments automobiles (joints, clapets, tapis, etc.) ▪ Semelles de chaussures

► COLLECTE, TRANSPORT, CONDITIONNEMENT

PRINCIPE / DESCRIPTION GÉNÉRALE	Aucune information identifiée.
ÉQUIPEMENTS REQUIS	

► **PRÉPARATION / TRANSFORMATION DE LA MATIÈRE**

<p>PRINCIPE / DESCRIPTION GÉNÉRALE</p>	<p>Ce type de procédés repose sur l'action des forces mécaniques combinées avec l'action d'un agent chimique (breveté par Lev gum) dans une extrudeuse ou un moulin.</p>
<p>SCHÉMATISATION, ILLUSTRATION DES OPÉRATIONS</p>	<p>Le schéma ci-dessous illustre le procédé mécano-chimique :</p> 
<p>ÉQUIPEMENTS REQUIS</p>	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Broyeur (dans le cas où les déchets sont prébroyés sur place) (1) ▪ Presse à granuler (dans le cas où les déchets sont granulés sur place) (2) ▪ Module de purification/ séparation (dans le cas où les déchets sont purifiés sur place) (3) ▪ Module à amalgamer (4) ▪ Module de laminage (5) ▪ Échangeur de chaleur (6)
<p>COÛTS</p>	<p>► COÛTS D'INVESTISSEMENT Pour un équipement complet de dévulcanisation mécano-chimique permettant de traiter environ 10 000 tonnes de déchets par an, les coûts d'investissement sont d'environ 3,5 à 4 millions d'euros. La période d'amortissement de cet investissement est environ 2 ans.</p> <p>► PRIX DE REPRISE ESTIMATIF DU CAOUTCHOUC VALORISÉ Le prix de reprise estimatif du caoutchouc dévulcanisé n'a pu être déterminé. Il est toutefois possible de savoir que l'emploi des composites valorisés par dévulcanisation permet d'économiser jusqu'à 50 % dans la production des nouveaux produits caoutchouteux et d'offrir ces produits à des prix plus bas, comparativement aux produits basés exclusivement sur du caoutchouc vierge (jusqu'à 50 % moins cher).</p> <p>► COÛTS ÉNERGÉTIQUES Environ 50 €/t pour une valorisation par un procédé mécano-thermique⁵³.</p>
<p>IMPACTS ENVIRONNEMENTAUX</p>	<p>► ÉMISSIONS DANS L'AIR, L'EAU ET LE SOL D'après les entretiens menés avec les industriels du secteur, un procédé mécano-chimique classique ne cause pas d'impacts importants sur l'air, l'eau et le sol.</p> <p>► DÉCHETS Selon les professionnels du secteur, aucun déchet n'est généré par les procédés de dévulcanisation, la totalité du flux entrant étant valorisé.</p>

⁵³ Estimation effectuée sur la base d'un coût énergétique de 1 000 à 1 500 kWh/t, avec un prix de 100kWh électriques fixé à 12,80 € (source MEDDTL),

► OBSERVATIONS GÉNÉRALES


POINTS FORTS	<ul style="list-style-type: none">▪ Le procédé est capable de traiter des pièces relativement larges, qu'il n'est pas toujours nécessaire de granuler avant traitement▪ Le traitement cause peu d'impacts environnementaux▪ Le procédé ne nécessite pas d'équipement complexe et peut être opéré avec une machinerie standard▪ Le caoutchouc valorisé par dévulcanisation conserve la plupart des caractéristiques du caoutchouc vierge et peut, par conséquent, être facilement réintroduit dans la production du caoutchouc▪ Le caoutchouc dévulcanisé permet de produire du caoutchouc neuf à des coûts jusqu'à 50 % plus bas par rapport à l'utilisation exclusive de caoutchouc vierge
POINTS FAIBLES	<ul style="list-style-type: none">▪ Complexité technique de mise en œuvre▪ Qualité des produits traités variable en fonction de la voie de dévulcanisation choisie.

► SOURCES UTILISÉES

SOURCES, ORIGINES DES INFORMATIONS, CONTACTS	<ul style="list-style-type: none">▪ Site, documents et entretien avec LevGum Ltd., dont brevet européen EP1242520B1▪ Modelling a continuous devulcanization in an extruder - P. Sutanto, F. Picchioni, L.P.B.M. Janssen▪ Étude sur la dévulcanisation de l'EPDM pour la fabrication d'un élastomère EPDM-TPO (thèse) - Macsiniuc, Adrian▪ Rubber Plasticizers From Degraded/Devulcanized Scrap Rubber: A Method of Recycling Waste Rubber - AMIYA R. TRIPATHY, DREW E. WILLIAMS, and RICHARD J. FARRIS▪ Recycling of Tire-Curing Bladder by Ultrasonic Devulcanization - Wenlai Feng, A.I. Isayev
--	---

III.3.2.3 FICHE PROCÉDÉS BIOLOGIQUES

► SYNTHÈSE

DÉNOMINATION DU PROCÉDÉ	Procédés biologiques
TYPE DE TRAITEMENT	Biologiques
EN QUOI CONSISTE LE PROCÉDÉ	<p>Les procédés biologiques consistent à traiter les déchets caoutchoutiques par des micro-organismes, en vue de leur régénération (élimination des composés toxiques notamment). Selon la nature des micro-organismes employés, les caoutchoucs peuvent également être dévulcanisés et désulfurés.</p> <p>Le caoutchouc purifié (et éventuellement dévulcanisé) peut, par la suite, soit être ajouté tel quel à de nouveaux caoutchoucs, soit être entièrement décomposé par de nouveaux agents biologiques.</p>
COMMERCIALISATION / DÉVELOPPEMENT DU PROCÉDÉ	<p>Recyclatech (www.recyclatech.com)</p> <ul style="list-style-type: none"> ▪ Nombre d'unités : 1 (capacité : 1 000 tonnes de déchets traités annuellement) ▪ Localisation : Écosse ▪ Date de mise en route : 2006 <p>NB : Recyclatech a vendu une licence à un recycleur espagnol qui prévoit la construction d'un pilote en Espagne en 2012 (capacité de 3 000 tonnes).</p> <p>Actuellement il ne semble pas exister d'autre emploi commercial des procédés biologiques pour la valorisation matière du caoutchouc. Plusieurs laboratoires de recherches ont toutefois été identifiés :</p> <ul style="list-style-type: none"> ▪ Asie : <ul style="list-style-type: none"> • College of Life Science and Technology, Beijing University of Chemical Technology (Chine) • Key Laboratory of Beijing City on Preparation and Processing of Novel Polymer Materials, Beijing University of Chemical Technology (Chine) • Centre for Biotechnology, Anna University, Chennai (Inde) • Department of Biotechnology, Indian Institute of Technology, Chennai (Inde) ▪ Europe : Dept. of Biotechnology, Centre for Chemistry and Chemical Engineering, Lund University (Suède).
ZONES GÉOGRAPHIQUES OÙ LE PROCÉDÉ EST APPLIQUÉ	Intenses activités de R&D en Asie et Europe (essentiellement en Suède).
ÉTAT DE DÉVELOPPEMENT	 <p>Technologie en cours de développement. Des essais en laboratoires ont été menés démontrant la capacité de certains micro-organismes à la désintoxication et la désulfuration : néanmoins, il n'existe actuellement aucune application commerciale.</p>
ÉVOLUTIONS ENVISAGÉES	<p>De par la qualité des produits obtenus en sortie de procédé et dans la mesure où elle permet une dévulcanisation très satisfaisante, la valorisation de caoutchoucs reposant sur des biotechnologies semblent intéressante et prometteuse.</p> <p>Toutefois, dans la mesure où l'essentiel des travaux menés sur ce type de procédés reste au stade R&D, il semble difficilement envisageable qu'un large développement à l'échelle industrielle soit possible avant quelques années.</p>
FREINS	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Travaux essentiellement au stade R&D ▪ Les caoutchoucs trop riches en certains additifs ne peuvent pas être traités efficacement

► BILAN MATIÈRE

FLUX ENTRANTS	CRITÈRES D'ENTRÉE	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Type(s) de caoutchouc(s) : tous types de caoutchoucs naturels et synthétiques peuvent être traités. ▪ Format : les déchets doivent être pré-broyés à sec ▪ Taille : dans l'idéal, de 100 à 200 µm (plus les granulés seront fins, plus le traitement biologique sera efficace) ▪ Critère d'exclusion : l'efficacité des procédés biologiques dépend de deux caractéristiques principales : <ul style="list-style-type: none"> - le nombre et la complexité des additifs contenus dans le caoutchouc à traiter : plus le caoutchouc contient d'additifs, plus la performance des microorganismes est réduite) En particulier, certains antiozonants tels que le diméthylbutyl-p-phénylenediamine) ou des composés sulfurés tels que le disulfure de tétraméthylthiurame, réduisent de manière importante l'efficacité du procédé. - la granulométrie des poudrettes entrantes : les microorganismes n'attaquent que la surface du caoutchouc, plus les granulés seront fins, plus le traitement sera efficace Ainsi, les poudrettes d'une granulométrie de plus de 200 µm ne peuvent pas être efficacement traitées par un procédé biologique.
	GISEMENT(S) CONCERNÉ(S)	À l'exception des déchets présentant des critères d'exclusion, tout autre type de déchets caoutchoutiques peut théoriquement être traité par procédé biologique.
	PROVENANCE	Les procédés biologiques étant encore au stade de la R&D, les matériaux pour des essais en laboratoires sont procurés localement. Dans le cas de la société écossaise contactée, les déchets sont issus du Royaume-Uni.
FLUX SORTANTS	CARACTÉRISTIQUES PHYSICO-CHIMIQUES	Les caoutchoucs traités via procédé biologique sont restitués sous forme de poudrettes. En fonction du procédé et de la bactérie utilisée, les caoutchoucs peuvent également être dévulcanisés (procédé Recyclatech) voire désulfurés (recherches sur <i>Thiobacillus ferrooxidans</i> par la Beijing University of Chemical Technology).
	DÉBOUCHÉS / APPLICATION DES DÉCHETS VALORISÉS	Les applications des poudrettes issues des procédés biologiques peuvent être distinguées en deux catégories : <ul style="list-style-type: none"> ▪ poudrettes ayant été dévulcanisées voire désulfurées : ces poudrettes peuvent être ajoutées à de la matière première non recyclée afin de produire un caoutchouc vierge. ▪ poudrettes n'ayant pas été dévulcanisées : ces poudrettes peuvent être employées pour des préparations caoutchoutiques pour sols sportifs (ou assimilés). ▪ Elle peuvent également être soumises à une nouvelle décomposition biologique, complète ou partielle, afin d'obtenir des composés organiques simples (H₂, H₂O, CO₂). Ce débouché impliquant une augmentation probable du coût du procédé.

► COLLECTE, TRANSPORT, CONDITIONNEMENT

PRINCIPE / DESCRIPTION GÉNÉRALE	Aucune information identifiée.
ÉQUIPEMENTS REQUIS	

► PRÉPARATION / TRANSFORMATION DE LA MATIÈRE

PRINCIPE / DESCRIPTION GÉNÉRALE	<p>Afin d'offrir aux micro-organismes la plus grande surface de matériau possible à attaquer, le caoutchouc est granulé (dans certains cas par cryobroyage) pour atteindre une granulométrie située idéalement entre 100 et 200 µm.</p> <p>La poudrette obtenue est tout d'abord prétraitée par des micro-organismes, afin de dégrader les principaux additifs toxiques. La désintoxication est effectuée en employant des micro-organismes cryptogamiques⁵⁴, tel que le <i>Resinicium Bicolor</i>, résistants en particulier aux composés organiques aromatiques.</p>
---------------------------------	---

⁵⁴ Végétal dont les organes de reproduction sont cachés ou peu apparents (champignons par exemple)

	<p>Les poudres de caoutchouc ainsi désintoxiquées sont enfin mises en contact avec le micro-organisme qui permettra sa régénération (<i>Thiobacillus Ferrooxidans</i> par exemple). Cette étape est réalisée dans un module de culture microbienne, en milieu aqueux et régulièrement alimenté en air.</p> <p>Dans le cas de <i>Thiobacillus Ferrooxidans</i> plus particulièrement, les bactéries vont détruire les ponts disulfures du caoutchouc et isoler le soufre élémentaire. En fonction de la technologie employée, 6 à 30 jours sont nécessaires pour réduire de 7 à 8 % la quantité de soufre présente initialement dans le caoutchouc.</p>
<p>SCHÉMATISATION, ILLUSTRATION DES OPÉRATIONS DE SÉPARATION / PURIFICATION</p>	<p>Le schéma illustre le processus de désintoxication et de désulfuration du caoutchouc. Il se déroule en deux étapes principales : la désintoxication et la désulfuration. Les deux étapes sont précédées de modules de culture microbienne dédiés à la production des micro-organismes nécessaires. Le processus est alimenté en air, en caoutchouc et en composés organiques. Les produits finaux sont des masses de micro-organismes et du soufre.</p> <p>Légende : - Air (flèche grise) - Caoutchouc (flèche violette) - Composés organiques (flèche violette pointillée)</p>
<p>ÉQUIPEMENTS REQUIS</p>	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Modules de culture microbienne ▪ Bioréacteurs ▪ Micro-organismes: <ul style="list-style-type: none"> - Organismes cryptogamiques pour désintoxication (exemple : <i>Resinicium Bicolor</i>) - Organismes bactériales pour la désulfuration (exemple : <i>Thiobacillus Ferrooxidans</i>)
<p>PERFORMANCE / RENDEMENT MATIÈRE</p>	<p>Pas d'information identifiée.</p>
<p>MATIÈRES PREMIÈRES SECONDAIRES GÉNÉRÉES</p>	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Poudrettes de caoutchouc dévulcanisées, de granulométrie allant de 100 à 500 µm ▪ Sulfure élémentaire ou acide sulfurique

► **SÉPARATION / PURIFICATION DE LA MATIÈRE VALORISÉE**

<p>PRINCIPE / DESCRIPTION GÉNÉRALE</p>	<p>L'étape de séparation / purification est comprise dans l'étape de préparation / transformation de la matière (notamment isolation du soufre élémentaire par les bactéries).</p>
<p>ÉQUIPEMENTS REQUIS</p>	<p>Il n'est donc a priori pas nécessaire de faire appel à une étape supplémentaire de traitement avant la mise en application des déchets valorisés par procédés biologiques.</p>

► **PERFORMANCES ET IMPACTS ENVIRONNEMENTAUX**

<p>CONSOMMATION ÉNERGÉTIQUE</p>	<p>Pas d'information identifiée.</p>
<p>IMPACTS ENVIRONNEMENTAUX DU PROCÉDÉ</p>	<p>Les impacts environnementaux des procédés biologiques sont faibles dans la mesure où les flux sortants sont biodégradables.</p>
<p>QUANTITÉS ET NATURE DES DÉCHETS PRODUITS</p>	<p>Les déchets principaux issus des procédés biologiques sont constitués des micro-organismes ayant été utilisés pour la désintoxication ou la désulfuration du caoutchouc. Ces déchets biologiques sont 100 % biodégradables. La quantité de ces déchets dépend de la capacité des procédés et des technologies employées.</p>

► **ASPECTS ÉCONOMIQUES ET COMMERCIAUX**

COÛT DES ÉQUIPEMENTS	L'investissement nécessaire pour le pilote d'une capacité de 3 000 tonnes en Espagne est d'environ 600 000 €.
COÛTS ÉNERGÉTIQUES	Pas d'information identifiée.
PRIX DE REPRISE ESTIMATIF DU CAOUTCHOUC VALORISÉ	Pas d'information identifiée.
PRIX DE REPRISE ESTIMATIF DES MATIÈRES PREMIÈRES SECONDAIRES GÉNÉRÉES	Pas d'information identifiée.

► **OBSERVATIONS GÉNÉRALES**

POINTS FORTS	<ul style="list-style-type: none"> Procédé permettant de dévulcaniser et désulfurer des caoutchoucs, sans faire appel à des conditions extrêmes de température et de pression.
POINTS FAIBLES	<ul style="list-style-type: none"> Procédés en développement, peu d'applications industrielles à l'heure actuelle Le traitement biologique nécessite une pré-granulation, dans l'idéal par cryobroyage, ce qui augmente considérablement les coûts totaux du procédé

► **SOURCES UTILISÉES**

SOURCES, ORIGINES DES INFORMATIONS, CONTACTS	<ul style="list-style-type: none"> Biotechnological Processes for Desulfurization of Rubber Products, Bredberg, K., Christiansson, M., Stenberg, B., Holst, O. - 2005 (publié en ligne le 15 janvier 2005 dans « Biopolymers Online », consulté le 10 Octobre 2011 : http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/3527600035.bpol2012/full) Myhre, M. (2005). Devulcanization by Chemical and Thermomechanical Means. In Sadhan K. De • Avraam I. Isayev Klementina Khait (rds.), Rubber Recycling. Boca Raton, London, New York Singapore : Taylor & Francis Group. CalRecovery, Inc. (2004). Evaluation of Waste Tire Devulcanization Technologies. Sacramento, CA : Integrated waste management board. Premraj, R. & Mukesh, D. (2005). Biodegradation of polymers. In Indian Journal of Biotechnology, Vol. 4, April 2005, pp. 186-193. http://www.recyclatech.com/Default.aspx?pid=1&request=true http://www.prw.com/subscriber/headlines2.html?cat=1&id=1297853142
---	---

III.3.2.4 FICHE VALORISATION EN MILIEUX SUPERCRITIQUES

► GÉNÉRALITÉS

DÉNOMINATION DU PROCÉDÉ		Traitement en milieux supercritiques.
TYPE DE TRAITEMENT		Les déchets caoutchoutiques sont traités par des fluides supercritiques.
EN QUOI CONSISTE LE PROCÉDÉ		<p>Un fluide est à l'état supercritique lorsqu'il est soumis à une température supérieure à sa température critique, tout en étant comprimé à une pression supérieure à sa pression critique. Les propriétés physiques d'un fluide soumis à de telles conditions de pression et de température sont situées entre les propriétés du même fluide à l'état gazeux et ses propriétés à l'état liquide.</p> <p>Le traitement de déchets caoutchoutiques en milieux supercritiques permet de provoquer une réaction chimique qui décompose le caoutchouc en différentes fractions à l'état gazeux, liquide et solide.</p> <p>Les procédés de valorisation en milieux supercritiques permettent de dévulcaniser, dépolymériser voire de décomposer complètement le caoutchouc.</p>
PROJETS DE RECHERCHE	LABORATOIRES OU PROJETS DE RECHERCHE	<p>► PROJET DE RECHERCHE : Le projet <i>DevulCO₂</i> (http://www.devulco2.net) a été lancé en Angleterre en 2006 par les partenaires suivants :</p> <ul style="list-style-type: none"> ▪ Smithers Rapra Technology Ltd ▪ PJH Partnership ▪ J Allcocks and Sons ▪ Charles Lawrence International ▪ BD Technical Polymers ▪ Martin's Rubber Company Limited <p>Aucune publication technique de ce groupement n'a été identifiée.</p> <p>► R&D EN INDUSTRIE :</p> <ul style="list-style-type: none"> ▪ 3M Corporate Research, Process Technologies Laboratory, St. Paul, MN 55144-1000, USA
	ARTICLE IDENTIFIÉ SUR LE SUJET	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Chen, D. T., Perman, C. A., Riechert, M. E., Hoven, J. (1995). Depolymerization of tire and natural rubber using supercritical fluids. In <i>Journal of hazardous materials</i> 44 (1995) 53-60
ZONES GÉOGRAPHIQUES OÙ LE PROCÉDÉ EST ÉTUDIÉ		Europe (principalement en Angleterre) et États-Unis.
ÉTAT DE DÉVELOPPEMENT		<div style="text-align: center;"> </div> <p>Le procédé en est au stade de la R&D. Un premier projet de recherche a été lancé en Angleterre afin de développer un nouveau procédé de traitement au dioxyde de carbone supercritique (projet « DevulCO₂ »). Aucun pilote industriel ou application n'a pour le moment été mis en place.</p>
ÉVOLUTIONS ENVISAGÉES		Le projet « DevulCO ₂ » a pour objet de développer et breveter une technologie applicable à l'échelle industrielle pour le traitement des déchets caoutchoutiques en milieux supercritiques. Les recherches se poursuivent, mais aucun brevet ne semble avoir été publié à l'heure actuelle.

► BILAN MATIÈRE

FLUX ENTRANTS	CRITÈRES D'ENTRÉE	Le groupement de recherche travaillant sur le projet « DevulCO ₂ » envisage de développer un procédé pour traiter principalement des pneumatiques usagés . Durant les années 1990 une équipe de chercheurs américains du laboratoire de recherche du groupe 3M a dépolymérisé avec succès du caoutchouc provenant de pneus usagés ainsi que du caoutchouc naturel , en milieux supercritiques.
FLUX SORTANTS	CARACTÉRISTIQUES PHYSICO-CHIMIQUES	Les fractions suivantes sont générées par traitement en milieux supercritiques : <ul style="list-style-type: none"> ▪ Une fraction aqueuse (dans le cas où le fluide supercritique utilisé est de l'eau) ▪ Une fraction gazeuse ▪ Une fraction organique, ou issue comme couche isolée ou absorbée par le charbon (environ 70 % en masse du flux entrant) ▪ Une fraction solide, principalement du noir de carbone (environ 30 % en masse du flux entrant) Afin d'éliminer toute trace organique, la fraction solide peut être nettoyée à l'aide de méthanol et de chloroforme.
	DÉBOUCHÉS / APPLICATION DES DÉCHETS VALORISÉS	Les principaux débouchés envisageables sont les suivants : <ul style="list-style-type: none"> ▪ Fraction organique : en fonction, la fraction organique est constituée des monomères ▪ Gaz : dans le cas idéal, le gaz peut être collecté et utilisé pour la production d'énergie ▪ Charbon : si le charbon issu du procédé est parfaitement purifié de toutes fractions métalliques et d'autres fractions non-caoutchoutiques, il peut être utilisé dans différentes applications, comme les pigments utilisés dans la peinture et les plastiques, comme charge dans de nouveaux produits caoutchoutiques, etc.

► DESCRIPTION DU PROCÉDÉ ET COÛTS

PRINCIPE / DESCRIPTION GÉNÉRALE	Le caoutchouc est pré-broyé en particules de 30 mesh (~500 µm) qui seront ensuite introduites dans un autoclave contenant le fluide supercritique (typiquement : H ₂ O ou CO ₂). Dans ce milieu, le caoutchouc réagira et se décomposera en quatre fractions principales : une fraction gazeuse, une fraction organique, une fraction aqueuse et une solide fraction (principalement constituée de noir de carbone en poudre).
SCHÉMATISATION, ILLUSTRATION DES OPÉRATIONS	<p>Légende</p> <ul style="list-style-type: none"> — Air → Caoutchouc --- Fractions non-caoutchoutiques
ÉQUIPEMENTS REQUIS	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Broyeur (dans le cas où les déchets sont pré-broyés sur place) ▪ Séparateur (dans le cas où les déchets sont séparés sur place) ▪ Autoclave (récipient hermétique à parois épaisses permettant de réaliser des opérations telles qu'une réaction chimique ou une stérilisation à haute pression). ▪ Fluide supercritique (p.ex. H₂O ou CO₂)
COÛT DES ÉQUIPEMENTS	Dans la mesure où le procédé n'est pas encore développé à l'échelle industrielle, il manque des informations fiables quant aux coûts des équipements. Un ordre de grandeur a toutefois été identifié dans la littérature et situe les coûts d'équipements entre 20 000 et plusieurs millions d'euros, en fonction de la taille et du type d'autoclave utilisé.

► OBSERVATIONS GÉNÉRALES

POINTS FORTS	<ul style="list-style-type: none">▪ La valorisation en milieu supercritique offrirait une solution techniquement intéressante pour la dépolymérisation et la dévulcanisation des caoutchoucs▪ Le procédé présente également un important potentiel pour la décomposition en composés organiques simples (hydrocarbures, cokes et noirs de charbon, etc.) de haute qualité▪ Le procédé peut combiner la valorisation énergétique (par génération gaz, d'huiles et de cokes) et valorisation matière (dévulcanisation/dépolymérisation pour réutilisation dans des mélanges vierges)
POINTS FAIBLES	<ul style="list-style-type: none">▪ La technologie n'est pas éprouvée à l'échelle industrielle▪ Le procédé nécessite des conditions réactionnelles extrêmes, ce qui peut augmenter significativement les coûts de fonctionnement, ainsi que les risques opérationnels

► SOURCES UTILISÉES

SOURCES, ORIGINES DES INFORMATIONS, CONTACTS	<ul style="list-style-type: none">▪ Chen, D. T., Perman, C. A., Riechert, M. E., Hoven, J. (1995). Depolymerization of tire and natural rubber using supercritical fluids. In Journal of hazardous materials 44 (1995) 53-60▪ Patterson, S. M. (date of publication unknown). New York state approved alternative RMW treatment technologies. Accessed on the 28 November 2011 at: http://www.google.fr/url?sa=t&rct=j&q=autoclave%20investment%20cost&source=web&cd=19&ved=0CH0QFjAIOAo&url=http%3A%2F%2Fwww.premierinc.com%2Fsafety%2Fsafety-share%2F07-05-downloads%2F08-rmw-ny.ppt&ei=g2TTTsnJCIXDtAaPm6W6DA&usg=AFQjCNFvsan3dlBjuGp0S9Z2rXbSraJ0Yg&cad=rja
---	---

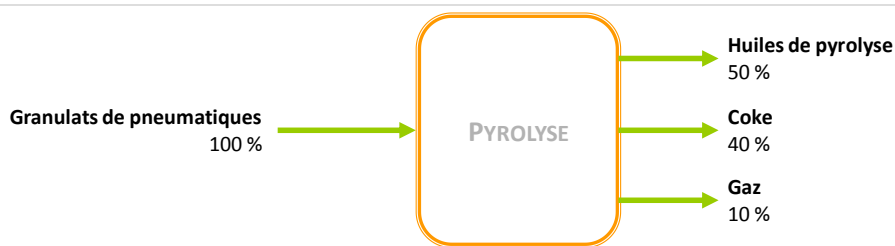
III.3.3 FICHE PYROLYSE

► SYNTHÈSE

DÉNOMINATION DU PROCÉDÉ	Pyrolyse
TYPE DE TRAITEMENT	Thermique
EN QUOI CONSISTE LE PROCÉDÉ	La pyrolyse consiste en une dégradation thermique en atmosphère pauvre en oxygène ⁵⁵ .
COMMERCIALISATION / DÉVELOPPEMENT DU PROCÉDÉ	<ul style="list-style-type: none"> ► <u>PYRUM INNOVATIONS S.A.S. (WWW.PYRUM.NET)</u> <ul style="list-style-type: none"> ▪ Localisation : Allemagne ▪ Construction d'une installation de capacité de traitement de 5 000 tonnes de pneumatiques prévue pour 2012 ► <u>PROGET ENERGY (PROJET DÉPOLYMÉRISATION THERMIQUE DE PNEUS USAGÉS ENTIERS)</u> <ul style="list-style-type: none"> ▪ Localisation : Italie ▪ Capacité de traitement de l'installation (six réacteurs de pyrolyse en parallèle) de l'ordre de 24 tonnes par jour ► <u>RAMERY, PROJET SOVAE (HTTP://WWW.ENVIRONNEMENT.RAMERY.FR/OFFRE-GLOBALE/CENTRE-DE-VALORISATION/SOVAE.HTML)</u> <ul style="list-style-type: none"> ▪ Localisation : Dunkerque, France ▪ Date de mise en route : Construction prévue pour 2012
ZONES GÉOGRAPHIQUES OÙ LE PROCÉDÉ EST APPLIQUÉ	France, Royaume-Uni, Amérique du Nord, Asie.
ÉTAT DE DÉVELOPPEMENT	 <p>La technologie de pyrolyse en général est mature et employée à l'échelle industrielle pour traiter plusieurs types de déchets.</p> <p>La pyrolyse et la gazéification de pneumatiques et autres caoutchoucs ne semblent toutefois pas être aussi matures que pour d'autres matières plastiques par exemple.</p>
ÉVOLUTIONS ENVISAGÉES	Au vu du gisement potentiel très important de pneumatiques usagés en particulier, et de la possibilité de récupérer de l'énergie par un procédé moins impactant sur l'environnement que l'incinération, il apparaît que le développement de la pyrolyse pourrait être stimulé dans les prochaines années, et largement appliqué dans 5 à 10 ans.
FREINS	Les produits issus de la pyrolyse des pneumatiques peuvent être fortement pollués, et nécessiter des opérations complémentaires de purification.

⁵⁵ La pyrolyse ne doit pas être confondue avec l'incinération, consistant à dégrader thermiquement un composé par une réaction de combustion, en vue de récupérer de l'énergie.

► **BILAN MATIÈRE**



Dans le cas du projet italien Proget Energy, le bilan matière détaillé est le suivant :

Flux entrants :

- 1000 kg de pneus entiers
- 500 kg d'air

Flux sortants :

- 800 kg de gaz
- 370 kg d'huile
- 160 kg de semi-coke
- 170 kg de métaux

FLUX ENTRANTS	CRITÈRES D'ENTRÉE	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Type(s) de caoutchouc(s) : tout type de caoutchoucs (et plus généralement, tout type de déchets organiques). Une grande variété de déchets caoutchoutiques peut être valorisée par la pyrolyse. Notamment, les types de déchets plastiques suivants ont été traités avec succès par différentes technologies Européennes : <ul style="list-style-type: none"> - Pneumatiques (EPDM en particulier) ; - PE, PET, autres plastiques ; - Divers déchets caoutchoutiques industriels. ▪ Format : les déchets doivent être pré-broyés grossièrement avant pyrolyse. ▪ Taille : environ 100-300mm ▪ Critère d'exclusion : pas de critère d'exclusion spécifique. Pour la pyrolyse de caoutchoucs halogénés, il est toutefois nécessaire de prévoir un système de récupération et traitement des fumées et suies.
	GISEMENT(S) CONCERNÉ(S)	Les principaux gisements sont constitués de déchets en fin de vie, essentiellement des pneumatiques.
	PROVENANCE	France et tout pays de l'Union Européenne, Amérique du Nord.
FLUX SORTANTS	CARACTÉRISTIQUES PHYSICO-CHIMIQUES	Les caoutchoucs sont dégradés en huiles, coke et gaz.
	DÉBOUCHÉS / APPLICATION DES DÉCHETS VALORISÉS	<p>Les produits issus de la pyrolyse de pneumatiques usagés ainsi que leurs principales applications sont les suivants :</p> <p>► HUILE PYROLYTIQUE :</p> <ul style="list-style-type: none"> ▪ Utilisation dans certains brûleurs disposant d'un système de préchauffage ▪ Raffinage afin d'obtenir des huiles à chauffage, de l'essence, éventuellement du carburant (pour bateaux) et d'autres produits chimiques hydrocarbonées <p>► COKE ET NOIR DE CARBONE :</p> <ul style="list-style-type: none"> ▪ Utilisation comme pigments dans les domaines de la peinture (coloration), des toners (propriétés électriques) et des plastiques (protection UV et renforcement) ▪ Utilisation comme charge dans de nouveaux produits composés de caoutchoucs (tapis de roulement, semelles de chaussures, pneumatiques, etc.) ▪ Utilisation comme additif pour polyoléfines afin d'améliorer les propriétés de résistance au rayonnement UV ▪ Utilisation dans la fabrication de matériaux isolants résistants à de hautes températures <p>► GAZ :</p> <ul style="list-style-type: none"> ▪ Réutilisation des gaz pour produire de l'électricité, soit directement (turbine à gaz) ou par production de vapeur surchauffée (turbine à vapeur).

DÉCHETS NON VALORISÉS PAR LE PROCÉDÉ	Il est possible de pyrolyser tous les déchets caoutchoutiques. Le coke et le noir de carbone peuvent toutefois présenter des traces de pollution (métallique notamment) en fonction du type de caoutchouc traité par le procédé.
---	---

► **COLLECTE, TRANSPORT, CONDITIONNEMENT**

PRINCIPE / DESCRIPTION GÉNÉRALE	Dans le cas du projet SOVAE sur la transformation des pneumatiques en huile de pyrolyse et porté par le groupe Ramery Environnement, les déchets caoutchoutiques seraient collectés et transportés par camion aux broyeurs et granulateurs. Les granulats seront ensuite acheminés par voies maritime et fluviale vers les installations de pyrolyse.
ÉQUIPEMENTS REQUIS	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Camions ▪ Barges fluviales et bateaux pousseurs pour un transport par voie fluviale ▪ Navires de transport spécifique pour un transport par voie maritime ▪ Containers ▪ Sacs

► **PRÉPARATION / TRANSFORMATION DE LA MATIÈRE**

PRINCIPE / DESCRIPTION GÉNÉRALE	La pyrolyse consiste en une dégradation thermique de matériaux carbonés à des températures se situant entre 400°C et 800°C, en absence complète d'oxygène, ou en quantité tellement réduite que la gazéification n'a pas lieu à un taux important (à ne pas confondre avec l'incinération). Le matériau pyrolysé est ainsi décomposé en ses unités de base.
SCHÉMATISATION, ILLUSTRATION DES OPÉRATIONS	<p style="text-align: center;">Légende</p> <ul style="list-style-type: none"> → Air → Caoutchouc → Composés organiques
ÉQUIPEMENTS REQUIS	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Déchiqueteur (dans le cas où les déchets sont prébroyés sur place) ▪ Compresseur rotatif ▪ Ventilateur ▪ Centrifuge ▪ Échangeur de chaleur à tubes ▪ Module de condensation ▪ Réacteur ▪ Four (dans le cas où une combustion est réalisée en fin de procédé pour traiter les cendres, résidus et vapeurs non-condensables)
PERFORMANCE / RENDEMENT MATIÈRE	La totalité des déchets entrants est traitée.
MATIÈRES PREMIÈRES SECONDAIRES GÉNÉRÉES	

► SÉPARATION / PURIFICATION DE LA MATIÈRE VALORISÉE

PRINCIPE / DESCRIPTION GÉNÉRALE	Dans le cas où une étape de séparation / purification est souhaitée, les opérations de séparation et de purification des différents produits issus de la pyrolyse de déchets caoutchoutiques seront très similaires aux opérations appliquées aux produits issus du raffinage du pétrole et consiste notamment en une élimination du sulfure d'hydrogène, du thiophène et autres composés soufrés (traitement par hydrodésulfuration ou utilisation d'amines).
ÉQUIPEMENTS REQUIS	

► PERFORMANCES ET IMPACTS ENVIRONNEMENTAUX

CONSOMMATION ÉNERGÉTIQUE	<p>Environ 1,2 MWh/t de pneumatiques valorisés</p> <p>Toutefois, le gaz résultant de la pyrolyse peut être utilisé pour produire l'énergie requise par le procédé en lui-même (procédé pouvant être exothermique sous certaines conditions).</p> <p>Dans le cas du projet italien Proget Energy, le bilan énergétique détaillé est le suivant :</p> <table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <tr> <td style="width: 50%;">Entrant :</td> <td style="width: 50%;">Sortant :</td> </tr> <tr> <td> <ul style="list-style-type: none"> ▪ Pneumatiques entiers : 8,9 MWh </td> <td> <ul style="list-style-type: none"> ▪ Gaz : 1,56 MWh ▪ Huile : 4,17 MWh ▪ Semi-coke : 1,06 MWh </td> </tr> </table>	Entrant :	Sortant :	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Pneumatiques entiers : 8,9 MWh 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Gaz : 1,56 MWh ▪ Huile : 4,17 MWh ▪ Semi-coke : 1,06 MWh
Entrant :	Sortant :				
<ul style="list-style-type: none"> ▪ Pneumatiques entiers : 8,9 MWh 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Gaz : 1,56 MWh ▪ Huile : 4,17 MWh ▪ Semi-coke : 1,06 MWh 				
IMPACTS ENVIRONNEMENTAUX DU PROCÉDÉ	<p>Lorsque réalisés dans des installations respectant les standards européens, les rejets dans l'eau et le sol sont négligeables,</p> <p>La plupart des polluants potentiels sont concentrés dans le coke et le noir de carbone (comme les métaux lourds) et dans les gaz pyrolytiques.</p> <p>Les rejets dans l'air sont essentiellement constitués de CO₂, et s'élèvent à 15-20 tonnes émises par an pour une installation d'une capacité de traitement annuelle de 5 000 tonnes.</p>				
QUANTITÉS ET NATURE DES DÉCHETS PRODUITS	<p>Les techniques de valorisation par pyrolyse permettent de valoriser la totalité du caoutchouc et ne produisent pas de déchets.</p> <p>Les déchets non décomposés en huiles ou en gaz constituent les cokes et le noir de carbone.</p>				

► ASPECTS ÉCONOMIQUES ET COMMERCIAUX

COÛT DES ÉQUIPEMENTS	<p>Les informations obtenues relatives aux coûts de mise en place d'une technologie récente respectant les normes et réglementations européennes, et produisant des huiles, gaz et cokes de haute qualité indiquent que les investissements nécessaires sont de l'ordre de 5 millions d'euros pour un module de pyrolyse d'une capacité de 5 000 tonnes par an. Cet ordre de grandeur communiqué dans le cadre de cette étude semble toutefois particulièrement élevé et ne serait pas représentatif du coût moyen d'un équipement.</p> <p>À noter que des équipements complets d'origine chinoise seraient disponibles aux alentours de 20 000 à 37 000 euros, pour une capacité de traitement de 5 à 10 tonnes de caoutchoucs et plastiques par jour (de 1 800 à 3 700 tonnes par an).</p>
COÛTS ÉNERGÉTIQUES	Environ 120 €/t de pneumatiques ⁵⁶
PRIX DE REPRISE ESTIMATIF DU CAOUTCHOUC VALORISÉ	<p>Les prix de reprise estimatifs sont les suivants :</p> <ul style="list-style-type: none"> ▪ Huile de pyrolyse : au même prix que le baril de pétrole (entre 70 et 80 € le baril) ; ▪ Gaz de pyrolyse : les gaz de pyrolyse sont généralement utilisés pour alimenter énergétiquement le procédé de pyrolyse en lui-même ; ▪ Coke et noir de carbone (intéressant essentiellement les fabricants de caoutchoucs) : <ul style="list-style-type: none"> - Coke purifié : au prix du marché actuel, soit environ de 1 € / kg - Poudre de coke utilisée comme charge dans la fabrication de caoutchouc vierge : de 120-140 €/t. <p>À noter également que les producteurs / fournisseurs de déchets s'acquittent également d'une certaine somme pour faire traiter leurs déchets :</p>

⁵⁶ Estimation effectuée sur la base d'un coût énergétique de 1 000 à 1 500 kWh/t, avec un prix de 100kWh électriques fixé à 12,80 € (source MEDDTL),

- Pneumatiques : les fournisseurs des déchets de pneumatiques payent entre 40 et 100 €/t pyrolysée.
- La collecte et le recyclage étant en règle générale financés par les éco-organismes dédiés.
- Divers déchets caoutchoutiques industriels : ces déchets sont repris gratuitement.

► QUALITÉ, RÉGLEMENTATION ET CINDYNIQUE

RISQUES INDUSTRIELS ET SANITAIRES LIÉS AU PROCÉDÉ

► RISQUES INDUSTRIELS :

Les principaux risques rencontrés sont les risques d'incendie et d'explosion.

► RISQUES SANITAIRES :

Les risques pour la santé humaine sont du même ordre que ceux rencontrés dans les procédés de raffinage du pétrole :

- pH acide
- forte teneur en métaux alcalins (dû à l'entraînement des cendres)
- fortes charges en particules (provenant de l'entraînement de résidu carboné et de cendres)

► OBSERVATIONS GÉNÉRALES

POINTS FORTS

- La concentration de l'énergie du déchet dans le coke (pyrolyse lente) ou dans les huiles de pyrolyse (pyrolyse rapide) constitue une alternative intéressante en termes de stockage de l'énergie et présente l'avantage de permettre un transport facilité
- Le bilan énergétique d'un procédé de valorisation par pyrolyse peut être positif si la combustion des gaz de pyrolyse est utilisée pour alimenter le procédé
- Grâce à la réaction en absence d'oxygène, la pyrolyse produit moins de fumée (économies réalisées sur les équipements de traitement de fumées)

POINTS FAIBLES

- Nécessité de prétraitements des déchets (séchage, broyage)
- En fonction de la qualité des déchets caoutchoutiques pyrolysés, le coke peut contenir des polluants concentrés (métaux lourds, POP, substances halogénées) : il peut être nécessaire d'engager des investissements complémentaires au niveau des installations de valorisation des cokes de pyrolyse des déchets pour effectuer un traitement adapté en accord avec la réglementation.

► SOURCES UTILISÉES

SOURCES, ORIGINES DES INFORMATIONS, CONTACTS

- Pyrolyse et gazéification des pneus hors d'usage- Recyc-Québec, 2001 : <http://www.recyc-quebec.gouv.qc.ca/upload/publications/pneus/pyrolyse.pdf>
- End life tyres: Alternative final disposal processes compared by LCA - A. Corti, L. Lombardi (2004), Dipartimento di Energetica "Sergio Stecco", Università degli Studi di Firenze, Via Santa Marta 3, Florence
- Site internet et documentations de Pyrum Innovations SAS : <http://www.pyrum.net/Home.2.0.html>
- Site internet, documentation et entretien avec GALLOO SAS
- Valorisation des déchets en combustibles, Centre Francophone de Recherche Partenariale, les Déchets et l'Environnement (CEFREPARE), 2010 : <http://www.cefrepade.org/nos-thematiques/valorisation-des-dechets-en-combustibles.html>
- Dossier « Biolyse », Société Maillot-Jeulin, 2003 : <http://www.biolyse.fr>
- Site de Ramery, page du projet Sovae : <http://www.environnement.ramery.fr/offreglobale/centre-de-valorisation/sovae.html>
- La pyrolyse pour valoriser: le noir de carbone, l'huile pyrolytique et le gaz (consulté le 16 Septembre 2011) : http://www.golden-trade.com/asp/gt_acc/default/3656/gt/recyclage-thermique-pneu-par-pyrolyse-3916-48629-cat.html
- Altreifen-Recycling, Eine Zusammenfassung wichtiger Entsorgung und Verwertungsverfahren, Kurt Reschner, 2006 : <http://www.entire-engineering.de/Altreifenrecycling.pdf>
- An assessment of the use of tires as an alternative fuel - M. J. Pegg, P. R. Amyotte, M. Fels, C.R.R. Cumming, J.C. Poushay, Department of Process Engineering and Applied Science, Canada, 2007

III.3.4 AUTRES PROCÉDÉS

Des techniques complémentaires ont été identifiées au cours de l'étude.

Elles n'ont toutefois pas toutes pu faire l'objet d'une étude détaillée dans la mesure où elles sortaient du champ de l'étude ou qu'elles ne présentaient pas un état de développement suffisant.

III.3.4.1 MÉTACTIVATION

► SYNTHÈSE

DÉNOMINATION DU PROCÉDÉ	Métactivation
TYPE DE TRAITEMENT	Mécanique
EN QUOI CONSISTE LE PROCÉDÉ	La métactivation consiste en un « microcraquage » (« microcracking ») du caoutchouc. Le procédé repose uniquement sur un traitement mécanique des déchets du caoutchouc. Il implique une compression, un cisaillement et une micro auto-explosion à basse température contrôlée.
ENTREPRISE COMMERCIALISANT LE PROCÉDÉ	Mercurhone (http://www.wasterubberactivation.org)
ZONES GÉOGRAPHIQUES OÙ LE PROCÉDÉ EST APPLIQUÉ	France
ÉTAT DE DÉVELOPPEMENT	 <p>Le brevet de la technologie de métactivation a été déposé en 2010. Les actions visant à commercialiser la technologie de métactivation ont été lancées pour la première fois en France en 2011. La technologie n'est pas encore appliquée à l'échelle industrielle.</p>
ÉVOLUTIONS ENVISAGÉES	La métactivation n'est pas encore appliquée à grande échelle : en effet, il manque encore une preuve de faisabilité à l'échelle industrielle.
FREINS	Dans la mesure où le procédé n'a pas encore été appliqué à l'échelle industrielle, les principaux freins techniques et économiques ne sont pas encore identifiés.

► BILAN MATIÈRE

FLUX ENTRANTS	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Type(s) de caoutchouc(s) : cette technologie pourrait principalement s'appliquer aux déchets de pneumatiques usagés (broyés), et à d'autres types de déchets de caoutchoucs vulcanisés, notamment NR, SBR, EPDM ▪ Format : les déchets doivent être broyés avant le traitement par métactivation ▪ Taille : granulés de 2 à 4 mm environ ▪ Critère d'exclusion : le procédé n'est normalement pas applicable aux caoutchoucs non-vulcanisés.
FLUX SORTANTS	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Format : poudrette de caoutchouc à l'état dit « métastable » ▪ Taille : les poudres issues de ce procédé ont une granulométrie de 10 à 500 µm. ▪ État de réticulation : les poudrettes métactivées « PaDa » (PArially Devulcanized and Activated) sont partiellement dévulcanisées et activées.

► PRÉPARATION / TRANSFORMATION DE LA MATIÈRE

PRINCIPE / DESCRIPTION GÉNÉRALE	La métactivation est basée sur un équipement de broyage spécifique, développé et breveté par Mercurhone (brevet EP 2 263 785 A1). Le procédé consiste en un micro-craquage mécanique suivi d'une désagrégation de la masse. Ceci aboutit à la transformation de la masse en taille plus réduite et à la modification physico-chimique et énergétique au sein du matériau d'origine.
---------------------------------	---

<p>SCHÉMATISATION, ILLUSTRATION DES OPÉRATIONS DE SÉPARATION / PURIFICATION</p>	
<p>ÉQUIPEMENTS REQUIS</p>	<p>Les équipements requis pour une unité permettant de traiter 1 200 tonnes de déchets par an sont les suivants :</p> <ul style="list-style-type: none"> ▪ Granulateur ▪ Séparateur ▪ Métactivateur (2 unités) ▪ Tamis ▪ Cyclone, tuyaux ▪ Convoyeurs à tapis, à vis ▪ Éléments d'automatisation
<p>PERFORMANCE / RENDEMENT MATIÈRE</p>	<p>Selon les informations du développeur de ce procédé, la totalité des quantités de déchets caoutchoutiques entrantes sont traitées.</p>

► **DONNÉES ENVIRONNEMENTALES ET ÉCONOMIQUES**

<p>IMPACTS ENVIRONNEMENTAUX DU PROCÉDÉ</p>	<p>Dans la mesure où le procédé est récent, aucune information quantitative n'a été identifiée concernant les impacts environnementaux de la métactivation. Selon l'entreprise développant le procédé, les impacts environnementaux seraient faibles.</p>
<p>COÛT DES ÉQUIPEMENTS</p>	<p>Coût total des équipements pour une installation permettant de traiter 1 200 tonnes de déchets par an : environ 700 000 €, dont près de 60 % pour le métactivateur.</p>
<p>PRIX DE REPRISE ESTIMATIF DU CAOUTCHOUC VALORISÉ</p>	<p>Le prix de vente de la poudre métactivée par Mercurhone est de 800 €/t.</p>

► **OBSERVATIONS GÉNÉRALES**

<p>POINTS FORTS</p>	<p>Les caractéristiques spécifiques du caoutchouc métactivé (souplesse, résistance aux chocs, résistance thermique, etc.) permettraient des applications à haute valeur ajoutée</p>
<p>POINTS FAIBLES</p>	<p>La technologie est en développement, il manque encore une preuve de faisabilité à l'échelle industrielle</p>

► **SOURCES UTILISÉES**

<p>SOURCES, ORIGINES DES INFORMATIONS, CONTACTS</p>	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Site, documentations et entretien de Mercurhone, dont demande de brevet européen EP 2 263 785 A1 pour la technologie de Métactivation (https://data.epo.org/publication-server/pdf-document?PN=EP2263785%20EP%2022263785&iDocId=7445660&iepoch=.pdf) ▪ Comportement vibro-acoustique de matériaux et structures à base de poudrettes de pneumatiques recyclés (thèse), Nicolas ROCHE, École Centrale de Lyon - 2010 (http://bibli.ec-lyon.fr/exl-doc/TH_T2208_nroche.pdf)
--	---

III.3.4.2 TECHNIQUES SPÉCIFIQUES DE TRI

Des acteurs spécialistes de la déconstruction et démolition automobile ont pu mener des travaux de recherches sur des techniques séparatives avancées permettant d'améliorer la séparation des fractions caoutchoutiques des autres fractions broyées.

Des freins d'ordre économique sont toutefois rencontrés pour le développement des techniques de tri spécifiques aux caoutchoucs : en effet, l'intérêt économique de la récupération des fractions caoutchoutiques (faible valeur marchande par rapport aux métaux en particulier) est limité, au regard des efforts techniques à mettre en œuvre.

III.3.4.3 SOLVOLYSE

Les procédés de solvololyse sont les procédés où les solvants utilisés font également office de réactifs. Ces procédés visent à décomposer les polymères en leurs monomères constitutifs, et sont particulièrement efficaces pour la décomposition des polymères condensés tels que le PET.

La littérature et les entretiens réalisés n'ont pas permis d'identifier l'existence de procédés de solvololyse de caoutchoucs, dont les spécificités (réticulation notamment) ne favorisent vraisemblablement pas l'utilisation de la solvololyse.

IV. BILAN ET SYNTHÈSE

IV.1 SYNTHÈSE DES FICHES PROCÉDÉS





Dans la mesure où la finalité de chaque technique identifiée est différente, la comparaison un à un des différents procédés est un exercice complexe.

Pour mener à bien cet objectif, une synthèse des informations importantes relatives à chaque procédé a donc tout d'abord été effectuée :

- **Caractéristiques techniques** : les principales caractéristiques techniques de chaque procédé ont été rappelées, ainsi que sa performance et son état de développement ;
- **Caractéristiques économiques** : dans la mesure du possible, les coûts de mise en place du procédé ont été rappelés, ainsi que les coûts des matières premières générées et les perspectives économiques ;
- **Caractéristiques environnementales** : les principaux impacts environnementaux ont été rappelés ;
- **Qualité, réglementation et risques** : les quelques aspects qualité, réglementaires et risques ayant été obtenus ont été synthétisés.

Le code couleur suivant a été adopté :

Tableau 13 : Code couleur du tableau comparatif

	Performance perfectible
	Performance moyenne
	Bonne performance
	Pas d'information

Une comparaison relative et qualitative des différents procédés a été proposée pour les critères suivants :

- **État de développement** : les procédés peu développés à l'échelle industrielle se sont vus attribuer une note basse ;
- **Facilité de mise en œuvre**, au regard du niveau de développement du procédé : une faible note a été attribuée aux procédés trop récents pour être appliqués à l'échelle industrielle et nécessitant des équipements très spécifiques ;
- **Coûts** : les procédés dont les coûts d'équipements et/ou les coûts énergétiques sont les plus élevés ont une notation basse ;
- **Impacts sanitaires et environnementaux** : une faible note a été attribuée aux procédés présentant les plus forts impacts sanitaires (risques sanitaires, notamment liés aux poussières) et environnementaux (consommation de ressources, déchets générés, émissions dans l'eau, l'air et le sol si disponibles) ;
- **Qualité des matières premières générées** : la note a été attribuée en fonction de l'utilisation des déchets après valorisation que les producteurs desdits déchets en ont. Si les produits valorisés présentent peu d'intérêt pour les industriels ayant produits les déchets caoutchoutiques, une faible note a été attribuée.

Le tableau ci-dessous présente un comparatif synthétique des différentes techniques identifiées, en fonction de leurs caractéristiques techniques, économiques et environnementales :

Tableau 14 : Récapitulatif des différentes techniques identifiées

TECHNIQUES		CARACTÉRISTIQUES				NOTATION				
		TECHNIQUES	ÉCONOMIQUES	ENVIRONNEMENTALES ET SANITAIRES	DÉBOUCHÉS	ÉTAT DE DÉVELOPPEMENT	FACILITÉ DE MISE EN ŒUVRE	COÛTS	IMPACTS SANITAIRES ET ENVIRONNEMENTAUX	QUALITÉ DES MATIÈRES PREMIÈRES GÉNÉRÉES
BROYAGES	BROYAGE / GRANULATION	Traitement mécanique des déchets caoutchoutiques.	Plus la granulométrie est basse, plus le coût du procédé augmente.	Impacts environnementaux a priori faibles. Impacts sanitaires liés aux poussières.	Variable (des applications TP à l'utilisation en matière première dans la fabrication de caoutchoucs).	●	●	●	●	●
	CRYOBROYAGE	Traitement mécanique des déchets, après refroidissement en dessous de leur température de transition vitreuse.	Importants coûts énergétiques en raison du maintien du système à basse température.	Impacts environnementaux non négligeables liés à l'utilisation d'azote liquide. Impacts sanitaires liés aux poussières.	Poudrettes de qualité suffisante pour une utilisation en temps que matière première secondaire dans la fabrication de caoutchoucs.	●	●	●	●	●
RÉGÉNÉRATION	PROCÉDÉS MÉCANO-THERMIQUES	Traitement des déchets dans une extrudeuse ou un moulin, avec éventuelle adjonction d'un agent de dévulcanisation.	Coûts d'investissements importants, mais a priori amortis rapidement.	Faibles impacts sur l'air, l'eau et le sol selon les industriels.	Réutilisation possible dans la fabrication de nouvelles pièces en caoutchoucs (de 10 à 70 % en fonction des applications).	●	●	●	●	●
	PROCÉDÉS BIOLOGIQUES	Traitement des déchets caoutchoutiques par des micro-organismes, en vue de leur régénération.	Développé à l'échelle industrielle par un seul acteur n'ayant pas souhaité communiquer d'information.	Flux sortants en grande majorité biodégradables.	Produits dévulcanisés et désulfurés.	●	●	●	●	●
	VALORISATION EN MILIEUX SUPERCRITIQUES	Traitement dans un fluide aux propriétés intermédiaires entre un liquide et un gaz.	Pas d'information identifiée.	En R&D, pas d'information identifiée.	Technique permettant de dévulcaniser, dépolymériser voire de décomposer complètement le caoutchouc.	●	●	●	●	●
PYROLYSE		Dégradation thermique en atmosphère pauvre en oxygène.	Coûts élevés des équipements de pyrolyse répondant aux standards européens	Impacts relativement faibles pour des équipements respectant les standards européens.	Huiles et gaz de pyrolyse pouvant être utilisés comme combustibles. Cokes et noir de carbone pouvant être utilisés en charge pour la fabrication de pièces caoutchoucs.	●	●	●	●	●

I.1 VALORISATION DES DECHETS CAOUTCHOUTIQUES EN FRANCE

Les entretiens structurants et recherches bibliographiques ont permis d'éclaircir et/ou confirmer certains aspects de la gestion et de la valorisation des déchets caoutchoutiques.

► ORGANISATION ACTUELLE ET TENDANCES

- **Part valorisation matière/valorisation énergétique :** l'importance actuelle de la valorisation des déchets caoutchoutiques serait fortement influencée par les choix stratégiques et politiques de la filière des pneumatiques usagés.

Entre 2005 et 2010, Aliapur a renforcé la part de la valorisation énergétique (de 37,7% à 43,1%), notamment vers les cimenteries, y compris à l'export. La valorisation matière arrive désormais en seconde position (40,7% des tonnages 2010).

Des études et projets sont toutefois lancés par Aliapur afin d'explorer d'autres voies de valorisation des déchets caoutchoutiques. L'éco-organisme a ainsi participé dès 2009 à plusieurs projets de R&D visant à développer les applications des granulats et broyats de pneumatiques usagés (notamment test de béton contenant des granulats de caoutchoucs, réalisé en partenariat avec Eiffage Travaux Publics). Un appel à projets a également été lancé en fin d'année 2011, en partenariat avec l'ADEME, afin d'identifier les projets et/ou voies de valorisation innovants, dans le but de promouvoir les produits et marchés de demain autour du pneu usagé.

Enfin, la question du prix de vente des granulats et broyats de caoutchouc recyclé est également cruciale dans l'équilibre économique de ces voies de valorisation : les difficultés des opérateurs de la granulation pourraient en partie être dues à un manque d'identification de débouchés à haute valeur ajoutée.

- **Mise en place de filières dédiées :** il n'existe à l'heure actuelle aucune filière pour les déchets autres que les déchets de pneumatiques et il n'y a a priori aucun travail ou réflexion en cours à ce sujet.

► VALORISATION DES CAOUTCHOUCS EN FONCTION DE LEUR ORIGINE

- **Valorisation matière des déchets de fabrication :** il est apparu que l'essentiel des procédés de valorisation matière des déchets de fabrication est réalisé **en interne**, en fonction des stratégies de gestion des déchets de chaque acteur industriel et parfois même en fonction des stratégies de chaque site industriel d'un même acteur.

Afin d'obtenir des informations complémentaires relatives aux déchets de fabrication, des industriels caoutchoutiers ont été mobilisés pour la réalisation des fiches procédés. Un faible nombre de retour a toutefois été obtenu.

- **Valorisation matière des déchets en fin de vie :** la valorisation matière des déchets caoutchoutiques en fin de vie concerne essentiellement les **pneumatiques usagés**.

Des acteurs procédant à la récupération et au broyage de déchets variés procèdent parfois à la récupération de déchets caoutchoutiques hors pneumatiques, mais semblent être minoritaires.

IV.3 FREINS ET LEVIERS

À la lumière des informations recueillies, il apparaît des freins, principalement d'ordres technique, économique et réglementaire, pour le développement des procédés de valorisation matière des déchets caoutchoutiques :

► DISPERSION DES GISEMENTS ET MÉLANGES

Afin qu'un procédé soit économiquement viable, il est nécessaire que les tonnages à traiter atteignent une quantité suffisante. Or, à l'heure actuelle, hormis les déchets de pneumatiques, et dans une moindre mesure les autres déchets caoutchoutiques issus de véhicules, les gisements de déchets caoutchoutiques sont trop dispersés et/ou générés en trop faibles quantités pour permettre la mise en place d'une unité de valorisation matière.

Un des axes de réflexion pour le développement des procédés de valorisation matière pourrait être de réfléchir à la « concentration / massification » des gisements de déchets à l'échelle locale (échelle régionale voire départementale).

À l'image de ce qui peut être fait actuellement pour certains déchets de véhicules, il serait également possible de procéder à une collecte des autres types de déchets caoutchoutiques sans distinction précise du type de caoutchouc collecté, puis de les traiter et préparer en mélange afin d'obtenir un matériau aux propriétés « moyennes ».

► DIFFICULTÉS TECHNIQUES ET VIABILITÉ ÉCONOMIQUE

Dans l'éventualité où les gisements de déchets caoutchoutiques étaient suffisants pour que l'installation d'une unité de valorisation matière soit économiquement intéressante, il apparaîtrait malgré tout des difficultés d'ordre technique dans la mesure où les caoutchoucs présentent des spécificités intrinsèques rendant complexe la mise en place de procédés de valorisation matière (réticulation et nombreux additifs notamment).

Bien que les contextes réglementaires et économiques tendent en faveur de la valorisation matière, cette voie ne sera pérenne qu'à condition que les différentes techniques soient viables économiquement. La mise en place de projets collaboratifs pour la valorisation de tous les types de déchets caoutchoutiques, où le maximum de parties prenantes seraient impliquées (fabricants de caoutchoucs, constructeurs automobiles, opérateurs de traitement, acteurs institutionnels) permettrait certainement de réaliser des économies d'échelle durant les phases de R&D.

Plusieurs pôles de compétitivité (cf. Annexe III « Liste d'acteurs identifiés ») constitués d'industriels et de centres de recherche travaillent actuellement sur la thématique de la valorisation matière des déchets caoutchoutiques. Aucune information relative à la nature et à l'avancée de ces travaux n'a toutefois pu être obtenue de la part des acteurs mobilisés au cours de l'étude.

► ASPECTS RÉGLEMENTAIRES ET RISQUES INDUSTRIELS

Outre les difficultés techniques, dans le cas où un industriel parviendrait à mettre en place un procédé économiquement et techniquement viable de valorisation matière de déchets caoutchoutiques, il lui faudrait également pouvoir répondre aux réglementations européennes et nationales en vigueur (notamment pour les dossiers d'enregistrement REACH de mélanges caoutchoutiques, pour les limitations liées aux polluants organiques persistants, etc.).

Une des principales difficultés d'ordre cyndinique est le **risque incendie**. En effet, une des explications pouvant être mises en avant pour l'explication de la diminution de la part de valorisation matière par rapport à la valorisation énergétique est la diminution du nombre d'acteurs procédant à la récupération et au traitement des déchets caoutchoutiques (granulateurs notamment), et il est apparu au moins deux cas d'incendies importants ayant occasionné la fermeture de sites de granulateurs.

V. CONCLUSION

Cette étude a permis dans un premier temps de collecter, consolider et synthétiser les données concernant les gisements potentiels et les filières de collecte des déchets caoutchoutiques en France.

L'analyse de ces informations a permis de confirmer, d'une part, que l'essentiel du gisement collecté séparément et traité était constitué majoritairement de déchets de pneumatiques et, d'autre part, que la valorisation matière de ces déchets ne représentait pas la voie de valorisation préférentielle en France.

Ces travaux ont également permis de déterminer que la valorisation des déchets de fabrication n'était pas uniformisée à l'échelle du territoire, voire des différents sites de production d'un même acteur industriel.

Les procédés de valorisation existants ont été répertoriés dans un second temps. Trois groupes principaux de techniques ont été analysés : broyage / granulation, procédés de régénération, pyrolyse.

Il est apparu à l'issue de l'analyse des techniques identifiées que le niveau de développement de chacune de ces techniques était extrêmement variable, et que ce dernier dépendait essentiellement du coût de mise en place de ces procédés, plus que d'obstacles d'ordres scientifique et technique.

En effet, bien que les gisements de déchets caoutchoutiques puissent être suffisants pour le développement de la valorisation matière, les coûts de reprise de la matière valorisée par les méthodes classiques développées à l'échelle industrielle dépassent en règle générale le coût de la matière vierge, pour une qualité parfois moindre.

L'analyse des techniques en développement au cours de cette étude, couplée aux contextes économique et environnementaux actuels tendant à l'économie de matière première, permet toutefois d'envisager une inversion de cette tendance pour les prochaines années.

VI. GLOSSAIRE

TERME(S)	DÉFINITION
Élastomère	Désigne un polymère à caractère amorphe ou cristallin présentant des propriétés remarquables en termes d'élasticité, d'amortissement et d'étanchéité. Un élastomère est un polymère thermoplastique rendu thermodurcissable après vulcanisation.
Macromolécule	Molécule de masse moléculaire élevée, constituée de monomères.
Mesh	Échelle granulométrique
Monomère	Molécule constitutive de base, de masse moléculaire faible.
Polymère	Substance composée de macromolécules.
Réticulation	Création par voie chimique ou physiques de chaînes entre les macromolécules d'un polymère, afin d'aboutir à la formation d'un ou plusieurs réseaux tridimensionnels.
Température de transition vitreuse	Température en dessous de laquelle un polymère est dur et cassant.
Thermodurcissable	Désigne un polymère ne pouvant être mis en œuvre qu'une seule fois et qui devient infusible et insoluble après polymérisation (leur forme ne peut plus être modifiée après durcissement). Les thermodurcissables sont mis en forme par moulage, au cours duquel la polymérisation peut être engendrée par une augmentation de la température, l'action de radiations, ou de produits chimiques.
Thermoplastique	Désigne un polymère susceptible d'être ramolli par chauffage et durci par refroidissement, et ce, de manière répétée. À l'état ramolli, les polymères thermoplastiques peuvent être mis en forme par injection, extrusion ou moulage. À l'inverse des thermodurcissables, les thermoplastiques peuvent être modelés et transformés sans réaction chimique.
Vulcanisation	La vulcanisation est une forme de réticulation qui consiste à incorporer un agent vulcanisant (soufre principalement) à un élastomère brut avant cuisson. La vulcanisation d'élastomères permet d'en améliorer la résistance et les propriétés mécaniques.

ANNEXES

Annexe I. ENQUÊTE INSEE 2008 - MÉTHODOLOGIE

Les établissements enquêtés sont tous les établissements exerçant une activité de fabrication et appartenant au champ de l'enquête⁵⁷ :

- Usines, ateliers, chantiers permanents où s'exerce une activité d'extraction, de fabrication ou de transformation ;
- Établissements exerçant des activités de réparation, d'installation ou de montage-assemblage.

Les établissements exclus du champ de cette enquête sont les suivants : bureaux, entrepôts, magasins de vente, laboratoires d'essais et tous les établissements « auxiliaires » de l'industrie sont exclus du champ de cette enquête.

Les caractéristiques de cette enquête sont les suivantes :

- **Taille de l'échantillon** : environ 12 000 établissements⁵⁸.

Font partie de l'échantillon enquêté les établissements :

- de 10 salariés et plus pour l'industrie agroalimentaire et les scieries ;
- de 20 salariés et plus pour le reste de l'industrie ;

NB : les établissements de plus de 100 employés ont été enquêtés exhaustivement, les données des gros producteurs de pièces en caoutchoucs sont donc a priori incluses.

- **Déchets concernés** : les déchets non dangereux concernés sont les suivants :

- | | |
|---|--|
| • Papiers ; | • Déchets verts ; |
| • Papiers-cartons en mélange ; | • Déchets alimentaires ; |
| • Textiles ; | • Déchets en mélange ; |
| • Cuir ; | • Verre ; |
| • Pneumatiques ; | • Plastiques ; |
| • Autres caoutchoucs ; | • Cartons ; |
| • Bois : palettes, cassettes, copeaux et sciures, bois en mélange ; | • Boues de STEP ; |
| • Minéraux ; | • Autres boues ; |
| • Équipements hors d'usage hors DEEE ; | • Déchets organiques d'origine animale ; |
| • VHU ; | • Autres déchets organiques. |

Cette enquête permet de déterminer les quantités de déchets produites, la nature du collecteur ainsi que le mode de traitement.

- **Taux de réponse** : le taux de réponse s'élève à 91 %.

⁵⁷ Appartiennent au champ de l'enquête les établissements dont l'APE relève des codes NAF Rev2 : 05 à 33 (sauf 12 - fabrication de produits à base de tabac)

⁵⁸ Dont 1500 appartenant à l'industrie agro-alimentaire

ANNEXE II. BIBLIOGRAPHIE

BIBLIOGRAPHIE

IDENTIFICATION DU DOCUMENT						
Titre	Organisme	Auteur(s)	Nature du document	Année	Source	Lien permettant d'accéder au document
(EP0997252) Caoutchouc régénéré et procédé pour régénérer du caoutchouc vulcanisé	Bridgestone	IZUMOTO RYUJI OHSHIMA NOBUMITSU	Brevet	2000	WIPO	http://www.wipo.int/patentscope/search/en/detail.jsf?docid=EP13323252
(EP1130050) Caoutchouc régénéré et son procédé de fabrication	Bridgestone	AKIYAMA SETSUO SHIRASAKA JINGO OHSHIMA NOBUMITSU	Brevet	2001	WIPO	http://www.wipo.int/patentscope/search/en/detail.jsf?docid=EP13587098
(EP1144493) PROCEDE DE PRODUCTION D'UN MELANGE D'ELASTOMERES SEMBLABLE A DES ELASTOMERES THERMOPLASTIQUES AU MOYEN DE CAOUCCHOUC REGENERE OU DE DECHETS DE CAOUCCHOUC		MICHAEL HANNES SCHOLZ HENRIK	Brevet	2001	WIPO	http://www.wipo.int/patentscope/search/en/WO2011076192
(EP1242520) MODIFIER FOR DEVULCANIZATION OF CURED ELASTOMERS, MAINLY VULCANIZED RUBBER AND METHOD FOR DEVULCANIZATION BY MEANS OF THIS MODIFIER	LEVGUM	BEIRAKH LEV KOPYLOV MICHAEL GOLDSTEIN VADIM	Brevet	2002	WIPO	http://www.wipo.int/patentscope/search/en/detail.jsf?docid=EP13801238
(EP2263785) Metactivator	Mercurhone	YI Beom-Jun	Brevet	2010	WIPO	http://www.wipo.int/patentscope/search/en/detail.jsf?docid=EP11213517
(WO2001029122) MODIFIER FOR DEVULCANIZATION OF CURED ELASTOMERS, MAINLY VULCANIZED RUBBER AND METHOD FOR DEVULCANIZATION BY MEANS OF THIS MODIFIER	LEVGUM	BEIRAKH, Lev; KOPYLOV, Michael; GOLDSTEIN, Vadim	Brevet	2000	WIPO	http://www.wipo.int/patentscope/search/en/WO2001029122
(WO2011004079) POWDERED METASTABLE POLYMER MATERIAL	Mercurhone	YI Beom-Jun	Brevet	2010	WIPO	http://www.wipo.int/patentscope/search/en/WO2011004079
(WO2011016231) METHOD FOR PRODUCING RECLAIMED TIRE	Bridgestone	INUKAI, Takaki MIKAMO, Nobuyoshi	Brevet	2010	WIPO	http://www.wipo.int/patentscope/search/en/detail.jsf?docid=WO2011016231
(WO2011076192) PROCÉDÉ DE BROYAGE DE MATIÈRES SOLIDES ÉLASTOMÈRES ET THERMOPLASTIQUES EN VUE DE LEUR RECYCLAGE	URBAN GMBH	BECKMANN, Jörg SCHUSTER, Robert, Hans	Brevet	2010	WIPO	http://www.wipo.int/patentscope/search/en/WO2011076192
15 - Recycling of Rubbers	Institute of Polymer Engineering The University of Akron, Ohio	ISAYEV, Avraam I.	Livre	2005	Science Direct	http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B9780124647862500183
A novel cryogenic grinding system for recycling scrap tire peels	College of Chemical Engineering, Dalian University of Technology, Dalian, 116012, PRC 2 Department of Laboratory M&E, Dalian University of Technology, Dalian, 116012, PRC	S. B. LIANG ^{1,2} and Y. C. HAO	Article scientifique	1999		
Aliapur, rapport d'activité 2010	Aliapur	Aliapur	Publication périodique	2011	Aliapur	http://www.aliapur.fr/media/files/societe/PDF/Rapport_Aliapur_2010_fr.pdf
Allergie aux gants médicaux : une liste de gants disponibles sur le marché français	INRS	MEYER A., PILLIERE F., BALTY I., FALCY M	Étude	1997	INRS	http://www.inrs.fr/html/allergies_gants_medicaux_liste_gants_disponibles.html
An analysis of plastics consumption and recovery in Europe 2000	Plastics Europe	-	Publication périodique	2002	Plastics Europe	http://plieweb.plasteurope.com/members/pdf/PIE5139.PDF
An analysis of plastics consumption and recovery in Europe 2001-2002	Plastics Europe	-	Publication périodique	2003	Plastics Europe	http://www.cie.gov.pl/publikacje/tpwue_2007/Sektor_przetwarzania/Inne%20dokumenty/raporty%20APME/01_Analiza%20o%20nsumciii2001-2002.pdf
An assessment of the use of tires as an alternative fuel	Department of Process Engineering and Applied Science Faculty of Engineering, Dalhousie University PO Box 1000, Halifax, NS, Canada B3J 2X4	Michael J. Pegg, PhD, P. Eng., Paul R. Amyotte, PhD, P. Eng., Mort Fels, PhD, P. Eng., Crysta R.R. Cumming and Jacqueline C. Poushay	Étude	2007		http://www.gov.ns.ca/nse/waste/docs/TireUseAlternativeFuelAssessment.pdf
An efficient method of material recycling of municipal plastic waste	Institute of Macromolecular Chemistry, Academy of Sciences of the Czech Republic	Fortelný I., Micháková D., Kruli Z.	Article scientifique	2004	Science Direct	http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S014139100400165X
An initial investigation of the use of a rubber waste (EPDM) in asphalt concrete mixtures	(a) Department of Civil & Environmental Engineering, Louisiana State University, Baton Rouge, USA (b) Department of Civil & Environmental Engineering, Louisiana State University, Baton Rouge, LA 70803, USA (c) W L Burle Engineers, P.A., Greenville, MS 38701, USA	(a) : Metcalf J. B. (b) Gopalakrishnan K. (c) Waters M. D.	Article scientifique	2000	Science Direct	http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0713274300801026
An Overview of Rubber Recycling	(1) Hari Shankar Singhania Elastomer and Tyre Research Institute (HASETRI), Jaykaygram, P.O. TyreFactory, Rajsamand -313 342, Rajasthan, INDE (2) R&D Centre, J.K. Tyre, Jaykaygram, P.O. Tyre Factory, Rajsamand, Rajasthan, INDE (3) Department of Polymer Science, Mohanlal Sukhadia University, Udaipur -313 001, Rajasthan, INDE	(1) : BANDYOPADHYAY S.,AGRAWAL S. L., AMETA R., DASGUPTA S., MUKHOPADHYAY R. (2) : DEURI A. S. (3) : AMETA Suresh C., AMETA Rakshit	Article scientifique	2008	INIST	http://cat.inist.fr/?aModele=afficheN&cpsidt=20398106
Annuaire des produits recyclés - Du matériau récupéré au produit recyclé : le caoutchouc et les pneumatiques	Cercle National du Recyclage, ADEME	-	Site/page internet	Pas d'information	Produits-Recyclés.com	http://www.produits-recycles.com/materiau/caout01.htm
Application du caoutchouc	SNCP	-	Site/page internet	2009	SNCP	http://www.lecaoutchouc.fr/IMG/pdf/Applications_du_caoutchouc.pdf
Bulletin mensuel de statistiques industrielles - 2006	INSEE	-	Publication périodique	2006	INSEE	http://www.insee.fr/sepsi/enquetes/smb/bmsi/janvier_2006/caoutchouc355.pdf
Campagne de démontage et de broyage de 304 VHU et étude des flux de matériaux issus du traitement	ADEME	ENVIRONNEMENT & SOLUTIONS	Étude	2008	ADEME	http://www2.ademe.fr/servelet/getDoc?cid=96&m=3&id=57166&p1=00&p2=05&ref=17597
Caoutchoucs synthétiques: procédés et données économiques	Editions TECHNIP	Jean-Pierre Arlie	Livre	1980	Editions TECHNIP	http://books.google.com/books?hl=en&lr=&id=WU2180AIwC&oi=fnd&pg=PA9&dq=caoutchoucs+recyclage&ots=uTasDe2-SN&sig=eb4f-6wSPMNCOPUjgrA2XPVY#v=onepage&q=caoutchoucs%20recyclage&f=false
Chemical kinetics of vulcanisation and compression set	National Rubber Research Programme, IRAD Ekona Regional Centre, PMB 25 Buea, Cameroon b School of Polymer Technology, University of North London, 220 Holloway Road, London N7 8DB, UK	Ejolle E. Ehabé a*,1, Saeed A. Farid	Article scientifique	1999	European Polymer Journal	

Comportement vibroacoustique des structures élaborées à partir de poudrettes de pneus recyclés	Thèse	Ameur CHETTAH	Thèse	2008	Thèse	http://ebureau.univ-reims.fr/slide/files/quotas/SCD/theses/exl-doc/GED0000957.pdf
Contrôle du marché des gants médicaux en latex de caoutchouc naturel	Afssaps	Afssaps	Site/page internet	2004	Afssaps	
Cours des caoutchoucs naturels	SNCP		Publication périodique	2011	SNCP	http://www.lecaoutchouc.fr/IMG/pdf/Cours_RSS3_mois_par_mois-2.pdf
CRYOGENIC FINE GRINDING OF RUBBER FROM USED TIRES	Hosokawa Polymer System		Autre	Pas d'information		http://www.polysys.com/pdf/newpdf/tires.pdf
Cure characteristics and mechanical properties of Butadiene rubber/whole tyre reclaimed rubber blends	Progress in rubber, plastics and recycling technology ISSN 1477-7606 2002, vol. 18, no2, pp. 85-97	NELSON P. A. KUTTY S. K. N.	Article scientifique	2002	Progress in rubber, plastics and recycling technology ISSN 1477-7606 2002, vol. 18, no2, pp. 85-97	http://cat.inist.fr/?aModele=afficheN&cpsid=13711072
De quoi se compose un pneu de vélo?	Schwable	Schwable	Site/page internet	2011	Schwable	http://www.schwable.com/fr/fr/technik_info/reifenbau/index.php5?flash=1&gesamt=9&ID_Land=7&ID_Sprache=5&ID_Seite=382&tn_mainPoint=Technik&tn_subPoint=
Déchets de production et déchets en fin de vie	SNCP	-	Site/page internet	Pas d'information	SNCP	http://www.lecaoutchouc.fr/spip.php?page=rubrique-public&id_rubrique=127
Depolymerization of tire and natural rubber using supercritical fluids	3M Corporate Research	Daniel T. Chen, Craig A. Perman, Manfred E. Riechert, John Hoven	Article scientifique	2000		http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S030438949500047X
Devulkanisation von schwefelvulkanisierten Elastomerabfällen : eine neue Technologie = Devulcanization of sulfur cured elastomer scrap : A new technology	Gummi, Fasern, Kunststoffe ISSN 0176-1625 CODEN GFKUED 1998, vol. 51, no5, pp. 432-436	KOHLER R. O'NEILL J.	Article scientifique	1998	Gummi, Fasern, Kunststoffe ISSN 0176-1625 CODEN GFKUED 1998, vol. 51, no5, pp. 432-436	http://cat.inist.fr/?aModele=afficheN&cpsid=2244344
Dictionnaire des câbles d'alimentation			Site/page internet	2010		http://www.forum-cable.org/viewtopic.php?t=7&t=77
Die Wiederverarbeitung von Gummiabfällen - ein Recycling-Konzept = The reuse of rubberscrap - a recycling concept	Gummi, Fasern, Kunststoffe ISSN 0176-1625 CODEN GFKUED 1995, vol. 48, no6, pp. 398-404 (6 ref.)	DIERKES W.	Article scientifique	1995	Gummi, Fasern, Kunststoffe ISSN 0176-1625 CODEN GFKUED 1995, vol. 48, no6, pp. 398-404 (6 ref.)	http://cat.inist.fr/?aModele=afficheN&cpsid=3562086
Discarded tire recycling practices in the United States, Japan and Korea	Korea Interfacial Science and Engineering Institute, Seoul, South Korea The Korean Institute of Resources Recycling, Seoul, South Korea Central Research Institute, Mitsubishi Materials Corporation, Omiya, Japan	Ji-Won Jang, , Taek-Soo Yoo, Jae-Hyun Oh, Iwao Iwasaki	Article scientifique	1997		http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0921344997000414
Dynamic devulcanization and dynamic vulcanization for recycling of crosslinked rubber	KGK. Kautschuk, Gummi, Kunststoffe ISSN 0948-3276 2006, vol. 59, no7-8, pp. 405-411	FUKUMORI K. MATSUSHITA M. MOURI M. OKAMOTO H. SATO N. TAKEUCHI K. SUZUKI Y.	Article scientifique	2006	KGK. Kautschuk, Gummi, Kunststoffe ISSN 0948-3276 2006, vol. 59, no7-8, pp. 405-411	http://cat.inist.fr/?aModele=afficheN&cpsid=18023294
End life tyres: Alternative final disposal processes compared by LCA	Dipartimento di Energetica "Sergio Stecco", Università degli Studi di Firenze	A. Corti, L. Lombardi	Article scientifique	2004		http://www.aitec-ambiente.org/Portals/2/docs/public/Documenti/Raccolta%20bibliografica/AITEC_CESI&P_Stat%20arte%20%20letteratura/cort%202004_pneumatici_RE.pdf
Enquête annuelle de production dans l'industrie 2008 : Fabrication d'autres articles en caoutchouc	INSEE	-	Publication périodique	2008	INSEE	http://www.insee.fr/fr/ppp/bases-de-donnees/donnees-detaillees/eap_2008/tableaux/2219.xls
Enquête annuelle de production dans l'industrie 2008 : Fabrication et rechapage de pneumatiques	INSEE	-	Publication périodique	2008	INSEE	http://www.insee.fr/fr/ppp/bases-de-donnees/donnees-detaillees/eap_2008/tableaux/2211.xls
Enquête annuelle de production dans l'industrie 2009 - Industrie chimique : Fabrication de caoutchouc synthétique	INSEE	-	Publication périodique	2009	INSEE	http://www.insee.fr/fr/ppp/bases-de-donnees/donnees-detaillees/eap/tableaux2009/2017.xls
Enquête annuelle de production dans l'industrie 2009 - Industrie chimique : Fabrication de colles	INSEE	-	Publication périodique	2009	INSEE	http://www.insee.fr/fr/ppp/bases-de-donnees/donnees-detaillees/eap/tableaux2009/2052.xls
Enquête mensuelle de branche dans l'industrie (2010) : Autres articles en caoutchouc	INSEE	-	Publication périodique	2010	INSEE	http://www.insee.fr/fr/ppp/bases-de-donnees/donnees-detaillees/indus-fiche-produit/pdf/F2121925.pdf
Enquête mensuelle de branche dans l'industrie (2010) : Chimie organique hors matières plastiques de base et caoutchouc synthétique	INSEE	-	Publication périodique	2010	INSEE	http://www.insee.fr/fr/ppp/bases-de-donnees/donnees-detaillees/indus-fiche-produit/pdf/F201425.pdf
Enquête mensuelle de branche dans l'industrie (2010) : Courroies et bandes transporteuses	INSEE	-	Publication périodique	2010	INSEE	http://www.insee.fr/fr/ppp/bases-de-donnees/donnees-detaillees/indus-fiche-produit/pdf/F2121924.pdf
Enquête mensuelle de branche dans l'industrie (2010) : Machines pour le travail du caoutchouc ou des plastiques	INSEE	-	Publication périodique	2010	INSEE	http://www.insee.fr/fr/ppp/bases-de-donnees/donnees-detaillees/indus-fiche-produit/pdf/F289621.pdf
Enquête mensuelle de branche dans l'industrie (2010) : Noirs de carbone	INSEE	-	Publication périodique	2010	INSEE	http://www.insee.fr/fr/ppp/bases-de-donnees/donnees-detaillees/indus-fiche-produit/pdf/F201385.pdf
Enquête mensuelle de branche dans l'industrie (2010) : Plaques, feuilles, bandes, baguettes et profilés en caoutchouc	INSEE	-	Publication périodique	2010	INSEE	http://www.insee.fr/fr/ppp/bases-de-donnees/donnees-detaillees/indus-fiche-produit/pdf/F2121921.pdf
Enquête mensuelle de branche dans l'industrie (2010) : Pneumatiques pour camions, autocars, avions et engins de génie civil	INSEE	-	Publication périodique	2010	INSEE	http://www.insee.fr/fr/ppp/bases-de-donnees/donnees-detaillees/indus-fiche-produit/pdf/F2121171.pdf
Enquête mensuelle de branche dans l'industrie (2010) : Pneumatiques pour voitures	INSEE	-	Publication périodique	2010	INSEE	http://www.insee.fr/fr/ppp/bases-de-donnees/donnees-detaillees/indus-fiche-produit/pdf/F2121173.pdf
Enquête mensuelle de branche dans l'industrie (2010) : Production de butadiène	INSEE	-	Publication périodique	2010	INSEE	http://www.insee.fr/fr/ppp/bases-de-donnees/donnees-detaillees/indus-fiche-produit/pdf/F201423.pdf
Enquête mensuelle de branche dans l'industrie (2010) : Tubes et tuyaux caoutchouc	INSEE	-	Publication périodique	2010	INSEE	http://www.insee.fr/fr/ppp/bases-de-donnees/donnees-detaillees/indus-fiche-produit/pdf/F2121922.pdf
Enquête sur la production de déchets non dangereux dans l'industrie en 2008	INSEE	-	Publication périodique	2008	INSEE	http://www.insee.fr/fr/ppp/bases-de-donnees/donnees-detaillees/dechets/xls/2008/T9.xls

Enrobés non-bruyants pour couches de roulement utilisant des poudrettes de caoutchouc issues du recyclage des pneumatiques usagés = Low-noise asphalt concrete for wearing course using crumb rubber powder from used tyres	Symposium international sur les caractéristiques de surface des chaussées routières et aéronautiques No4, Nantes , FRANCE (22/05/2000) International symposium on pavement surface characteristics of roads and airfields No4, Nantes , FRANCE (22/05/2000) 2000 , pp. 367-382[Note(s) : [551 p.]] (5 ref.) ISBN 2-84060-131-1	BALLIE Michel	Article scientifique	2000	Symposium international sur les caractéristiques de surface des chaussées routières et aéronautiques No4, Nantes , FRANCE (22/05/2000) International symposium on pavement surface characteristics of roads and airfields No4, Nantes , FRANCE (22/05/2000) 2000 , pp. 367-382[Note(s) : [551 p.]] (5 ref.) ISBN 2-84060-131-1	http://cat.inist.fr/?aModele=afficheN&cpsidt=1141587
Etude des mécanismes de recyclage des caoutchoucs provenant des déchets de pneus	Annales de chimie (Paris. 1914) A. 2008, vol. 33, n° 3, pp. 179-188	NADAL Antonio FERRER Carlos MONZO Matias LOPEZ Juan	Article scientifique	2008	Annales de chimie (Paris. 1914) A. 2008, vol. 33, n° 3, pp. 179-188	http://www.refdoc.fr/Detailnotice?darticle=345912
Euphorie sur le front des matières premières European Rubber Journal	Le Figaro	-	Site/page internet	2011	Le Figaro	http://www.lefigaro.fr/matieres-premieries/2011/05/17/04012-20110517ARTF000691-euphorie-sur-le-front-des-matieres-premieries.php
Feedstock recycling of synthetic and natural rubber term by pyrolysis in a fluidized bed	Journal of Analytical and Applied Pyrolysis Volume 85, Issues 1-2, May 2009, Pages 334-337	Walter Kaminsky Carsten Mennericha Zie Zhang	Article scientifique	2008	Journal of Analytical and Applied Pyrolysis Volume 85, Issues 1-2, May 2009, Pages 334-337	http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0165237008001885
Granulation et broyage de caoutchouc vulcanisé	Plastiques & élastomères magazine A. 2003, vol. 55, n° 3, pp. 39-41	PREVIERO Dario	Article scientifique	2003	Plastiques & élastomères magazine A. 2003, vol. 55, n° 3, pp. 39-41	http://www.refdoc.fr/Detailnotice?darticle=8904908
Indice des prix internationaux des matières premières importées - en devises - Caoutchouc naturel	INSEE	INSEE	Publication périodique	2011	INSEE	http://www.indices.insee.fr/bsweb/servlet/bsweb?action=BS_SERIE&ONGLET=2&BS_IDBANK=810651&BS_IDARBO=180000000000
Inventory of existing information on recycling of selected waste materials	European Environment Agency European Topic Centre on Waste and Material Flows	JACOBSEN Henrik, BRODERSEN Jens, KRISTENSEN Karen, HEDAL NIELSEN Nanja	Étude	2004	European Environment Agency European Topic Centre on Waste and Material Flows	http://eea.eionet.europa.eu/Public/rc/eionet-circle/etc_waste/library/working_papers/inventory_information/_EN_1.0_8a-d
La chimie de base en chiffres	INSEE	INSEE	Article scientifique	2008	INSEE	http://www.insee.fr/esssi/publications/dossiers Sect/pdf/chimie08.pdf
La cryogénie au service du recyclage = Cryogenics in recycling service	Caoutchoucs & plastiques ISSN 1154-1105 CODEN RCPLAS 1999, no 781, pp. 54-63 (9 p.) (bibl.: dissem.), pp. 65-68	GUJRAL P.	Article scientifique	1999	Caoutchoucs & plastiques ISSN 1154-1105 CODEN RCPLAS 1999, no 781, pp. 54-63 (9 p.) (bibl.: dissem.), pp. 65-68	http://cat.inist.fr/?aModele=afficheN&cpsidt=1272437
La plasturgie en chiffres	Ministère de l'économie de l'industrie et de l'emploi	-	Publication périodique	2008	MINEFI	http://www.industrie.gouv.fr/esssi/publications/dossiers Sect/pdf/plasturgie08.pdf
Le caoutchouc industriel : la face cachée des élastomères	INSEE	-	Étude	2003	INSEE	http://www.insee.fr/esssi/4pages/pdf/4p176.pdf
Le caoutchouc naturel possède des propriétés incontournables que les élastomères fabriqués à partir du pétrole ne parviennent pas à égaler.	Le Figaro	Le Figaro	Article scientifique	2010	Le Figaro	http://www.lefigaro.fr/matieres-premieries/2010/08/15/04012-20100815ARTF000204-la-demande-de-caoutchouc-reste-tres-forte-dans-le-monde.php
Le nouveau système de classification et d'étiquetage des produits chimiques	INRS	-	Site/page internet	2009	INRS	
Le pneu recyclé entre dans la construction = The recycled tire enters into the construction industry	Le Moniteur des travaux publics et du bâtiment ISSN 0026-9700 CODEN MTPUAS 2005, noJUN, NS,	DONNAES Philippe	Article scientifique	2005	Le Moniteur des travaux publics et du bâtiment ISSN 0026-9700 CODEN MTPUAS 2005, noJUN, NS,	http://cat.inist.fr/?aModele=afficheN&cpsidt=16842809
Le recyclage des déchets de polymères réticulés = Recycling of crosslinking polymers wastes	Caoutchoucs & plastiques ISSN 1154-1105 CODEN RCPLAS 1993, no727, pp. 59-62 (15 ref.)	DELMAS M.	Article scientifique	1993	Caoutchoucs & plastiques ISSN 1154-1105 CODEN RCPLAS 1993, no727, pp. 59-62 (15 ref.)	http://cat.inist.fr/?aModele=afficheN&cpsidt=3943563
Le recyclage du caoutchouc	HELMo Gramme	?	Autre	?	HELMo	http://www.gramme.be/unit9/pmwiki/uploads/PrG0910/recyclagecaoutchouc.pdf
L'élimination et la valorisation des pièces en caoutchouc usagées de l'automobile. Valorisation des pneus usagés	Conférence : Elastomères et automobiles. Congrès, FRA, 1995 02-23	BRUN	Article scientifique	1995	Conférence : Elastomères et automobiles. Congrès, FRA, 1995-02-23	http://www.refdoc.fr/Detailnotice?darticle=16353200
Les déchets de A à Z : les pneumatiques usagés	AREC Poitou-Charentes	-	Site/page internet	Pas d'information	AREC PC	http://www.arecpc.com/artisan/dechet/pneu.html
Les élastomères	Exventys	Exventys	Site/page internet	2011	Exventys	http://www.exventys.com/crbs1_6.html#anchor-top
Les filières de récupération et de valorisation des déchets banals : les pneumatiques usagés	AREC Poitou-Charentes	-	Site/page internet	Pas d'information	AREC PC	http://www.arecpc.com/guide/dlb/pneu.html
Les pneumatiques usagés	AREC PC	Agence Régionale d'évaluation Environnement et Climat	Site/page internet	2005	AREC PC	http://www.arecpc.com/guide/dlb/pneu.html
Les pneus et les pneumatiques	David Schmitt in http://atulu.com/wordpress/atulu/histoire-de-pneus/ lejournaldunet/management	ConsoGlobe	Site/page internet	2010	David Schmitt in http://atulu.com/wordpress/atulu/histoire-de-pneus/ lejournaldunet/management	http://www.encyclo-ecolo.com/Pneu%28%29_et_pneumatique
Les substances chimiques des gazons synthétiques extérieurs: un risque pour la santé des utilisateurs?	Institut de santé publique du Québec	Monique Beausoleil Karine Price Caroline Muller	Site/page internet	2008	Institut de santé publique du Québec	http://www.inspq.qc.ca/bise/post/Les-substances-chimiques-des-gazon-synthetiques-exterieurs-un-risque-pour-la-sante-des-utilisateurs.aspx
Mechanochemical devulcanization of vulcanized gum natural rubber	JANA G. K. ; DAS C. K.		Article scientifique	2005	INIST	
Microbial desulfurization of ground tire rubber by Thiobacillus ferrooxidans	Key Laboratory of Beijing City on Preparation and Processing of Novel Polymer Materials, Beijing University of Chemical Technology, Beijing, China b College of Life Science and Technology, Beijing University of Chemical Technology, Beijing, China	Yuanhu Li a, Suhe Zhao a,*, Yaqin Wang b	Article scientifique	2011		

Microbial Desulfurization of Ground Tire Rubber by Thiobacillus ferrooxidans	Key Laboratory of Beijing City on Preparation and Processing of Novel Polymer Materials, Beijing University of Chemical Technology, Beijing, China College of Life Science and Technology, Beijing University of Chemical Technology, Beijing, China	Yuanhu Li, Suhe Zhao, Yaqin Wang	Article scientifique	2011		http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0141391011002242
Modelling a continuous devulcanization in an extruder	Chemical Engineering Department, University of Groningen, Nijenborgh 4, 9747 AG Groningen, The Netherlands	P. Sutanto, F. Picchioni, L.P.B.M. Janssen	Article scientifique	2006		http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0092506006004258
Natural rubber biosynthesis—A living carbocationic polymerization?	Department of Polymer Science, The University of Akron, 170 University Avenue, Akron, OH 44325, USA Laboratoire de Chimie des Polymères Organiques, CNRS-ENSCP, 16 Avenue Pey-Berland, 33607 Pessac Cedex, France	J.E. Puskasa, E. Gautriauda, A. Deffieux, J.P. Kennedy	Article scientifique	2006		
New technology of crumb rubber compounding for recycling of waste tires	Journal of applied polymer science A. 2000, vol. 78, n° 8, pp. 1573-1577	JIN KUK KIM SUNG HYO LEE	Article scientifique	2000	Journal of applied polymer science A. 2000, vol. 78, n° 8, pp. 1573-1577	http://www.refdoc.fr/Detaillnotice?darticle=11139612
Observatoire de la Filière Pneumatiques Usagés - Situation en 2007	ADEME	Ernst & Young	Publication périodique	2008	ADEME	http://www2.ademe.fr/servelet/getBin?name=84D880870084DAA93589086C7EBF3FC1233574149467.pdf
Observatoire de la Filière Pneumatiques Usagés - Situation en 2008	ADEME	Ernst & Young	Publication périodique	2009	ADEME	http://www2.ademe.fr/servelet/getBin?name=C8287FBFD93EC403D7D7448644635EA1261144209333.pdf
Observatoire de la Filière Pneumatiques Usagés - Situation en 2009	ADEME	Ernst & Young	Publication périodique	2010	ADEME	http://www2.ademe.fr/servelet/getBin?name=BA0E4E483DB3057461F345E698A81A3D1286198049339.pdf
Panorama de l'industrie française française, édition 2009 - F45 Caoutchouc	INSEE	-	Publication périodique	2009	INSEE	http://insee.fr/fr/themes/detail.asp?ref_id=panorama-industrie&page=donnees-detailles/panorama-industrie/F45_v.htm
Perspectives on the contributions of Michael Szwarc to living polymerization	Chemistry Department, State University of New York College of Environmental Science and Forestry, Forestry Drive, Syracuse, NY 13210, USA Katholieke Universiteit Leuven, Department of Chemistry, Laboratory of Macromolecular & Physical Organic Chemistry, Celestijnenlaan 200F, Louvain, B-3001 Belgium Clower Hydrocarbon Research Institute and Department of Chemistry, University of Southern California, University Park, Los Angeles, CA 90089-1661, USA	Johannes Smida, Marcel Van Beylen, Theo E. Hogen-Esch,	Article scientifique	2006		
Pneumatiques et caoutchouc	CDZE	CDZE	Site/page internet	2011	CDZE	http://www.cdze.com/sections/fr/bourse/liste_des_dechets/fiches_dechets/pneumatiques_caoutch/
Pneus poids lourds: notations élémentaires	Continental	Continental	Publication périodique	2006	Continental	http://www.conti-online.com/generator/www/be/nl/continental/transport/general/tech_info/reifengrundlagen_pdf_nl.pdf
Poudre de caoutchouc issue du broyage de pneumatiques usagés améliorant la durabilité des bétons aux cycles gel-dégel = Caoutchouc fine powder, from used tyre grinding, improve freeze thaw cycle concrete durability		MORICONI F. ANTOINE P. VINCENT D.	Article scientifique	1991	INIST	http://cat.inist.fr/?aModele=afficheN&cpsidt=5102592
Preparation of mesoporous and macroporous materials from rubber term of tyre wastes	Microporous and Mesoporous Materials Volume 67, Issue 1, 8 January 2004, Pages 35-41	E. Manchón-Vizuetea A. Macías-García A. Nadal Gisbert C. Fernández-González V. Gómez-Serrano	Article scientifique	2004	Microporous and Mesoporous Materials Volume 67, Issue 1, 8 January 2004, Pages 35-41	http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1387181103006176
Procédé de dévulcanisation d'un caoutchouc (WO/2001/023464)	DSM NV	DUIN VAN, Martin NOORDERMEER, Jacobus, Wilhelmus, Maria VERBRUGGEN, Miriam, Adriëne, Lambertina VAN DER DOES, Leen	Brevet	2001	WIPO	http://www.wipo.int/patentscope/search/fr/WO2001023464
Procédés et installation pour la séparation des constituants de pneus usagés	Demande de brevet	Debaillleul Gérard	Brevet	2004	Demande de brevet	http://www.freepatentsonline.com/EP1032611.html
Process for producing reclaimed rubber or unvulcanized reclaimed rubber	Kabushiki Kaisha Toyota Chuo Kenkyusho	Mouri, Makoto (Aichi, JP), Usuki, Arimitsu (Aichi, JP), Sato, Norio (Aichi, JP)	Brevet	1997	Free Patentes Online	http://www.freepatentsonline.com/5672630.html
Production : une industrie bicéphale	SNCP	SNCP	Site/page internet	2010	SNCP	http://www.lecaoutchouc.com/spip.php?page=rubrique-public&id_rubrique=112
Progress in tyre recycling	Congrès Rubber in the environmental age - progress in recycling : (Shrewsbury, 18 November 1996) Rubber in the environmental age. Seminar, Shrewsbury , ROYAUME-UNI (18/11/1996) 1996 , pp. 3.1-3.5[Note(s) : [48 p.]] (bibl.: dissem.) ISBN 1-85957-091-7 ; Illustration : illustration ;	KETTERINGHAM K. HERD D. MCCUBBIN I.	Article scientifique	1996	Congrès Rubber in the environmental age - progress in recycling : (Shrewsbury, 18 November 1996) Rubber in the environmental age. Seminar, Shrewsbury , ROYAUME-UNI (18/11/1996) 1996 , pp. 3.1-3.5[Note(s) : [48 p.]] (bibl.: dissem.) ISBN 1-85957-091-7 ; Illustration : illustration ;	http://cat.inist.fr/?aModele=afficheN&cpsidt=2722956
Properties of polypropylene/natural rubber/recycle rubber powder blends	Polymer-plastics technology and engineering ISSN 0360-2559 CODEN PPTEC7 2002, vol. 41, no5, pp. 833-845	ISMAIL Hanafi SURYADIANSYAH	Article scientifique	2002	Polymer-plastics technology and engineering ISSN 0360-2559 CODEN PPTEC7 2002, vol. 41, no5, pp. 833-845	http://cat.inist.fr/?aModele=afficheN&cpsidt=13977072
Protection et entretiens des pneus d'aviation	Goodyear	Goodyear	Site/page internet	2011	Goodyear	http://www.goodyearaviation.com/resources/pdf/aircraftmanual_fr.pdf
Pyrolyse et Gazéification des pneus hors d'usage	RECYC-QUÉBEC	RECYC-QUÉBEC	Étude	2001	RECYC-QUÉBEC	http://www.reycy-quebec.gouv.qc.ca/upload/publications/pneus/pyrolyse.pdf

Pyrolyse von Elastomeren und Gummi zur Wertstoffrückgewinnung = Pyrolysis of elastomers and rubber for valuable substance recycling	Kautschuk und Gummi, Kunststoffe ISSN 0022-9520 CODEN KGUKAC Jahrestagung des Fachbeirats Elastomerverarbeitung. Vortrag. 9, Braunschweig, ALLEMAGNE (05/02/1991) 1991, vol. 44, no9, pp. 846-851 [6 page(s) (article)] (26 ref.)	KAMINSKY W. ROËSSLER H. SINN H.	Article scientifique	1991	Kautschuk und Gummi, Kunststoffe ISSN 0022-9520 CODEN KGUKAC Jahrestagung des Fachbeirats Elastomerverarbeitung. Vortrag. 9, Braunschweig, ALLEMAGNE (05/02/1991) 1991, vol. 44, no9, pp. 846-851 [6 page(s) (article)] (26 ref.)	http://cat.inist.fr/?aModele=afficheN&cpsid=19844634
Pyrolysis kinetics of rubber term mixtures	Journal of Hazardous Materials Volume 58, Issues 1-3, February 1998, Pages 227-236	Jyh-Ping Lin Ching-Yuan Chang Chao-Hsiung Wu	Article scientifique	1998	Journal of Hazardous Materials Volume 58, Issues 1-3, February 1998, Pages 227-236	http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0304389497001349
Rapport d'activité 2009	Aliapur	Aliapur	Publication périodique	2010	Aliapur	
Rapport d'activité 2009	France Recyclage Pneumatiques	France Recyclage Pneumatiques	Publication périodique	2010	France Recyclage Pneumatiques	
Reclaimed rubber from latex glove rejects	Kautschuk und Gummi, Kunststoffe ISSN 0022-9520 CODEN KGUKAC	AZIZ Y.	Article scientifique	1992	Kautschuk und Gummi, Kunststoffe ISSN 0022-9520 CODEN KGUKAC	http://cat.inist.fr/?aModele=afficheN&cpsid=4431581
Reclamation and recycling of waste rubber	Progress in Polymer Science Volume 25, Issue 7, September 2000, Pages 909-948	D. De and S. Maiti B. Adhikari	Article scientifique	2000	Progress in Polymer Science Volume 25, Issue 7, September 2000, Pages 909-948	http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S007967000000204
Recyclage des déchets de caoutchouc - Etude thermique de la vulcanisation - Propriétés des vulcanisats - Elaboration de matériaux de bâtiment	Université de Saint-Etienne	ACCETTA André	Thèse	1982	Thèse présentée à l'Université de Saint-Etienne pour obtenir le grade de Docteur ès Sciences physiques	http://cdoc.enscm-douai.fr/emdat/DetailDoc.aspx?DocID=38072
Recyclage des pneumatiques usagés	HELMo Gramme	?	Site/page internet	Pas d'information	HELMo	http://www.gramme.be/unit9/gmwiki/gmwiki.php?n=PrGC0910_Recyclage
Recyclage des pneus hors d'usage au Canada - La transformation des pneus hors d'usage en produits à valeur ajoutée	CATRA	-	Autre	Pas d'information	CATRA Online	http://catraonline.ca/pdf/Recyc_2006_Pneus.pdf
Recyclage et valorisation des matériaux isolants en fin de vie	Revue ABB	ABB	Article scientifique	2009	Revue ABB	http://library.abb.com/global/scot/scot271.nsf/(verthydisplay)/c88c7d0e3b5d1277c124575e0004f87c?511p/10_16%202M%63_FBA72fm.pdf
Recycling of Rubbers	Science and Technology of Rubber (Third Edition) 2005, Pages 663-701	Avraam I Isayev	Article scientifique	2005	Science and Technology of Rubber (Third Edition) 2005, Pages 663-701	http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B9780124647862500183
Recycling of silicone rubber waste: Effect of ground silicone rubber vulcanizate powder on the properties of silicone rubber	Polymer engineering and science A. 2003, vol. 43, n° 2, pp. 279-296	GHOSH Arun RAJEEV R. S. BHATTACHARYA A. K. BHOWMICK A. K. DE S. K.	Article scientifique	2003	Polymer engineering and science A. 2003, vol. 43, n° 2, pp. 279-296	http://www.refdoc.fr/Detailnotice?darticle=8785208
Recycling of silicone rubber waste_effect of ground silicone rubber vulcanizate powder on the properties of silicone rubber	Rubber Technology Centre, Indian Institute of Technology Kharagpur	ARUN GHOSH, R. S. RAJEEV, A. K. BHATTACHARYA, A. K. BHOWMICK and S. K. DE*	Article scientifique	2003	POLYMER ENGINEERING AND SCIENCE, FEBRUARY 2003, Vol. 43, No. 2	
Recycling of Tire Curing Bladder by ultrasonic devulcanization	Institute of Polymer Engineering, The University of Akron, Akron, Ohio	Wenlai Feng, A.I. Isayev	Article scientifique	2006	POLYMER ENGINEERING AND SCIENCE	
Recycling of Tyre Rubber into New Rubber Products through efficient De-vulcanisation	WRAP	WRAP, J Allcock & Sons, Tun Abdul Razak Research Centre (TARRC)	Étude	2007	-	
Recycling Rubber	Practical Action	-	Autre	Pas d'information	Practical Action	http://practicalaction.org/docs/technical_information_service/recycling_rubber.pdf
Recycling Technology - Applications of Processed Waste Tires (Crumb Rubber)	North Carolina Division of Pollution Prevention and Environmental Assistance	-	Site/page internet	Pas d'information	DPPEA	http://www.p2pays.org/ref/11/10504/html/usa/usechip.htm#Reclaimed
Recycling Technology - Applications of Whole Waste Tires	North Carolina Division of Pollution Prevention and Environmental Assistance	-	Site/page internet	Pas d'information	DPPEA	http://www.p2pays.org/ref/11/10504/html/usa/usewhole.htm
Recycling Technology - Pyrolysis	North Carolina Division of Pollution Prevention and Environmental Assistance	-	Site/page internet	Pas d'information	DPPEA	http://www.p2pays.org/ref/11/10504/html/usa/pyro.htm
Recycling Technology - Retread	North Carolina Division of Pollution Prevention and Environmental Assistance	-	Site/page internet	Pas d'information	DPPEA	http://www.p2pays.org/ref/11/10504/html/usa/retread.htm
Recycling Technology - Tire-Derived Fuel	North Carolina Division of Pollution Prevention and Environmental Assistance	-	Site/page internet	Pas d'information	DPPEA	http://www.p2pays.org/ref/11/10504/html/usa/tdf.htm
Recycling technology of tire rubber	aToyota Central Research and Development Laboratories, Inc., Nagakute, Aichi; Toyota Motor Corp., Toyota-cho, Toyota, Aichi Toyoda Gosei Co., Ltd., Kitajima-cho, Inazawa, Aichi	Kenzo Fukumoria, Mitsumasa Matsushitaa, Hiroataka Okamotoa, Norio Satoa, Yasuyuki Suzukib, Katsumasa Takeuchic	Article scientifique	2001	Society of Automotive Engineers of Japan, Inc. and Elsevier Science B.V.	
Résultats annuels des enquêtes de branche 2007 - F45 - Industrie du caoutchouc	INSEE	-	Publication périodique	2007	INSEE	http://www.insee.fr/sessi/enquetes/eab/2007/EAB-F45.htm
Re-use of ground rubber waste : A review	Progress in rubber and plastics technology 2001, vol. 17, no2, pp. 113-125 (55 ref.)	DE S. K.	Article scientifique	2001	Progress in rubber and plastics technology 2001, vol. 17, no2, pp. 113-125 (55 ref.)	http://cat.inist.fr/?aModele=afficheN&cpsid=1139066
Risques présentés par les produits chimiques dangereux	Caisse nationale de l'assurance maladie des travailleurs salariés	Caisse nationale de l'assurance maladie des travailleurs salariés	Site/page internet	1998	Caisse nationale de l'assurance maladie des travailleurs salariés	
Rubber plasticizers from degraded_devulcanized scrap rubber_a method of recycling waste rubber	Polymer Science and Engineering Department University of Massachusetts Amherst	AMIYA R. TRIPATHY, DREW E. WILLIAMS, and RICHARD J. FARRIS	Article scientifique	2004		
Rubber recycling		H. Schnecko, KGK, P.O. Box 1706, D-63407 Hanau, Germany	Article scientifique	1998		

Scrap rubber : An unpredictable waste or a useful raw material	Congrès Rubber in the environmental age - progress in recycling : (Shrewsbury, 18 November 1996) Rubber in the environmental age. Seminar, Shrewsbury , ROYAUME-UNI (18/11/1996) 1996 , pp. 2.1-2.7[Note(s) : [48 p.]] (bibl.: dissem.) ISBN 1-85957-091-7 ; illustration : illustration ;	ASPLUND J.	Article scientifique	1996	Congrès Rubber in the environmental age - progress in recycling : (Shrewsbury, 18 November 1996) Rubber in the environmental age. Seminar, Shrewsbury , ROYAUME-UNI (18/11/1996) 1996 , pp. 2.1-2.7[Note(s) : [48 p.]] (bibl.: dissem.) ISBN 1-85957-091-7 ; illustration : illustration ;	http://cat.inist.fr/?aModele=afficheN&cpsidt=2722955
Sous-produits de valorisation des pneus au Japon	ADEME - 99-94-007/03	ADEME	Étude	1999	ADEME - 99-94-007/03	http://www.refdoc.fr/Detailnotice?dmonno=335468
Studies of the thermal degradation of waste rubber	Department of Chemical Engineering, University of Petroleum, 100083, Beijing, China	Fengzhen Chen*, Jialin Qian	Article scientifique	2003	Science direct	
Studies on mechanical, thermal and morphological properties of irradiated recycled polyamide and waste rubber powder blends	a National Center for Radiation Research and Technology, Nasr City, Cairo 11731, Egypt b Chemistry Department, Faculty of Science, Al-Azhar University, Nasr City, Cairo, Egypt	Medhat M. Hassan a.*, Nagwa A. Badway b, Azza M. Gamal b, Mona Y. Elnaggar a, El-Sayed A. Hegazy a	Article scientifique	2009	Science direct- Elsevier	
Study on waste related issues of newly listed POPs and candidate POPs	BIPRO	BIPRO	Étude	2011	BIPRO	
Tableau de bord matières premières "caoutchouc"	SNCP	-	Publication périodique	2011	SNCP	http://www.lecaoutchouc.fr/IMG/pdf/Tableau_de_bord_materieres_premieres_Juin_2011.pdf
Testing and evaluating commercial applications of new surface-treated rubber technology utilizing waste tires	Environmental Technologies Alternatives, Inc., 5065 East Sloan Street, Port Clinton, OH 43452, USA Argonne National Laboratory Energy Systems Division - Building 362, Argonne, IL 60439, USA	F.G. Smith I, E.J. Daniels, A.P.S. Teotia *	Article scientifique	1995	Science direct- Elsevier	
The application of thermal processes to valorise waste tyre	Fuel processing technology A. 2006, vol. 87, n° 2, pp. 143-147	MURILLO R. AYLON E. NAVARRO M. V. CALLEN M. S. ARANDA A. MASTRAL A. M.	Article scientifique	2006	Fuel processing technology A. 2006, vol. 87, n° 2, pp. 143-147	http://www.refdoc.fr/Detailnotice?darticle=6751308
The de-link process : A technological breakthrough in rubber recycling	STI-K Polymers	-	Article scientifique	1996	INIST	http://cat.inist.fr/?aModele=afficheN&cpsidt=2722960
The effect of physical treatments of waste rubber powder on the mechanical properties of the revulcanizate	School of Nano and Advanced Materials Engineering, Gyeongsang National University, Jinju, Gyeongnam 660-701, Korea 2Department of Chemical Engineering, Queen's University, Kingston, ON K7L3N6, Canada 3Sung Jong Company, Deagu University Business Incubating Center, Jillyang, Gyeongbuk 712-714, Korea	Sung Hyo Lee,1,2 Sung Hyuk Hwang,3 Marianna Kontopoulou,2 V. Sridhar,1 Zhen Xiu Zhang,1 Deng Xu,1 Jin Kuk Kim1	Article scientifique	2007		
The use of rubber term tire particles in concrete to replace mineral aggregates	Department of Civil Engineering, University of Puerto Rico, Mayaguez, Puerto Rico 00681-5000	H. A. Toutanji	Article scientifique	1995	Department of Civil Engineering, University of Puerto Rico, Mayaguez, Puerto Rico 00681-5000	http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/0958946595000100
Thèse Mercurhone			Thèse			
Transformation et utilisation des déchets de caoutchouc dans l'industrie des pièces en caoutchouc à usage technique Transformation and use of rubber wastes in industry of pieces of technical rubbers	Kaučuk i rezina ISSN 0022-9466 1986, no2, pp. 35-39	NOVIKOVA L. A. MIRONOVA V. I. KRISHTAL I. V.	Article scientifique	1986	Kaučuk i rezina ISSN 0022-9466 1986, no2, pp. 35-39	http://cat.inist.fr/?aModele=afficheN&cpsidt=8639949
Un programme d'essai d'extinction automatique d'incendies de pneumatiques ambitieux	SNCP	SNCP	Site/page internet	2010	SNCP	http://www.lecaoutchouc.com/sip.php?page=rubrique-public&id_rubrique=128
Use of ground tyre rubber (GTR) in thermoplastic polyolefin elastomer compositions	Progress in rubber, plastics and recycling technology ISSN 1477-7606 2004, vol. 20, no1, pp. 1-10 [10 page(s)]	LIEVANA E. KARGER-KOCSIS J.	Article scientifique	2004	Progress in rubber, plastics and recycling technology ISSN 1477-7606 2004, vol. 20, no1, pp. 1-10 [10 page(s)]	http://cat.inist.fr/?aModele=afficheN&cpsidt=15485262
VI.5 Recycling of plastic waste, rubber waste and end-of-life cars in Germany		Dreher P., Faulstich M., Weber-Blaschke G., Berninger B., Keilhammer U.	Livre	2004		http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S013274304800357

ANNEXE III. LISTE D'ACTEURS IDENTIFIES

Acteurs à relancer en priorité

- 1/ Industriel (caoutchoutier, etc.) et autre acteur (pyrolyse)
- 2/ Laboratoire de recherche
- 3/ Fédération/Syndicat
- 4/ Granulateur
- 5/ Manufacturier (fabricant de pièces caoutchoutiques à partir de déchets valorisés)
- 6/ Déconstructeur/Démolisseur
- 7/ Équipementier

LISTE D'ACTEURS

Organisme	Type d'organisme	Activité(s)	Pays / Zone géographique	Région	Identité du contact	Fonction du contact	Coordonnées du contact	Précisions	Site / page internet	Commentaire
3R	Acteur mettant en place des actions de valorisation matière des déchets caoutchoutiques	Laboratoire/projet de recherche	Belgique				3R@skypro.be	Procédé par cryogénie pour broyer les déchets de caoutchouc (notamment chutes de découpe, pièces rebutées, etc.)	http://www.3rbrubber.eu/	
ACCIONA	Acteur mettant en place des actions de valorisation matière des déchets caoutchoutiques	Laboratoire/projet de recherche	Espagne		Favier BOTELLO ROJAS Mme Andrea Casas Ocampo	Coordinateur	fbotello@acciona.es +34 91 791 20 20 Ms Andrea Casas Ocampo (+34) 91.791.20.99 andrea.casas.ocampo@acciona.es	Coordinateurs du projet européen RECTYRE. The project intends to demonstrate the technical and market viability for ground tyres, produced by a heat and chemical free process. So far two trial runs have been carried out in Spain and the problems arising have proved to be both technical and socio-economic. The project will refine the process and iron out the glitches.	http://www.rectyre.solintel.eu/index.html	
Air Products	Acteur mettant en place des actions de valorisation matière des déchets caoutchoutiques	Granulateur	USA		Mathieu Leguy MICHEL PEROCHAIN	Ingénieur Qualité Environnement RESPONSABLE EH&S, Europe du Nord		Mise en place d'un procédé de cryobroyage du caoutchouc (sites en France)	http://www.airproducts.fr	
Amandus Kahl	Acteur mettant en place des actions de valorisation matière des déchets caoutchoutiques	Équipementier	Allemagne		Pleun VAN DER BORDEN	Dirigeant Amandus Kahl France	03 44 44 17 92 info@amandus-kahl-group.de	Équipementier pour le broyage/granulation de pneumatiques usagés	http://www.akahl.de/akahl/fr/home/	
AXELERA	Organisme ayant des compétences/ressources utiles pour le projet	Autre	France	RhôneAlpes	Sophie SUC Nathalie SINTES Isabelle HARTER	Chef de projet, Image, dialogue et engagement sociétal Chef de projet, Formation et prospective des compétences Chef de projet, Intelligence et veille économique	04 78 77 83 64	Pôle de compétitivité spécialisé dans la Chimie et l'Environnement - A priori en association avec Plastipolis (pôle de compétitivité Plasturgie) et Techtera (pôle de compétitivité des textiles et matériaux souples) dans le cadre du projet Euromatière (Europe Matériaux Innovants et Recyclabilité)	http://www.axelera.com	
Big Tyre Recycling Corporation Company (BTRC Company)	Acteur mettant en place des actions de valorisation matière des déchets caoutchoutiques	Industriel (caoutchoutier, chimiquier, pneumaticien, etc.)	Belgique		Luc de Somere	Directeur	de.somere.luc@btrc.be 0032 9 223 75 30	Coordinateur du projet BIG TYRE RECYCLING, en association avec AIMPLAS (institut espagnol des plastiques et des caoutchoucs) "The BTRC company has investigated since 2002 the UHP water jetting system and finally, as a result, a detailed feasibility study with extensive full scale tests has proven that this procedure is profitable for big tyres."	http://www.btrc.be/fr/history.php	
Bridgestone	Acteur mettant en place des actions de valorisation matière des déchets caoutchoutiques	Industriel (caoutchoutier, chimiquier, pneumaticien, etc.)	Japon		Olivier Montbet	Directeur Technique region ouest Europe	contact.bsfr@bridgestone.eu +33 (0)1.69.19.27.00	Dépôt de plusieurs brevets relatifs à la régénération et au recyclage de pneumatiques et de caoutchoucs	http://www.bridgestone.fr	
British Plastics & Rubbers	Organisme ayant des compétences/ressources utiles pour le projet	Autre	UK		Sam Anson	Editorialiste	sam.a@rapidnews.com +44(0) 1829 770037	British Plastics & Rubber est un magazine mensuel publiant toute l'actualité et les informations techniques de l'industrie des polymères.	http://www.britishtoplastics.co.uk/?default.html	
British Recycled Products	Acteur mettant en place des actions de valorisation matière des déchets caoutchoutiques	Manufacturier	UK			Pour les demandes techniques	technical@britishrecycled.com 01422 844131	Fabrication de pièces issues de granulats de caoutchoucs	http://www.britishtorecycledproducts.co.uk	

Budzar Industries	Acteur mettant en place des actions de valorisation matière des déchets caoutchoutiques	Équipementier	US					Équipementier pour le cryobroyage	http://www.budzar.com/mqpte.asp	
CEREMAP	Organisme ayant des compétences/ressources utiles pour le projet	Laboratoire/projet de recherche	France				infos@ceremap.fr 04 67 46 64 90	Centre d'études sur le Recyclage des Matières Plastiques	http://www.ceremap.fr	Structure dissoute, n'existe plus
Charles Lawrence International Limited	Acteur mettant en place des actions de valorisation matière des déchets caoutchoutiques	Granulateur	Angleterre				international@clgplc.co.uk	Producteur des machines pour la granulations des pneumatiques	http://www.tvrecyclingmachines.com/	Adresse invalide
CRYOGENIC EQUIPMENT & SERVICES NV	Acteur mettant en place des actions de valorisation matière des déchets caoutchoutiques	Équipementier	Belgique					Équipementier pour le cryobroyage	http://www.cesgroup.com/content/home/index.html	
Deltagom	Acteur mettant en place des actions de valorisation matière des déchets caoutchoutiques	Granulateur	France	Alain GURDEBEKE	Directeur général		alain@gurdebeke.com 03-44-93-25-27	Valorisation matière de granulats de caoutchoucs	http://www.delta-gom.com	
DeRichebourg	Acteur mettant en place des actions de valorisation matière des déchets caoutchoutiques	Déconstructeur / Démolisseur / Broyeur	France	Manuel BURNAND	Chargé du développement, de l'environnement et anime la commission recyclage du broyage		mburnand@derichebourg.com 01 39 37 43 91 06 16 75 68 36	Déconstructeur étudiant la récupération des déchets caoutchoutiques	http://www.derichebourg.com	
DevulCO2	Acteur mettant en place des actions de valorisation matière des déchets caoutchoutiques	Laboratoire/projet de recherche	UK	Dr Martin Forrest			mforrest@rapra.net	Le projet DevulCO2 vise à mener des recherche sur la dévulcanisation et la réutilisation de caoutchoucs issus de pneumatiques usagés.	http://www.devulco2.net	
ECORUB	Acteur mettant en place des actions de valorisation matière des déchets caoutchoutiques	Manufacturier	Suède	Åke Paulsson	CEO		ake@ecorub.se	Établissement spécialisé dans le développement d produits caoutchoutiques écologiques. Coordinateurs du projet ACE. "From 2010, and three years ahead, a project financed by the EU – EcoInnovation – will be conducted. EU finance half the project cost and the other half is funded by EcoRub and the three partner companies. The EU has noted that there are a number of environmental innovations that are developed clearly but have difficulty in entering the market. That is the reason for this call. Our project is called ACE – Advanced pre-commercialization of Eco rubber materials – and is the only project that deals with the reuse of tire rubber for the creation of a new material funded by the EU "	http://www.ecorub.eu	
EIFFAGE TRAVAUX PUBLICS	Acteur mettant en place des actions de valorisation matière des déchets caoutchoutiques	Industriel (caoutchoutier, chimiquier, pneumasticien, etc.)	France	Stéphane GAFFIE	Responsable Environnement Eiffage TP		sgaffie@travauxpublics.eiffage.fr	Projet de R&D en 2005 sur la "Bio-dévilcanisation de pneus usagés en vue d'améliorer la valorisation des granulats de pneus dans les enrobés routiers"	http://www2.adema.fr/sep/dst/8baseShowZout4148_53&cid=95&m=3&sort=1	
Elastisol Recyclage	Acteur mettant en place des actions de valorisation matière des déchets caoutchoutiques	Manufacturier	France	îledeFrance	Karl Bisseuil	PDG	karl.bisseuil@elastisol.com 01 69 30 38 26	Aménagement d'aires de jeux, sols récréatifs, de sécurité de piscine, dalles, etc. en caoutchouc recyclé	http://www.elastisol.com	
Elastopôle	Organisme ayant des compétences/ressources utiles pour le projet	Autre	France		Bruno MAROSTEGAN (pas de réponse) Bruno MARTIN (nouveau contact)	Directeur Chef du projet senior	bruno.marostegan@elastopole.com - 02 38 45 75 87 bruno.martin@elastopole.com - 01 49 60 57 97/06 42 64 53 75	Pôle de compétitivité caoutchouc et polymères	http://www.elastopole.com	
EMAC	Acteur mettant en place des actions de valorisation matière des déchets caoutchoutiques	Industriel (caoutchoutier, chimiquier, pneumasticien, etc.)	France	Aquitaine	Didier CHAUFFAILLE	DG	d.chauffaille@emac.fr 05 59 28 81 33	EMAC est un des plus importants fabricants français de mélanges de caoutchouc et polymères, ainsi qu'un concepteur de formulations. La société compte 77 salariés. EMAC commercialise ses produits au niveau mondial. EMAC met en place plusieurs actions visant à limiter leurs impacts environnementaux, et notamment, le recyclage de leurs déchets de fabrication	www.emac-caoutchouc.com	

Entyrecycle	Acteur mettant en place des actions de valorisation matière des déchets caoutchoutiques	Industriel (caoutchoutier, chimiquier, pneumasticien, etc.)	UK					Une société britannique, Entyrecycle, prévoit d'installer une usine de recyclage de pneus ainsi qu'un centre de recherche et de développement à Blaringhem, dans le Nord du Royaume-Uni.	http://gijastines-caoutchours.com/le-caoutchoucas-recycle-de-mieux-1125.html	
ETRA	Organisme ayant des compétences/ressources utiles pour le projet	Fédération / Syndicat	Europe		Valérie SHULMAN	Secrétaire Général	etra@wanadoo.fr + 33 1 45 00 37 77	European Tyre Recycling Association (ETRA) is an independent, member-driven European Association open to those involved in the diverse activities that contribute to the 'tyre recycling industry'	http://www.etra.eu.org	
ETRMA (European Tyre & Rubber Manufacturers Association)	Organisme ayant des compétences/ressources utiles pour le projet	Fédération / Syndicat	Europe		Mrs Fazilet CINARALP	Secrétaire Général	f.cinaralp@etrma.org 3222184940	Association au niveau européen des opérateurs des pneumatiques et du caoutchouc	http://www.etrma.org	
European rubber journal	Organisme ayant des compétences/ressources utiles pour le projet	Autre	Europe			Editorialiste	dshaw@crain.com	European Rubber Journal magazine has been reporting on the world's rubber industry since 1884. Published six times a year, the magazine provides details of all of the important commercial and technical developments within this business, one of the world's most dynamic and globally integrated industrial businesses.	http://www.european-rubber-journal.com	
France Construction / Hexdalle	Acteur mettant en place des actions de valorisation matière des déchets caoutchoutiques	Manufacturier	France	PACA			contact@hexdalle.com 04 94 14 91 91	Fabricant de sols sportifs et techniques à base de caoutchoucs recyclés	http://www.hexdalle.com	
GALLOO	Acteur mettant en place des actions de valorisation matière des déchets caoutchoutiques	Déconstructeur / Démolisseur / Broyeur	France		Olivier FRANCOIS	Direction Environnement et Développement	olivier.francois@galloo.com 03 20 23 91 49	Valorisation des déchets de caoutchouc issus de VHU, hors pneumatiques	http://www.galloo.com	
Gerflor	Acteur mettant en place des actions de valorisation matière des déchets caoutchoutiques	Manufacturier	France		Laure Aldon	Responsable Environnement	laldon@gerflor.com	Fabricant de sols pour la maison et usages professionnels à base de caoutchoucs recyclés	http://www.gerflor.fr	
Goodyear Tire	Acteur mettant en place des actions de valorisation matière des déchets caoutchoutiques	Industriel (caoutchoutier, chimiquier, pneumasticien, etc.)	USA					Dépôt de brevet sur un procédé de dévulcanisation de caoutchouc réticulé	http://www.patfr.com/199909/EP0942034.html	
Green Rubber Global (Petra Group)	Acteur mettant en place des actions de valorisation matière des déchets caoutchoutiques	Industriel (caoutchoutier, chimiquier, pneumasticien, etc.)	Malaisie		Karen Harris		karen.harris@petragroup.com	Filiale de Petra Group (basé à Kuala Lumpur en Malaisie), Green Rubber Global est en train de construire au Nouveau Mexique une usine visant à recycler les pneus usagés. Le procédé qui sera mis en place permettra de dévulcaniser le caoutchouc des pneumatiques.	http://www.green-rubber.com	
Green Tech	Acteur mettant en place des actions de valorisation matière des déchets caoutchoutiques	Industriel (caoutchoutier, chimiquier, pneumasticien, etc.)	USA		Lyle Jensen	Chef de direction	ljensengrn@yahoo.com	Recycled rubber subsidiary of GreenMan (sold to Irish Knight Holdings LLC in 2011)	http://www.greenman.biz	
Guinamic	Acteur mettant en place des actions de valorisation matière des déchets caoutchoutiques	Manufacturier	France	Alsace			guinamic@guinamic.com 03 88 70 83 60	Fabricants de sols techniques à base de caoutchoucs recyclés	http://www.guinamic.com	
Gummi Appel	Acteur mettant en place des actions de valorisation matière des déchets caoutchoutiques	Manufacturier	Allemagne				gummi-appel@t-online.de	Fabrication de pièces issues de granulats de caoutchoucs	http://www.gummi-appel.de/english/recycling.html	
Gummi Praha	Acteur mettant en place des actions de valorisation matière des déchets caoutchoutiques	Manufacturier	République Tchèque				gummipraha@volny.cz	Fabrication de pièces issues de granulats de caoutchoucs	http://www.gummiraba.cz/en-products-from-recycling-rubber-100010	
Gumtec	Acteur mettant en place des actions de valorisation matière des déchets caoutchoutiques	Granulateur	Allemagne				info@gum-tec.de	Développement d'une méthode de recyclage de caoutchoucs (pneumatiques et autres déchets)	http://www.gum-tec.de/english/home_engl.html	
HS Polymers	Acteur mettant en place des actions de valorisation matière des déchets caoutchoutiques	Industriel (caoutchoutier, chimiquier, pneumasticien, etc.)	Angleterre					Mise au point d'une méthode de régénération de déchets de caoutchoucs		
IFOCA (Institut national de Formation et d'enseignement professionnel du Caoutchouc)	Organisme ayant des compétences/ressources utiles pour le projet	Autre	France		Yolande BUFQUIN	DG	yolande.bufquin@ifoca.com 01 49 60 51 15		http://www.ifoca.com	

Imperial College	Acteur mettant en place des actions de valorisation matière des déchets caoutchoutiques	Laboratoire/projet de recherche	Angleterre		Geoff FOWLER	Laboratory manager for the Environmental and Water Resources Engineering section	g.fowler@imperial.ac.uk +44 (0)20 7594 5973	Travaux en cours sur le sujet de la dépolymérisation des caoutchoucs par thermolyse	http://rsc.conference-services.net/resources/728/7286/pdf/MC10_0108.pdf	
IRSG (International Rubber Study Group)	Organisme ayant des compétences/ressources utiles pour le projet	Autre	Monde				contact_irsg@rubberstudy.com (+65) 6837 2411	The International Rubber Study Group (IRSG) is an intergovernmental organisation recognised as an international body located in Singapore, formally established by a Headquarters Agreement with the Government of Singapore. Membership of the IRSG is open to governments. Currently 16 countries and the European Union are contributing members: Belgium, Republic of Cameroon, Cote d'Ivoire, France, Germany, India, Italy, Japan, Malaysia, Nigeria, Russian Federation, Singapore, Spain, Sri Lanka, Thailand and United States of America.	http://www.rubberstudy.com	
J Allcock and Sons Ltd	Acteur mettant en place des actions de valorisation matière des déchets caoutchoutiques	Granulateur	UK				ja@allcocks.co.uk	Recyclage de caoutchoucs par un procédé de broyage à température ambiante (recycle notamment des FKM)	http://www.allcocks.co.uk	
Jakobs Rubber Recycling	Acteur mettant en place des actions de valorisation matière des déchets caoutchoutiques	Industriel (caoutchoutier, chimiquier, pneumaticien, etc.)	Pays-Bas				info@jakobsrubber.com	Our company buys and sells rubber waste, and processes it into semi-manufactured products, so these useful semi-manufactured products are re-circulated worldwide. We grade, purify, grind and package rubber waste from the tyre retreading industry at our factory, and turn it into new impact-absorbent products. Rubber processing industries then use these semi-manufactured products to manufacture new items such as sports surfaces, insulation material and safety tiles.	http://www.jakobsrubber.com/	
Key Laboratory of Beijing City on Preparation and Processing of Novel Polymer Materials	Organisme ayant des compétences/ressources utiles pour le projet	Laboratoire/projet de recherche	China		Suhe ZHAO		zhaosh@mail.buct.edu.cn	A publié plusieurs articles sur le traitement biologique des déchets caoutchoutiques.		
Klean Industries	Acteur mettant en place des actions de valorisation matière des déchets caoutchoutiques	Industriel (caoutchoutier, chimiquier, pneumaticien, etc.)	USA		Mr Jesse Klinkhamer	Chief Executive	j.klinkhamer@kleanindustries.com	Gère des technologies de pyrolyse en Angleterre et aux Etats Unis.	http://www.kleanindustries.com/	
Levgum	Acteur mettant en place des actions de valorisation matière des déchets caoutchoutiques	Industriel (caoutchoutier, chimiquier, pneumaticien, etc.)	Israël		Dr. Ran Zamir Daniel Bar-On	CEO COB	ranz@levgum.com - +972-52-605-5120 (mobile) baron@levgum.com - +972-52-605-5125 (mobile) info@levgum.com (adresse plus valide) (+972) 8 859 8066	Mise au point d'une technique de dévulcanisation du caoutchouc	http://www.levgum.com	
Liberty Tire Recycling	Acteur mettant en place des actions de valorisation matière des déchets caoutchoutiques	Granulateur	USA				crumbrubber@libertytire.com	Scrap tire processing operations unit (sold by GreenMan in 2011)	http://www.libertytire.com	
LRCCP (Laboratoire de Recherches et de Contrôle du Caoutchouc et des Plastiques)	Acteur mettant en place des actions de valorisation matière des déchets caoutchoutiques	Laboratoire/projet de recherche	France	ÎledeFrance	Thomas EVRARD	Responsable Qualité Sécurité Environnement	01 49 60 57 57	Laboratoire du SNCP et un des premiers laboratoires de France à travailler sur la valorisation matière des caoutchoucs	http://www.lrccp.com	
Lund University, Department of Biotechnology, Center for Chemistry and Chemical Engineering	Organisme ayant des compétences/ressources utiles pour le projet	Laboratoire/projet de recherche	Sweden		Katarina BREDBERG		katarina.bredberg@biotek.lu.se Tel: +46-462224626	A publié plusieurs articles sur le traitement biologique des déchets caoutchoutiques.		
Lund University, Department of Biotechnology, Center for Chemistry and Chemical Engineering	Organisme ayant des compétences/ressources utiles pour le projet	Laboratoire/projet de recherche	Sweden		Olle HOLST		olle.holst@biotek.lu.se Tel: +46-462229844	A publié plusieurs articles sur le traitement biologique des déchets caoutchoutiques.		
Magnum d'Or Resources	Acteur mettant en place des actions de valorisation matière des déchets caoutchoutiques	Granulateur	Canada	Québec			mdor@magnumresources.net	Entreprise spécialisée dans l'approvisionnement de compounds issus du traitement des pneumatiques usagés. Les produits commercialisés se destinent à des applications nécessitant des matériaux de haute qualité.	http://magnumresources.net/	

Mercurhone	Acteur mettant en place des actions de valorisation matière des déchets caoutchoutiques	Granulateur	France	RhôneAlpes	Beom-Jun YI	PDG	contact@wasterubberactivation.org info.mercurhone@club-internet.fr 04 78 39 54 19	Développement procédé innovant utilisant des pneus usagés pour élaborer de nouvelles matières thermoplastiques	http://www.lvon-ci.fr/annuaire/fiche.asp?cle=19947864
Messer	Acteur mettant en place des actions de valorisation matière des déchets caoutchoutiques	Équipementier	France					Équipementier pour le cryobroyage	http://www.messer.fr/_globalDownloads/_Downloads_brochures/Brochure_Poudres_fines.pdf
Micronis	Acteur mettant en place des actions de valorisation matière des déchets caoutchoutiques	Équipementier	France					Équipementier pour le cryobroyage	http://www.micronis.com/acueil.html
Neo-Eco Recycling	Acteur mettant en place des actions de valorisation matière des déchets caoutchoutiques	Granulateur	France		Christophe DEBOFFE	Gérant / Associé fondateur de l'entreprise	cdeboffe@neo-eco.fr 02.20.10.31.10 06.28.07.16.88"	Développement d'un projet sur la valorisation de déchets caoutchoutiques issus de pneus broyés dans une matrice béton pour des produits de construction	http://www.neo-eco.fr
Pallmann	Acteur mettant en place des actions de valorisation matière des déchets caoutchoutiques	Granulateur	Allemagne		Alain PETRY Dominique VOGÉ	Correspondants pour la France du secteur "Matière plastiques/ Technique des procédés industriels"	alain.petry@pallmann.de (+49) 6332 802 140 dominique.voge@pallmann.de 04 78 93 43 13	Leader mondial dans le domaine des techniques de broyage. Offre des solutions de broyage et de traitement de matières plastiques.	http://www.pallmann.eu
Phenix Industries	Acteur mettant en place des actions de valorisation matière des déchets caoutchoutiques	Granulateur	France			Marc GRUFFAT Mathias LEJAY	marc.gruffat@phenix-industries.com Mathias.lejay@noos.fr	Acteur pionnier en termes de broyage, granulation, pulvérisation des caoutchoucs	-
Phoenix Innovation	Acteur mettant en place des actions de valorisation matière des déchets caoutchoutiques	Industriel (caoutchoutier, chimiqueur, pneumasticien, etc.)	Canada	Québec	Jean PREVOST Stephen MURPHY	Président PDG	smurphy@videotron.ca (+1) 450 264 2762 (+1) 514 591 3911	Traitement de caoutchouc pour la production à valeur ajoutée - Utilisation de caoutchouc recyclé et traité utilisé en combinaison avec des caoutchoucs vierges	http://www.f-c-e.ca/apps/ccc/brch/nvt/dg3hDrti&url1&estblmtNo=234567087598&profil&cmultPril&profil&id=161&anosold&lang=en
Plastipolis	Organisme ayant des compétences/ressources utiles pour le projet	Autre	France				info@plastipolis.fr	Pôle de compétitivité en plasturgie	http://www.plastipolis.fr
Poittemill Group	Acteur mettant en place des actions de valorisation matière des déchets caoutchoutiques	Équipementier	France					Équipementier pour le broyage	http://www.poittemill.com/broyeur-pulverisateur.php
Pulva Corporation	Acteur mettant en place des actions de valorisation matière des déchets caoutchoutiques	Équipementier	US					Équipementier pour le cryobroyage	http://www.pulva.com/cryo.html
Pyrum Innovations	Acteur mettant en place des actions de valorisation matière des déchets caoutchoutiques	Industriel (caoutchoutier, chimiqueur, pneumasticien, etc.)	France/Allemagne		Plusieurs contacts : http://www.pyrum.net/L-equipe.11.0.html	Plusieurs contacts : http://www.pyrum.net/L-equipe.11.0.html	Plusieurs contacts : http://www.pyrum.net/L-equipe.11.0.html	Procédé de recyclage de pneumatiques usagés par pyrolyse	http://www.pyrum.net
RBSI recyclage	Acteur mettant en place des actions de valorisation matière des déchets caoutchoutiques	Manufacturier	France	Lorraine			info@rbsi.fr	Société de recyclage de caoutchoucs pour des applications sportives, des applications routières, des aires de jeux	http://www.rbsi.fr/documents/history.xml?lang=fr
Recyclatech	Acteur mettant en place des actions de valorisation matière des déchets caoutchoutiques	Industriel (caoutchoutier, chimiqueur, pneumasticien, etc.)	Écosse				bill.findlay@recyclatech.com	Recyclatech have developed a unique patented devulcanisation (sulphur removal) technology which enables the reprocessing of used tyres into reusable rubber, economically, profitably and without any environmental impact. The resulting processed rubber can be used in products that currently require new rubber to be used, at significant cost savings.	http://www.recyclatech.com
RECYLUX	Acteur mettant en place des actions de valorisation matière des déchets caoutchoutiques	Déconstructeur / Démolisseur / Broyeur	Bénélux		Patrick ARCHIER		p.archier@recylux.com 03 82 39 01 13	Broyeur présentant des travaux avancés en termes de récupération et de traitement des plastiques/caoutchouc de VHU	http://www.recylux.com

ReMould	Acteur mettant en place des actions de valorisation matière des déchets caoutchoutiques	Laboratoire/projet de recherche	UK		Kerry Haralambou		kharalambou@rapra.net	A second project, called ReMould, will be started soon which aims to transfer the technology to other waste rubber products and expand the range of goods that can be manufactured from the de-vulcanised rubber. This project is also to be funded by the Technology Strategy Board. Research into the development of a novel, scalable, industrial process for the continuous production of high quality re-processable rubber compounds	http://www.remould.org.uk	
Roll-Gom	Acteur mettant en place des actions de valorisation matière des déchets caoutchoutiques	Industriel (caoutchoutier, chimiquier, pneumaticien, etc.)	France		Richard LETT		rlett@roll-gom.com 03 21 24 94 95	Recyclage des pneus usages non réutilisables e valorisation du caoutchouc par vulcanisation. L'établissement procède en outre à l'injection de matières plastiques vierges et recyclées	http://www.roll-gom.com	
Royal Mat	Acteur mettant en place des actions de valorisation matière des déchets caoutchoutiques	Manufacturier	Canada	Québec	André GREGOIRE	Représentant des ventes/Développement des affaires	a.gregoire@royalmat.com (+1) 450 210 2655	Manufacturier de produits à base de pneus recyclés	http://www.royalmat.com	Raymond Hébert VP ventes et marketing (r.hebert@royalmat.com)
Rti cryogenics	Acteur mettant en place des actions de valorisation matière des déchets caoutchoutiques	Déconstructeur / Démolisseur / Broyeur	Canada				jimanderson@rticryo.com	Opérateur et fournisseur des systèmes de cryobroyage pour des pneumatiques usés.	http://www.rticryo.com	
Rubber-Regen	Acteur mettant en place des actions de valorisation matière des déchets caoutchoutiques	Industriel (caoutchoutier, chimiquier, pneumaticien, etc.)	Angleterre					Rubber-Regen is developing novel devulcanisation technology that will permit the reuse of end-of-life rubber tyres in new rubber compounds.	http://www.rbrinklies.com/rubberregen.html	
SIMS	Acteur mettant en place des actions de valorisation matière des déchets caoutchoutiques	Déconstructeur / Démolisseur / Broyeur	Angleterre					Déconstructeur anglais travaillant sur l'optimisation de la récupération des déchets caoutchoutiques de véhicules	http://uk.simsom.com/newport	
SITA Recyclage (REGENE)	Acteur mettant en place des actions de valorisation matière des déchets caoutchoutiques	Granulateur	France		Frédéric BONAMY	Direction industrielle (membre du comité de suivi de l'étude)	frederic.bonamy@sit.fr 06 42 95 83 19	Un des principaux acteurs de la granulation (avec Delta Gom et Roll-Gom)	http://www.sita.fr/fr/identite/organisation/les-poles-d-expertises/nole-recyclage/filiere-plastiques/regene-atlantique/regene-atlantique/	
Smithers Rapra	Organisme ayant des compétences/ressources utiles pour le projet	Autre	UK				info@rapra.net	Centre technique d'information sur les caoutchoucs et les plastiques et bureau d'études et d'analyse. Publie le magazine "Progress in Rubber and Plastics technology".	http://www.rapra.net	
Smithers Rapra	Acteur mettant en place des actions de valorisation matière des déchets caoutchoutiques	Laboratoire/projet de recherche	UK				info@rapra.net	Smithers Rapra, an independent testing, research and consulting firm, offers a variety of material testing and analysis services	http://www.smithersscientific.com	
Socamont	Acteur mettant en place des actions de valorisation matière des déchets caoutchoutiques	Granulateur	France	Auvergne	Anne COUASNON	Responsable Commerciale	anne.couasnon@socamont.com 02 43 01 01 17		http://www.socamont.com	
SOVAE	Acteur mettant en place des actions de valorisation matière des déchets caoutchoutiques	Industriel (caoutchoutier, chimiquier, pneumaticien, etc.)	France	NordPasdeCalais	Patrick Rousere	Responsable SOVAE	prouser@ramery.fr	Usine de recyclage de pneumatiques usagés par pyrolyse	http://www.environnement.ramery.fr/offre-globale/centre-de-valorisation/sovae.html	
TEAM 2 (Technologies de l'Environnement Appliquées aux Matières et Matériaux)	Organisme ayant des compétences/ressources utiles pour le projet	Autre	France	NordPasdeCalais	Sylvain CODRON	Directeur	s.codron@team2.fr info@team2.fr 03 21 13 06 80	Pôle de compétitivité en écotechnologie relatif à la filière du recyclage et à la valorisation des déchets	http://www.team2.fr/team2/fr/7455-team2.html	
Thermya	Acteur mettant en place des actions de valorisation matière des déchets caoutchoutiques	Industriel (caoutchoutier, chimiquier, pneumaticien, etc.)	France		Edith FARDET LEMAIRE		fardet@thermya.com 05 56 15 13 63	Procédé de torréfaction de déchets	www.thermya.com	
Toyota	Acteur mettant en place des actions de valorisation matière des déchets caoutchoutiques	Industriel (caoutchoutier, chimiquier, pneumaticien, etc.)	Japon		Fabien Supizet	Directeur des Relations Extérieures et Environnement Toyota	fabien.supizet@toyota-europe.com	Mise en place de procédé de dévulcanisation de caoutchoucs par extrusion.	http://fr.toyota.be/images/cac%20recyclage%20rench-tem295-169058.pdf	
Tyres Herco	Acteur mettant en place des actions de valorisation matière des déchets caoutchoutiques	Granulateur	Grèce					Fournisseur de la poudre pour EcoRub	http://www.herco.gr	

UCAPLAST	Organisme ayant des compétences/ressources utiles pour le projet	Fédération / Syndicat	France		Bernard MASSAS Guy BERTRAND Damien BESLAY		ucaplast@ucaplast.fr 01 55 78 28 98 06 07 03 07 25	UCAPLAST regroupe les PME PMI du caoutchouc industriel (transformateurs de pièces techniques, fabricants de rubans adhésifs, ...) La mission d'UCAPLAST est de préparer les accords de branche en faisant des propositions aux partenaires sociaux et en répondant aux demandes de ces derniers	http://www.ucaplast.fr
US Rubber reclaiming	Acteur mettant en place des actions de valorisation matière des déchets caoutchoutiques	Industriel (caoutchoutier, chimiquier, pneumasticien, etc.)	USA				info@usrubber.com	U.S. Rubber Reclaiming, Inc. (USRR) is the major source of butyl rubber reclaim in the western hemisphere and is a single-source reclaimed butyl rubber supplier to most of the U.S. tire industry. USRR and its predecessors have been engaged in reclaiming various scrap rubbers for over 100 years. Its current focus is butyl rubber reclaiming. Longtime customers include several Fortune 500 tire companies such as Michelin®, Continental/General®, and Goodyear®; a number of smaller tire manufacturers; inner tube manufacturers; and vendors of tape used for gas/oil pipe line wrap.	http://www.usrubberreclaiming.com
US Rubber recycling	Acteur mettant en place des actions de valorisation matière des déchets caoutchoutiques	Industriel (caoutchoutier, chimiquier, pneumasticien, etc.)	USA				info@usrubber.com	US rubber recycling, inc. a worldwide manufacturer/supplier of high quality flooring products made primarily from recycled rubber and other environmentally friendly compounds that are designed specifically for high traffic or high abuse areas in all types of retail and commercial buildings. We will, at all times, strive to maintain the high standards set forth in the "Total Quality management" or "TQM" philosophy. The ultimate end goal is the preservation of the world's natural resources through creative engineering.	http://www.usrubber.com/
Wattelez	Acteur mettant en place des actions de valorisation matière des déchets caoutchoutiques	Industriel (caoutchoutier, chimiquier, pneumasticien, etc.)	France		Maryvonne WATTELEZ	Présidente	Formulaire de contact en ligne	Industriel français garantissant le recyclage de certains produits retournés. La matière est triée, broyée et retravaillée, puis sera utilisée dans la fabrication d'autres produits de la gamme de l'établissement.	http://www.wattelez.com
West Coast Rubber Recycling	Acteur mettant en place des actions de valorisation matière des déchets caoutchoutiques	Industriel (caoutchoutier, chimiquier, pneumasticien, etc.)	USA	Californie			information@groundrubber.com	October 1, 1999 Gary's Tire Disposal started collecting tires from various tire dealers in the Greater Bay Area. In August of 2001 our name changed to West Coast Rubber Recycling (WCRR) and expanded our tire collection and sales territory. WCRR remanufactures scrap tires into the following markets:	http://www.groundrubber.com
ZAGREB UNIVERSITY	Acteur mettant en place des actions de valorisation matière des	Laboratoire/projet de recherche	Croatie				ruonbar@grad.hr	Projet RUCONBAR (RUBberized CONcrete Noise BARrier)	http://www.ruonbar.com/RUCONBAR-brochure.pdf

Annexe IV. ACV CORTI & LOMBARDI 2004

End life tyres: Alternative final disposal processes compared by LCA

Disponible via le lien suivant :

http://www.aitec-ambiente.org/Portals/2/docs/pubblci/Documenti/Raccolta%20bibliografica/AITEC_CESISP_Stato%20arte%20-%20letteratura/corti%202004_pneumatici_RE.pdf

► OBJECTIFS

Étudier les impacts environnementaux de quatre types de traitement de pneumatiques usagés, dont deux voies de valorisation matière (*mechanical pulverisation process*, « MPP » et *cryogenic pulverisation process* « CPP »), et deux voies de valorisation énergétique.

► CHAMPS

- Unité fonctionnelle : une tonne de pneumatiques entrant dans chaque système
- Définition des systèmes :
 - MPP : la première étape consiste en la production de particules de 7 à 14 cm, et l'extraction de la fraction métallique. La seconde étape permet de réduire les particules à 2 cm, qui seront pulvérisées pour atteindre une granulométrie inférieure à 1 mm dans la troisième et dernière étape

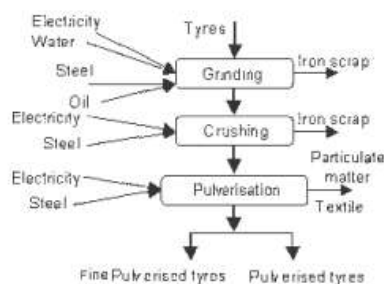


Fig. 1. Production of pulverised tyres by mechanical crushing process.

- CPP : la première étape est identique à celles du traitement précédent. La seconde étape est la pulvérisation cryogénique en particules de granulométrie plus fine.

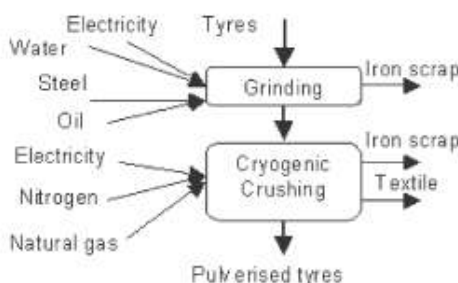


Fig. 2. Production of pulverised tyres by cryogenic crushing process.

Des précisions relatives aux équipements utilisés sont disponibles dans l'ACV.

- Données collectées et pays de référence : installations situées en Italie (modèle thermodynamique pour une des deux voies de valorisation énergétique étudiées).