

SYNTHESE / EXTENDED ABSTRACT
FRANÇAIS / ENGLISH

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

**REVIEW OF THE PROCESSES FOR THE MATERIAL RECOVERY
OF RUBBER WASTE**

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 – 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.

- ✓ En Bibliographie, le document dont est issue cette synthèse sera cité 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

RÉSUMÉ

Cette étude a un double objectif. D'une part, elle a permis de dresser une photographie de la filière des déchets caoutchoutiques en France (gisements, modalités de collecte). D'autre part, elle consistait à recenser et d'étudier les procédés permettant leur valorisation matière sous leurs aspects techniques, environnementaux et économiques, et ceci 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 éparpillés sur le territoire, et donc difficilement mobilisables et où il n'existe pas de réelle filière de collecte et de valorisation de ces déchets.

S'agissant des 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, et visent à développer la valorisation matière des caoutchoucs.

MOTS CLÉS

Caoutchouc, élastomère, valorisation matière, recyclage, régénération, dévulcanisation

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 aimed to identify recovery processes 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 mobilise and there is no dedicated collection and recovery system in place.

Regarding 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.

KEYWORDS

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

SOMMAIRE

SYNTHÈSE (FRANÇAIS) 5

I.	CONTEXTE DE L'ÉTUDE	5
II.	CHAMP, OBJECTIFS, DÉROULEMENT ET PLAN DE L'ÉTUDE	6
III.	PRINCIPAUX RÉSULTATS OBTENUS ET CONCLUSIONS DE L'ÉTUDE	7
III.1	État des lieux de la filière (gisements et collecte).....	7
III.1.1	Typologies utilisées	7
III.1.2	Inventaire des gisements.....	7
III.1.3	Filières de collecte	8
III.2	Procédés de valorisation matière	9
III.2.1	Fiches procédés	9
III.2.2	Synthèse et comparaison des procédés identifiés	10
III.3	Analyse des résultats.....	11
III.3.1	Valorisation des déchets caoutchoutiques en France.....	11
III.3.2	Freins et leviers	11
IV.	CONCLUSION.....	12

EXTENDED ABSTRACT (ENGLISH)13

I.	CONTEXT OF THE STUDY	13
II.	SCOPE, OBJECTIVES AND STRUCTURE.....	14
III.	MAIN RESULTS OBTAINED AND CONCLUSIONS OF THE STUDY	14
III.1	State of affairs in the sector (waste generation and collection).....	14
III.1.1	Typologies used.....	14
III.1.2	Inventory of generated waste quantities.....	15
III.1.3	Collection channels	15
III.2	Material recovery processes	16
III.2.1	Method factsheets	17
III.2.2	Synthesis and comparison of identified recovery methods	18
III.3	Analysis of results.....	19
III.3.1	Recovery of rubber waste in France.....	19
III.3.2	Obstacles and potential improvements	19
IV.	CONCLUSION.....	20

I. CONTEXTE DE L'ÉTUDE

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, 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) :

- 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.

II. CHAMP, OBJECTIFS, DÉROULEMENT ET PLAN DE L'ÉTUDE

L'étude dont est issue la présente synthèse a consisté à réaliser un état de l'art des techniques et procédés visant à la valorisation matière des déchets caoutchoutiques.

► CHAMP DE L'ÉTUDE

- **Périmètre technique** : l'étude a porté 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 de la situation des gisements et des filières de collecte a porté sur la France. Quant à l'étude des procédés de valorisation matière, elle s'est étendue à l'international.

► OBJECTIFS ET DÉROULEMENT

L'étude, débutée en avril 2011, s'est décomposée en deux grandes phases dont les objectifs respectifs ont été les suivants :

- **Première étape** : obtenir une cartographie précise de la filière des déchets caoutchoutiques (gisements, collecte, types de procédés existants) en France.
- **Seconde étape** : établir une analyse approfondie des différents procédés de valorisation matière existants, afin d'en connaître les aspects techniques, environnementaux et économiques. L'étude des procédés a été effectuée parallèlement via des recherches bibliographiques et la réalisation d'entretiens.

► PLAN DE L'ÉTUDE

Le plan du rapport final de l'étude est le suivant :

- **Chapitre I : Contexte et objectifs de l'étude**
- **Chapitre II : État des lieux de la filière (gisements et collecte)**
Ce chapitre présente les résultats des recherches effectuées afin d'obtenir une cartographie des gisements et de la collecte des déchets caoutchoutiques, ainsi que les principaux types de procédés de valorisation existants.
- **Chapitre III : Procédés de valorisation matière**
Ce chapitre présente les résultats des travaux effectués dans le cadre de l'analyse des différents procédés de valorisation matière existants.
- **Chapitre IV : Bilan et synthèse**
Ce chapitre permet de comparer synthétiquement les différentes techniques identifiées, en fonction de leurs caractéristiques techniques, économiques et environnementales.
- **Chapitre VI : Conclusion de l'étude**

III. PRINCIPAUX RÉSULTATS OBTENUS ET CONCLUSIONS DE L'ÉTUDE

III.1 ÉTAT DES LIEUX DE LA FILIÈRE (GISEMENTS ET COLLECTE)

III.1.1 TYPOLOGIES UTILISÉES

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

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 véhicules⁵, répartis entre :
 - déchets de pneumatiques,
 - déchets de véhicules hors pneumatiques,
- Déchets hors véhicules.

Des détails complémentaires relatifs à l'établissement de cette typologie sont présentés dans le rapport complet de l'étude.

III.1.2 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.

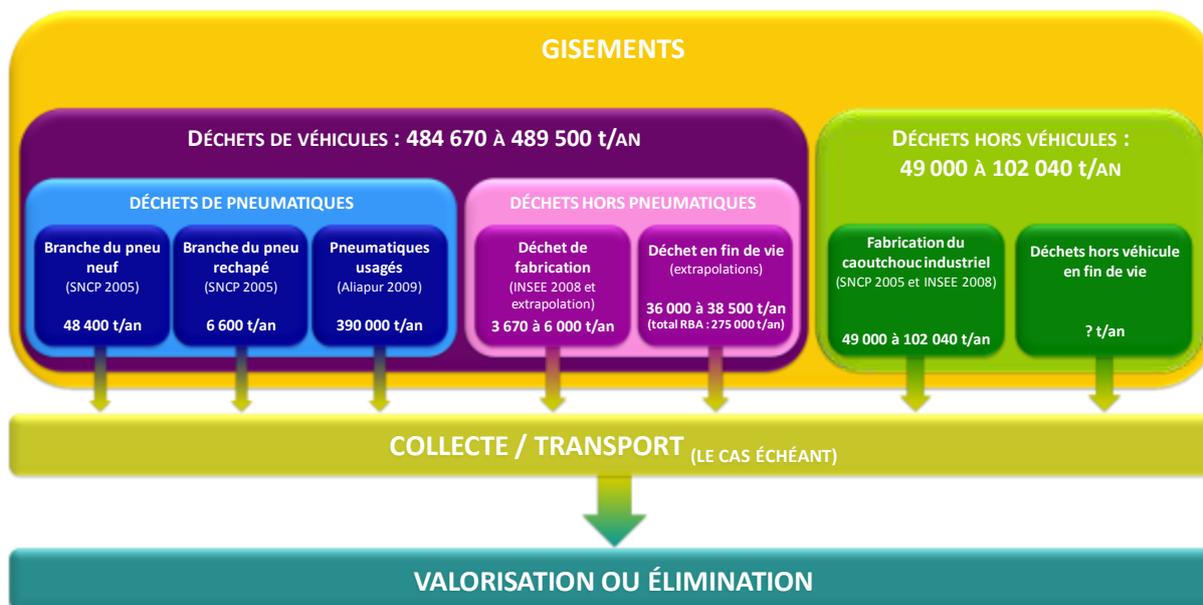


Figure 1 : Répartition des gisements de déchets caoutchoutiques

Les sources et hypothèses de calcul des gisements présentés ci-dessus sont détaillées dans le rapport complet de l'étude. Il est important de préciser que ces estimations, dont certaines sous forme de fourchettes relativement larges, s'appuient sur des sources documentaires parfois anciennes et, dans certains cas, sur des extrapolations. Il est également nécessaire d'indiquer que ces gisements ne représentent pas les gisements de déchets caoutchoutiques effectivement récupérables et réellement collectés.

⁵ Est considéré comme véhicule tout élément mobile permettant de déplacer des personnes ou des charges d'un point à un autre.

III.1.3 FILIÈRES DE COLLECTE

Les déchets caoutchoutiques étant considérés comme des déchets d'activités économiques (DAE) non dangereux⁶, 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 soumise à une obligation réglementaire. Ainsi, depuis 2002, il est interdit de mettre en centre de stockage des déchets ultimes des pneus usagés. Les fabricants de pneumatiques se sont fédérés pour créer un total de sept éco-organismes⁷, dont ALIAPUR en est le plus important.

- **Déchets de véhicules hors pneumatiques**

Ces déchets sont soumis à 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.

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

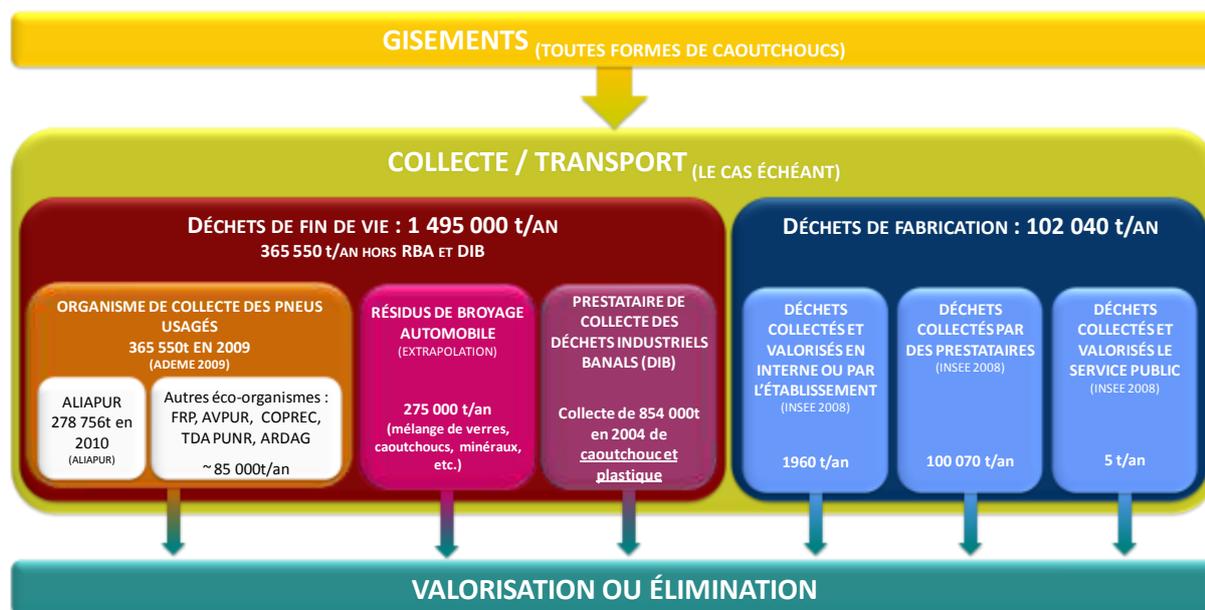


Figure 2 : Organisation des filières de collecte de déchets caoutchoutiques en France

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.

⁶ Anciennement déchets industriels banals (DIB)

⁷ Trois en France métropolitaine : ALIAPUR, FRP, COPREC. Quatre dans les DOM : AVPUR, TDA PUNR, ARDAG

III.2 PROCÉDÉS DE VALORISATION MATIÈRE

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

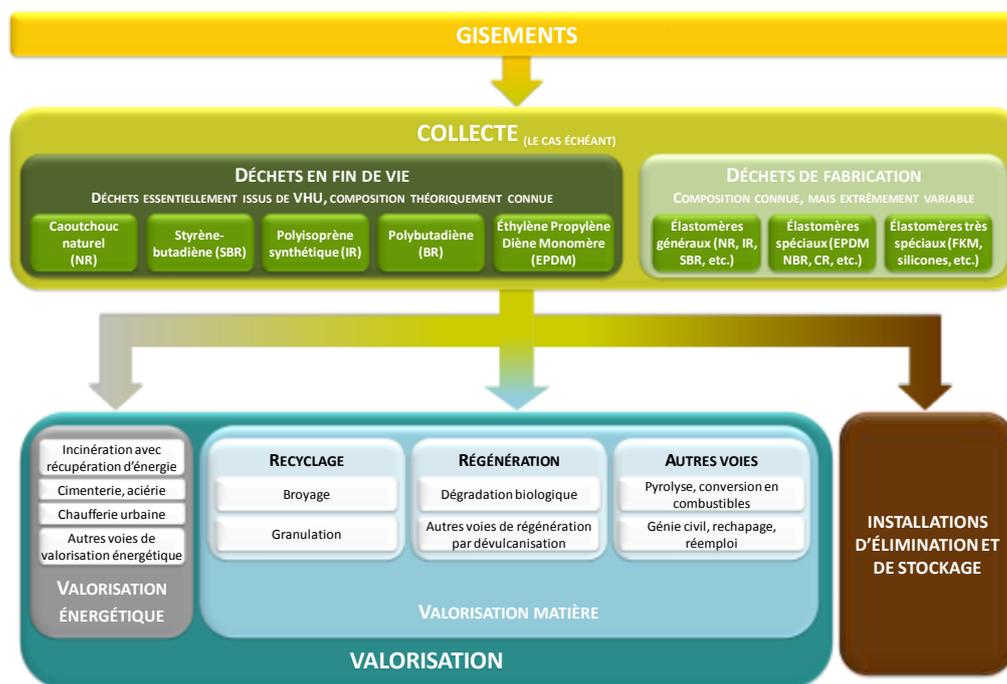


Figure 3 : Schématisation des principaux modes de valorisation des déchets caoutchoutiques

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 ci-dessus mais n'ont pas été retenues dans l'étude détaillée 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.2.1 FICHES PROCÉDÉS

Les recherches menées ont permis de réaliser les fiches suivantes :

- Fiches Broyages : fiche Broyage / Granulation et fiche Cryobroyage
- Fiches Régénération :
 - Présentation générale ;
 - Fiche procédé mécano-chimique ;
 - Fiche procédés biologiques ;
- Fiche Valorisation en milieux supercritiques ;
- Fiche Pyrolyse ;
- Autres procédés.

Le détail des fiches procédés est disponible dans le rapport complet de l'étude.

III.2.2 SYNTHÈSE ET COMPARAISON DES PROCÉDÉS IDENTIFIÉS

Une comparaison qualitative et en absolu des différents procédés a été effectuée en fonction de 5 critères différents.

Le tableau ci-dessous présente ce comparatif synthétique, et rappelle également les principales caractéristiques techniques, économiques et environnementales de chaque technique.

Code couleur	
	Performance perfectible
	Performance moyenne
	Bonne performance
	Pas d'information

Tableau 1 : 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 SUPERCRIITIQUES	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 ANALYSE DES RESULTATS

I.1.1 VALORISATION DES DECHETS CAOUTCHOUTIQUES EN FRANCE

► 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.
- **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.
- **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.

I.1.2 FREINS ET LEVIERS

À la lumière des informations recueillies, plusieurs freins, principalement d'ordres technique, économique et réglementaire, ont été identifiés qui pénalisent 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** : 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 présence de 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 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.

IV. CONCLUSION

L'essentiel du gisement collecté séparément et traité est constitué majoritairement de déchets de pneumatiques. La valorisation matière de ces déchets ne représenterait pas la voie de valorisation préférentielle en France.

La valorisation des déchets de fabrication n'est 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.

I. CONTEXT OF THE STUDY

Rubber waste (inflatable or industrial) constitutes a significant quantity of waste (several hundreds of thousands of tonnes annually in France), which can be recovered⁸ by employing different procedures.

Given its strong calorific power, energy recovery is generally practiced using co-combustion in a cement or paper factory to supply calorific energy such as heat or waste streams. Because of certain characteristics such as suppleness, strong hydraulic conductivity, and a lightweight nature, rubber waste can be recycled⁹, re-purposed¹⁰ (i.e. second use of a tire), or reused¹¹ (e.g. the reuse of car tires to protect the hull of a boat) during the material recovery process.

Rubber that has undergone a material recovery can be used in numerous ways in public works (retention and infiltration basins, road surfaces, retaining walls, alleviated embankments) as well as in implementations beyond public works (playgrounds, sports surfaces, tramway platforms, baffles, synthetic lawns, etc.).

Thus, the three principal observations relative to rubber waste are: the amount of waste generated, the different recovery methods and the uses of the recovered material.

To supplement these preliminary elements and clearly articulate this study's objective, it is important to note that several obstacles to the general recovery of rubber waste, and in particular, to material recovery, have already been documented by different stakeholders in the sector.

The following constraints can therefore be mentioned (this list is not exhaustive):

- Insufficient amounts of rubber in some products greatly reduce the interest of its extraction from an economical point of view, and complicate action from a technical point of view.
- The contamination of certain rubber products, due to the substances they transport (e.g. conveyor belts).
- A complicated collection due to the scattering and wide range (by size and weight) of rubber parts.
- The presence of several other materials in rubber objects, which complicates the recovery process.

Moreover, it has been noted that material recovery has been losing some of its importance in favor of energy recovery since the mid-2000s.

⁸ As defined in the Article L541-1-1 of the Code of the environment (Section 1, Chapter 1, Title IV, Book V), the term 'recovery' means any operation whose principal result is that waste is employed to useful purposes in substitution to other substances, materials or products that have been used for a particular purpose, or that waste have been prepared to be used for this purpose, including by the waste generator..

⁹ Recycling means any recovery operation by which waste, including organic waste, is reprocessed into substances, materials or products for their original or other purposes. The operations of energy recovery from waste, of conversion of waste into fuel and the operations of embankment cannot be qualified as recycling operations.

¹⁰ Reuse means any operation by which substances, materials or products that are not waste are used again for the same purpose as the one for which they were designed.

¹¹ Re-purposing means any operation by which substances, materials or products that have become waste are used again.

II. SCOPE, OBJECTIVES AND STRUCTURE

The present synthesis was drawn from a study, which addresses state-of-the-art techniques and methods for the material recovery of rubber waste.

► FIELD OF STUDY

- **Technical scope:** the study focused on the processes of material recovery, including any mode of waste treatment enabling the re-purposing, reuse or recycling of all types of rubber waste.
- **Geographical coverage:** the analysis of waste streams and collection channels focused on France. As for the study on material recovery processes, it was extended to an international scale.

► OBJECTIVES AND WORK FLOW

The study, initiated in April 2011, was divided into two major phases with the following respective goals:

- **First step:** obtain a precise mapping of the rubber waste sector (quantities, collection, types of existing recovery processes) in France.
- **Second step:** establish a deeper analysis of the different existing material recovery methods in order to know the technical, environmental and economic aspects. The study of these methods was conducted simultaneously through bibliographic research and interviews.

► STRUCTURE OF THE STUDY

The structure of the final report of the study is as follows:

- **Chapter I: Context and objectives of the study**
- **Chapter II: State of affairs in the sector (quantity and collection of generated waste)**
This chapter gives an overview of the quantity of rubber waste generated, its collection, and the main existing material recovery processes.
- **Chapter III: Material recovery processes**
This chapter presents the results of the analysis of the different existing material recovery processes.
- **Chapter IV: Synthesis**
This chapter synthetically compares the different processes identified, according to their technical, economical and environmental characteristics.
- **Chapter VI: Conclusion**

III. MAIN RESULTS OBTAINED AND CONCLUSIONS OF THE STUDY

III.1 STATE OF AFFAIRS IN THE SECTOR (WASTE GENERATION AND COLLECTION)

III.1.1 TYPOLOGIES USED

The study of the generation and collection of rubber waste was developed by identifying two main origins for waste: **manufacturing waste** and **end-of-life waste**.

Below is a simplified classification by waste type that was developed for the detailed study of rubber waste quantities and collection in France.

- **Vehicle waste,**¹² divided between **Tire waste** and **Non-tire vehicle waste**
- Non-vehicle waste

Additional details explaining the creation of this typology are presented in the complete report of the study.

III.1.2 INVENTORY OF GENERATED WASTE QUANTITIES

The figure below recapitulates the distribution of rubber waste quantities in France as estimated in this study.



Figure 1: Distribution of generated rubber waste quantities

The data presented above, which provides statistics of quantities of waste generated, are detailed in the complete report of the study. It is important to note that these estimates, some of which span relatively large ranges, rely on projections or in some cases older document sources. It is also important to note that the quantity of rubber waste generated does not represent the quantity of rubber waste successfully recovered or collected.

III.1.3 COLLECTION CHANNELS

The regulations concerning rubber waste, which is considered non-hazardous waste resulting from economic activities, are not very restrictive.

Few collection channels have been established, so the following classifications have been made for the collection of these waste products:

- **Tire waste:** the collection of tires is subject to regulation. Since 2002, placing used tires in a waste disposal facility has been restricted. Tire manufacturers have united to create seven eco-organisations, of which ALIAPUR is the most important.
- **Non-tire vehicle waste:** these waste products are subject to an industry collection. Since 2006, owners of out-of-use vehicles (end-of-life vehicles) must return them to certified treatment facility, allowing for proper classification.
- **Other waste:** no organised channel exists for the collection of other types of waste. Individual waste collection operations set up by individual actors, however, do exist.

The diagram below illustrates the classification just outlined:

¹² A vehicle is considered to be anything with a mobile element allowing the movement of people or objects from one point to another.

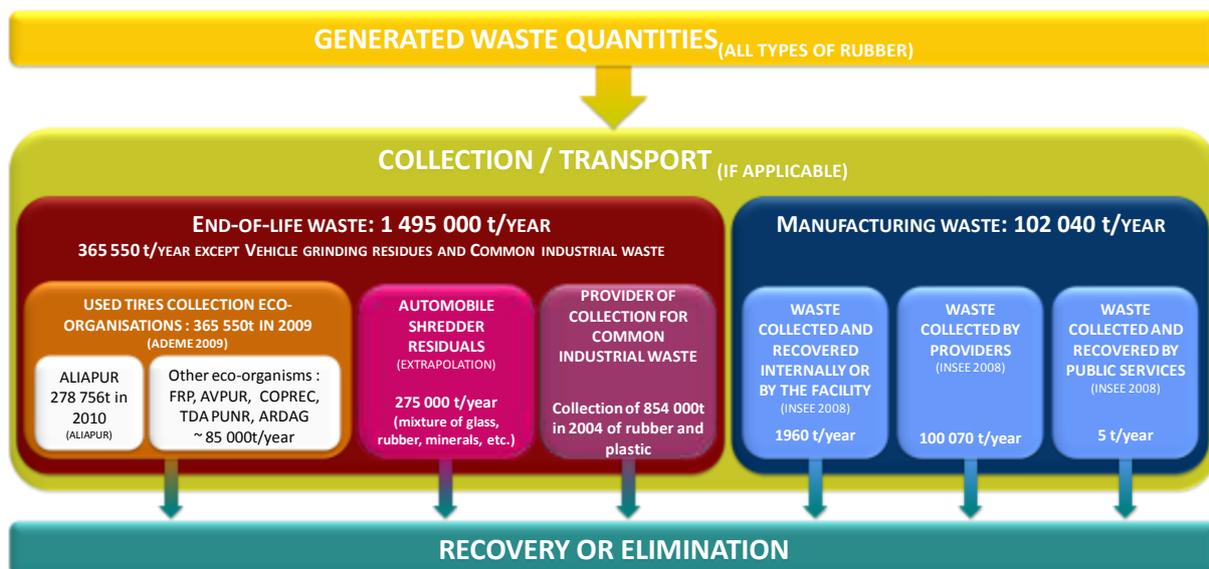


Figure 2: Organisation of rubber waste collection channels in France

Similar to the schematisation of generated waste quantities, it is important to note that some of the figures presented above may source from older documentation or extrapolations. Moreover, the indicated tonnages do not represent the actual rubber waste collection in France.

III.2 MATERIAL RECOVERY PROCESSES

The diagram below summarises both the main types of rubber and primary recovery methods of rubber waste.

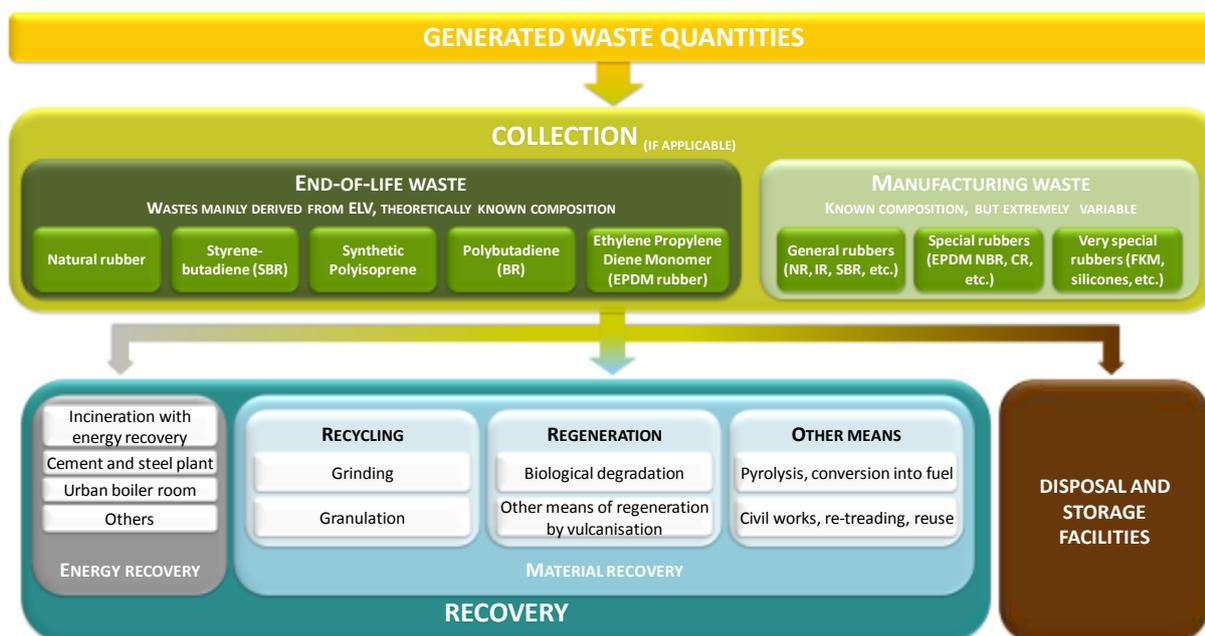


Figure 3: Schematisation of the main recovery processes for rubber waste

In the absence of an official, uniform and commonly accepted classification of procedures for rubber recovery, the following classification was established:

- **Recycling:** recycling techniques aim to obtain a high-quality raw material that can be used as a filler or main constituent in the industrial manufacturing process.
- **Regeneration:** identified regeneration techniques aim to de-vulcanise treated rubber. Regeneration can be conducted through both chemical and chemical mechanical methods.

- **Other methods:** other recovery methods identified primarily concern techniques for obtaining combustibles using a thermal treatment. Remoulding or reuse techniques are presented in the figure below but have not been evaluated in the detailed study of material recovery methodologies.

This classification is based on interviews and bibliographic research. As a result, a conclusion cannot be made due to the opinions of numerous stakeholders in this sector.

III.2.1 METHOD FACTSHEETS

The research yielded the development of the following factsheets:

- Grinding method factsheets:
 - Grinding / granulation factsheet
 - Cryogrinding factsheet
- Regeneration fact sheets:
 - General presentation
 - Chemical mechanical process fact sheet
 - Biological processes factsheets
- Recovery in supercritical environments factsheet
- Pyrolysis factsheet
- “Other methods” factsheet, regrouping techniques at the R&D stage, or used for other polymer types but not yet for rubber

The details of these factsheets are available in the complete report of the study.

III.2.2 SYNTHESIS AND COMPARISON OF IDENTIFIED RECOVERY METHODS

A qualitative and conclusive comparison of the different rubber recovery methods was carried out according to 5 different criteria.

The table below presents this synthetic comparison, and serves as a reminder of the main technical, economical and environmental characteristics of each technique.

Colour legend	
	Performance needs improvement
	Average performance
	Good performance
	No information

Table 2 : Overview of the different identified processes

TECHNIQUES		CHARACTERISTICS				RATING				
		TECHNIQUES	ECONOMICAL	ENVIRONMENTAL AND SANITARY	OUTLETS	STATE OF DEVELOPMENT	ABILITY FOR IMPLEMENTATION	COSTS	SANITARY AND ENVIRONMENTAL IMPACTS	QUALITY OF THE GENERATED RAW MATERIALS
GRINDING	GRINDING / GRANULATION	Mechanical treatment of rubber waste.	The lower the particle size, the higher the cost of the process.	Environmental impacts appear to be low. Sanitary impacts linked to dust.	Variable (ranging from Public work applications to use as raw material for rubber manufacturing).					
	CRYOGRINDING	Mechanical treatment of waste after cooling below their glass transition temperature	Important energy costs given the need to maintain low temperatures.	Significant environmental impacts associated with the use of liquid nitrogen. Sanitary impacts linked to dust.	Fine granules of sufficient quality can be used as a secondary raw material in rubber manufacturing.					
REGENERATION	THERMO-MECHANICAL PROCESSES	Waste treatment in an extruder or a mill, with possible addition of a de-vulcanising agent.	High investment costs, but quickly amortised	Low impact on air, water and soil according to manufacturers.	Possible reuse in the manufacture of new rubber parts (10% to 70% depending on the application).					
	BIOLOGICAL PROCESSES	Treating rubber waste with micro-organisms, for the purpose of regeneration.	Developed on an industrial scale by a single actor who did not wish to communicate any information.	Outflows are mostly biodegradable.	De-vulcanised and de-sulfured products					
	RECOVERY IN SUPERCRITICAL SITUATIONS	Treatment in a fluid with intermediary properties between liquid and gas.	No information identified.	In R&D, no information identified.	Technique enables de-vulcanising, depolymerising even so as to completely decompose the rubber.					
PYROLYSIS		Thermal degradation in oxygen-poor atmosphere.	High equipment costs of pyrolysis responding to European standards.	Impacts relatively low for equipment that adheres to European standards.	Oils and pyrolysis gas can be used as combustibles. Cokes and carbon black can be used to manufacture rubber pieces.					

I.1 ANALYSIS OF RESULTS

I.1.1 RECOVERY OF RUBBER WASTE IN FRANCE

▶ CURRENT ORGANISATION AND TRENDS

- **Material recovery versus energy recovery:** currently, the importance of the rubber waste recovery seems to be strongly influenced by strategic and political choices in the used tires sector.
- **Implementation of dedicated channels:** presently, there is no existing channel for waste other than for tire waste products. There is currently, a priori, **no work or ongoing discussions on this subject.**

▶ RECOVERY OF RUBBER ACCORDING TO THEIR ORIGIN

- **Material recovery of manufacturing waste:** most of the material recovery of manufacturing waste is done **internally** and based on waste management strategies undertaken by each industrial actor. In some cases, it is even based on the strategies implemented at different sites managed by the same industrial actor.
- **Material recovery of waste at the end-of-life:** the material recovery of rubber waste at the end-of-life concerns essentially **used tires.**

The actors involved in the collection and grinding of various wastes sometimes also collect non-tire rubber waste, but this practice seemed to be minimal.

I.1.2 OBSTACLES AND POTENTIAL IMPROVEMENTS

Based on the information gathered, several technical, economical and regulatory obstacles have been identified that hinder the development of material recovery techniques for rubber waste:

- **Dispersed generation of waste and treatment of mixes:** in order for the process to be economically viable, the tonnages to be treated must reach a sufficient quantity. To date -- with the exception of tire waste, and to a lesser extent, other vehicle-based rubber waste -- the quantity of generated rubber waste is too dispersed and/or too small to allow for the implementation of material recovery units.
- One area for further study on the development of material recovery processes could be assessing the “concentration / massification” of generated waste at the local level (by region or department).
- Using the example of what is done for some of today’s vehicle waste, it could also be possible to collect other types of rubber waste without a clear distinction of the types of rubber collected. Furthermore, the rubber would be processed and prepared in order to obtain a mixed material with “average” properties.
- **Technical difficulties:** in the case that the quantity of rubber waste was sufficient so that the installation of a material recovery unit could be economically attractive, technical difficulties still present problems. Rubber possesses inherent challenges that make it difficult to implement material recovery (reticulation and many additives).
- Although the regulatory and economic environment tends to promote material recovery, this channel will only be sustainable if the different techniques are economically viable. The establishment of collaborative projects for the recovery of all types of rubber waste, where many stakeholders are involved (rubber manufacturers, car manufacturers, treatment operators, institutional actors) would certainly help achieve economies of scale during the phases of R&D.
- Several clusters consisting of industrial actors and research centres are currently working on the theme of waste rubber material recovery. However, no information has been collected from these actors regarding the nature and progress of this work **Regulatory aspects and industrial risks:** other than technical difficulties, in the case that an industry succeeded in implementing a technically and economically viable process of rubber waste recovery, it would also need to be able to rigorously respond to national and European regulations (particularly, REACH registration for rubber mixes, adhering to the restrictions

placed on persistent organic pollutants, etc.). One of the main challenges is the **risk of fire**. Indeed, one explanation for the declining share of material recovery versus energy recovery seems to be the reduction of the number of actors performing recovery and treatment of rubber waste (in particular granulators). Also, there have been at least two cases where large fires have closed down granulator sites.

IV. CONCLUSION

The bulk of generated waste that is collected and treated separately consists of tire waste. The material recovery of this waste is not the preferred recovery method in France.

The recovery of manufacturing waste is not uniform in France, even across different product sites belonging to the same industrial actor.

Three main recovery methods were analysed: grinding / granulation, processes of regeneration and pyrolysis.

The level of development for each of these techniques varies widely and depends more on the implementation costs for these methods, rather than on scientific and technical obstacles.

Although the quantity of rubber waste generated could be adequate for the development of material recovery, the costs for reusing the recovered material through traditional methodologies on an industrial scale go beyond the general cost of virgin material for a quality that is sometimes inferior.

The analysis of techniques under development during this study, coupled with the current economic and environmental context surrounding the economy of raw materials, suggests a reversal of this trend in the near future.