

**SYNTHESE
FRANÇAIS**

**ETUDE DES PROCÉDES ET DES TECHNIQUES D'INCORPORATION
DE TRACEURS DANS LE POLYPROPYLENE (PP),
EN VUE DU TRI AUTOMATISÉ DE DÉCHETS PLASTIQUES
DE PRODUITS HORS D'USAGE**

mars 2011

**F. BEZATI - IMP - INSA DE LYON & MAPIE - ENSAM CHAMBERY
V. MASSARDIER-NAGEOTTE - IMP - INSA DE LYON
D. FROELICH - MAPIE - ENSAM CHAMBERY**

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, Etude des procédés et des techniques d'incorporation de traceurs dans le polypropylène (PP), en vue du tri automatisé de déchets plastiques de produits hors d'usage, 2011, 147 p, n°09-0909/3A

- ✓ Ces travaux ont reçu le soutien de l'ADEME (Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Energie)
www.ademe.fr

Cette étude a été réalisée dans le cadre de la thèse de doctorat de Feliks BEZATI intitulée « L'addition de traceurs dans les polymères : Une nouvelle voie spectroscopique par fluorescence X, pour l'identification rapide et le tri des matériaux plastiques ».

Celle-ci a été soutenue avec succès le 16 novembre 2010 à l'INSA de LYON.

Ces travaux de thèse ont été réalisés entre 2007 et 2010 au sein de l'UMR CNRS 5223 / Ingénierie des Matériaux Polymères, au Laboratoire des Matériaux Macromoléculaires de l'INSA de Lyon et au Laboratoire Conception Produit Innovation de l'Institut ARTS et METIERS ParisTech Chambéry. Les directeurs de thèse étant le Dr. Valérie Massardier-Nageotte et le Pr. Daniel Froelich.

Ce travail a bénéficié d'un cofinancement ADEME – RECORD par le biais d'une bourse de thèse.

La thèse est disponible en ligne sur le site de l'INSA DE LYON à l'adresse suivante :
<http://docinsa.insa-lyon.fr/these/>

Résumé

Ce travail de thèse a eu comme objectif principal de prouver la faisabilité technique de détection par spectrométrie de fluorescence X de traceurs ajoutés dans une matrice polypropylène afin de développer un tri efficace et rentable.

Dans un premier temps nous avons choisi les traceurs convenant le mieux à notre problématique, en s'appuyant sur des critères tels que la toxicité et la radioactivité, l'intensité du signal de détection, la singularité du pic, la disponibilité des réserves et le prix. Suite à l'application de ces contraintes nous avons choisi les oxydes de terres rares comme traceurs.

Deuxièmement, après avoir sélectionné les traceurs, nous avons étudié leur dispersion dans la matrice PP ainsi que leur impact sur les propriétés du matériau tracé. Les résultats expérimentaux présentés ont montré que l'addition de 1000 ppm d'oxyde de terre rare, de taille micrométrique, dans une matrice polypropylène a un impact non significatif sur les propriétés mécaniques et physico-chimiques, ainsi que sur la photo-dégradation sous rayonnement UV. De plus, la dispersion est homogène sans formation d'agglomérats.

Pour finir nous avons validé leur choix par rapport à la détection par SFX. Des résultats expérimentaux et de modélisation ont montré que nous pouvons détecter les oxydes de terre rare dans une gamme de concentration [100-1000 ppm] pour un temps d'acquisition de 10 ms.

Mots-clés : traceur, dispersion de charge, propriétés de polyoléfines, vieillissement, détection, identification, spectrométrie de fluorescence X, tri, recyclage

Abstract

Rare earth oxides can be used as tracers for the identification of polymer materials in order to have an economically efficient recycling and high speed automatic sorting of plastic wastes. This study focused on the detection of these particles by X-ray fluorescence spectrometry and their effect on PP matrix with respect to thermal and mechanical properties and to photo-degradation under UV irradiation exposure.

Addition of 1000 ppm of such particles, of micrometric size, has a minor effect on the mechanical and thermal properties of the traced materials as well as in the photo-degradation of the polymer after UV irradiation exposure. The SEM images together with the results obtained from image processing show a homogenous dispersion of tracers into PP matrix.

Regarding their detection by X-ray fluorescence spectrometry, experimental and modeling results have shown that the rare earth oxides studied could be detected in a range [100-1000 ppm] for 10 ms acquisition time.

Keywords: tracer, dispersion of fillers, properties of polyolefin, UV photo-degradation, detection, identification, X-ray fluorescence, sorting, recycling

Introduction Générale

Les performances considérables des plastiques, telles que leur faible poids, leur durabilité, leur faible coût, leurs nombreuses propriétés (utilisation dans un vaste domaine de température, résistance à des nombreuses substances chimique et facilité de mise en œuvre) sont à l'origine d'une croissance de production annuelle de 10%, depuis 1950, et d'une demande mondiale en 2004 de 225 million de tonnes. Néanmoins, la gestion de leur fin de vie s'avère délicate et est devenue une priorité pour tous les pays industrialisés.

En 2004, en Europe, 37% des plastiques étaient consommés dans l'emballage, 15 % pour des applications dans les secteurs de l'automobile et des équipements électriques et électroniques et le reste dans l'agriculture, le bâtiment, les loisirs, etc. Par contre, en ce qui concerne la génération de déchets, cette même année, 60% des déchets plastiques provenaient de l'emballage tandis que 10% étaient issus des véhicules hors d'usage (VHU) et des déchets d'équipements électriques et électroniques (DEEE).

En ce qui concerne le recyclage et la récupération de ces matières plastiques, actuellement, c'est dans le secteur de l'emballage que le recyclage est le plus développé (environ 25% sont recyclés) et cela grâce au tri automatisé par spectrométrie infrarouge. Cependant, dans le secteur automobile et des équipements électriques et électroniques, des contraintes techniques (couleur, granulométrie) empêchent d'utiliser efficacement ce type de techniques. Actuellement ces déchets sont essentiellement traités par des filières de tri post broyage et permettent de récupérer uniquement 6 à 8% des plastiques avec des niveaux de séparation conduisant à des grades dont les performances ne répondent pas à des applications à très haute valeur ajoutée.

Afin de gérer la fin de vie de produits de consommation, la Commission Européenne a commencé à mettre en place deux directives, la 2000/53/CE et 2002/96/CE, traitant les matériaux de VHU et DEEE, respectivement. L'objectif pour les VHU est qu'à partir du 1^{er} Janvier 2015, 95% des matériaux doivent être valorisés, dont 85% en recyclage, tandis que la valorisation pour dix catégories de DEEE doit attendre des taux compris entre 70 et 80%.

Pour tenir les objectifs européens de recyclage des VHU, la filière va être obligée de recycler les plastiques. Aujourd'hui, environ 75% des matériaux sont récupérés (essentiellement métaux ferreux et non ferreux) tandis que le reste, ce qu'on appelle les résidus de broyage automobile (RBA) est en général envoyé en centre d'enfouissement technique ou incinéré. Les RBA contiennent environ 50% de plastiques, et seule une fraction de polyoléfines non chargés de 6 à 8% est recyclée. A ce jour les plastiques ont une part croissante dans le poids du véhicule en vue de son allègement. Le problème de la fin de vie des matières plastiques de VHU sera donc croissant si on n'anticipe pas le recyclage de ces matières.

En ce qui concerne les DEEE, afin de tenir les objectifs de recyclage fixés au niveau européen, le problème est non seulement de trier les plastiques entre eux mais aussi, au sein d'une même famille, d'extraire ceux qui sont ignifugés. En effet, il peut y avoir des problèmes de toxicité, s'il y a présence d'agents bromés et de perturbation du processus de recyclage car les produits se dégradent si la température d'extrusion est trop élevée.

Outre la réglementation qui impose des objectifs de recyclage et d'utilisation de matières recyclés, le développement du recyclage contribue à la préservation des matières

premières et à la réduction des émissions polluantes. La raréfaction des énergies fossiles, le développement de l'économie locale, les bénéfices environnementaux associés au recyclage jouent en sa faveur pour des applications à haute valeur ajoutée. Il est alors nécessaire de produire des matières secondaires de qualité pour proposer de nouvelles solutions à un marché dont la demande de matières plastiques recyclées est nettement plus forte que l'offre actuelle.

Pour les raisons citées ci-dessus, les acteurs du recyclage tentent de valoriser une matière la plus pure possible après des opérations de démontage, de broyage et de tri. Or, les technologies actuelles n'ont pas les capacités pour trier les matériaux polymères sombres, ni en fonction de leurs formulations, ni de leurs propriétés rhéologiques. Ceci, alors que plus de 60% des pièces plastiques utilisées dans l'automobile sont de couleur sombre voire noire et que ce chiffre est estimé à 40% dans le cas des déchets électriques et électroniques.

La nécessité d'améliorer les méthodes de tri afin de rendre le recyclage des matériaux plastiques viable devient urgente. Pour avoir un recyclage rentable et efficace, les matériaux plastiques doivent être triés automatiquement en fonction de la nature des formulations et à un niveau de pureté élevé.

Les technologies de tri existantes, utilisées pour les déchets plastiques, ne fournissent pas la flexibilité exigée pour un tri ultrarapide des plastiques par type et grade. La technique de traitement d'image haute résolution à partir de la transmission de rayons X, est limitée actuellement à la séparation du PVC et du PET tandis que les techniques de tri en temps réel basées sur la spectroscopie proche infrarouge ne peuvent pas identifier les différents grades ou formulations du même type de plastique et trier les plastiques sombres présents dans de très nombreuses pièces pour l'industrie automobile.

Contenu de l'étude

Bien que des travaux de recherche aient été réalisés, les technologies industrielles n'utilisent pas un système traceur pour faciliter l'identification et le tri. Dans les années 90, sur un projet financé par la Communauté Economique Européenne, le Dr Ahmad (Université de Cranfield) a développé un nouveau concept d'identification de plastiques par introduction de traceurs fluorescents dans les polymères ce qui leur donne une signature en fluorescence UV. L'utilisation de traceurs doit permettre l'obtention de matériaux triés de haute pureté, une séparation des polymères par formulations, une identification positive et un tri rapide. Ces travaux ont reporté que la présence de colorants peut réduire le rendement de fluorescence et que le signal en présence de colorant noir était trop faible pour obtenir une identification du traceur. En plus de ces limitations, la spectroscopie UV est une technique de caractérisation surfacique ce qui impose une surface propre pour la détection des traceurs.

Après deux études confiées conjointement à l'IMP et au LCPI par ReCoRD sur l'ajout de traceurs dans le polypropylène, il a été conclu que la spectrométrie de fluorescence X (SFX) peut offrir la possibilité de trier les matériaux polymères sombres. La SFX est une technique d'analyse élémentaire et non-destructive. Par rapport à la spectroscopie UV, le processus de détection n'est pas affecté par la présence des colorants noirs et une surface propre n'est pas nécessaire puisque elle permet une analyse en volume d'une épaisseur de 1 mm. Cependant, comme la SFX est une technique spectroscopique permettant une analyse

élémentaire, cela signifie que le nombre de traceurs est limité aux éléments du Tableau Périodique de Mendeleïev.

L'étude est principalement focalisée sur la valorisation de polymères fortement utilisés dans les industries automobiles, électriques et électroniques et c'est pour cette raison que nous avons décidé de travailler avec le polypropylène (PP), qui représente environ 30% des quantités totales des plastiques utilisés dans ces deux secteurs.

Les problématiques traitées dans le cadre de ce travail de thèse sont donc :

- l'étude de la dispersion des traceurs et des propriétés du matériau après ajout de traceurs en faible concentration dans la matrice PP
- la détectabilité par SFX et à grand vitesse de traceurs dispersés en faible concentration dans la matrice PP.

Le travail de thèse est présenté en trois chapitres. Dans le 1^{er} chapitre, l'étude bibliographique, présente les techniques de tri appliqués aujourd'hui et leurs limites pour la séparation des plastiques contenus dans les VHU et DEEE. Nous expliquons aussi pourquoi la SFX avec l'utilisation d'un système traceur peut être une technique très prometteuse et nous développons le protocole de sélection des traceurs basée sur des critères tels que le prix, la toxicité, l'écotoxicité, les réserves et la stabilité.

Une fois la sélection des traceurs effectuée, dans le Chapitre 2 nous présentons nos travaux de recherche sur la dispersion des traceurs dans la matrice PP et la caractérisation de cette matrice afin de savoir si le traceur en tant que charge pouvait avoir une influence sur les propriétés mécaniques, physico-chimiques ainsi que la photo-dégradation sous rayonnement UV. Suite à cette caractérisation nous pouvons ainsi estimer la gamme de concentration pour laquelle les propriétés de la matrice polymère ne sont pas affectées.

Pour terminer, le 3^e Chapitre est consacré à l'étude de la détectabilité des traceurs par SFX. Nous présentons des tests en statique ainsi que des essais de modélisation afin d'optimiser la limite de détection, c'est-à-dire la quantité minimale de traceur qu'il faut ajouter pour avoir un matériau trié de haute pureté.

Principales conclusions

L'objectif principal de ce projet était de prouver la faisabilité technique de détection par la SFX de traceurs ajoutés dans une matrice polymère afin de développer un tri efficace et rentable. Pour atteindre cet objectif, nous avons tout d'abord proposé les traceurs qui conviendraient le mieux à notre problématique et, suite à leur choix, nous avons articulé notre recherche sur deux axes :

- le premier était la validation de ces traceurs par rapport à leur impact sur les propriétés du matériau tracé.
- le deuxième était leur validation par rapport à la détection par SFX.

La sélection des traceurs a été accomplie par un processus en deux étapes. Puisque la SFX est une méthode d'analyse élémentaire, la première étape était de choisir les éléments les plus adaptés, puis de choisir la formule chimique qui conviendrait le plus au niveau de la stabilité et de la disponibilité. En appliquant des critères tels que la toxicité et la radioactivité, l'intensité forte du signal de détection, la singularité du pic, la disponibilité des réserves ainsi que des contraintes économiques, nous avons pu trouver que les traceurs a priori les plus adaptés pour notre problématique étaient des oxydes de terres rares.

Le nombre d'études traitant l'ajout de telles particules sur des matrices polymères et à des concentrations de 100 à 1000 ppm est très faible. En conséquence, nous avons dû caractériser les matériaux tracés pour connaître l'impact des oxydes de terres rares sur la matrice PP et les concentrations pour lesquelles ces propriétés ne sont pas significativement affectées.

Les résultats de ces travaux ont montré que l'addition de 1000 ppm de particules d'oxydes de terres rares dans la matrice PP peut réduire l'allongement à la rupture dans une fourchette [10-50%] pour une vitesse de 250 mm/min. Pour la même concentration, les caractéristiques physico-chimiques, analysées par DSC, ont légèrement augmenté, tandis que la stabilité thermique (ATG) a été améliorée.

En ce qui concerne la photo-dégradation sous rayonnement UV, les résultats obtenus par FTIR, DSC, ATG et caractérisation mécanique ont montré que l'addition de particules de CeO₂ dans la matrice PP peut améliorer son comportement en résistant plus longtemps à la photo-dégradation sous rayonnement UV. En effet, les particules de CeO₂ jouent un rôle important dans la stabilisation du polypropylène en retardant le processus de photo-dégradation et en agissant comme des absorbeurs d'irradiations UV. Pour les traceurs restants, les résultats obtenus ont montré le même comportement sous photo-dégradation que la matrice PP de référence.

Un des paramètres clés pour la bonne détection des traceurs par SFX et la minimisation de leur influence sur les propriétés de la matrice polymère est leur dispersion. Celle-ci a été caractérisée quantitativement en appliquant un traitement d'image par Matlab sur les images MEB. Nous avons comparé la distance entre une particule de traceur et dix voisins à la distance théorique pour un empilement cubique et hexagonal. Les résultats de traitement d'image ainsi que les images MEB ont montré une dispersion homogène des traceurs dans la matrice PP, sans formation d'agglomérats pour des concentrations unitaires de traceurs variant de 1000 à 10000ppm.

Suite à la caractérisation des matériaux tracés, nous avons défini une contrainte sur la concentration en traceur. Pour avoir un faible impact sur les propriétés mécaniques et physico-chimiques, ainsi que sur la photo-dégradation sous rayonnement UV celle-ci doit être inférieure à 1000 ppm.

Dans le cadre de la détection des traceurs et de l'optimisation de leur concentration nous avons testé expérimentalement des échantillons avec trois types de détecteurs différents. Les résultats expérimentaux ont montré que le CdTe et le HPGe ont nettement la meilleure sensibilité pour la détection des énergies supérieures à 30 keV, correspondant aux raies énergétiques K de la majorité des traceurs. La gamme de concentration pour laquelle ces détecteurs ont identifié les oxydes de terre rare est [1000-2000 ppm] pour un temps d'acquisition de 10 ms. Concernant le détecteur SDD étudié, son faible épaisseur limite son

rendement et en conséquence la détection de la majorité des oxydes de terre rare, qui ont des raies énergétiques supérieures à 30 keV, est très compliquée.

Les résultats de la modélisation ont montré que le HPGe peut être la meilleure solution pour la détection des oxydes de terre rare. Par contre la différence entre un SDD, plus épais que celui utilisé pour l'obtention des résultats expérimentaux, et un CdTe est que le premier est plus performant pour les traceurs plus légers, tels que Y_2O_3 , CeO_2 et Nd_2O_3 tandis que le deuxième donne de meilleurs résultats pour les éléments plus lourds.

Ce qui est très intéressant est de comparer les résultats expérimentaux avec ceux de la modélisation. Dans le cas du CdTe, nous remarquons que la limite de détection est limitée dans le domaine [500-1000 ppm] principalement à cause de pics d'échappements du cadmium et du tellure, qui créent un bruit de fond très important dans le domaine de sortie des pics de traceurs. En utilisant ce type de détecteur, les meilleurs résultats seront limités à un seuil de détection de 500 ppm pour un temps d'acquisition de 10 ms.

Dans le cas du HPGe, la comparaison entre les résultats expérimentaux et ceux de la modélisation montre une amélioration d'un facteur dix environ. Celle-ci doit être prise avec précaution puisque la couche inactive du HPGe peut avoir un impact sur les calculs de la méthode Monte Carlo en surestimant le nombre de photons comptés dans le taux de comptage net.

Pour finir, dans le cas du SDD, la limite de détection obtenue par modélisation pour un semi-conducteur plus épais est nettement plus basse que pour celui utilisé dans le banc d'essai. L'augmentation de l'épaisseur a amélioré le rendement du détecteur pour les énergies supérieures à 30 keV, ainsi le SDD peut être une solution pour la détection d' Y_2O_3 , CeO_2 , Nd_2O_3 et Gd_2O_3 .

Pour revenir sur le choix du détecteur le plus adapté pour l'identification rapide des oxydes de terre rare la réponse n'est pas simple. Si on se base sur les résultats expérimentaux, il semble que le HPGe et le CdTe sont les détecteurs donnant les meilleurs résultats pour tous les traceurs testés. Pour ce qui est des tests en statique il ne faut pas négliger que le SDD utilisé est d'une très faible épaisseur et, que, actuellement sur le marché il existe des capteurs SDD plus performants.

Si maintenant, on prend en compte les résultats de la modélisation, le HPGe donne les meilleurs tandis que, dans le cas du CdTe, la limite de détection est limitée par les pics d'échappement. Afin d'avoir une réponse claire sur le HPGe, il faudra tester un nouveau détecteur, un peu moins épais que celui des tests, pour pouvoir conclure. Concernant le SDD, via les résultats de la modélisation nous avons vu qu'il donne de très bons résultats pour l' Y_2O_3 , le CeO_2 , le Nd_2O_3 et le Gd_2O_3 . En prenant en considération les réserves des tous les traceurs proposés, il apparaît que ces quatre là ont les disponibilités les plus importantes. Par conséquent, si dans le futur, il est décidé d'identifier les traceurs qui ont des réserves importantes (Gd, Y, Ce, Nd), le SDD peut être le meilleur choix tant d'un point de vue économique et que des performances.

Perspectives

Les résultats de ce travail de thèse ont permis le montage d'un programme ECOTECH de 45 mois (TRIPTIC) financé par l'Agence Nationale de la Recherche, Traceurs Répartis pour l'Identification des Polymères et le Tri Industriel en Cadence. L'objectif du projet TRIPTIC est de développer une technologie de marquage des polymères grâce à des systèmes traceurs, que cela soit en SFX ou fluorescence UV, ainsi que le développement de pilotes de tri. Il fixe aussi comme objectif final du projet, l'arrivée à un projet de normalisation du traçage des matériaux polymères.

En ce qui concerne le projet de thèse en lui-même pour la caractérisation des matériaux tracés, des études supplémentaires peuvent être envisagées comme complément aux résultats présentés.

Tout d'abord, il conviendra de valider le cahier des charges lié aux matériaux tracés, comme le coût de l'ajout de traceurs, la mise en peinture, l'aspect ainsi que l'impact du traceur sur les matériaux tracés recyclés.

Deuxièmement, le protocole d'addition des traceurs peut être optimisé par la recherche d'autres procédés de mise en œuvre qui peuvent faciliter leur dispersion tout en optimisant la quantité de composés organiques volatils émis lors des opérations. Il serait aussi intéressant d'étudier la distribution des traceurs dans des pièces réelles complexes, des phénomènes de ségrégation pouvant intervenir pendant la mise en œuvre.

Pour finir, des études supplémentaires sur les propriétés mécaniques, physico-chimiques et du vieillissement climatique peuvent être considérées sur d'autres grades de PP (dédiées à des applications pour l'industrie automobile) ou d'autres familles de polymères tels que l'acrylonitrile butadiène styrène (ABS) fortement utilisé dans les industries automobiles, électriques et électroniques.

Pour la partie détection, en sachant que d'un point de vue des performances et du prix, le détecteur reste un paramètre clé, il faudra tester un SDD plus épais ainsi qu'un HPGe plus mince afin de confirmer les résultats de la modélisation.

Une autre possibilité pour la détection des oxydes de terres rares est l'utilisation de la SFX en longueur d'onde (WD-XRF). L'avantage de celle-ci est sa très bonne résolution, obtenue grâce à l'utilisation d'un cristal faisant office de réseau. Cependant, le rendement de cette technique est très faible, ce qui signifie qu'il faudrait augmenter le temps d'acquisition et/ou avoir un générateur très puissant.

Les tests ayant lieu en statique, la prochaine étape est de réaliser des analyses en dynamique et cela sera possible grâce au pilote qui va être construit pour le projet TRIPTIC. Pour arriver à la réalisation du pilote, il faudra continuer les tests sur banc d'essais, afin de déterminer le cahier des charges de la détection pour l'applicabilité sur une machine de tri industrielle. Pour aboutir à cela, il faudra trouver la distance et la largeur optimale de détection, la nature et la puissance du générateur de rayons X, la granulométrie des produits, ainsi que la vitesse de défilement et le temps de remplissage du convoyeur pour pouvoir déterminer la cadence de tri en kg/h.

En plus de l'utilisation de la SFX avec un système traceur, nous pouvons envisager son application pour l'identification des contaminants présents dans des matériaux d'ancienne

génération, tels que les métaux lourds et les retardateurs de flamme. En effet, l'usage de Cadmium ou de Plomb dans les colorants de plastiques, ou de retardateurs de flamme de type PBDE (Polybromodiphényléther) était courant il y a une quinzaine d'années et en détectant ces éléments nous pourrions sûrement les trier, dans les résidus de broyage. Cependant, quelques analyses de modélisation, non présentées dans cette thèse, ont montré que le temps d'acquisition est trop long pour détecter 100 ppm de Cadmium, tandis que dans le cas du Plomb, le pic du contaminant est confondu avec le pic du piège et du blindage, qui sont composés du même élément. Donc, pour envisager la récupération des contaminants contenant du Plomb il faudra penser à un autre type de blindage.

Nous avons vu qu'en utilisant la SFX, le nombre de traceurs potentiels est limité par le Tableau Périodique de Mendeleïev. En sachant que la cible à terme est une normalisation des traceurs pour le tri et le recyclage des polymères, il serait bon d'avoir une vision globale de la problématique du traçage à court et à long terme, afin de savoir le nombre de traceurs nécessaires. Pour résoudre ce problème il faudra définir quelles seraient les familles et les grades de matériaux pertinentes pour le recyclage aujourd'hui et à terme. Ce choix doit tenir compte de critères industriels comme l'existence ou pas de procédés ou de filières de recyclage de ces matériaux à terme, des gisements potentiels de ces matières, des performances mécaniques de ces matériaux une fois recyclés, les évolutions prévisibles de la réglementation et enfin de l'intérêt environnemental et économique d'un tel recyclage.