

SYNTHESE / EXTENDED ABSTRACT
FRANÇAIS / ENGLISH

**IDENTIFICATION DES LIMITATIONS TECHNIQUES
ET ENVIRONNEMENTALES DU RECYCLAGE MATIERE
DES DECHETS (HORS BTP)**

**IDENTIFICATION OF THE TECHNICAL AND ENVIRONMENTAL
LIMITATIONS OF SOLID WASTE RECYCLING (EXCEPT
BUILDINGS AND PUBLIC WORKS)**

juillet 2010

B. DE CAEVEL, A. GERARD, E. VAN OVERBEKE - RDC-Environnement
J. DEVAUX - Université catholique de Louvain



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, Identification des limitations techniques et environnementales du recyclage matière des déchets (hors BTP), 2010, 126 p, n°08-0910/1A

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

RESUME

La mise en place de filières de recyclage est motivée par la perspective d'un gain économique et/ou d'un gain environnemental accompagnant la nécessaire gestion des déchets produits par la société. Pour ces raisons, il est à la fois promu par les autorités publiques et privilégié par les entreprises en commençant par les filières les plus faciles et les plus rentables. L'objet de l'étude est d'identifier les éléments qui freinent ou pourraient limiter dans le futur l'extension du recyclage. L'étude se focalise sur les limites techniques et environnementales, donc à l'exclusion des limites économiques et de marché. Elle concerne le recyclage mécanique des déchets solides (donc pas le recyclage chimique).

L'étude comporte deux parties. La première partie présente les principales limites identifiées pour les différentes filières de recyclage, en les regroupant selon qu'elles sont liées à la source du flux à recycler, au procédé de recyclage ou aux applications possibles. Une analyse spécifique par matériau reprend ensuite une évaluation de la taille des gisements et des applications de la matière première secondaire, les limites techniques et sanitaires particulières ainsi qu'un ordre de grandeur de bilan environnemental du recyclage. Dans un deuxième temps, quatre études de cas traitent de manière spécifique et détaillée les problématiques rencontrées au sein des filières de recyclage de quatre matériaux. Les études de cas sont:

- Recyclage du PEHD en présence de PP
- Présence de couches barrière sur les bouteilles PET
- Contamination de l'acier par le cuivre
- Valorisation du bois de classe B

MOTS CLES

Recyclage, limites techniques, environnement

SUMMARY

Economic and/or environmental benefits drive the development of recycling routes, in the framework of the necessary management of waste produced by society. Therefore, recycling is promoted by authorities and also privileged by companies, beginning with the easiest and most profitable recycling chains. The aim of the study is to identify elements limiting –or that could limit in the future- further extension of recycling. The study focuses on technical and environmental limits rather than on economic or market limits. Mechanical recycling of solid waste is treated, excluding chemical recycling.

The study consists in two parts. The first part presents the main limits identified for the various recycling routes. Those limits are grouped according to whether they are linked to the source of waste to be recycled, the recycling process or the possible applications. A specific analysis per material further provides the market size (source and applications of secondary raw materials), the particular technical and sanitary limits as well as the order of magnitude of the environmental footprint of the recycling route. In the second part, four case studies are dedicated to a detailed description and analysis of specific recycling problems. The case studies are:

- Recycling of HDPE in the presence of PP
- Presence of barrier layer on PET bottles
- Contamination of steel by copper
- Valorization of class B wood

KEY WORDS

Recycling, technical limits, environment

Contexte de l'étude

Le recyclage, des déchets ménagers comme des déchets industriels, est une pratique de plus en plus intensive que les autorités publiques cherchent à promouvoir. Ce qui incite les entreprises à valoriser leurs déchets de production dans des voies de recyclage, c'est de diminuer les coûts (coût d'élimination, coût d'achat de matières premières, prix de revente des matières) tout en développant une image verte et en répondant aux évolutions législatives, toujours plus exigeantes dans ce domaine. L'augmentation du prix des matières premières et des droits d'émission de CO₂ améliore la position compétitive du recyclage, ce qui stimule la recherche au sein des entreprises de traitement des matières secondaires.

Historiquement, le recyclage s'est d'abord développé pour le verre, le papier et les métaux. Progressivement, des filières se sont développées pour des matériaux tels que les plastiques, des matériaux de construction (béton, briques...), des matières organiques ou des gisements plus complexes, comme par exemple les cartons à boissons. Actuellement ce sont encore souvent sur les gisements les plus faciles à capter et recycler et sur les applications les moins exigeantes (bien qu'avec substitution du même matériau vierge) que les filières de recyclage sont construites. Par exemple :

- Le verre d'emballage qui est recyclé en verre coloré
- Les bouteilles PET qui sont recyclées en fibres textiles

Les freins empêchant de développer de nouvelles filières et d'aller plus loin en termes de quantités de matière recyclée peuvent être d'ordre

- Economique ou lié aux marchés (coûts, pérennité des gisements et des débouchés, etc.) ;
- Commercial (exigences de marketing) ;
- Technique (technologies de tri et de traitement manquantes ou en décalage par rapport à l'évolution des gisements) ;
- Environnemental (impacts environnementaux des procédés parfois supérieurs aux gains résultants) ;
- Sanitaire (exigences limitant l'utilisation pour certaines applications)

Ces freins sont encore mal connus et dès lors mal pris en compte lors des prises de décisions. Ceci mène parfois à des situations (faillites, problèmes de qualité, manque d'approvisionnement...) qui discréditent la chaîne des matières recyclées dans son ensemble.

Objectifs et plan de l'étude

L'objectif de l'étude est de faire une analyse argumentée des limites du recyclage matière, en prenant en considération l'intégralité de la filière, du flux source à l'application. Elle se focalise sur les limites techniques et environnementales sans approfondir l'analyse des limites économiques et de marché. Elle concerne le recyclage mécanique (et donc pas le recyclage chimique) des déchets solides à l'exclusion des déchets des Bâtiments et Travaux Publics (BTP). Elle couvre les principaux plastiques, les papiers-cartons, le verre, l'acier et l'aluminium.

Cette étude s'adresse prioritairement aux acteurs français du recyclage mais a été réalisée selon une perspective européenne car les problèmes du recyclage sont en grande partie communs à tous les pays européens et même du monde.

L'étude comporte deux parties. La première partie présente les principales limites identifiées pour les différentes filières de recyclage, en les regroupant par type de limites. Une analyse spécifique par matériau prend ensuite en compte les données de marché estimées par application de la matière première secondaire, les limites techniques et sanitaires particulières ainsi qu'un ordre de grandeur de bilan environnemental du recyclage. Dans un deuxième temps, quatre études de cas traitent de manière spécifique et détaillée les problèmes qui affectent la mise en place ou l'efficacité des filières de recyclage de quatre matériaux. Les quatre études de cas sont:

- Recyclage du PEHD en présence de PP
- Présence de couches barrière sur les bouteilles PET
- Contamination de l'acier par le cuivre
- Valorisation du bois de classe B

Partie 1 : Limites générales et spécifiques

Toute activité de recyclage est définie par une filière, nécessairement composée d'une source de matière à recycler, d'un procédé de recyclage et d'une application utilisatrice de MPS. Chaque composante d'une filière peut être perturbée par des éléments limitant la mise en place ou l'efficacité des filières. C'est pourquoi, les limites générales identifiées sont classées selon qu'elles portent davantage sur la source, le procédé ou les applications visées. Cette classification est bien sûr simplifiée car ces trois composantes sont interdépendantes. Néanmoins, des typologies de limites peuvent être dégagées :

- Les limites attachées à la source comprennent les aspects liés à la conception du matériau devenant déchet et les caractéristiques du gisement (taille et caractère pré- ou post-consommation) ainsi que la manière de collecter et de trier le flux ;
- Les limites liées aux procédés de recyclage tiennent au temps nécessaire pour rendre mûr un procédé alors que les compositions des gisements évoluent en permanence et aux perturbations occasionnées sur les lignes par des impuretés. Un bilan environnemental défavorable pour certains indicateurs peut aussi limiter le recyclage ;
- Les limites dues aux applications tiennent essentiellement à la dégradation des propriétés des matériaux lorsque celles-ci sont critiques dans les applications considérées.

Les principaux éléments perturbant effectivement les filières de recyclage sont repris ici.

Des **limites techniques** peuvent exister du fait de :

- la nature même de la matière : Ces cas sont rares. Les résines thermodurcissables constituent un exemple car elles sont infusibles et on ne peut donc pas leur donner une nouvelle forme ;
- l'aspect multi-matériau des produits : les matières combinées en vue d'optimiser les propriétés des produits peuvent être difficiles à séparer (multicouches, matrices avec renfort fibreux, mélanges dans la masse, etc.). Comme les propriétés de la matière multi-matériau résultent souvent de leur agencement spatial (les couches barrières doivent être continues, les fibres de renforcement doivent être stabilisées...), le recyclage doit passer par une séparation des matières, pour laquelle une solution technique fait défaut dans un nombre important de cas. Pour les mélanges dans la masse, il n'est pas nécessaire de séparer les constituants mais il faut pouvoir isoler le matériau (collecte sélective, tri) pour un recyclage efficace vers des applications identiques.

Pour les matériaux et configurations concernés, ces limites techniques se présentent même dans les cas de recyclage en boucle fermée de déchets de pré-consommation. Ce type de recyclage fait depuis longtemps partie intégrante de nos systèmes de production et ne pose dans les autres cas pas de problème technique ni de qualité. La matière retransformée est diluée et ne représente que quelques dizaines de pourcents de la quantité de matière vierge. Citons par exemple l'utilisation de calcin interne dans les fours verriers, l'injection de préformes défectueuses broyées en mélange avec le PET vierge lors de l'injection de préformes PET, etc.

Des **limites techniques, environnementales et économiques** se présentent exclusivement pour les flux post-consommation (par opposition aux déchets industriels de production) :

- Au niveau des étapes de collecte et de tri : La collecte se fait souvent en mélange et la séparation subséquente des matériaux peut être difficile. S'il s'agit d'un mélange de mono-matériaux (éventuellement de différentes couleurs), cette limite revient à une question de coût. En effet, des méthodes de tri existent mais à un coût relativement élevé par rapport aux alternatives. Par exemple pour les VHU et les DEEE, le broyage est favorisé au détriment du démontage pour des raisons de coûts, alors que le démontage permet de collecter des flux beaucoup plus purs.
- Au niveau du procédé de recyclage : La contamination par des métaux, des agents pathogènes, des souillures d'hydrocarbures peut poser problème soit :
 - Parce que les méthodes d'épuration existent mais sont trop coûteuses
 - Parce les méthodes d'épuration existent mais ont des impacts trop importants d'un point de vue environnemental au regard du bénéfice retiré. Ce cas se présente notamment lorsque des opérations de lavage entraînent une consommation élevée d'eau.

- Parce que les méthodes d'épuration n'existent pas et que les contaminants perturbent les propriétés soit mécaniques, soit sanitaires, soit esthétiques des produits recyclés. Un exemple de difficulté majeure de décontamination se présente sur des plastiques contaminés par diffusion de substances dans le volume libre (au sein même des plastiques). Ces substances ne peuvent pas être extraites lors d'un recyclage mécanique. Un problème technique effectif se présente.
- Au niveau des applications accessibles : La MPS peut être utilisée dans une application si elle satisfait les exigences fixées, essentiellement en termes de propriétés mécaniques, sanitaires, de couleur, d'odeur et d'aptitude au contact alimentaire. En fonction de la qualité du gisement entrant et du procédé de recyclage, ces exigences peuvent ne pas être remplies pour certaines applications, parmi les plus exigeantes. La matière première secondaire est utilisée dans les applications (par ordre décroissant de préférence « environnementale », à affiner au cas par cas) :
 - les plus exigeantes de la matière vierge, en substitution 1:1 (ou en substitution légèrement inférieure à 1:1)
 - moins exigeantes de la matière vierge, mais quand-même en substitution 1:1 (ou en substitution légèrement inférieure à 1:1)
 - en substitution de la même matière mais avec un surpoids important
 - en substitution d'un autre matériau ou en mélange avec d'autres matériaux

Les filières de recyclage sont dominées à l'heure actuelle par les applications peu exigeantes présentant des bons taux de substitution de la même matière vierge. Le bilan environnemental est très bon car on évite bien les impacts d'une production de la même quantité de matière vierge. Vu la tendance pour de nombreux matériaux à disposer d'une offre en recyclé limitée par rapport à la demande, le recyclé va prioritairement à ces usages qui sont les plus rentables actuellement.

Néanmoins, comme les politiques de gestion des déchets poussent à l'augmentation des quantités recyclées, certaines applications vont atteindre la saturation. Il faut donc aller vers de nouveaux débouchés. Afin que le recyclage génère un bénéfice environnemental substantiel, il faut que les débouchés consistent en la même matière, en substitution (proche de) 1:1. Comme ces nouvelles applications sont plus exigeantes, les procédés à mettre en œuvre sont plus complexes et les coûts plus élevés.

Cet aspect de saturation de certaines applications utilisatrices de MPS est discuté dans la partie de l'étude consacrée aux limites spécifiques au recyclage. Par matériau ou famille de matériaux, une analyse des données de production totale et d'incorporation actuelle de matière recyclée par application est réalisée. Cette analyse met en évidence que c'est au niveau des matériaux plus sensibles lors du recyclage comme les plastiques et les papiers-cartons que se situe le risque d'une saturation de certaines applications. En particulier, les risques de saturation sont identifiés pour :

- les applications classiques du PET : fibre de rembourrage et strapping ;
- l'utilisation de PEBD dans des sacs poubelles, pour certaines zones géographiques de ;
- les applications de la pâte à papier secondaire en journaux et en caisse carton.

Cette partie de limites spécifiques présente en outre pour chaque matériau un ordre de grandeur de bilan environnemental. Ce bilan correspond à la balance entre les impacts du procédé de recyclage, les impacts évités de la production de matière vierge et les impacts de l'élimination évitée du déchet. Quoique dans des proportions variables, le bilan est la plupart du temps bénéfique. Néanmoins, parmi les cas limitant identifiés et déjà évoqués, se trouve la consommation d'eau élevée lors du lavage de films agricoles en PEBD. En outre, le recyclage du papier-carton présente un bilan allant de légèrement défavorable à légèrement bénéfique, en fonction notamment de la manière de modéliser la consommation de la ressource bois.

Partie 2 : Etudes de cas

Pour chacune des études de cas, le rapport présente la problématique abordée en

- situant le contexte et en analysant l'ampleur de la problématique
- examinant d'un point de vue scientifique l'origine des problèmes potentiels ou rencontrés
- analysant les solutions susceptibles de réduire ou supprimer la menace pesant sur la filière de recyclage

RECYCLAGE DE PEHD EN PRESENCE DE PP

Le polyéthylène haute densité (PEHD) et le polypropylène (PP) se retrouvent souvent dans le même flux à recycler, la fraction « polyoléfines » (le plus souvent, un peu de PP dans un flux PE). En effet, ces plastiques sont fréquemment collectés ensemble en raison de leur utilisation dans des applications similaires, en partie au moins.. Cette fraction peut provenir de la collecte sélective des flacons, des dépôts en déchèteries ou des résidus de broyage. En outre, leur séparation est difficile vu leurs propriétés chimiques et de densités proches. Ces deux polymères n'étant pas miscibles, leur mise en œuvre en mélange donne lieu à un matériau hétérogène (au-delà d'une certaine fraction de PP) présentant des propriétés mécaniques réduites par rapport au PEHD seul.

Actuellement, comme la part de PP est encore relativement faible, sa présence à raison de quelques % ne pose pas de problème technique. Il y a suffisamment d'applications peu exigeantes en termes de contenu en PP.

Cependant, la part de marché du PP augmente et les performances techniques du PEHD en présence de PP se dégradent au fur et à mesure que la proportion de PP augmente. Il n'y a pas de solution unique à ce problème mais plutôt une combinaison de solutions :

- Améliorer la collecte à la source (pas facile)
- Améliorer les techniques de séparation (voie prometteuse)
- Rendre certains débouchés plus accessibles en supprimant des exigences inutiles dans les cahiers des charges
- Améliorer les propriétés des mélanges grâce à des additifs (compatibilisants)

La séparation à la source n'étant pas facile à mettre en œuvre, la voie prometteuse est le développement de techniques de séparation en aval. Elles ne sont pas encore au point à échelle industrielle mais certaines en sont proches (notamment la séparation IMDS, une grosse installation a démarré en 2009 aux Pays-Bas).

PRESENCE DE COUCHES BARRIERE DANS LES BOUTEILLES PET

Les technologies barrière sur PET ont pour objectif de réduire la perméabilité du PET principalement à l'oxygène et au gaz carbonique et d'augmenter ainsi la durée de vie (*shelf life*) des produits. Les configurations de **barrière passive** sur bouteille PET sont les suivantes :

- Coatings : Films minces inorganiques qui sont des dépôts internes ou externes de type silice ou carbone
- Multicouches (3 ou 5 couches) à base d'EVOH (copolymère éthylène-alcool vinylique) ou de polyamide (nylon)
- Blends : mélanges dans la masse de polyamide et de PET

Des **couches actives** vis-à-vis de l'oxygène (= scavenger O₂) sont utilisées dans certaines technologies multicouches ou blends en mélange dans le nylon qui joue le rôle de matrice.

Le gisement des bouteilles avec couches barrière est en croissance. Il représentait en moyenne 2,5% des bouteilles PET en Europe en 2007 mais ce taux augmente rapidement. La configuration en monocouches blends a tendance à prendre le dessus sur les multicouches, tandis que les coatings restent stables voire sont en croissance. Or ce sont les technologies blends qui posent le plus de problèmes au niveau du recyclage.

La présence de couches barrière sur les bouteilles PET ne pose pas de problèmes actuellement pour l'incorporation de PET recyclé dans les applications colorées ou en fibres de rembourrage. Elle pose néanmoins des difficultés à la filière bottle-to-bottle mais les recycleurs parviennent encore néanmoins à satisfaire les exigences critiques de ces cahiers des charges, notamment la couleur.

Il est anticipé par la plupart des acteurs qu'un problème va se poser à court ou moyen terme pour la filière bottle-to-bottle. L'exigence de couleur ne pourra plus être rencontrée car même les flux les plus purs contiendront des quantités excessives de barrière.

Des solutions différentes pour préserver cette filière de recyclage sont identifiées en fonction de l'horizon temporel :

- A court terme, le tri manuel doit être utilisé et une gestion optimale des lots doit être effectuée pour arriver à une couleur acceptable. Des consignes de tri très strictes pourraient être instaurées de manière à exclure toutes les bouteilles autres que les bouteilles à eaux. En matière d'éco-conception, il faut privilégier les coatings (très minces) et, sous conditions, les multicouches polyamides (en grande partie éliminées par délaminage) aux dépens des multicouches EVOH (grande vitesse de dégradation, ce qui génère du jaunissement lors de la mise en œuvre du PET, malgré un certain délaminage) et les blends (pas de délaminage avec effet jaunissant du polyamide, quoique moindre que l'EVOH).
- A moyen terme : si les développements en cours aboutissent avec succès, des technologies de tri automatique permettraient de n'exclure que les bouteilles problématiques. Les bouteilles restantes, en quantités maximisées, pourraient répondre aux spécifications des applications bouteilles (sans problème lié aux couches barrière tout au moins). Les flux exclus pourraient être orientés vers des applications moins exigeantes.
- A long terme : l'écoconception et les innovations devraient aller vers des développements de des couches barrière qui ne posent pas de problèmes au recyclage.

CONTAMINATION DE L'ACIER PAR LE CUIVRE

L'augmentation actuelle des gisements d'acier recyclé issus des flux DEEE et VHU ainsi que des mâchefers d'incinération d'ordures ménagères accentue la proportion de cuivre dans le flux d'acier à recycler.

Une fois que le cuivre est en alliage dans l'acier, il devient impossible de l'extraire. Le phénomène de migration des phases riches en cuivre vers les joints de grains entraîne des problèmes de fissuration à chaud. Ce phénomène est connu depuis longtemps par les acteurs de l'acier (producteurs et utilisateurs). Il en résulte une réduction de la ductilité pouvant poser problème pour des applications en acier plat.

La contamination par le cuivre ne pose néanmoins actuellement pas de problème car il y a un effet de dilution par l'acier vierge et parce qu'il y a suffisamment de débouchés pour l'acier contaminé au cuivre (en acier long qui nécessite moins de ductilité). Des décotes par rapport au référentiel européen EUROFER sont néanmoins observées avec une fréquence accrue.

Si un problème de qualité/débouché devait se poser, des solutions techniques sont prêtes à être mises en œuvre pour obtenir une meilleure séparation (lors du broyage des VHU et des DEEE).

Entre 6 et 14% du flux de cuivre est perdu comme élément contaminant dans l'acier. Il y a donc une perte de ressource (néanmoins cela ne constitue pas un enjeu majeur en tant que ressource mais un impact environnemental lié à l'absence de recyclage).

VALORISATION DU BOIS DE CLASSE B

L'étude de cas vise à discuter d'un point de vue technique et environnemental les voies de traitement des déchets de bois de classe B, essentiellement :

- La valorisation en bois énergie
- La valorisation matière en panneaux

Aujourd'hui, un vide juridique persiste sur la définition de la classe B par rapport à la classe C des déchets de bois. En effet, aucune limite de concentration en éléments polluants présents dans le déchet de bois ne permet de faire la distinction entre les deux classes. De plus, la classification des déchets selon les 3 classes se fait, le plus souvent, uniquement par des contrôles visuels des différents acteurs.

Actuellement la quasi-totalité du bois B va vers des applications panneaux car, en cas de valorisation énergétique, les exigences en matière de contrôle des conditions de combustion et d'épuration des fumées sont très élevées, ce qui rend cette filière peu compétitive.

Les enjeux sanitaires et environnementaux de la valorisation des bois de classe B sont différents selon les filières :

- La filière panneau est attentive au respect du référentiel européen EPF pour garantir aux ouvriers du bâtiment et aux utilisateurs de panneaux le respect des spécifications visant à limiter les risques sanitaires et environnementaux.
- La filière énergie est beaucoup plus réglementée et encadrée sur ses émissions dans l'atmosphère et ses impacts potentiels sur la toxicité humaine et les milieux naturels. Selon la revue bibliographique, il est certain que le bois de classe B émet plus de polluants dans l'atmosphère que la combustion de bois naturel.

La pression exercée par les exigences européennes en matière de production d'énergie renouvelable (dont la biomasse) pourrait cependant rendre rentable la filière de valorisation énergétique.

Une ACV simplifiée a été réalisée pour comparer d'un point de vue environnemental les deux scénarios de traitement dans le but de répondre à la question : « Existe-t-il des raisons techniques, environnementales ou sanitaires qui poussent à favoriser une filière plutôt qu'une autre ou bien les coûts du marché peuvent-ils dicter le type de filière à suivre ? ».

Du point de vue environnemental, l'enjeu est la production alternative. En principe, les panneaux non-produits avec du bois de classe B peuvent l'être :

- soit avec du bois non-exploité (car trop cher) et dans ce cas, il y a peu d'impacts supplémentaires
- soit avec des matériaux de construction alternatifs (plastique, acier, béton...) et dans ce cas, il y a des impacts supplémentaires significatifs.
 - o Si le bois B va en valorisation énergétique, il se substitue :
 - soit à une énergie fossile, avec des impacts économisés significatifs
 - soit à une autre source d'énergie renouvelable (biomasse, géothermie, éolien...), avec des impacts économisés faibles.
 - o L'utilisation matière (panneaux) de bois B est la meilleure et la moins bonne option à la fois, selon les implications indirectes :
 - Si, en l'absence de valorisation énergétique du bois B, la chaleur est produite à partir d'énergie fossile, l'utilisation matière du bois B est la moins bonne option du point de vue environnemental
 - Si par contre, en vue de répondre aux exigences de la Directive européenne 2009/28/CE sur les énergies renouvelables, la chaleur est produite à partir d'une source d'énergie renouvelable qui n'aurait pas été exploitée si le bois B avait été disponible - alors l'utilisation de bois B en panneaux stimule indirectement la production d'énergie renouvelable et devient le meilleur des scénarios.

Context of the study

Recycling share in end-of-life schemes has significantly increased over the past few years for both household and industrial wastes. Public authorities seek to promote this treatment scheme. Cost cutting (disposal / raw material supply costs and recycled materials resale price) constitutes the main incentive for companies to recycle their waste while developing a green image and meeting new demanding policies. Price increases for raw materials and CO₂ emission quota enhance the competitive position of recycling, which stimulates research and development within secondary materials treatment companies.

Recycling was first developed for glass, paper and metals. Step by step, recycling schemes have been developed for materials such as plastics, construction materials (concrete, brick...), organic matter or more complex material such as beverage cartons. The recycling schemes currently rely on the easiest collectable and recyclable streams and on the least demanding applications (even with substitution of the same virgin material). For instance:

- Packaging glass that is recycled into coloured glass
- PET bottles that are recycled into textile fibers

Obstacles preventing the development of new recycling schemes and the increase of recycled material quantities can be as follows:

- Economic or market-based obstacles (costs, waste streams and applications stability etc.).
- Commercial obstacles (marketing constraints);
- Technical obstacles (lack of sorting and treatment technologies or mismatch compared with waste streams evolution);
- Environmental obstacles (environmental impact of processes may exceed the resulting gains);
- Sanitary obstacles (requirements limiting the use of recycled material in some applications)

These limits are still poorly understood and therefore not properly taken into account when making decisions. This sometimes leads to situations (failures, quality problems, lack of supply ...) discrediting the chain of recycled material as a whole.

Aims and structure of the study

The study aims at analyzing material recycling limitations in a reasoned discussion, taking into consideration the entire chain from the waste stream source to the application. It focuses on technical and environmental limitations without insisting on economics and market. It deals with solid waste mechanical recycling (and hence not with chemical recycling) excluding Buildings and Public Works wastes. The study covers the main plastics, paper and cardboard, glass, steel and aluminum.

The audience mainly consists of French actors in the recycling domain. However the study was carried out within a European outlook. The recycling problems are indeed mostly shared by all European countries and even by all the countries in the world.

The study is divided in two parts. The first part presents the main limitations identified for the various recycling schemes. Those limits are grouped by types. Then a material-specific analysis takes into account market data estimated for each application of the secondary raw materials. It also describes specific sanitary and technical limitations as well as an order of magnitude of the environmental impacts of recycling. In the second part of the study, four case studies analyse in depth the issues related to four specific materials or material families. The elements affecting the implementation or effectiveness of the recycling schemes of these materials are described in a specific and detailed way.

The case studies are as follows:

- Recycling of HDPE in the presence of PP
- Presence of barrier layer on PET bottles
- Contamination of steel by copper
- Valorization of class B wood

Part 1: General and specific limitations

Any recycling activity is defined by a scheme which is necessarily composed of a source of material to be recycled, a recycling process and a secondary raw material end-use application. Each component of the scheme can be disrupted by factors limiting the setup or efficiency of the scheme. Therefore, the general limitations identified are classified according to whether they are more related to the source, to the process or to the targeted applications. This classification is obviously simplified since these three components are interdependent. However, the following limitation typologies can be used:

- The limitations linked to the source include aspects related to the design of the material becoming waste and to characteristics of the waste streams (size and pre- or post-consumer collection) as well as the way streams are collected and sorted;
- The limitations attached to the recycling processes are either related to the time necessary to obtain mature processes (whereas compositions of the waste streams are constantly changing) or to process lines disruptions caused by impurities. For certain indicators a detrimental environmental balance may also limit recycling;
- The limitations due to the applications are mainly related to the degradation of material properties when they are critical for the applications.

The main elements that effectively disturb the recycling schemes are summarized as follows.

Technical limitations may exist due to

- the nature of the material itself: These cases are rare. Thermoset resins are an example because they are infusible and can not be recasted;
- the multi-material aspect of the products: Materials combined for improving product properties can be difficult to separate (multilayer, matrix with fiber reinforcement, blends in the bulk, etc.). As the properties of multi-materials products often result from their spatial organisation (the barrier layers must be continuous, reinforcing fibers must be stabilized...), recycling must begin with a separation of materials for which there is no technical solution in a significant number of cases. For blends in the bulk, there is no need to separate the components but one must be able to isolate products made out of a specific blend (collection, sorting) for an efficient recycling towards similar applications.

For the affected materials and configurations, these technical limitations occur even with pre-consumer waste in closed loop recycling. This type of recycling has long been an integral part of our production systems. In many cases, it does not lead to technical or quality problems. The reprocessed material is diluted and only represents a few tens of percent of the amount of virgin material. Examples : the use of internal cullet into glass furnaces, the mixing of grounded defective performs and virgin PET for perform injection, etc.

Some of the technical, environmental and economic limitations occur exclusively for post-consumer streams (in contrast with industrial wastes from production sites) :

- At collection and sorting levels: The collection is often done in mixed fractions. Subsequent separation of materials can hence be difficult. If the stream is composed of a mixture of mono-materials (possibly of different colors), this limit boils down to costs. Indeed, sorting methods exist but at a relatively high cost compared to alternatives. For example for ELVs (End-of-Life Vehicles) and WEEE (Waste Electronic and Electrical Equipment), shredding is preferred to dismantling because it is cheaper whereas the dismantling allows the collection of much purer fractions.
- At the recycling process: Contamination by metals, pathogens, oil stains can be a problem:
 - Because cleaning methods exist but are too expensive
 - Because cleaning methods exist but result, from an environmental point of view, in damages larger than derived benefits. For example, this situation arises when washing operations involve a high consumption of water.
 - Because the purification methods do not exist and because contaminants disrupt either mechanical, sanitary or aesthetic properties of the recycled products. A good example of a major decontamination problem is the contamination of plastics by diffusion of substances in their free volume . These substances can not be extracted with mechanical recycling. An effective technical problem arises.

- In terms of the available applications: The secondary raw material can be used in an application if it meets the mechanical, health, color, odor and suitability for food contact requirements. Depending on the quality of the waste to be recycled and on the recycling process, these requirements can be unfulfilled for certain most demanding applications. The secondary raw material is used in the following applications (by descending order of "environmental" preference, to be refined case by case):
 - the most demanding applications of virgin material, substituting 1:1 (or substituting slightly less than 1:1)
 - the less demanding applications of virgin material, but anyway in substitution 1:1 (or substituting slightly less than 1:1)
 - in substitution of the same material but with a large overweight
 - in substitution of another material or mixed with other materials

The recycling systems are currently dominated by the less demanding applications showing good substitution rates of the virgin material. The environmental balance is very satisfying because one avoids many impacts coming from virgin material production. Nowadays, the supply of secondary material tends to be limited compared with its potential applications. Thus recycled material is used in priority into the currently most beneficial applications.

However, since the waste management policies drive up the amount of recycled materials, some applications will reach saturation. One must therefore seek new markets. In order that recycling generates a substantial environmental benefit, the new opportunities must be constituted of the same material, in substitution (close to) 1: 1. As these new applications are more demanding, the processes to be carried out are more complex and more costly.

The saturation issue of certain applications using secondary raw material is discussed in the section of the study devoted to specific limitations to recycling. An analysis of global production data and of the current incorporation of recycled material by application is provided, per material or materials family.

This analysis shows that saturation of certain applications is a risk, but mainly for the most sensitive materials during recycling such as plastics and paper and cardboard. In particular, risks of saturation are identified for:

- common applications of PET such as fibers and strapping;
- use of LDPE in bin bags, for certain geographical areas;
- applications of secondary pulp in newspapers and cardboard products.

This part on specific limitations further presents for each material an order of magnitude of environmental balance. This balance represents on the one hand the impacts of the recycling process, and on the other hand the impacts of the avoided production of virgin material and the impacts of avoided disposal waste. Although in varying proportions, the results are mostly beneficial to the environment. However, among the limiting cases identified and already mentioned above, one can point out the high water consumption during the LDPE agricultural films washing step. In addition, paper and cardboard recycling have a balance from slightly detrimental to slightly beneficial to the environment, depending on the modeling of wood resources consumption.

Part 2: Case Studies

For each case study, the report presents the issues by :

- situating the context and analyzing the magnitude of the problem
- examining the origin of the potential or encountered problems from a scientific point of view
- analyzing solutions likely to reduce or eliminate the threat to the recycling scheme

RECYCLING OF HDPE IN THE PRESENCE OF PP

High density polyethylene (HDPE) and polypropylene (PP) are often found in the same stream to be recycled, the "polyolefin" fraction (most often, some PP in the PE stream). Indeed, these plastics are often collected together because of their use in similar (at least partially similar) applications. This fraction can come from bottle collection, waste collection center or shredding residues. Moreover, according to close properties in terms of chemistry and density, these plastics are difficult to separate.

They are not miscible. Hence their processing in blend results in a heterogeneous material (beyond a certain fraction of PP) with reduced mechanical properties compared to neat HDPE..

Currently, as the proportion of PP is still relatively low (few %), its presence does not create any technical problems. There are enough applications with little constraints on PP content.

However, the market share of PP increases and the technical performance of HDPE in the presence of PP decreases gradually as the proportion of PP increases.

There is no single solution to this problem but rather a combination of solutions:

- To improve waste collection at the source (not easy)
- To improve separation technologies (promising path)
- To make certain applications more accessible by eliminating unnecessary requirements in the customer's specifications
- To improve the properties of the blends with additives (compatibilizers)

Since separation at source is not easy to implement, the promising path is the development of techniques for downstream separation. They are not yet ready at industrial scale but some are close to be (including the separation IMDS, a large facility started in 2009 in the Netherlands).

PRESENCE OF BARRIER LAYERS IN PET BOTTLES

Barrier technologies on PET aim at reducing the permeability of PET to mainly oxygen and carbon dioxide and thereby aim at increasing the shelf life of the products. Configurations of **passive barriers** on PET bottles are :

- Coatings: Thin inorganic films that consist in internal or external coating based on silica or carbon
- Multilayer (3 or 5 layers) based on EVOH (ethylene-vinyl alcohol copolymer) or polyamide (nylon)
- Blends : Blends in the bulk of polyamide and PET

Active layers for oxygen (O₂ scavenger) are used in certain multilayer or blends technologies, mixed in a nylon matrix.

The market of PET bottles with barrier layers is growing. In 2007, it represented 2.5% (in average) of the PET bottles in Europe but the rate increases rapidly. Monolayer configuration blends tends to gain the upper over the multilayer. In the meantime, the coatings market share remains stable or is increasing. However, it is the blends technologies that pose the most problems in recycling.

Currently the presence of barrier layers on PET bottles does not pose any kind of problems for the incorporation of recycled PET in fiber applications or colored applications. It nevertheless poses difficulties in the bottle-to-bottle recycling scheme. However recyclers still succeed in meeting the critical requirements of the corresponding specifications, including color.

It is anticipated by most actors that a problem will arise in the short or medium term for the bottle-to-bottle route. The requirement of color will be difficult to meet because even the purest streams will contain excessive amounts of barrier materials.

To preserve this recycling scheme, different solutions are identified with different time frames:

- In the short term, manual sorting must be used and optimal management of the lots must be done to reach an acceptable color. Strict sorting guidelines could be established in order to exclude all the bottles other than water bottles. In terms of eco-design, coatings (thin) and under certain conditions, multilayers polyamides (largely eliminated by delamination) should be privileged at the expense of multilayer EVOH (high speed of degradation resulting in yellowing during PET processing, despite some delamination) and blends (no delamination with yellowing effect of the polyamide, although to a lesser extent than with EVOH).
- In the mid term : if current developments are successful, automated sorting technology would allow the exclusive withdrawal of the problematic bottles out of the stream. The remaining bottles, in the largest possible amounts, could meet the specifications of bottle applications (at least in terms of barrier layer). The rejected fraction could be directed to less demanding applications.
- In the long term: eco-design and innovation should go towards development of barrier layers that do not pose problems in recycling.

CONTAMINATION OF STEEL BY COPPER

The current increase in amount of steel to be recycled coming from WEEE, and from household waste incineration bottom ash increases the proportion of copper in the steel fraction.

Once copper is present in alloy in steel, it becomes very difficult to retrieve it. The phenomenon of migration of copper-rich phases to the grain boundaries leads to problems of hot cracking. This phenomenon has long been known by steel actors (producers and users). It results in a reduction in ductility that can be problematic for flat steel applications.

However, the contamination by copper poses currently no problem because there is a dilution effect with primary steel and because there are enough applications for steel contaminated with copper (long steel for example, which requires less ductility). Underpricing from the European EUROFER referential is however observed more often.

Would a quality / outlet problem arise, then technical solutions would be ready for implementation to achieve better separation (at ELV and WEEE shredders).

Between 6 and 14% of the copper flow is lost as a contaminant in steel. Copper resource is hence lost (this is more an environmental issue due to the lack of recycling rather than an issue in terms of resource).

VALORIZATION OF CLASS B WOOD

The case study aims at discussing from a technical and environmental point of view the valorization schemes for class B wooden waste. The main studied schemes are as follows:

- The valorization as wood energy
- The material valorization in wood panels

Today, a gap in the law persists in the definition of class B versus class C wooden waste. Indeed, both classes can not be distinguished by a defined concentration threshold of pollutants. Moreover, the classification of waste among both classes results, in most cases, only from visual checks by the different actors.

Currently almost the entire class B wood waste stream goes to panel applications due to very high requirements in terms of combustion conditions and flue gas treatment, hindering the competitiveness of the wood energy scheme.

The health and environmental issues arising from the valorization of class B wood differ in function of the scheme:

- For panel end-users, attention is paid to compliance with the European EPF referential to ensure the fulfillment of the specifications limiting the health and environmental risks for the sake of building workers and panel users.
- The wood-energy scheme is much more regulated and supervised regarding its atmospheric emissions and its potential impacts on humans and environment. According to our literature review, it is certain that class B wood emits more pollutants into the air than natural wood combustion.

The constraint exerted by European requirements in terms of renewable energy (including biomass) could however make the wood energy sector profits-making,

A simplified LCA (Life Cycle Assessment) has been conducted to compare both treatment scenarios in order to answer the question: "Are there any technical, environmental or health reason to promote one scheme rather than another or, alternatively, can the market costs dictate the type of scheme to follow? ".

From an environmental point of view, the issue resides in the alternative production.

In principle, panels not produced with wood products of class B can be produced with:

- either unexploited wood (because too expensive), resulting then in little additional impact ;
- or alternative building materials (plastic, steel, concrete ...) resulting then in-significant additional impacts.

If class B wood goes to energy application, it replaces:

- Either a fossil fuel, with significant impact savings ;

- Or another source of renewable energy (biomass, geothermal, wind, ...), with low impact savings.

The use of class B wood as material (in panels) is both the best and the worst option, as a function of the indirect implications:

- If, in the absence of energy production from class B wood, heat is generated from fossil fuel, then the use of class B wood in panels is the worst option from the environmental point of view;
- If by contrast, in order to meet the requirements of the EU Directive 2009/28/EC on renewable energy, heat is produced from a renewable energy source that would not have been exploited if class B wood was available, then the use of wood B in panels indirectly stimulates the production of renewable energy and becomes the best case scenario.