

Identification des limitations techniques et environnementales du recyclage matière des déchets (hors BTP)



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

RAPPORT FINAL

octobre 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 et l'Environnement – est le fruit d'une triple coopération entre industriels, pouvoirs publics et chercheurs. L'objectif principal de RECORD est le financement et la réalisation d'études et de recherches dans le domaine des déchets et des pollutions industrielles.

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

Avertissement :

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

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

- ✓ Pour toute reprise d'informations contenues dans ce document, l'utilisateur aura l'obligation de citer le rapport sous la référence :
RECORD, 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

© RECORD, 2010

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. Dans une première partie, les principales limites identifiées pour les différentes filières de recyclage sont présentées, 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 accompanying the necessary management of waste produced by the society. Therefore, recycling is promoted by authorities and also privileged by companies, beginning with the easiest and most valuable 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. In the first part, the main limits identified for the various recycling routes are presented according to whether they are linked to the source of waste to be recycled, to the recycling process or to the possible applications. A specific analysis per material further presents the evaluation of the size of the market (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 specific and detailed description of the problems encountered in the recycling routes of four materials. 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

SOMMAIRE

1. Introduction	7
1.1 Contexte	7
1.2 Objectif et champ de l'étude	7
2. Principales limites pour le recyclage matière des déchets	9
2.1 Définition du recyclage	9
2.2 Enjeux du recyclage	9
2.3 Limitations générales en matière de gisements et d'approvisionnement.....	10
2.3.1 <i>Quantité disponible et pérennité de la source</i>	10
2.3.2 <i>Limites liées à la chimie des matériaux</i>	11
2.3.3 <i>Pureté liée à la conception des produits</i>	11
2.3.4 <i>Limitations selon le type de source : pré- ou post-consommation</i>	16
2.3.5 <i>Contamination liée au mode de collecte et de préparation</i>	16
2.3.6 <i>Normalisation et traçabilité</i>	18
2.4 Limitations liées aux procédés de recyclage	19
2.4.1 <i>Adaptation des procédés à l'évolution des gisements</i>	19
2.4.2 <i>Perturbation des procédés par les impuretés</i>	20
2.4.3 <i>Impacts environnementaux des procédés de recyclage</i>	20
2.5 Limitations liées aux applications.....	21
2.5.1 <i>Introduction : propriétés affectées lors du recyclage</i>	21
2.5.2 <i>Types d'applications accessibles</i>	21
2.6 Limites spécifiques	25
2.6.1 <i>Les plastiques</i>	25
2.6.2 <i>Papiers - cartons</i>	48
2.6.3 <i>Verre</i>	54
2.6.4 <i>Acier</i>	57
2.6.5 <i>Aluminium</i>	59
2.7 Références.....	61
3. Etude de cas n°1 : Le recyclage du PEHD en présence de PP	63
3.1 Introduction	63
3.2 Origines de la présence de PP dans le PEHD	63
3.2.1 <i>Applications du PEHD vierge</i>	63
3.2.2 <i>Les flux de déchets de PEHD</i>	64
3.3 Problèmes liés à la présence de PP dans le flux HDPE	65
3.3.1 <i>Etude de la miscibilité des mélanges PEHD / PP</i>	65
3.3.2 <i>Propriétés mécaniques et rhéologiques</i>	65
3.4 Solutions	67
3.4.1 <i>Types de solutions</i>	67
3.4.2 <i>Applications du PEHD recyclé qui tolèrent le PP</i>	67
3.4.3 <i>Les méthodes de séparation</i>	71
3.4.4 <i>Compatibilisation des mélanges PEHD / PP</i>	74

3.4.5	<i>Adaptation des cahiers des charges pour les applications</i>	76
3.5	Conclusion	76
3.6	Références.....	77
3.7	Annexes.....	77
3.7.1	<i>Annexe 1 : Propriétés du PEHD et du PP vierges</i>	77
3.7.2	<i>Annexe 2 : Positionnement des différentes applications du PEHD sur une grille indice de viscosité - densité</i>	79
4.	Etude de cas n°2 : Présence de couches barrière sur les bouteilles PET	80
4.1	Introduction	80
4.2	Caractérisation du gisement PET avec système barrière	80
4.2.1	<i>Les propriétés barrière</i>	80
4.2.2	<i>Description des technologies barrière sur bouteilles PET</i>	81
4.2.3	<i>Quantification du gisement [52]</i>	82
4.3	Effets des technologies barrière sur le recyclage	84
4.3.1	<i>Commentaires des recycleurs</i>	84
4.3.2	<i>Les protocoles de tests relatifs au recyclage</i>	85
4.3.3	<i>Modélisation d'une accumulation pour les applications bottle-to-bottle</i>	88
4.4	Solutions pour le recyclage de PET avec couches barrière	89
4.4.1	<i>Eco-conception</i>	89
4.4.2	<i>Techniques de tri</i>	90
4.4.3	<i>Choix d'applications du RPET moins exigeantes</i>	92
4.5	Conclusions	93
4.6	Références.....	94
5.	Etude de cas n°3: Contamination de l'acier par le cuivre	95
5.1	Introduction	95
5.2	Caractérisation du gisement: nature et amplitude de la contamination	95
5.2.1	<i>Gisement d'acier et de ferrailles</i>	95
5.2.2	<i>Caractéristiques des ferrailles et pourcentage de cuivre</i>	96
5.2.3	<i>Origine du Cuivre présent dans les ferrailles</i>	98
5.2.4	<i>Accumulation et concentration du cuivre dans les ferrailles</i>	99
5.3	Problèmes lors de l'étape de recyclage.....	100
5.4	Impacts sur la qualité et les propriétés de l'acier	100
5.4.1	<i>Perte de ductilité et fragilité à chaud</i>	100
5.4.2	<i>Les applications de l'acier concernées</i>	101
5.4.3	<i>Explication physique : migration vers les joints de grains</i>	101
5.4.4	<i>Autres Paramètres qui influencent les fissures à chaud</i>	102
5.4.5	<i>Valeurs seuils selon les applications</i>	102
5.5	Evaluation de la perte de ressource cuivre	103
5.6	Les solutions pour mieux séparer le cuivre et l'acier à la source.....	103
5.7	Conclusion	105
5.8	Références.....	105

6.	Etude de cas n°4: Valorisation du bois de classe B	107
6.1	Introduction	107
6.2	Caractérisation du gisement	108
6.2.1	<i>Caractérisation quantitative du gisement.....</i>	<i>108</i>
6.2.2	<i>Caractérisation de la composition des bois de classe B.....</i>	<i>109</i>
6.2.3	<i>Caractérisation qualitative des adjuvants.....</i>	<i>110</i>
6.2.4	<i>Teneur en lindane et PCP de divers déchets bois.....</i>	<i>111</i>
6.2.5	<i>Teneur en métaux lourds de divers déchets bois.....</i>	<i>111</i>
6.2.6	<i>.Caractérisation quantitative des filières de recyclage.....</i>	<i>112</i>
6.3	Prétraitement du bois de classe B	112
6.4	Valorisation dans la filière "panneaux"	112
6.5	Valorisation dans la filière "bois-énergie"	114
6.5.1	<i>Emissions de polluants lors de la combustion en chaudière industrielle</i>	<i>114</i>
6.5.2	<i>Traitements des fumées et conditions d'exploitation nécessaires.....</i>	<i>117</i>
6.6	Evaluations environnementales des filières	118
6.6.1	<i>Méthodologie et champ de l'étude</i>	<i>118</i>
6.6.2	<i>Résultats</i>	<i>120</i>
6.7	Conclusion	122
6.8	Références.....	122
7.	Conclusions générales.....	123
7.1	Limites générales	123
7.2	Etudes de cas	124

1. Introduction

1.1 Contexte

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 prévenant les évolutions législatives, toujours plus exigeantes dans ce domaine. L'augmentation du prix des matières premières et des droits d'émission de CO₂ 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 sur les applications les moins exigeantes (bien qu'avec substitution du 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 excessifs de solutions techniques existantes qui dépassent les coûts de production de matière vierge (d'autant plus que l'économie de traitement des déchets n'est pas répercutée sur la structure des coûts de la chaîne de recyclage)
 - inefficacité de la captation du gisement et hétérogénéité des flux,
 - petite échelle des installations existantes, ce qui limite leur capacité d'investissement en automatisation et leur potentiel de réduction des coûts d'exploitation
 - incertitude sur la pérennité de l'offre (les flux de déchets continueront-ils d'exister ? risque de fournisseur défaillant) et de la demande (concurrence des matières vierges), ce qui augmente le risque des investissements (bien que l'offre et la demande globales évoluent en parallèle)
- Commercial : exigences de marketing (sur la couleur par exemple) ou exigences techniques inutilement fortes des clients, par facilité, car basées sur les performances des matières vierges,
- Technique :
 - développement inachevé des technologies de tri
 - manque de connaissances sur les technologies d'amélioration des caractéristiques des matières hétérogènes (compatibilisants)
- Environnemental : impacts environnementaux des procédés parfois supérieurs aux gains résultants
- Sanitaire : présence dans le gisement de certaines substances qui limitent son utilisation pour certaines applications où l'humain est exposé

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.

1.2 Objectif et champ 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. Les qualités techniques des matières secondaires (et des matériaux qui en sont issus) sont de même discutées.

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.

Elle concerne le recyclage **mécanique** (donc pas le recyclage chimique) **des déchets solides à l'exclusion des BTP**. Elle se focalise sur les limites **techniques et environnementales**, donc à l'exclusion des limites économiques et de marché.

L'étude comporte deux parties. Dans une première partie, les principales limites identifiées pour les différentes filières de recyclage sont présentées, 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, les problématiques relatives à quatre types de matériaux sont approfondies afin de décrire de manière spécifique et détaillée les éléments qui affectent la mise en place ou l'efficacité des filières de recyclage de ces matières.

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

2. Principales limites pour le recyclage matière des déchets

2.1 Définition du recyclage

Selon la Directive cadre 2008/98/CE du Parlement européen et du Conseil du 19 novembre 2008 relative aux déchets, le recyclage est défini comme "toute opération de valorisation par laquelle les déchets sont retraités en produits, matières ou substances aux fins de leur fonction initiale ou à d'autres fins. Cela inclut le retraitement des matières organiques, mais n'inclut pas la valorisation énergétique, la conversion pour l'utilisation comme combustible ou pour des opérations de remblayage". Le recyclage est donc à distinguer :

- du réemploi, qui consiste à utiliser des produits ou des composants de nouveau pour un usage identique à celui pour lequel ils avaient été conçus, sans étape de déformation de la matière;
- de la valorisation énergétique de la matière, qui permet d'utiliser les déchets pour la production d'énergie en remplacement d'autres sources d'énergie.

Toute activité de recyclage est définie par une filière. D'une manière simplifiée, les trois éléments principaux qui caractérisent une filière sont décrits à la Figure 2-1. Ainsi, il ne peut y avoir recyclage que s'il existe une source de déchets, un procédé de recyclage et une application utilisatrice.

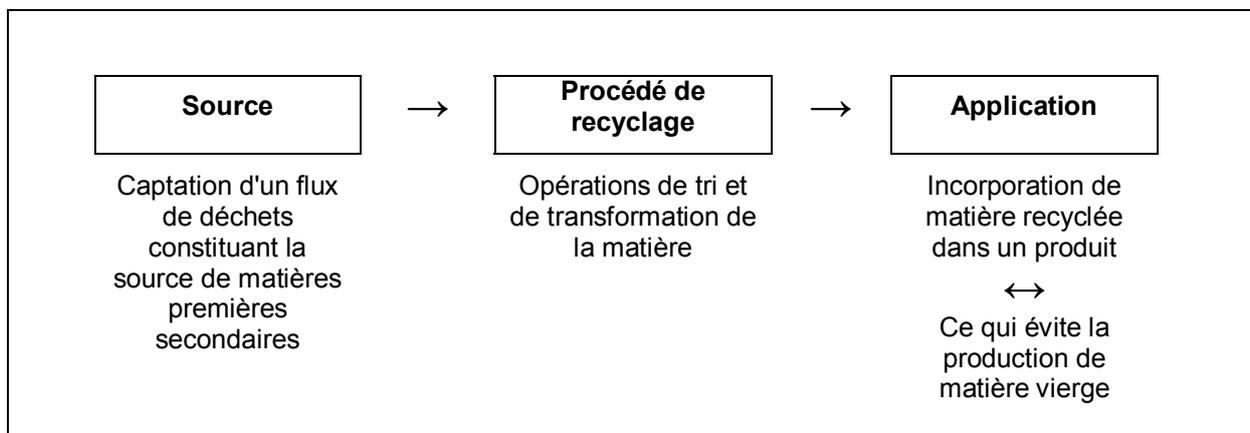


Figure 2-1: Définition d'une filière de recyclage selon un schéma simplifié

2.2 Enjeux du recyclage

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 les acteurs autres que les Autorités publiques, cette motivation générale peut être complétée par des exigences légales.

En effet, comme indiqué à la Figure 2-1, le recyclage permet d'éviter une production de matière première vierge. Dans tous les cas, une consommation de matières premières est ainsi évitée, de même que leur transport.¹ En outre, le bilan de l'énergie évitée liée à la production de la matière vierge et de l'énergie dépensée dans les opérations de collecte, tri et recyclage est favorable dans la plupart des cas (par exemple lors du recyclage des métaux).

L'enjeu clé du recyclage est donc l'identification des filières qui permettent de maximiser les bénéfices environnementaux et économiques, parmi lesquels la préservation des ressources en matières premières et énergétiques. Comme discuté dans la suite de ce rapport, la nature et la quantité de matière vierge évitée grâce au recyclage sont des éléments clés de la détermination des gains accessibles, qu'il faut mettre en balance avec les efforts de mise en œuvre exigés.

Pour ces raisons, la présente étude vise à identifier les limites techniques et environnementales du recyclage qui empêchent la valorisation "idéale" de la matière, définie comme la substitution de la

¹ Cela ne signifie néanmoins pas qu'au total, tous les transports sont évités. En effet, les déchets et les matières premières secondaires font partie d'un marché mondial avec des imports et exports transcontinentaux.

même matière vierge avec un taux de substitution de 1 pour 1 et avec un niveau d'exigences de qualité de la matière première secondaire (MPS) comparable à celui de l'application initiale de la matière.

Les éléments, principalement techniques, qui limitent la mise en place de filières de recyclage sont discutés de manière générale dans les chapitres 2.3 à 2.5. Ils sont classifiés en fonction de la composante de la filière à laquelle ils se rapportent le plus, à savoir la source, le procédé ou l'application. Cette classification est bien sûr simplifiée car ces trois composantes sont interdépendantes. Néanmoins, des typologies de cause peuvent être dégagées :

- Les limites attachées à la **source** comprennent les aspects liés à la conception du matériau devenant déchet, ainsi que les caractéristiques du gisement (taille et caractère pré- ou post-consommation) et 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 ou 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 limites spécifiques à chaque type de matériaux sont discutées au chapitre 2.6 en termes de bilan environnemental et de tailles des gisements et des marchés des applications concernées. Par contre, l'analyse des marchés d'un point de vue économique sort du cadre de cette étude.

2.3 Limitations générales en matière de gisements et d'approvisionnement

Ce chapitre aborde les limites générales qui sont associées à la source de matière première secondaire. Il peut être séparé en deux parties selon que les limites ont trait aux caractéristiques des gisements de déchets ou à la manière dont les gisements sont collectés et deviennent une fraction à recycler.

Les éléments relatifs aux gisements comprennent :

- La taille et la pérennité des gisements ;
- La nature des matériaux constituant les gisements et la conception des produits ;
- Le caractère pré- ou post-consommation des gisements.

Les éléments relatifs à la collecte et au tri amont incluent :

- La manière de collecter les déchets en flux séparés ou mélangés de même que pour les flux concernés, l'alternative en démontage et broyage ;
- L'existence de normes ou référentiels ;
- La traçabilité des flux.

2.3.1 Quantité disponible et pérennité de la source

Une quantité de déchets minimum et suffisamment pérenne est nécessaire (mais pas suffisante) pour justifier la mise en place d'une filière de recyclage, en particulier des installations de recyclage à taille industrielle. Par ailleurs, une quantité minimum de MPS doit être rendue disponible avec un approvisionnement garanti dans la durée pour qu'un utilisateur développe un produit incorporant cette MPS et fixe les spécifications matière associées.

La taille minimum du flux dépend de la valeur de la matière recyclée et du coût (lui-même lié aux risques sanitaires) de son élimination. Par exemple, les batteries et piles ne représentent pas un flux massif important dans les déchets ménagers. Néanmoins, elles sont recyclées car leur élimination dans les déchets ménagers non triés entraînerait des dommages environnementaux et sanitaires importants.

La pérennité de la source est un élément clé dans le calcul de la rentabilité des investissements. En raison des incertitudes pesant sur cette pérennité, la projection de rentabilité doit viser l'amortissement des installations sur des durées relativement courtes, ce qui peut constituer un frein aux investissements. Il faut en outre toujours compter sur des adaptations régulières des installations

car non seulement les approvisionnements mais aussi les législations et les débouchés évoluent continuellement.

2.3.2 Limites liées à la chimie des matériaux

Les matières à recycler peuvent être classées en deux groupes selon leur chimie de base :

- les métaux et le verre qui peuvent être recyclés à l'infini (d'un point de vue de la chimie et en l'absence de contamination extérieure) en raison de la nature respectivement métallique et à composante ionique de leurs liaisons intermoléculaires ;
- les papiers-cartons (fibres cellulosiques), les plastiques (macromolécules) et les textiles, qui tirent leurs propriétés de leur grande taille moléculaire mais qui subissent des modifications lors leur mise en œuvre, se traduisant par une dégradation de certaines propriétés.

Au niveau des plastiques, les thermoplastiques doivent en outre être distingués des résines thermodurcissables :

- Les thermoplastiques sont constitués de macromolécules indépendantes qui peuvent s'écouler au-delà d'une certaine température. Celle-ci dépend de leur nature chimique et de leur éventuel caractère semi-cristallin. Pour les thermoplastiques formés par polycondensation (comme le PET), un traitement de post-condensation permet de déplacer l'équilibre chimique vers la formation de chaînes plus longues permettant ainsi de contrecarrer la diminution de masse moléculaire résultant de la transformation de ces matières plastiques ou causée par hydrolyse. Des procédés d'allongement de chaîne peuvent être aussi envisagés pour les polymères obtenus par ouverture de cycle mais pas pour les polymères synthétisés par polyaddition comme les polyoléfinés (PP, PE).
- Les résines thermodurcissables forment après réticulation une macromolécule unique sous forme d'un réseau tridimensionnel. Elles ne peuvent donc pas s'écouler sous l'effet de la température et ni être remises en œuvre. Leur recyclage est donc très difficile sans porter atteinte à leur intégrité.

En pratique, les dégradations de propriétés qui interviennent lors du recyclage des matériaux sensibles ne posent pas de problème pour de faibles taux d'incorporation de la matière recyclée mais peuvent devenir plus critiques pour des taux élevés et plusieurs boucles de recyclage.

L'effet des cycles successifs de mise en œuvre des matières plastiques est décrit au chapitre 2.6.1.2.

2.3.3 Pureté liée à la conception des produits

La composition des produits ou de leurs pièces constitutives influence fortement les possibilités de recyclage en fin de vie. Une distinction majeure doit donc être faite entre les déchets mono-matériaux et les déchets multi-matériaux.

2.3.3.1 ADDITIFS (DANS LES DECHETS MONO-MATERIAUX)

De nombreux produits sont composés d'un matériau unique. Toutefois, ce matériau peut contenir des additifs visant à modifier une ou plusieurs de ses propriétés. Les principales familles d'additifs sont :

- Les colorants : ils constituent une limite importante pour le recyclage de tous les produits visibles lors de leur utilisation. Cela concerne surtout les plastiques teints dans la masse. Les autres matériaux colorés sont recouverts d'une couche colorée (laque, vernis, peinture) qui peut être +/- facilement enlevée. De manière générale, la couleur de la matière recyclée ne convient pas à toutes les applications; En particulier, si des flux de déchets non-colorés sont mélangés avec des flux colorés, la matière recyclée ne pourra pas être utilisée dans des applications non-colorées.

Exemples : le calcin coloré ne peut pas servir à faire des bouteilles en verre transparent ; les bouteilles en PET colorées ne peuvent pas être recyclées dans des applications "bottle-to-bottle" en PET clair. Par contre, cela ne pose pas de problème comme couche non-externe de produits multicouches et pour les applications enterrées (tuyaux) ou cachées (dans des murs, dans des caissons...).

- Les plastifiants et stabilisants dans les polymères : ils ne posent a priori pas de problème significatif sauf pour certains produits à longue durée de vie. Celle-ci entraîne en effet un décalage entre la nature des déchets collectés et les spécifications actuelles des recycleurs.[7]

Exemple 1: des retardateurs de flamme (RF) bromés se trouvent dans la majorité des DEEE récupérés. Néanmoins, on observe globalement depuis 5 ans une très forte diminution de la consommation de RF bromés entrant dans la fabrication des EEE. Certains de ces RF bromés sont à présent interdits, en pratique limités à 0,1% en poids, par la directive 2002/95/EC dite "RoHS" (Restriction d'utilisation de substances dangereuses pour l'environnement). La Directive précise en outre que les pièces plastiques contenant des produits bromés devront faire l'objet d'un traitement séparé. Ces réglementations posent donc des contraintes importantes sur le recyclage des plastiques contenant des RF bromés. Compte tenu des durées de vie très variables des appareils, la présence de RF halogénés (y compris bromés) dans les DEEE restera problématique au moins jusqu'en 2015/2020.[8]

Exemple 2: De même, du PVC contenant des stabilisants à base de cadmium et de plomb (essentiellement dans des châssis de fenêtre) se retrouve à présent dans les circuits de recyclage alors que ces substances "historiques" sont interdites maintenant. En effet, la Directive 91/338/EEC fixe à 0,01% la teneur maximale en cadmium de produits fabriqués à partir de matériaux plastiques colorés ou stabilisés par des substances contenant du cadmium. Cette réglementation pose donc de gros problèmes à l'industrie du PVC pour atteindre des taux élevés de recyclage car les châssis en PVC issus de la déconstruction par exemple, constituent un flux important relativement facile à recycler d'un point de vue mécanique (gros flux assez pur).

- Les catalyseurs de polymérisation : lors d'une transformation ultérieure de la matière, ils peuvent jouer un rôle catalytique d'oxydation des chaînes polymères. En général, ils posent peu de problèmes car les opérations de recyclage se passent à des températures inférieures ou égales à la température de mise en œuvre et que ces catalyseurs sont conçus pour ne pas agir pendant la mise en œuvre.
- Des charges de type talc ou carbonate de calcium (CaCO_3) sont utilisées entre autres dans les polyoléfines, en substitution d'une fraction du plastique. Une motivation essentielle est liée aux coûts des matières premières. Les propriétés mécaniques telles que la rigidité peuvent être améliorées tandis que d'autres sont maintenues jusqu'à environ 10% en poids de charge, puis se dégradent.

Deux types de problèmes apparaissent lors du recyclage de ces matériaux:

- Tout d'abord, la densité du plastique est modifiée (la densité du talc ou du CaCO_3 étant de l'ordre de $2,7 \text{ kg/dm}^3$). Ceci pose problème par exemple dans le tri des polyoléfines par densité. Ces polyoléfines ne se retrouvent pas dans le flux polyoléfines mais bien dans les fractions plus lourdes et perturbent les filières de recyclage de ces fractions;
- Ensuite, la présence des charges peut poser des problèmes aux procédés de recyclage car elle implique d'adapter les paramètres de mise en œuvre.

2.3.3.2 DECHETS MULTI-MATERIAUX

Un produit (déchet) peut être multi-matériaux

- soit parce que la surface du matériau principal est recouverte par une couche autre,
- soit parce le matériau est, dans la masse, composé de matériaux de natures différentes, en vue de combiner leurs propriétés (soit de manière moyenne soit avec synergies de propriétés).

Chacune des configurations utilisées dans les cas multi-matériaux est décrite séparément ci-dessous ainsi que les limites associées au recyclage de ces matériaux en fin de vie.

2.3.3.2.1 Revêtements

De nombreux types de revêtements existent sous diverses dénominations, regroupées en anglais sous le terme « coatings » :

- Dépôt en couche mince ;
- Laque ;
- Vernis ;
- Peinture ;

- Encres.

Ces revêtements peuvent remplir différentes fonctions :

- Couches de protection du matériau ;
- Couches barrière ;
- Modification de l'aspect extérieur.

L'épaisseur des couches peut varier du dixième de micron à quelques dizaines de microns. La nature des revêtements peut être organique ou minérale.

Vu la diversité des situations, il est difficile de discuter dans chaque cas l'influence du revêtement sur la fin de vie du matériau. Néanmoins, on peut dégager quelques tendances, illustrées par des exemples.

(1) Tout d'abord, les couches très fines, d'épaisseur inférieure au dixième de micron par exemple, ne posent normalement pas de problème lors du recyclage. Leurs constituants se retrouvent dispersés dans la matière régénérée mais ne perturbent pas les propriétés (parmi celles-ci l'apparence). Il faut néanmoins éviter des effets catalytiques de composants du revêtement sur l'oxydation des plastiques.

Le Tableau 2-1 illustre deux exemples de matériaux recouverts d'une couche mince ne perturbant pas le recyclage.

Tableau 2-1 : Exemples de matériaux avec revêtement en couche mince

Matériau substrat	Nature du revêtement	Epaisseur de la couche	Couche éliminée avant recyclage	Conséquences sur le recyclage
Bouteille PET	Carbone amorphe ou SiOx	~0.1 µm 0.01 – 0.1 µm	Non	Le dépôt ne perturbe pas le recyclage. La bouteille reste recyclable à 100%. [2]
Verre plat	Oxydes métalliques	0.01 – 0.8 µm	Non	Pas de perturbation pour les fines couches

(2) Sur substrat métallique (acier et aluminium), la tendance est à l'élimination du revêtement avant la refonte. Le Tableau 2-2 présente pour l'acier et l'aluminium des cas où l'élimination du revêtement intervient au cours des opérations de recyclage.

Tableau 2-2 : Exemples d'élimination de revêtements sur métaux

Matériau substrat	Nature du revêtement	Epaisseur de la couche	Couche éliminée avant recyclage	Conséquences sur le recyclage
Fer-blanc	Etain	Typiquement 0.3 à 1.6 µm	Oui, par électrolyse par exemple	Si l'étain n'est pas enlevé avant l'étape de refonte, son incorporation dans l'acier résulte en une perte des propriétés de ductilité et d'étirabilité. [3]
Aluminium	Laque et coating (dont époxy)	10 – 100 µm	Oui, par dégradation thermique	La présence des revêtements sur les scraps introduits dans le four de refusion augmente les pertes métalliques. ² [4]

² En cas d'absence d'étape de « decoating » de l'aluminium par exemple, le passage à haute température permet la combustion des éléments oxydables et/ou la réduction des oxydes. Le revêtement organique est bien éliminé mais cause des pertes métalliques plus importantes.

(3) Sur substrats plastiques, il est difficile d'extraire le revêtement. Celui-ci perturbe le recyclage dans un certain nombre de cas identifiés, en limitant la valeur ajoutée des applications accessibles. Un exemple en est donné au Tableau 2-3.

Tableau 2-3 : Exemples de problèmes posés par les revêtements sur plastiques

Matériau substrat	Nature du revêtement	Couche éliminée avant recyclage	Conséquences sur le recyclage
Pare-chocs en PP	Laque	Partiellement par lavage friction-solvant	Problème de fragilité liée à la présence de défauts

2.3.3.2.2 Multicouches

Les multicouches ou laminés sont le plus souvent composés de couches plastiques, éventuellement combinées à des couches en aluminium ou en carton. Les épaisseurs de différentes couches varient le plus souvent entre 5 et 100 microns.

Il n'est, la plupart du temps, pas possible économiquement (car très compliqué techniquement et non-appliqué industriellement sauf pour les exceptions ci-dessous) de séparer les couches en vue de leur recyclage en mono-matériaux. Par ailleurs, il est difficile de transformer les multicouches non séparées en raison des différences de température de mise en œuvre de chaque couche, qu'elles soient constituées de différents plastiques ou a fortiori d'aluminium.

Ce n'est que dans des cas très spécifiques qu'un recyclage de multicouches pourrait être envisagé. Celui pratiqué par la firme japonaise Far East Network constitue un exemple. Celle-ci utilise des multicouches post-consommation à base par exemple de PE et PET. Elle produit des mélanges de polymères avec adjonction de compatibilisants pour des applications telles que des palettes, des pièces pour intérieur de voiture, des pots et bacs... Ces applications ont des exigences techniques faibles (pas d'effet barrière, pas de résistance à l'abrasion, pas de résistance aux agents chimiques... uniquement une performance mécanique).

Le recyclage des cartons à boisson constitue une autre exception bien connue de valorisation de multicouches. Les fibres du carton sont récupérées tandis que les couches polyéthylène et aluminium suivent en général une voie d'élimination éventuellement avec valorisation énergétique.

D'autres configurations en multicouches existent comme par exemple les pare-brise automobiles. Les pare-brise en verre feuilleté se composent habituellement de deux couches de verre séparées par une feuille de polyvinylbutyral (PVB), sur laquelle elles sont contrecollées. Le PVB est un matériau de haute résistance à la pénétration qui empêche les particules de verre acérées de s'échapper lorsque le pare-brise est endommagé. La feuille PVB pose certaines difficultés pour le recyclage de ces verres. Cette feuille est en effet difficile à séparer du verre, ce qui génère des pertes en verre élevées, difficilement réductibles, lors du procédé.

2.3.3.2.3 Mélanges dans la masse

Le mélange de matériaux de natures différentes peut conduire

- soit à un matériau homogène (mélange intime au niveau moléculaire), comme par exemple pour les mélanges de polymères miscibles ou certains alliages métalliques ;

Exemples : bronze (alliage cuivre avec 7 à 20% d'étain)

- soit à un matériau hétérogène avec séparation de phases, comme dans le cas des mélanges de polymères non miscibles ou partiellement miscibles ; leur microstructure est souvent caractérisée par la dispersion de nodules d'une phase dans l'autre ;

Exemples : mélanges ABS/PC ou PP/PC utilisés par exemple dans des pièces automobiles

Il est souvent difficile voire impossible de séparer les constituants du mélange en vue de les recycler de manière individuelle. Les mélanges ne peuvent être recyclés que dans un champ limité d'applications, voire que pour les mêmes applications que celles de départ, pour autant que la microstructure obtenue dans le produit de départ soit conservée lors de la re-transformation. Mais, surtout, les flux de matériaux mélangés sont multiples et risquent d'être chacun individuellement trop peu significatif pour qu'une filière de recyclage dédiée soit mise en place.

2.3.3.2.4 Renforts fibreux

De nombreux matériaux composites, composés d'une matrice renforcée par des fibres, ont été développés ces dernières décennies.

Exemples : composites polyester – fibres de verre utilisés pour les habillages intérieurs des trains

Les principaux systèmes sont :

- Matrice polymère (thermoplastique ou thermodurcissable) avec fibres longues ou courtes en :
 - verre
 - carbone
 - polymère (Ex : Kevlar)
 - cellulose (bois)
- Matrice métallique avec fibres métalliques

D'une manière générale, les possibilités de recyclage sont limitées par la difficulté de transformer à nouveau les composites, surtout dans le cas des fibres longues. Dans le cas des fibres courtes fragiles, comme les fibres de verre, leur rupture à chaque étape de recyclage fait décroître rapidement les propriétés mécaniques de la MPS.[1]

2.3.3.2.5 Autres assemblages

Divers assemblages conduisent à rendre solidaires des parties de compositions différentes dans un même objet :

- Soudure d'éléments métalliques
Exemple : couvercle en aluminium des cannettes en acier
- Intégration de fils électriques
Exemple : système de chauffage dans les vitres arrière des voitures
- Assemblages avec adhésif
Exemple : Etiquettes papier collées sur bouteille

Lorsque les colles utilisées dans les assemblages peuvent être dissoutes ou éliminées, comme les colles solubles dans l'eau, il est possible techniquement de récupérer séparément les matériaux constitutifs de l'assemblage. Dans tous les autres cas, ces assemblages posent des problèmes de contamination ou des difficultés de mise en œuvre lors du recyclage.

2.3.3.3 AMELIORATION DE LA PURETE GRACE A L'ECOCONCEPTION

Pour toutes ces pièces multi-matériaux, l'**écoconception** joue un rôle très important afin de permettre davantage de recyclage

- soit en limitant le recours aux multi-matériaux ;
- soit en prévoyant la possibilité de séparer les matériaux constitutifs des assemblages.

En ce qui concerne l'automobile, la Directive 2000/53/CE du Parlement européen et du Conseil, du 18 septembre 2000, relative aux véhicules hors d'usage (VHU), fixe des objectifs pour la valorisation des VHU comme suit :

- au 1^{er} janvier 2006, 80% en masse de réutilisation et de recyclage et 85% en masse de réutilisation et de valorisation ;
- au 1^{er} janvier 2015, 85% en masse de réutilisation et de recyclage et 95% en masse de réutilisation et de valorisation.

Afin d'atteindre ces objectifs, les constructeurs vont certainement aller dans le sens de ces deux attitudes d'écoconception.

Dans le domaine des emballages, dans certains pays, des guides ont été rédigés à l'intention des personnes qui mettent des produits emballés sur le marché.³ Par exemple pour les bouteilles en

³ UK (<http://www.recoup.org/business/default.asp>); Australia (<http://www.acor.org.au/materials.html>)

PEHD, ces guides indiquent dans quelle mesure les matériaux utilisés pour les bouchons, étiquettes et autres sont compatibles avec les procédés de recyclage existant.

2.3.4 Limitations selon le type de source : pré- ou post-consommation

Les déchets peuvent provenir de deux types de sources :

- Les industries productrices de la matière première ou celles qui l'utilisent pour produire des biens ; celles-ci recyclent une grande partie en interne mais écartent aussi de leur production de la matière présentant des défauts, des chutes de production ou de la matière excédentaire (« des fins de rouleaux », découpes, copeaux, etc.) ; on parle de flux **pré-consommation** ;
- Des consommateurs, ménages et secteurs public et privé qui jettent des biens en fin de vie ; on parle de flux **post-consommation**.

Les avantages des flux pré-consommation sur les flux post-consommation sont :

- ils sont propres et mieux connus au niveau de leur composition; celle-ci varie peu en fonction du temps (ou de manière prévisible) ; ils ne contiennent pas de contaminants imprévisibles ;
- ils peuvent plus facilement être collectés en flux séparés en raison des volumes plus grands et du nombre plus faible d'acteurs concernés.

Les flux post-consommation provenant des industries (exemples : films de palettisation collectés dans la grande distribution ; films agricoles) se rapprochent des flux pré-consommation en termes de volumes. Ils présentent plus de possibilités de recyclage que les flux provenant des ménages, surtout en boucle fermée, que ce soit pour des raisons de couleur ou de grade. Néanmoins, des difficultés liées aux saletés et à la contamination peuvent apparaître.

En règle générale, les flux pré-consommation rencontrent peu de limites à leur recyclage sauf en cas de difficulté inhérente à leur conception, comme par exemple dans le cas des multicouches. Par contre, les flux post-consommation posent les questions suivantes:

- choix du mode de collecte et difficulté d'avoir des flux séparés
- approvisionnement : celui-ci n'est pas stable en quantité et en qualité dans le temps, par exemple à cause d'effets saisonniers. Pour pallier cette difficulté, les régénérateurs mélangent toujours des flux de différentes provenances afin de garantir une qualité stable aux clients.
- problèmes causés par le contenu résiduel (pour les emballages), par exemple du lait, des huiles, des détergents. Le contenu résiduel peut être difficile à éliminer au cours des opérations de lavage et peut poser des problèmes de
 - odeurs
 - perturbation des propriétés mécaniques (par exemple plastification des plastiques)
- Problème d'élimination des impuretés
- Effet de l'humidité

2.3.5 Contamination liée au mode de collecte et de préparation

Pour les flux pré-consommation, les fractions recyclables sont généralement collectées de manière séparée. Par contre, pour les flux post-consommation se pose le choix

- du tri ou non à la source pour les déchets ménagers et industriels assimilés ;
- du démontage ou du broyage pour les flux tels que les véhicules hors d'usage (VHU) et les déchets d'équipements électriques et électroniques (DEEE) ou encore les déchets de construction.

2.3.5.1 COLLECTE SELECTIVE VS. TRAITEMENT MECANIQUE BIOLOGIQUE

La collecte des déchets recyclables auprès des ménages implique la mise en place d'un système de gestion à la fois simple pour les particuliers et le plus efficace possible en termes économique et environnemental.

Deux grandes options existent :

- Soit les ménages effectuent eux-mêmes une partie du tri de leurs emballages et leurs déchets sont collectés de manière sélective. Un tri supplémentaire par matériau est ensuite réalisé en centre de tri. Ces collectes sélectives peuvent être organisées en :
 - monoflux, c'est-à-dire en collectant en mélange toutes les fractions recyclables (fibreuse, plastiques, métaux, verres) ;
 - biflux, typiquement en séparant les corps plats (fibreuse) et les corps creux (plastiques, métaux, verres) ;
 - multiflux, analogue au biflux mais en collectant séparément le verre et/ou en ajoutant éventuellement une collecte de la fraction fermentescible des ordures ménagères (FFOM) ;
- Soit tous les déchets des ménages (à la fois les déchets tout-venant et les recyclables) sont collectés ensemble dans la même poubelle. Différentes opérations de tri sont effectuées en aval. Un tel système permet de valoriser aussi la fraction organique et porte le nom de traitement mécano biologique (TMB, ou MBT en anglais, "mechanical biological treatment").

Ces deux systèmes peuvent aussi être utilisés de manière complémentaire.

Les principales limites du système de collecte sélective sont les suivantes :

- Seules les matières autorisées par les consignes de tri données aux ménages sont recyclées
- Des erreurs de tri par rapport aux consignes données entraînent la présence de contaminants qui nécessitent des opérations de tri supplémentaires (avec le risque d'augmenter le rejet du "bon matériau") et/ou se retrouvent dans la matière recyclée.

La principale limite du MBT du point de vue du recyclage est la contamination des flux à recycler par tous les autres déchets, ce qui crée des problèmes de

- Odeurs (en raison du contact avec des matières organiques, en partie dégradées)
- exigences de souplesse des procédés (pour s'adapter à une composition variable)
- séparation, notamment en raison d'ordures et de contaminants collant sur les déchets à trier (ils posent des difficultés de reconnaissance optique et gênent la séparation densimétrique car ils modifient la densité apparente)
- fréquence de défauts dans les produits recyclés plus élevée que pour les flux collectés sélectivement, ce qui pose des problèmes de garantie de respect des exigences.
- exclusion des filières de recyclage, comme c'est le cas pour les papiers cartons. En effet, la norme EN 643 définissant les grades de papiers cartons récupérés [5] stipule que les produits provenant du tri sur ordures brutes ne sont pas utilisables dans l'industrie papetière. En conséquence, ceci exclut l'utilisation de tous les papiers et cartons récupérés issus de la collecte d'ordures ménagères en mélange.⁴ En effet, bien que non-contraignante, cette norme est soutenue par le secteur du recyclage du papier et ces fractions sont préférentiellement valorisées comme RDF.[6]

Quel que soit le mode de collecte, une phase importante de tri est réalisée en centre de tri avant envoi des balles chez les recycleurs (ou les régénérateurs, assimilés dans la suite de ce chapitre). En raison du nombre limité de flux séparés qu'il est possible de trier et de la difficulté de distinguer certains matériaux au tri manuel, les flux envoyés chez les recycleurs peuvent contenir des matériaux différents.

C'est le cas bien sûr des bouchons qui restent sur les bouteilles en PET mais qui peuvent être facilement séparés du PET par flottation.

Mais c'est aussi le cas des bouteilles en PP qui se retrouvent dans le flux PEHD, par exemple en France et en Belgique. La présence du PP peut ou non poser des problèmes en fonction de la quantité de PP présente dans le flux et des possibilités de tri supplémentaire chez le recycleur ainsi que des applications de la matière recyclée. Tous les aspects liés à la contamination du PEHD par le PP sont discutés au chapitre 3.

⁴ La question de l'acceptation des flux obtenus par collecte sélective en monoflux se pose pour les papiers qui sont ainsi en contact avec des bouteilles de lait, des ELA, des boîtes de conserve, etc. Le risque d'exclusion augmente avec les perspectives à court terme en France d'étendre la collecte sélective à d'autres types d'emballages comme les barquettes, pots de yaourt, etc.

Tous types de verre confondus, il est constaté l'augmentation des risques de pollution du calcin liés à la présence de vitrocéramique dans le verre collecté, notamment du fait du développement des utilisations de vitrocéramique transparente, non-séparable des autres verres par les détecteurs optiques (matériel culinaire, vitres pare-feu...). Les caractéristiques de ce verre (point de fusion plus élevé, faible coefficient de dilatation) entraînent une pollution dans les fours verriers et des pertes de production qui peuvent être très importantes (rémanence des particules dans les fours pendant plusieurs jours).[7]

2.3.5.2 DEMONTAGE VS. BROYAGE

Pour les flux post-consommation complexes tels que les véhicules hors d'usage (VHU) et les déchets d'équipements électriques et électroniques (DEEE), deux scénarios "extrêmes" existent pour valoriser la matière en fin de vie.⁵

- Scénario limite 1 : démontage minimal. Pour les VHU, la plupart des pièces restent sur la carcasse qui est ensuite broyée. Les métaux ferreux sont extraits et les plastiques, mousses, caoutchouc, métaux non-ferreux, textiles et verre se retrouvent le plus souvent dans les résidus de broyage mis en décharge.
- Scénario limite 2 : démontage sélectif poussé. Pour les VHU, la plupart des pièces sont démontées (fauteuils et banquettes, pare-brises et vitre, pare-choc, tableau de bord, textiles,...) et les matériaux ainsi séparés. Les pièces sont entières et peu salies. Elles peuvent donc, directement après le démontage, entrer dans la filière de valorisation matière appropriée.

Dans la pratique, c'est un scénario intermédiaire qui prend place puisque certaines pièces ne sont jamais démontées tandis que d'autres le sont parfois. L'étendue de la phase de démontage sélectif dépend d'un pays à l'autre. Le frein le plus important pour le démontage vient du coût élevé de la main d'œuvre nécessaire. En outre, certains flux sont trop peu volumineux pour justifier le démontage des pièces correspondantes. Enfin, des coûts de transport très élevés limitent aussi l'intérêt du démontage sélectif des mousses.

Afin d'être recyclés, les matériaux contenus dans les résidus de broyage doivent être séparés. Plusieurs techniques ont été développées dans l'industrie pour permettre cette séparation. [8] [9] Elles font intervenir un pré-tri des résidus de broyage qui permet de séparer les résidus en minimum trois fractions : plastiques, métaux et fraction minérale. Ces fractions font dans un deuxième temps l'objet d'un tri plus poussé dont l'efficacité varie en fonction des technologies.

Pour les plastiques, parmi les opérateurs les plus avancés, se trouve Galloo Plastics qui obtient des fractions mono-matériaux (PP, PE, ABS, PS, PP talc). Ces fractions de plastiques passent par une étape d'ajustement des propriétés physiques afin que les granulés produits par extrusion et compoundage respectent les cahiers des charges du client. Néanmoins d'autres installations atteignent des niveaux de séparation moins élevés, ce qui conduit à des utilisations de la matière recyclée de moindre valeur. Par contre, même dans le meilleur des cas, les installations existantes ne permettent pas aujourd'hui de récupérer tous les types de plastiques contenus dans les pré-concentrés de résidus de broyage.

Pour le verre, d'après l'étude de l'ADEME consacrée aux VHU [9], il apparaît que le verre qui entre dans les broyeurs ne termine pas chez des recycleurs. Il contient en effet trop d'impuretés pour entrer à nouveau dans des fours en tant que calcin. Dans le meilleur des cas, la fraction minérale contenant le verre broyé est utilisée comme soubassement de routes. Pour le verre, le démontage sélectif doit donc être encouragé (par des incitants financiers par exemple) puisqu'il permet de recycler ces verres dans de nombreuses applications. Les principales difficultés du recyclage des verres automobiles sont la séparation de la feuille de PVB pour les pare-brises (PVB non-recyclable et qui entraîne des pertes) et la couleur du verre pour les vitres arrière (teinte verte obtenue par ajout d'oxydes de fer).

2.3.6 Normalisation et traçabilité

D'une manière générale, les acteurs de la chaîne du recyclage souhaiteraient [7] :

- « un renforcement de la normalisation des matières premières secondaires, en particulier pour les ferrailles, les métaux non ferreux, le verre et les plastiques ou, à défaut, des garanties sur

⁵ Ces opérations sont dans tous les cas précédées d'une dépollution et du démantèlement des pièces "dangereuses" (pour DEEE : tubes cathodiques, éléments contenant du mercure, piles et batteries...; pour VHU : batteries, fluides, roues, pneus)

les caractéristiques des lots de MPS livrés » ; En effet, « La normalisation des MPS améliore le fonctionnement des marchés car elle définit des standards de qualité servant de référence dans les transactions et dans le suivi des prix. »

- « l'élaboration de normes volontaires plus spécifiques à certaines MPS lorsqu'elles n'existent pas ou les faire évoluer pour les rendre plus adaptées aux attentes des acteurs » ;
- « l'instauration d'un système de traçabilité et de contrôles tout au long du processus de recyclage. »

Le Tableau 2-4 reprend les référentiels et normes volontaires existant pour caractériser les flux de matière à recycler.

Tableau 2-4 : Normes et référentiels existant pour les MPS

	Nom du référentiel / norme	Portée géographique	Année
Acier	EUROFER ISRI 210/211	Europe USA	1995
Aluminium	EN 12258-3 et 13920	Europe	Resp. 2000 et 2002
Cuivre	EN 12861	Europe	2000
Verre	/		
Plastiques	/		
Papier-carton	EN 643	Europe	2002
Bois	/		

En l'absence de normalisation, ce sont les spécifications sur les flux à l'entrée des installations de recyclage qui prévalent, limitées parfois à un simple contrôle visuel. « Les utilisateurs de MPS constatent un déficit d'information sur la qualité des lots : La difficulté à caractériser complètement les MPS et à identifier la présence d'éventuels contaminants se traduit par une impossibilité pour l'acheteur d'estimer la valeur du lot et le risque associé. Ce phénomène accroît la méfiance des utilisateurs et complique les négociations commerciales, les acteurs ne pouvant s'appuyer sur un prix de référence pour une qualité donnée. » [7]

Quant à la traçabilité, « des processus de traçabilité doivent être instaurés afin d'identifier l'origine d'un matériau recyclé en cas d'incident sur les chaînes de recyclage. » Néanmoins, toute comme la normalisation, « Ces processus ne doivent cependant pas imposer des contraintes telles que les « petits opérateurs » seraient écartés de la chaîne de recyclage. » [7]

2.4 Limitations liées aux procédés de recyclage

2.4.1 Adaptation des procédés à l'évolution des gisements

La cinétique d'adaptation des procédés de recyclage aux caractéristiques des flux à recycler est limitée alors que ces flux évoluent rapidement, notamment à travers les développements technologiques sur les produits. Un décalage technique apparaît en raison du temps nécessaire à l'identification du problème rencontré et à la recherche de solution. Il constitue une menace pour les filières car les spécifications des utilisateurs de matière recyclée peuvent ne pas être rencontrées en sortie, que ce soit de manière transitoire ou plus pérenne. A titre d'exemple, l'augmentation de l'utilisation de couches barrière multicouches sur les bouteilles PET nécessite la mise en place ou l'optimisation de l'étape de séparation aéraulique.

2.4.2 Perturbation des procédés par les impuretés

Les matières recyclées provenant de sources moins homogènes et moins stables en composition dans le temps que les matières vierges, elles contiennent parfois de petites impuretés (poussières ou petites particules solides) qui sont incorporées dans les matières (en particulier les plastiques) et peuvent gêner les processus de mise en œuvre en plus d'affecter les propriétés des produits recyclés. Par exemple, de petites impuretés peuvent bloquer partiellement des têtes d'injection et perturber la production au point de devoir arrêter les machines. Ces arrêts imprévisibles sont des sources de coûts :

- directs (arrêts de production) et
- indirects (retards de livraison...), qui peuvent être nettement plus considérables que les coûts directs.

Dans le cas du PET, ce sont ces risques qui justifient le prix légèrement inférieur du PET recyclé par rapport au PET vierge, même lorsque la qualité intrinsèque de la matière recyclée permet d'accéder aux applications les plus exigeantes du PET.⁶

2.4.3 Impacts environnementaux des procédés de recyclage

Il est rare que les impacts environnementaux soient, en valeur absolue, plus élevés que les bénéfices du recyclage et que le bilan soit donc défavorable. Cette affirmation s'appuie d'une part sur l'étude « Bilan environnemental sur les filières de recyclage : l'état des connaissances ACV » [11] et d'autre part sur les calculs illustratifs présentés au 2.6.

L'étude mentionnée de revue ACV [11] attire néanmoins l'attention sur les points suivants :

- Si le taux de substitution s'éloigne du 1 pour 1 et/ou si la production de la matière substituée est peu impactante, les dommages environnementaux peuvent, pour certaines catégories d'impacts, dépasser les gains ou le recyclage peut ne pas être le traitement le plus bénéfique. Exemple : plastique substituant du bois ou du béton
- Certains rejets spécifiques peuvent augmenter avec le recyclage. Exemple : émissions atmosphériques d'acide fluorhydrique et de plomb dans le cas du recyclage du verre
- La valorisation énergétique peut avoir un bilan environnemental plus favorable que le recyclage, en fonction des caractéristiques locales de performances et de mix énergétique substitué. Exemple : recyclage des papiers graphiques

En outre, pour les flux très souillés nécessitant un nettoyage intensif à l'eau, le recyclage peut être défavorable en termes de consommation d'eau. Exemple : recyclage du PEBD (cf. 2.6.1.5.4)

Par ailleurs, des opérations de recyclage réalisées dans des installations non suffisamment contrôlées ou équipées peuvent être sources de dommages environnementaux et sanitaires. Cela peut notamment être le cas pour le recyclage des DEEE dans les pays en voie de développement.

Pour le recyclage de l'aluminium, la formation de dioxines dans les fonderies peut se produire en cours de refroidissement progressif et même en cours de fusion car la température de fusion (650°C) ne permet pas la destruction de ces molécules.[12] En l'absence d'épuration efficace des fumées, des quantités importantes de dioxines peuvent être émises dans l'environnement.

La pollution par des métaux non-ferreux notamment émis dans les fumées peut causer des problèmes sanitaires aigus et chroniques non seulement pour les opérateurs de ces filières mais aussi pour l'environnement proche et en particulier auprès des enfants de la zone.[12] Les niveaux élevés de plomb et cuivre mesurés par exemple sur des sites en Chine sont préoccupants.⁷

⁶ Notons qu'un prix du recyclé supérieur à celui du PET vierge peut parfois être observé en raison des engagements des producteurs de bouteilles d'incorporer du recyclé dans des quantités difficiles à fournir par le marché. Ces situations sont des situations de court terme.

⁷ <http://ec.europa.eu/environment/integration/research/newsalert/pdf/105na2.pdf>

2.5 Limitations liées aux applications

2.5.1 Introduction : propriétés affectées lors du recyclage

D'une manière générale, les propriétés de la matière peuvent être affectées lors du recyclage en raison de :

- soit le comportement intrinsèque du matériau lors de sa mise en œuvre (par exemple : dégradation de plastiques) ;
- soit la présence de contaminants dans la matière recyclée ; ces contaminants peuvent provenir :
 - de la composition fixée lors de la phase de production du matériau (exemple: revêtement)
 - de la phase d'utilisation (exemple : saletés déposées sur des conteneurs à déchets)
 - de la filière de gestion des déchets, cf. 2.3.4 (exemple : matériaux différents collectés dans le même flux et non triés)

Le recyclage peut affecter les propriétés suivantes d'un matériau :

- Mécaniques
- Rhéologiques
- Couleur, aspect
- Odeur
- Contact alimentaire et aspects sanitaires

Ces points sont successivement discutés ci-dessous (cf. 2.5.2)

2.5.2 Types d'applications accessibles

2.5.2.1 BOUCLES OUVERTES OU FERMEES

Trois types de recyclage peuvent être distingués, présentant des caractéristiques, des intérêts et des contraintes différentes :

- Le recyclage en boucle fermée, où l'on refabrique le même produit à partir de la matière. Exemple : recyclage des bouteilles PET en bottle-to-bottle;
- Le recyclage en boucle ouverte, où l'on fabrique un autre produit qui, en l'absence du flux recyclé, aurait été produit à partir de la même matière mais vierge. Exemple : recyclage des bouteilles PET en fibres de rembourrage;
- La valorisation matière dans un usage où l'on n'aurait pas fabriqué le produit à partir de la même matière vierge ; par exemple, fabrication d'un banc en plastique mixte au lieu d'en bois.

L'enjeu en matière environnementale est la substitution de matière à haut impact environnemental. Si on a une boucle fermée, le bénéfice de cette substitution est en principe maximal (aux pertes près). Si la boucle est ouverte, on a un bénéfice aussi important si la substitution concerne la même matière mais en général nettement moins bon si la substitution concerne une autre matière.

Plus qu'entre boucles ouverte et fermée, il convient donc de distinguer la substitution à l'identique de la substitution d'une matière différente. Le fait d'avoir une boucle fermée est un juste un garantie de substitution à l'identique.

Pour les **métaux et le verre**, on a (presque) toujours une substitution à l'identique avec un taux de substitution égal à 1 pour 1. Pour le verre néanmoins, des considérations de couleur interviennent, comme décrit ci-dessous.

Pour les **plastiques et les papiers – cartons**, même si on a une substitution à l'identique, il est plus fréquent que le taux de substitution du vierge par le recyclé s'écarte légèrement du ratio 1 :1. Les flux pré-consommation et post-consommation industriels sont les plus susceptibles d'être valorisés en boucle fermée, avec un ratio proche de ou égal à 1:1. Par contre, les possibilités de recyclage en substitution à l'identique des flux post-consommation des ménages sont beaucoup plus limitées en raison de :

- présence de contaminants et/ou d'impuretés, qui peuvent poser des problèmes sanitaires ou empêcher l'utilisation en contact alimentaire (pour les flux issus des emballages alimentaires)
- problèmes d'odeur
- problèmes de couleur : si des flux de différentes couleurs sont mélangés, il n'est pas possible de retrouver une couleur spécifique (sauf le gris ou le noir)
- problèmes de dégradation de la matière.

2.5.2.2 LIMITATIONS LIEES AUX EXIGENCES DE COULEUR

Pour le verre et les plastiques, les exigences de couleur posent de réelles limites au recyclage.

Pour le **verre**, le calcin coloré ou le calcin coloré et blanc mélangé ne peut pas servir à produire du verre incolore (ou couleur claire). Afin de valoriser en verre incolore le calcin blanc collecté en même temps que le calcin coloré, il faut effectuer une opération de démixage. Ce système de séparation optique typiquement français (pas de tri de couleur à la source) est aujourd'hui techniquement au point et s'intègre parfaitement dans l'organisation logistique verrière en place. De plus, les verriers sont disposés à assumer les coûts supplémentaires de mise en œuvre du démixage.[7]

Pour les **plastiques**, le recyclage de flux pré-consommation ou post-consommation industriels permet un recyclage en boucle fermée avec préservation de la couleur. Par contre, dès qu'il y a un mélange de flux de différentes couleurs, il n'est pas possible de donner à la matière recyclée une couleur autre que celle du mélange ou des couleurs telles que gris ou noir. La dégradation ou l'effet de la présence de certains contaminants peut aussi induire un jaunissement de la matière. Afin de pouvoir recycler la matière dans une application, il faut pouvoir :

- Soit co-extruder la matière recyclée avec la même matière vierge de la couleur souhaitée (structure bicouche ou "sandwich");
- Soit convaincre l'utilisateur d'adopter pour son application une couleur compatible avec le flux valorisé.

Si ce n'est pas possible, la filière de recyclage correspondante ne peut pas se mettre en place.

2.5.2.3 LIMITATIONS LIEES AU PROBLEME D'ODEUR

Certains flux post-consommation donnent des matières secondaires caractérisées par des odeurs inappropriées à l'application. Ces odeurs proviennent essentiellement du contenu résiduel dans les emballages ou les pots. Ces matériaux sont réservés aux applications extérieures ou enfouies.

Par exemple, l'utilisation de PEHD recyclé dans les bouteilles à usage alimentaire est quasiment impossible dans de nombreux pays car les contraintes de couleur et d'odeurs limitent le marché.[10]

2.5.2.4 LIMITATIONS LIEES AUX EXIGENCES MECANIQUES OU RHEOLOGIQUES

2.5.2.4.1 Métaux et verre

Comme indiqué à la section 2.3.2, il n'y a pas de dégradation de la matière liée au fait de retransformer les métaux et le verre.

Néanmoins, des problèmes liés à la contamination par des éléments d'alliage peuvent apparaître pour certaines applications des métaux. Des impuretés ou infusibles présents dans le verre peuvent créer des défauts, sources de fragilité.

2.5.2.4.2 Plastiques

La non-adéquation des propriétés rhéologiques et mécaniques des MPS pour certaines applications freine la mise en place de filières de recyclage. Les limites peuvent être de plusieurs types :

- problème de grade: par exemple, le PEHD grade bouteille ne convient pas pour des applications en film
- modification des propriétés due à la dégradation liée à la transformation : pour pallier cette perte de propriétés, la matière recyclée peut être mélangée avec de la matière vierge
- problèmes liés à l'obtention de mélanges de plastiques au recyclage (solution partielle: ajout de compatibilisants)

- Problème lié à la présence d'impuretés : celles-ci limitent les applications en films minces.

2.5.2.4.3 Papiers et cartons

Dégradation progressive des fibres qui peuvent être utilisées de 2 à 7 fois (cf.2.6.2.1).

2.5.2.5 LIMITATIONS LIEES AUX EXIGENCES SANITAIRES ET RELATIVES AU CONTACT ALIMENTAIRE

Concernant les aspects sanitaires en général, « *les déchets et donc les MPS sont exclus de la procédure de déclaration issue de la réglementation REACH. Certaines MPS bien spécifiques pourraient perdre au cas par cas le statut « déchet » et deviendraient de ce fait soumises à REACH. Cependant, les conditions de déclaration ne sont aujourd'hui pas définies.* » [7]

Les questions sanitaires se posent en particulier pour les applications avec contact alimentaire. Comme décrit ci-dessous, des législations existent pour certains types d'emballage afin de vérifier qu'au cas où les matériaux ont été mis en contact avec des substances nocives, les procédés de recyclage résultent en une décontamination suffisante pour permettre leur utilisation en contact avec une denrée alimentaire.

2.5.2.5.1 Métaux et verre

Le recyclage des métaux et du verre n'affecte pas leur adéquation ou non pour le contact alimentaire. En effet, les procédés de recyclage font intervenir des températures suffisamment élevées pour éliminer tout problème sanitaire lié à une contamination. L'aluminium recyclé peut être utilisé dans les applications pour emballage, de même que le verre qu'on ne produit plus sans calcin, pour le verre coloré en tout cas. Quant à l'acier pour contact alimentaire, recyclé ou non, il est par contre toujours revêtu sur leurs deux faces d'une fine couche d'étain⁸.

2.5.2.5.2 Plastiques

En Europe, du fait de l'absence de cadre réglementaire relatif aux applications des produits recyclés en contact avec des produits alimentaires, l'usage du recyclé a longtemps été limité à des produits d'hygiène pour les applications du type flacons. Suite à la réglementation européenne récente (dont le Règlement (CE) n°282/2008 relatif aux matériaux et aux objets en matière plastique recyclée destinés à entrer en contact avec des denrées alimentaires), plusieurs pays européens ont donné leur accord à l'usage du PET recyclé pour des applications emballages alimentaires.⁹

En France, l'AFSSA (Agence Française de Sécurité Sanitaire des Aliments) a émis en 2006 un avis relatif à l'utilisation de matériaux PET recyclés pour la mise au contact des denrées alimentaires et des eaux de boisson.[13] Toute utilisation doit faire l'objet d'une demande d'autorisation à établir selon les lignes directrices définies dans cet avis. L'exigence essentielle de ces lignes directrices, l'objectif ultime des recycleurs, doit être de s'assurer et de démontrer que la migration de tout contaminant éventuel ne peut excéder 1,5 µg/kg d'aliment. La demande doit détailler :

- Le mode de collecte des matières entrantes et les opérations successives de tri ainsi que le cahier des charges fixant les conditions de reprise des matériaux recyclables triés
- Les procédures et les résultats des tests de décontamination ; les procédés de recyclage doivent en effet satisfaire à des exigences en termes de rendements de décontamination
- Les procédures et les résultats des tests de migration ; Combinés aux tests de décontamination, ces résultats permettent d'imposer des niveaux maximum de contamination dans le flux après lavage et avant décontamination.
- La procédure de contrôle de qualité du PET recyclé mise en place afin de garantir la qualité du PET recyclé et d'écartier des lots non-conformes.

Ces spécifications de l'AFSSA peuvent conduire à exclure certaines applications du PET recyclé si la filière de recyclage évaluée remplit les conditions pour certains types de denrées alimentaires mais pas pour d'autres, en distinguant notamment les boissons aqueuses des boissons alcoolisées, du vinaigre ou des aliments gras.

⁸ <http://www.arcelormittal.com/packaging/contentpage.asp?idSp=19&idSection=68>

⁹ C'est du recyclage mécanique qu'il est question ici, pas du recyclage chimique avec hydrolyse et recondensation.

2.5.2.5.3 Papiers et cartons

Les cartons importés d'Asie peuvent contenir des phtalates, dont la présence est interdite pour tout usage du carton recyclé avec contact alimentaire [7].

2.5.2.6 LIMITATIONS LIEE A LA TRAÇABILITE DANS CERTAINES APPLICATIONS

Actuellement, seuls les déchets dangereux font l'objet d'une obligation de traçabilité, à travers les bordereaux de suivi des déchets.¹⁰ Cette procédure n'est que « recommandée » pour les autres types de déchets. En pratique, les cahiers des charges de certains utilisateurs de MPS imposent déjà des contraintes en termes de traçabilité, notamment lors de contact alimentaire.

Comme discuté dans le paragraphe 2.3.6, la traçabilité des déchets à recycler augmenterait la crédibilité et la transparence de toute la chaîne. Les exigences de traçabilité pourraient se marquer différemment en fonction des applications visées, par exemple en étant plus strictes pour le contact alimentaire.

2.5.2.7 LIMITATIONS LIEES A LA PERCEPTION OU AUX ENJEUX DU MARKETING

Une des limites au développement du recyclage réside dans la méfiance et les a priori qui peuvent parfois exister chez les industriels utilisateurs de MPS, les consommateurs finaux, les prescripteurs de produits contenant du recyclé.

2.5.2.7.1 Métaux et verre

Les métaux et le verre recyclés sont bien perçus par les différents acteurs.

2.5.2.7.2 Plastiques

Les plastiques recyclés souffrent d'un problème d'image :

- Auprès des transformateurs qui émettent des craintes quant à la qualité et la sécurité d'approvisionnement de la matière secondaire et quant à l'opportunité du recyclage ;[14]
- Dans le public (mais cela change) en raison du manque de confiance sur la fiabilité et les performances des produits à base de matière recyclée.

2.5.2.7.3 Papiers et cartons

Le papier recyclé n'est pas toujours bien perçu pour des raisons de couleur ou de performances.

¹⁰ http://www.thermya.com/pdf/guide_dechets_BTP_vosges.pdf

2.6 Limites spécifiques

L'objet de ce chapitre est de dégager, pour chaque type de matériau, les éléments limitant le recyclage en se basant sur

- l'analyse des ordres de grandeurs des données de marchés pour les matières premières et secondaires ; pour chaque type d'application, les données sur la demande actuelle totale pour chacun des matériaux (matière recyclée ou non) sont présentées ainsi que, lorsque disponibles, sur la part maximale de cette demande qui peut être substituée par des matières premières secondaires ; la discussion vise à déterminer si les débouchés actuels permettent d'absorber un éventuel accroissement de la disponibilité de matière à recycler ;
- une discussion des limites de qualité technique et éventuellement sanitaire des matières secondaires en lien avec l'origine de la matière secondaire et en fonction des applications potentielles ;
- un bilan environnemental simplifié des bénéfices du recyclage, prenant en compte
 - la production de la matière secondaire à partir de matériaux en fin de vie (incluant le transport des balles vers le recycleur, le procédé de régénération ou le procédé de production à partir de matière première secondaire et le traitement des pertes au recyclage)
 - les impacts de la production évitée de matière première vierge.
 - les impacts de l'élimination évitée (53% d'incinération et 47% de mise en CSDU)

2.6.1 Les plastiques

Les aspects théoriques relatifs à la mise en œuvre des polymères soit en boucles successives soit en mélanges sont d'abord abordés. Ensuite, des chapitres consacrés successivement aux principaux plastiques présentent l'évaluation quantitative des gisements et des applications des matières premières secondaires ainsi que des résultats illustratifs du bilan environnemental du recyclage de ces plastiques.

2.6.1.1 DESCRIPTION GENERALE DES MELANGES DE POLYMERES

Afin de bien comprendre le comportement des polymères en mélanges, les aspects thermodynamiques ainsi que les propriétés qui en découlent doivent être décrits. Ces points ont fait l'objet d'une étude approfondie pour l'association RECORD en 2001, intitulée « Etat de l'art concernant la compatibilité des matières plastiques » (ETUDE N° 00-0904/1A). [20] Le lecteur peut se référer à cette source dont les extraits nécessaires à la bonne compréhension de la présente étude sont reproduits ci-dessous (à l'exception des références bibliographiques utilisées).

2.6.1.1.1 Aspects thermodynamiques

Introduction

Pour prévoir la miscibilité, on fait généralement appel à la thermodynamique des mélanges qui permet de prévoir :

- si un mélange de composition fixée peut être miscible à une température donnée. Selon la température et la composition des mélanges, la miscibilité peut être totale, partielle ou nulle et l'on est généralement amené à construire des diagrammes de phases qui sont basés sur l'étude expérimentale de mélanges.
- les propriétés interfaciales (adhésion)

La miscibilité est liée:

- aux forces dispersives
 - Van der Waals
 - interactions dipôle/dipôle
 - interactions dipôle / molécules polarisables
- aux forces spécifiques
 - liaisons hydrogène
 - liaisons ioniques

La miscibilité des polymères peut être totale, nulle ou partielle et il sera souvent nécessaire d'établir, de manière expérimentale, le diagramme de phases des polymères à étudier.

La tension interfaciale entre les différents constituants des mélanges jouera sur la dispersion moléculaire, les morphologies des mélanges, l'adhésion entre les phases.

Il peut y avoir **différents types de mélanges possibles** :

- thermoplastique / thermoplastique
- thermoplastique / élastomère
- thermoplastique / thermodurcissable
- thermodurcissable / thermodurcissable

Les propriétés des mélanges vont dépendre de différents paramètres tels que :

- Proportion des constituants
- Caractère amorphe ou cristallin des polymères considérés
- Tenue en température (Tg, Tf)
- Caractéristiques mécaniques des phases (souplesse, rigidité, caractère élastomère,...)
- Viscosité des constituants en fonction de la température et du cisaillement

Pour prévoir la miscibilité « a priori », on se basera donc sur la thermodynamique des mélanges qui permet de prévoir la miscibilité de polymères « purs » sans additifs minéraux, organiques... La prise en compte de corps étrangers (additifs minéraux, organiques, polluants divers) ne pourra être faite qu'à partir de travaux expérimentaux.

Courbes binodales et spinodales - évolution de la miscibilité avec la température

Il existe des équilibres métastables entre deux courbes limites : binodale et spinodale.

Courbe binodale

Dans le diagramme de phases, c'est la courbe qui sépare la région où l'on a une phase de celle où l'on a deux phases en équilibre. Elle représente donc la limite de stabilité d'un système à deux phases. Si la miscibilité augmente avec la température, la courbe binodale présente un maximum : la température critique supérieure de miscibilité ou "upper critical solution temperature (UCST)" au-dessus de laquelle les deux composés sont miscibles en toutes proportions.

Si on refroidit un mélange en partant d'un point au-dessus de la binodale à un point en dessous, il y a séparation de phase avec un mécanisme de nucléation croissance.

La température critique inférieure de miscibilité ou "lower critical solution temperature (LCST)" est la température au dessous de laquelle un mélange binaire ne présente qu'une seule phase, quelle que soit la composition du mélange.

Courbe spinodale

Dans le diagramme de phases, c'est la courbe qui sépare la région où l'on a deux phases en équilibre d'une région à une phase en équilibre métastable, donc région entre la binodale et la spinodale.

La Figure 2-2 a fait bien apparaître l'importance de la composition sur les morphologies des mélanges.

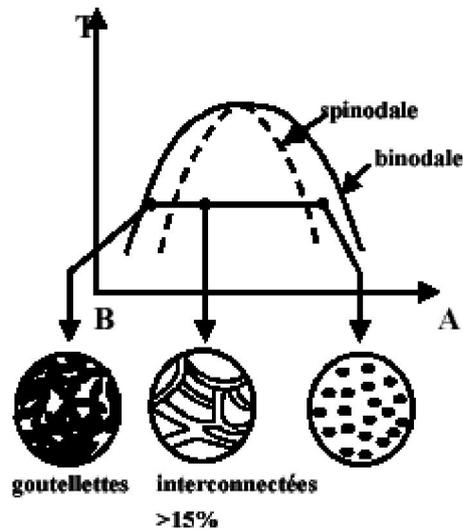


Figure 2-2 : Diagramme de phase et morphologie des mélanges en fonction de la composition

2.6.1.1.2 Conséquences sur les propriétés des mélanges

Calcul de la Tg

Si on a un mélange miscible, celui-ci sera caractérisé par une seule température de transition vitreuse Tg.

Si on a un mélange non-miscible et si les températures de transition vitreuse et de fusion sont suffisamment éloignées, on distingue respectivement deux températures de transition vitreuse et deux températures de fusion.

Phénomènes interfaciaux dans les mélanges hétérogènes

La nature de l'interface dans les polymères immiscibles (compatibilité et adhésion entre les phases) est un paramètre très important qui joue sur

- les propriétés mécaniques
- les propriétés d'écoulement
- l'obtention des mélanges

La tension de surface (d'un liquide ou d'un solide) est « l'excès d'énergie par unité de surface dû à l'existence de la surface libre ». La tension interfaciale est, de la même façon, « l'excès d'énergie dû à la formation d'une interface ». On exprime ces deux grandeurs en J/m².

Les méthodes de détermination des tensions interfaciales sont diverses. Pour évaluer ces tensions interfaciales, on peut donc mesurer séparément les tensions de surface des deux polymères mélangés, par exemple par mesure de l'angle de contact formé sur leurs surfaces respectives par une goutte d'un même liquide connu, mais on peut aussi utiliser la méthode de la goutte pendante en mesurant les caractéristiques d'une goutte du polymère A dans le polymère B. D'une façon similaire, on peut mesurer le temps qu'il faut à un filament du polymère A, étiré dans le polymère B, pour revenir à un état stable et former des gouttelettes bien sphériques.

Diminuer au maximum les tensions interfaciales rendra d'autant plus facile la miscibilité de deux corps. Dans le cas des polymères, en appelant γ_1 la tension de surface du polymère 1, γ_2 celle du polymère 2 et γ_{12} la tension interfaciale, on a :

$$\gamma_{12} = (\gamma_1^{1/2} - \gamma_2^{1/2})^2$$

Enfin, grâce aux tensions de surface γ_i et γ_j et à la tension interfaciale γ_{ij} , on définit le travail d'adhérence Wadh, travail qu'il faut fournir pour séparer les polymères i et j, exprimé dans la relation de Dupré :

$$Wadh = \gamma_i + \gamma_j - \gamma_{ij}$$

Quand Wadh est positif, les polymères sont probablement miscibles, puisque moins la tension de surface entre deux polymères est élevée, mieux ils se mélangent.

On verra également plus loin que l'on cherche parfois à réduire les tensions interfaciales en utilisant des intermédiaires : des agents émulsifiants ou compatibilisants, par analogie physicochimique avec l'un ou/et l'autre des composants du mélange, permettent de diminuer les tensions.

Le Coefficient d'étalement d'une phase i sur une phase j peut se calculer à partir de la formule :

$$\lambda_{ij} = \gamma_i - \gamma_j - \gamma_{ij}$$

Avec γ_i et γ_j = tension interfaciale

λ_{ij} = Tension superficielle

L'étalement est possible si $\lambda_{ij} > 0$; Si $\lambda_{ij} > 0$, i recouvre j et Si $\lambda_{ij} < 0$, i isolée de j.

2.6.1.1.3 La compatibilisation des mélanges de polymères

Définition

Dans le cas, de mélanges non miscibles, se pose le problème de la coalescence des gouttes de polymères qui augmente la taille des phases (cf. Figure 2-3). Lorsque la concentration en particules augmente la probabilité de rencontre ou de collision devient non nulle.

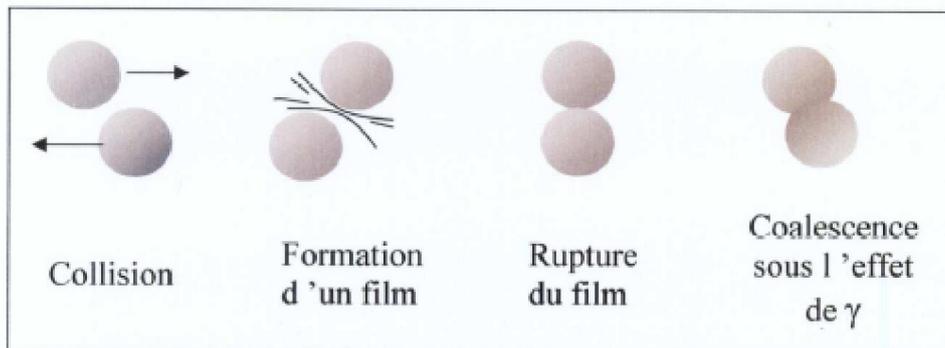


Figure 2-3: Phénomènes de rupture de goutte et coalescence

La morphologie du mélange va donc dépendre de l'équilibre dynamique entre rupture de goutte et coalescence.

Pour améliorer la miscibilité des polymères on peut introduire à l'interface des deux polymères A et B immiscibles un troisième composant C présentant des affinités avec A et/ou B. Le rôle principal de ce composé C est d'empêcher la coalescence et c'est ce qui a été démontré pour des mélange polyamide 6/poly(méthacrylate de méthyle) PA-6/PMMA en présence d'un copolymère styrène-anhydride maléique SMA. Le compatibilisant permet également d'améliorer la dispersion des phases en présence. Il peut être introduit directement sous sa forme active ou être généré in situ.

Ce troisième constituant appelé compatibilisant va induire :

- une réduction de la tension interfaciale
- une meilleure dispersion pendant le mélange
- une stabilisation de la morphologie
- une amélioration de l'adhésion interfaciale

Avec les mélanges non miscibles mais compatibles, on arrive à avoir une dispersion très fine et une bonne adhésion entre les phases.

Les types de compatibilisants les plus souvent rencontrés sont des copolymères (blocs, statistiques, greffé). Les compatibilisants sont non réactifs ou réactifs (création de liaisons chimiques avec une phase ou avec les deux). Une compatibilité chimique des segments du copolymère avec les phases à compatibiliser et une masse molaire du compatibilisant pas trop petite sont nécessaires.

Idéalement, les compatibilisants se situent à l'interface des deux polymères. Mais ce n'est pas toujours le cas et il en résulte une moindre efficacité du compatibilisant.

Dans le cas d'un binaire de polymères A et S non miscible, il y a séparation en deux phases l'une de A, la matrice, et l'autre de S, la phase dispersée. La morphologie des mélanges sans compatibilisant est très grossière, c'est-à-dire que la taille moyenne des domaines de B dispersés dans la matrice de A

peut être assez grande, (de l'ordre de 20 µm dans le cas d'un mélange PE/PET). Ceci est dû à la faible interaction entre les deux polymères et aux fortes énergies de surface des deux polymères qui les poussent à rester séparés.

La forme sphérique des phases provient du fait que c'est la géométrie qui consomme le moins d'énergie pour le matériau. En effet, une sphère est la forme qui a le plus grand volume pour la plus petite surface. De ce fait, la tendance du matériau dispersé dans la matrice est de se regrouper et de former des grands domaines sphériques pour se trouver dans un état de plus faible énergie.

Lorsque l'on ajoute un compatibilisant, la taille des phases diminue. Sur les photographies de faciès de rupture on observe qu'il y a adhésion entre les phases, on remarque que la rupture est cohésive c'est à dire qu'elle traverse les nodules de phase dispersée au lieu de les contourner.

Ce phénomène s'explique par les différents objectifs du compatibilisant :

- éviter la coalescence et diminuer la tension interfaciale entre les deux phases, ce qui entraîne une diminution de la taille des nodules de phase dispersée
- créer de liaisons chimiques ou physiques entre les deux phases, ce qui permet l'augmentation de l'adhésion entre les phases donc de la cohésion du mélange.

Les différentes méthodes de compatibilisation

Pour parvenir à une bonne compatibilisation, il faudrait être en mesure d'améliorer l'adhésion entre les phases ainsi que diminuer la taille des nodules. Deux méthodes sont envisageables:

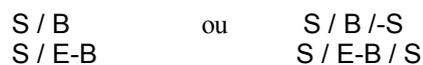
1. compatibilisation par création de liaisons physiques
2. compatibilisation par création de liaisons chimiques

Ces méthodes peuvent faire appel à la synthèse préalable de compatibilisants ou à des modifications de polymères au cours du mélange.

Chimie de l'agent compatibilisant

On distingue deux grandes voies:

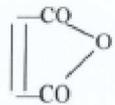
- **Synthèse préalable du compatibilisant.** C'est le cas des copolymères à blocs, greffés, statistiques.



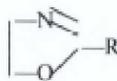
- **Synthèse in situ lors de la mise en œuvre,**

→ on peut utiliser des monomères fonctionnels

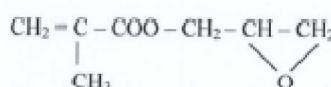
- **anhydride maléique**



- **oxazoline**



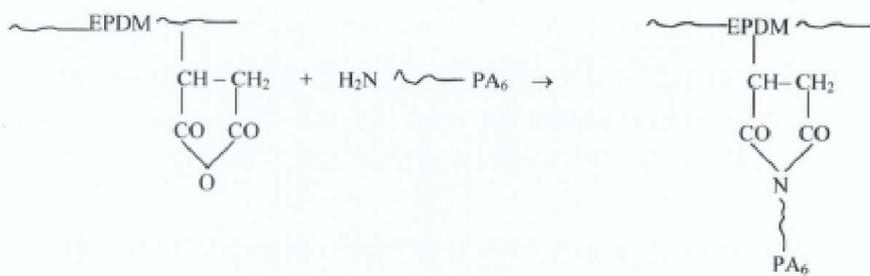
- **methacrylate de glycidyle**



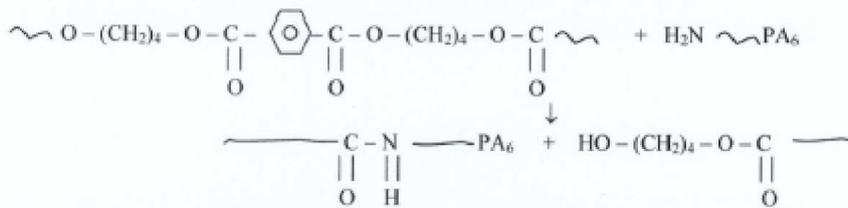
- **acide**

qui vont servir à greffer un polymère donné

Exemple :



-> on peut aussi faire des réactions d'échange sur les chaînes polymères



Compatibilisation par création de liaisons chimiques

Le principe consiste en l'introduction dans le mélange d'un troisième composant polymère qui va venir se placer à l'interface des deux phases en créant des liaisons chimiques entre les polymères immiscibles.

Une partie de ce polymère sera attirée par une des deux phases avec laquelle il va s'enchevêtrer et va créer des liaisons covalentes par réaction chimique avec l'autre phase comme indiqué à la Figure 2-4:

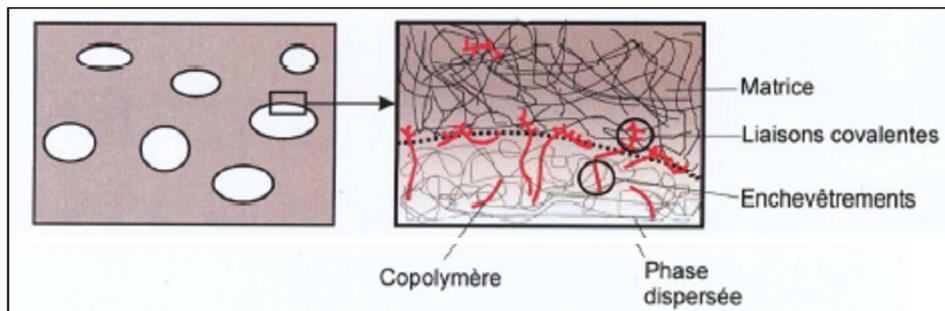


Figure 2-4: Compatibilisation par création de liaisons chimiques à l'interface

Ce mode de compatibilisation est souvent rencontré lorsque l'un des deux constituants du mélange comporte des groupements réactifs susceptibles de réagir avec l'anhydride maléique. Les compatibilisants fonctionnalisés par l'anhydride maléique sont eux aussi assez nombreux. De plus, il est souvent possible de les fabriquer en greffant des fonctions anhydride sur un polymère non fonctionnalisé comme l'ABS, par exemple, dans l'optique d'une compatibilisation du mélange ABS/PA. On greffe également l'anhydride maléique sur le PE, PP, les élastomères et le SEBS.

Mais on trouve aussi, déjà formulés,

- des PP-g-MA
- SEBS-g-MA
- SMA (copolymère de polystyrène et d'anhydride maléique).

La présence du copolymère à l'interface entre les deux phases est encore favorable du point de vue de l'adhésion, de la dispersion et de la stabilisation des phases. Une fois la réaction achevée, on se

Etude RECORD n° 08-0910/1A 30

retrouve dans une situation similaire à la précédente car on a un copolymère à 1 interface constitué d'un bloc de A et d'un bloc de B. Cependant, si le compatibilisant est mi cible avec le A, cette technique nous assure quasiment de trouver le compatibilisant à l'interface A/B car il aura réagi avec les fonctions de B. De plus, il a été noté que créer le compatibilisant in situ améliore souvent la qualité de la compatibilisation.

Compatibilisation par création de liaisons physiques

Cette technique consiste à générer in situ ou à introduire dans un mélange de polymères immiscibles un troisième composant, par exemple un copolymère à bloc ou polymère greffé constitué des polymères à mélanger ou de chaînes de polymères miscibles avec les polymères à mélanger qui viendrait se placer à l'interface comme représenté à la Figure 2-5:

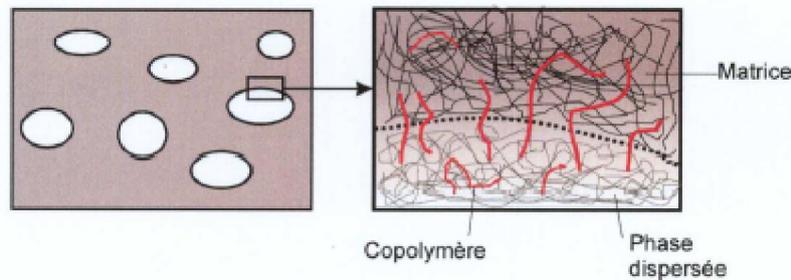


Figure 2-5: Compatibilisation par création de liaisons physiques à l'interface

Dans un mélange ternaire formé des deux homopolymères (A et B) et du copolymère (copolymère block AB ou greffé A-g-B), ce dernier se place à l'interface séparant les deux homopolymères. La tension interfaciale s'en trouve alors sensiblement réduite et l'aire de l'interface augmente dans de proportions appréciables. Le système s'organise en domaines plus restreints, ce qui aboutit à une meilleure dispersion du polymère minoritaire.

La présence du copolymère à l'interface entre les deux phases est également favorable du point de vue de l'adhésion. Les deux portions du copolymère pénètrent respectivement dans leur domaine de prédilection et s'enchevêtrent avec 1 homopolymère de même nature. Il en résulte une meilleure adhésion entre les domaines.

Il semble cependant que l'amélioration générale de qualités du mélange est limitée par les énergies de liaisons relativement faibles mises en jeu et par la difficulté de faire s'enchevêtrer efficacement le copolymère.

2.6.1.2 DEGRADATION DE LA MATIERE LORS DE MISES EN ŒUVRE SUCCESSIVES

: : : Les **matières plastiques** sont constituées de polymères (macromolécules), qui peuvent subir une dégradation lors de la mise en œuvre sous l'effet de la chaleur, du cisaillement, de l'environnement oxydant, etc. Les liaisons covalentes qui forment la chaîne des macromolécules peuvent par exemple se rompre (ex: PP). De nouvelles liaisons peuvent aussi se créer, ce qui conduit le polymère à réticuler (ex: PE). Le type de dégradation (rupture de chaîne, réticulation, élimination) dépend de la nature du polymère, mais aussi des conditions de mise en œuvre (ex: pour le PET, des conditions de séchage ou des conditions de pression partielle en oxygène [15]).

Il faut donc toujours tenir compte d'une certaine dégradation lors de la mise en œuvre. Pour les **thermoplastiques**, des études ont porté sur l'évolution des propriétés en fonction du nombre de cycles de transformation. [1] Les mêmes chaînes moléculaires peuvent subir plusieurs cycles successifs de mise en œuvre comme par exemple lorsque les déchets de production sont recyclés en interne (recyclage primaire). La part des molécules de l'échantillon de départ qui ont subi tous les cycles successifs peut être calculée comme illustré à la **Figure 2-6**. [16] Cette part diminue avec le nombre de cycles et d'autant plus que le taux d'incorporation de matière recyclée est faible. En recyclage primaire, les conséquences de mises en œuvre successives sur les propriétés des matériaux restent donc très limitées, au moins pour des taux d'incorporation égaux ou inférieurs à 20%.

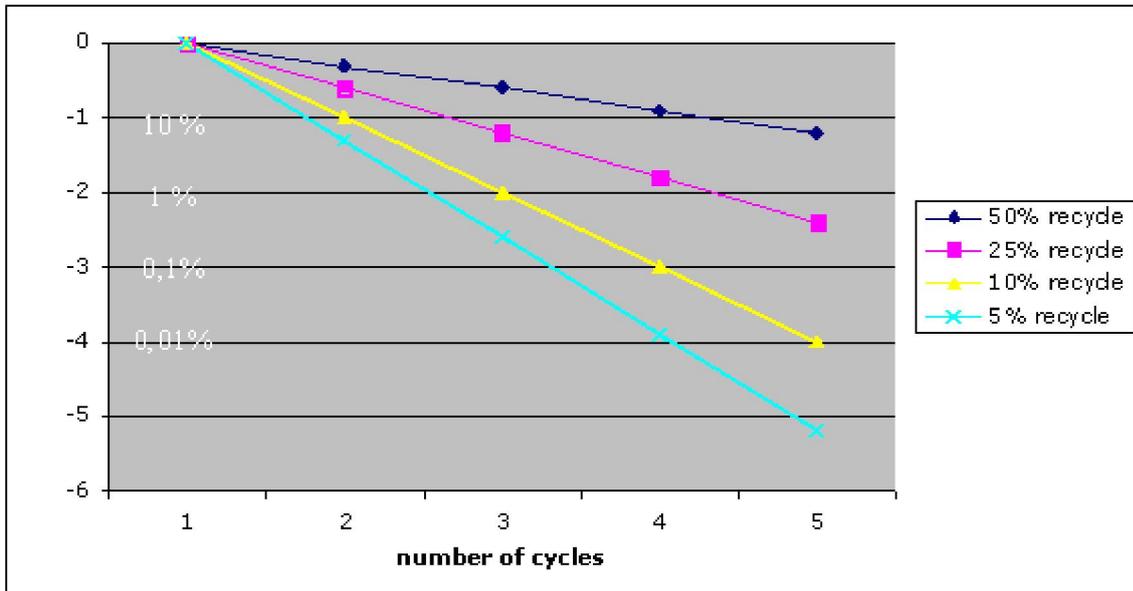


Figure 2-6 : (Echelle logarithmique) Part calculée des molécules de l'échantillon de départ (cycle « 0 ») qui se retrouve dans le matériau à chaque cycle successif en fonction du taux d'incorporation de la matière recyclée (% recycle)

Dans le cas du recyclage primaire, l'effet de cycles multiples de transformation de la matière plastique a été modélisé. [16] Le schéma de recyclage est repris à la figure 2.

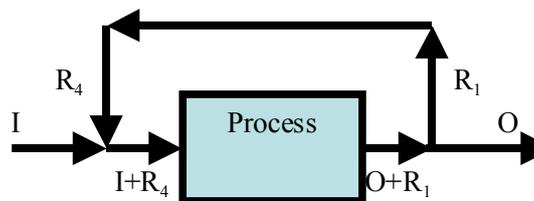


Figure 2 : Schéma de recyclage primaire utilisé pour la modélisation.

Avec les flux définis à la figure 2, on peut définir la part de matière vierge incorporée k :

$$k = \frac{I}{I + R_4}$$

Si on admet l'additivité simple des propriétés dans un mélange on peut écrire, par exemple, qu'une propriété P qui évolue de P_0 à l'état initial à P_1, P_2, \dots, P_n après respectivement 1, 2, ...n cycles, vaudra, après le premier cycle, donc, à l'entrée du second :

$$kP_0 + (1-k)P_1$$

A l'entrée du troisième cycle, elle vaudra :

$$kP_0 + (1 - k)(kP_1 + (1-k)P_2)$$

En généralisant, après n cycles, cette propriété vaudra :

$$k \sum_{j=1}^{n-1} P(1-k)^{j-1} + (1-k)^{n-1} P_n$$

Pour utiliser ce modèle, on voit qu'il est nécessaire de poser une hypothèse sur l'évolution d'une propriété en fonction du nombre de cycles de transformation. L'hypothèse la plus simple est celle d'une diminution linéaire mais elle est peu réaliste. Il est plus réaliste d'envisager une diminution exponentielle (dégradation de la propriété d'ordre un par rapport à cette même propriété)

Néanmoins, selon le type de polymère, différents cas peuvent se présenter (Figure 2-3). Il est donc essentiel de connaître le ou les processus de dégradation d'un polymère impliqué dans une filière de recyclage pour évaluer les conséquences d'un recyclage multiple. De préférence, ces processus devraient être connus dès la conception d'une pièce (DeGroot et al.)

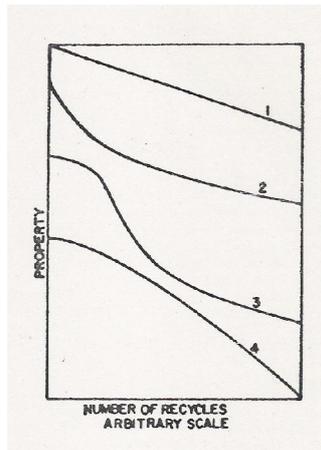


Figure 3 : Evolutions possibles d'une propriété (ex: masse moléculaire) en fonction du nombre de cycles de transformation successifs. 1: évolution linéaire. 2 : Diminution exponentielle (ex: PET). 3 : Diminution exponentielle retardée (cas des polymères stabilisés contre l'oxydation (par exemple, PP). 4 : Cas de dégradation auto-catalytique (ex.: PVC)

L'évolution relative de la propriété P_n après le cycle n par rapport à la propriété de la matière vierge P_0 est calculée pour différents taux d'incorporation de matière vierge k. Elle est représentée à la Figure 2-7 pour une réduction exponentielle de la propriété avec le nombre de cycles (sur la Figure 2-7, cette réduction exponentielle correspond au cas où la totalité de la matière est recyclée, soit $k = 0$). Pour des taux d'incorporation de matière recyclée inférieurs à 20% ($k > 0,8$), les modifications de propriétés sont inférieures à quelques %. Par contre, même si, dans un premier temps, la propriété décroît significativement lorsque la part de matière recyclée augmente, il est intéressant de noter que ce modèle montre qu'une stabilisation de la propriété à une valeur plancher intervient toujours pour les grands nombres de cycles. Cette valeur plancher est remarquablement élevée ($\geq 95\%$) jusqu'à des taux de recyclage de 20%.

Ces prédictions sont cependant limitées à des situations théoriques où les polymères sont à l'état pur, à savoir non-mélangés à des composants d'autres natures (additifs, charges, autre polymère, colle, etc.) ni à des contaminants ou impuretés. Néanmoins, même avec ces restrictions, si on l'extrapole, avec toutes les précautions nécessaires, au cas du recyclage secondaire, c'est à dire lorsque la matière recyclée provient de collectes après utilisation, on peut estimer que, si le taux moyen d'incorporation de matière recyclée ne dépasse pas, ce qui semble réaliste, 5%, la valeur plancher restera tout à fait acceptable, même en cas de recyclage multiple.

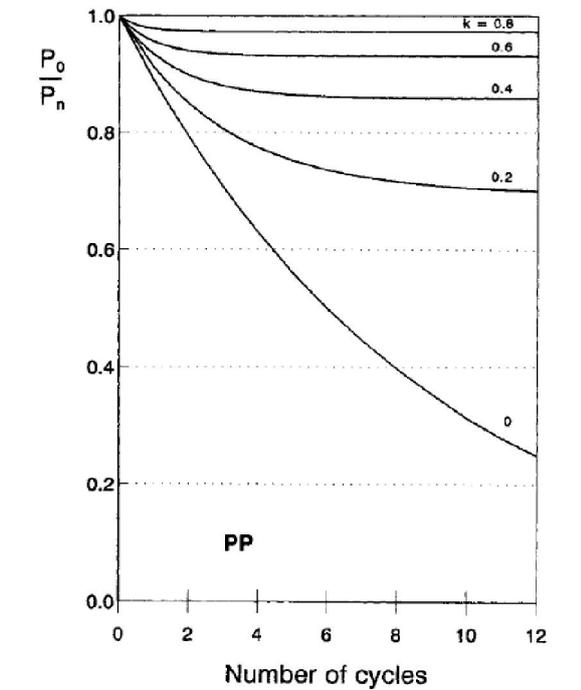


Figure 2-7 : Evolution d'une propriété du matériau contenant de la matière retransformée en fonction du nombre de cycles et du contenu en matière vierge (indice: paramètre k).

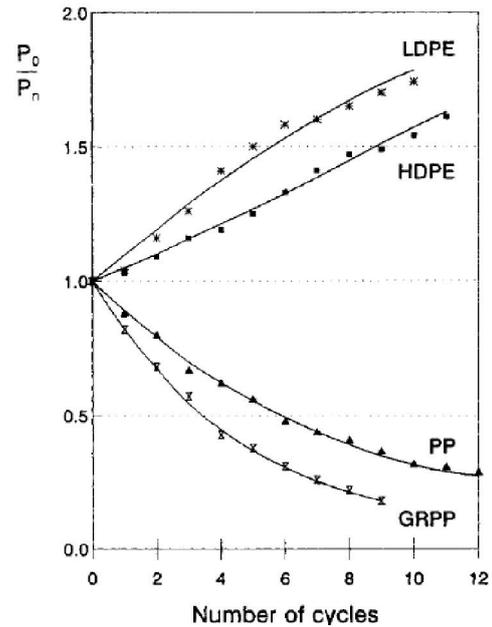


Figure 2-8 : Evolution de la viscosité en fonction du nombre de cycles de transformation ; LDPE = low density PE ; GRPP = glass-reinforced PP)

La dégradation de la matière peut être suivie par une des mesures possibles de la viscosité à l'état fondu : le melt flow index (MFI). Plus le MFI est élevé, plus la viscosité du polymère à l'état fondu est faible. Le MFI varie inversement à la viscosité. La viscosité est, par contre, une fonction directe de la masse moléculaire.

L'évolution possible de la viscosité en fonction du nombre de cycles est représentée à la **Figure 2-8** pour plusieurs polyoléfines. Le polyéthylène (à la fois basse densité et haute densité) voit sa viscosité augmenter avec les cycles multiples en raison de l'apparition d'une structure moléculaire avec branchements (recombinaisons inter-chaînes des radicaux), voire de réticulation. Par contre, la masse moléculaire du polypropylène se réduit, ce qui se traduit par une réduction de sa viscosité au fil des cycles.

Cependant, le cas du PE est intéressant car, si, la dégradation chimique de la macromolécule conduit à une augmentation de la masse moléculaire et à une réticulation, la dégradation mécanique due au cisaillement conduit à une réduction de la longueur de chaîne. Ces deux phénomènes antagonistes justifient l'observation empirique que, pour le PEHD en tout cas, les modifications induites par le recyclage multiple peuvent être négligées jusqu'au 4^{ème} cycle environ, pour une incorporation de 100% de recyclé. [18]

2.6.1.3 POLYETHYLENE TEREPHTHALATE (PET)

2.6.1.3.1 Introduction

Les évolutions relatives au PET sont nombreuses et rapides, laissant un temps limité aux filières pour s'adapter. Parmi les principales évolutions en cours ou à venir, nous pouvons citer :

- Sources : la présence croissante de couches barrière sur bouteilles PET développée pour conquérir de nouveaux marchés dans le domaine des boissons ;
- Sources (collecte et tri) : la perspective de recycler à court ou moyen terme des gisements autres que celui des bouteilles, comme les barquettes et les blisters ;
- Applications : la précision depuis quelques années des réglementations concernant l'utilisation de PET recyclé dans les applications avec contact alimentaire ainsi que

l'accroissement progressif, en proportions, des applications bottle-to-bottle ou en barquette au détriment des fibres.

Ces points sont spécifiquement discutés dans la partie 3.7 consacrée à l'étude de cas sur le recyclage des bouteilles PET avec couches barrière.

2.6.1.3.2 Données de marché

Le Tableau 2-5 et la Figure 2-9 reprennent par type d'application la consommation européenne de PET. L'utilisation du PET dans l'emballage, et en particulier dans les bouteilles, domine le marché. C'est ce gisement uniquement qui est recyclé à l'heure actuelle, au niveau du recyclage post-consommateur. Le taux de collecte sélective moyen des bouteilles en Europe s'élevait à 41% en 2007 et pourrait s'élever à 44% en 2010 (prévisions faites en 2008). En tonnage, cela représente une augmentation, de 1,1 millions de tonnes en 2007 à 1,4 millions de tonnes en 2010.

La collecte du gisement des barquettes et blisters (marché des feuilles pour thermoformage) constitue une perspective à court ou moyen terme, dans certains pays européens.

Le tableau présente aussi le taux d'utilisation de matière recyclée en 2007 par application ainsi qu'un ordre de grandeur de la limite technique maximale d'incorporation.

La part de l'application en fibres de rembourrage dans l'utilisation du recyclé diminue au fil du temps au profit des applications en bouteilles et en feuilles. Elle est passée de 95% en 1997 à 47% en 2007. Stable en valeur absolue jusqu'en 2007, la production de fibres en PET recyclé a tendance à diminuer depuis 2008. Plusieurs usines européennes ont fermé en raison de la compétition avec les fibres chinoises et avec les autres applications du recyclé.

Tableau 2-5 : Consommation de PET par application, dont le PET recyclé

Applications	Fibre de rembourrage	Bouteilles à usage alimentaire	Strapping	Feuilles pour thermoformage	Produits moulés (pots, plateaux, automobile, EEE)	Filaments pour tissage
Consommation totale (kt/an)	500	2600	140	180	25	700
% moyen de recyclé incorporé (%)	>70%	5%	>70%	>70%		0%
Part max possible de recyclé	100%	70%, voire 100%	100%	100%		0% (réticence)
Part de l'application dans les débouchés du recyclé (%) 2007	47%	17%	10%	24%	2%	0%

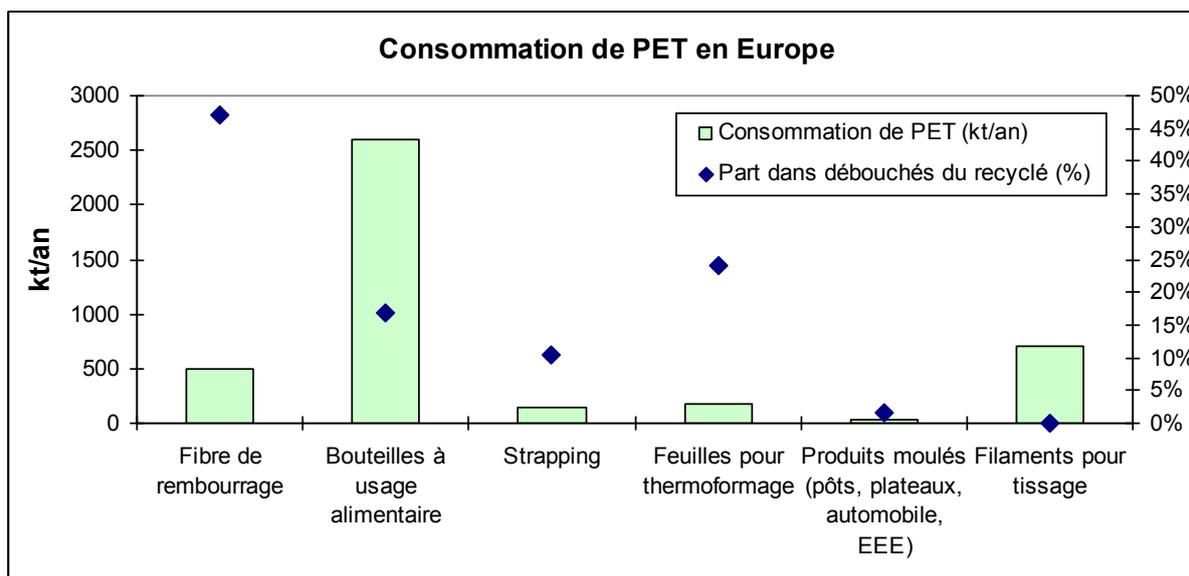


Figure 2-9

Source: [10] en particulier la contribution de AJI Europe ; Petcore, Identiplast 2009

L'analyse du tableau indique que la capacité d'utilisation du PET recyclé dans ses applications historiques du type fibres de rembourrage et strapping est proche de la saturation.

2.6.1.3.3 Limites techniques et sanitaires liées aux sources et applications

Comme discuté plus en détail dans l'étude de cas, les exigences techniques sur le PET recyclé se situent essentiellement au niveau de la couleur et de la viscosité. Cette dernière est adaptée au cours de l'étape de polymérisation à l'état solide (*solid state polymerisation, SSP*) pratiquée après extrusion des granules. Quant à la couleur, elle représente une exigence très importante pour toutes les applications claires. Seules les fibres pour applications non-visibles et les feuilles colorées ne sont pas concernées.

Outre les exigences techniques, la matière recyclée destinée aux usages alimentaires doit respecter la réglementation européenne récente (dont le Règlement (CE) n°282/2008 relatif aux matériaux et aux objets en matière plastique recyclée destinés à entrer en contact avec des denrées alimentaires), ainsi qu'en France, les conditions d'utilisation de matériaux PET recyclés précisées en 2008 par l'AFSSA (Agence Française de Sécurité Sanitaire des Aliments). Celles-ci supposent le respect de conditions très strictes sur l'origine et sur la qualité du gisement de PET ainsi que sur son mode de collecte et son traitement.

2.6.1.3.4 Bilan environnemental du recyclage

Le Tableau 2-6 présente les impacts du fait de recycler le PET plutôt que de l'éliminer. Les résultats sont extraits de résultats obtenus par ACV pour la fin de vie de bouteilles PET en France. Un procédé de régénération en contact alimentaire a été considéré ainsi que l'évitement d'une production primaire de grade bouteille. Des taux de substitution proches de 1 peuvent être considérés pour le PET recyclé en remplacement du PET vierge. Néanmoins, un taux de substitution conservateur de 0,9 a été utilisé dans le tableau.

Tableau 2-6 : Bénéfice environnemental du recyclage de PET

	Consommation d'eau litres	Consommation d'énergie non- renouvelable MJ primaire	Augmentation de l'effet de serre kg éq CO2	Acidification g éq. SO2	Eutrophisation g éq. PO4
<i>Par kg de PET à recycler</i>					
Procédé de régénération (1)	6.8	14.7	0.50	1.41	0.19
Production primaire évitée (2)	-9.7	-70.2	-2.90	-13.33	-0.34
Élimination évitée (3)	2.1	7.1	-0.86	0.19	-2.37
Total	-0.8	-48.4	-3.3	-11.7	-2.5
Gain en % par rapport à la production de vierge	9%	69%	112%	88%	744%

Sources : (1) Pour le procédé de régénération: Procédé Supercycle repris dans 'Bilan environnemental sur les filières du recyclage : état des connaissances ACV', ADEME (2001), comprend aussi le transport vers le recycleur; (2) Ecoprofil du PET grade bouteille de PlasticsEurope (version 2005), taux de substitution par défaut de 1:0.9, pouvant être modifié dans le tableau Excel (ouvrir le Tableau 2-6); (3) Modélisation RDC et procédés de la base de données Ecoinvent.

Pour les cinq catégories d'impact présentées, le recyclage est bénéficiaire (les impacts présentent des valeurs négatives et correspondent donc à des dommages évités). La marge est plus faible pour la consommation d'eau.¹¹ La valeur reprise pour le recyclage correspond à la fois à l'eau consommée sur le site de régénération et à l'eau consommée pour la production d'électricité (qui dépend du mix électrique). La consommation sur site avec les technologies actuelles se situe typiquement vers 3,5 litres par kg de PET recyclé.

Le recyclage ne pose pas de problèmes environnementaux ou sanitaires ni pour les catégories présentées dans le tableau ni par rapport à d'autres, comme la santé humaine ou la protection des écosystèmes.

La question de l'intérêt environnemental de recycler les bouteilles plutôt en bouteilles ou plutôt en fibres se pose. Les deux filières se différencient notamment

- par la vente de PET régénéré sous forme de paillette dans le cas des fibres. Ceci évite une extrusion chez le régénérateur. Le PET régénéré pour bouteilles est par contre vendu sous forme de granules, ayant subi une post-condensation (SSP) ;
- par l'évitement d'un PET de grade amorphe dans le cas des fibres et par une production évitée de PET grade bouteille pour les applications en bottle-to-bottle.

Dans les deux cas, une opération de séchage des paillettes ou des granules est de toute façon nécessaire chez le transformateur.

Sur base des informations dont RDC Environnement dispose à ce jour, la filière avec applications en bouteilles serait légèrement moins bénéficiaire que l'application fibres mais dans tous les cas de figure, les différences relatives sont faibles.

2.6.1.4 POLYETHYLENE HAUTE DENSITE (PEHD)

2.6.1.4.1 Introduction

Le polyéthylène est un polymère de commodité vendu en grands tonnages. Son unité monomère est chimiquement très simple (-CH₂-CH₂-) mais les macromolécules peuvent présenter des architectures moléculaires et des distributions de masses moléculaires très différentes. Ces différents grades possèdent des propriétés différentes, notamment mécaniques et rhéologiques et ne sont pas nécessairement miscibles entre eux.

¹¹ Des développements méthodologiques sont en cours au sein de la communauté ACV afin de préciser le type et l'usage de l'eau qu'il faut intégrer à cette catégorie. Les données actuellement disponibles dans les bases de données ne permettent pas encore une analyse poussée de ces impacts.

Le PEHD est constitué de longues macromolécules présentant peu de ramifications. Le taux de cristallinité est élevé et le matériau opaque. Le PEHD est utilisé sous forme de bouteilles, flacons, tuyaux, sacs et sous formes multiples de récipients et autres pièces injectées. Les secteurs utilisateurs sont très divers et incluent, à titre d'exemples, l'emballage, la construction et l'agriculture.

Comme discuté dans l'étude de cas n°1, le recyclage du PEHD à partir d'un flux multi-matériaux pose des problèmes de séparation du PEHD des autres polyoléfinés (dont le PEBD ou le polypropylène). Les points discutés dans ce chapitre sont les données de marché et les bénéfices environnementaux du recyclage du PEHD, tandis que la discussion des limites techniques liées aux différentes applications est présentée dans la partie 3.

2.6.1.4.2 Données de marché

Le Tableau 2-7 (en deux parties) et la Figure 2-10 présentent les gisements de PEHD et l'utilisation de matière recyclée.

Tableau 2-7 : Applications et recyclage du PEHD

Applications	Bouteilles pour usages alimentaires	Bouteilles et flacons pour usages non alimentaires	Tuyaux agricoles	Tuyaux pour construction
Consommation totale (kt/an)	300	1000	135	420
Source de PEHD à recycler	Aux USA et en Grande-Bretagne (à partir de bouteilles transparentes)	Caisses, cageots Tuyaux Accessoires ménagers	Fûts et bidons Bouteilles Accessoires ménagers Bouchons	Fûts et bidons Bouteilles Accessoires ménagers Bouchons
Type de boucle	Fermée	Ouverte	Ouverte	Ouverte
Part de recyclé incorporé, si incorporation (%)		25%	25% à 100%	25% à 100%
Part max possible de recyclé	Faible	40 à 50% (multi-couches)	40 à 50% (si multi-couches), sinon 100%	40 à 50% (si multi-couches), sinon 100%
% moyen de recyclé incorporé (%)	0%	1%	19%	29%
Part de l'application dans les débouchés du recyclé (%)	0%	1%	5%	26%

Applications	Poubelles rigides, bidons	Caisses, palettes, pots	Profilés	Accessoires ménagers (bacs de rangement, étagères, corbeilles,...)
Consommation totale (kt/an)	1090	880	225	310
Source de PEHD à recycler	Caisses, cageots Fûts et bidons Accessoires ménagers	Palettes Fûts Bouteilles Accessoires ménagers Bouchons	Fûts et bidons	Fûts et bidons Bouteilles Bouchons
Type de boucle	Ouverte à 95%	Fermée en majorité, sauf pour les pôts	Ouverte	Ouverte
Part de recyclé incorporé (%)	50%	Casiers : 70% Pôts : 5%	25%	25%
Part max possible de recyclé	Techniquement, jusqu'à 50%, voire 100% de recyclé	100%	30%	30%
% moyen de recyclé incorporé (%)	8%	20%	11%	3%
Part de l'application dans les débouchés du recyclé (%)	20%	40%	5%	2%

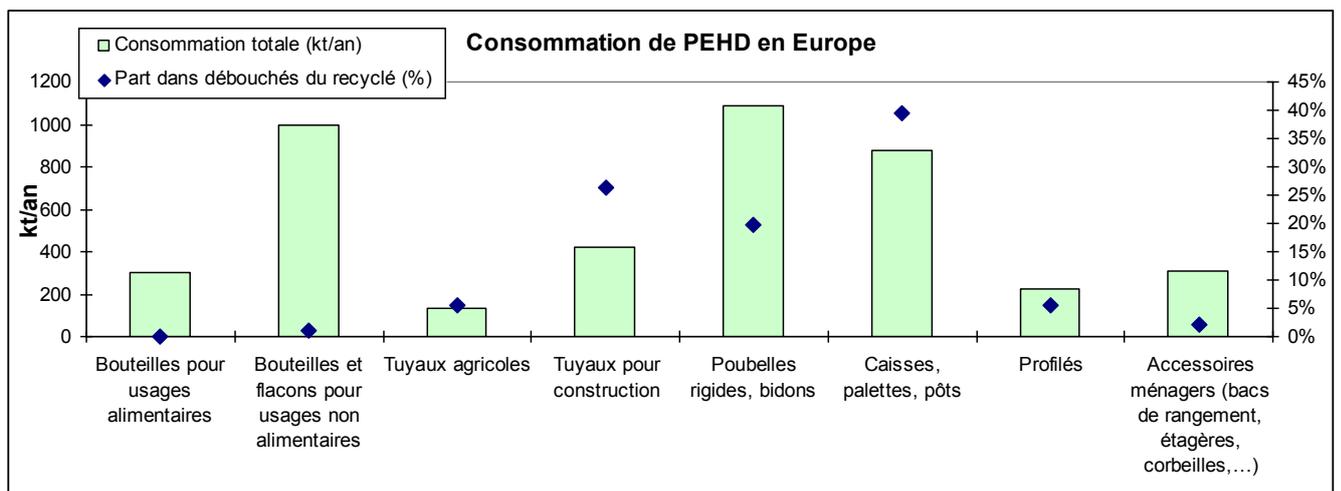


Figure 2-10

Source: [10] en particulier la contribution de AJI Europe

Pour toutes les applications en dehors des bouteilles alimentaires, l'évolution probable de la demande de produits est une forte croissance, que ce soit en vierge ou en recyclé.

Pour les cageots, caisses et palettes, les contraintes réglementaires d'hygiène favorisent le remplacement du bois par le plastique dans les secteurs alimentaire et des médicaments (Hazardous Analysis Critical Contact Point Norm – HACCP).

2.6.1.4.3 Bilan environnemental du recyclage

Tableau 2-8

	Consommation d'eau	Consommation d'énergie non-renouvelable	Augmentation de l'effet de serre	Acidification	Eutrophisation
<i>Par kg de PEHD à recycler</i>	litres	MJ primaire	kg éq CO2	g éq. SO2	g éq. PO4
Procédé de régénération (1)	6.6	8.3	0.13	0.40	0.18
Production primaire évitée (2)	-5.7	-61.5	-1.56	-5.18	-0.14
Elimination évitée (3)	4.9	14.3	-1.14	0.69	-2.66
Total	5.9	-38.8	-2.57	-4.1	-2.6
Gain en % par rapport à la production de vierge	-103%	63%	165%	79%	1885%

Sources : (1) Pour le procédé de régénération: données collectées par RDC auprès de recycleurs européens, mix électrique français ; comprend aussi le transport vers le recycleur; (2) Ecoprofil du PEHD de PlasticsEurope (version 2005), taux de substitution par défaut de 1:0.9, pouvant être modifié dans le tableau Excel; (3) Modélisation RDC et procédés de la base de données Ecoinvent.

Le bilan environnemental du recyclage est largement bénéficiaire pour toutes les catégories d'impacts sauf pour la consommation d'eau. Les résultats pour cette catégorie sont dominés par le mix électrique retenu, qui intervient dans le procédé de recyclage et pour la modélisation de la récupération d'énergie à l'incinération évitée. En effet, la consommation d'eau (hors refroidissement) pour la production d'électricité, notamment par nucléaire, est élevée. Par contre, la consommation d'eau sur le site de régénération est inférieure à 1 litre par kg.

Pour les autres catégories, pour autant qu'on substitue toujours du PEHD vierge, le recyclage reste bénéficiaire même si le taux de substitution diminue jusque par exemple 50%.

2.6.1.5 POLYETHYLENE BASSE DENSITE (PEBD)

2.6.1.5.1 Introduction

Le PEBD est utilisé sous forme de films, sacs et tuyaux pour des secteurs d'activités très différents incluant la distribution, l'agriculture et la construction.

L'épaisseur des films utilisés a tendance à diminuer, notamment pour les films rétractables de palettisation. Les films étirables de très faible épaisseur (parfois 15 microns d'épaisseur) ont en outre gagné des parts de marché. Ces deux aspects ont pour effet une réduction en tonnages du gisement en fin de vie et à rendre le recyclage moins efficace car les contaminations sont proportionnelles à la surface.

2.6.1.5.2 Données de marché

Le Tableau 2-9 et la Figure 2-11 reprennent par type d'application la consommation européenne de PEBD.

Tableau 2-9: Consommation et recyclage de PEBD, par application

Applications	Sacs poubelles	Film agricole, film construction, tuyaux d'arrosage (goutte à goutte)	Tuyaux pour la construction	Sacs épais	Film de palettisation
Consommation totale (kt/an)	650	670	310	255	2000 dont étirable: 1400; rétractable: 650
Type de boucle	Ouverte	Ouverte / fermée	Ouverte	Ouverte	(Fermée)
Source de PEBD à recycler	-Film rétractable -Film agricole -Film étirable -Sacs épais	-Film rétractable -Film agricole -Film étirable -Sacs	-Film rétractable -Film étirable -Sacs	-Film rétractable -Film agricole -Sacs	- Film étirable propre (pour l'étirable recyclé)
% moyen de recyclé incorporé (%)	85%	7%	3%	2%	0.1%
Part max possible de recyclé	100%	Principalement pour les films de paillage. Peu de recyclé dans les films tunnel et de serre	30%	Non précisé	Faible
Qualité (grade) de la résine recyclée utilisée	Faible (sauf critères mécaniques exigés)	Moyenne (film agricole) Elevée (film pour la construction)	Non précisé	Elevée	Elevée
Part de l'application dans les débouchés du recyclé (%)	89%	8%	2%	1%	0.5%

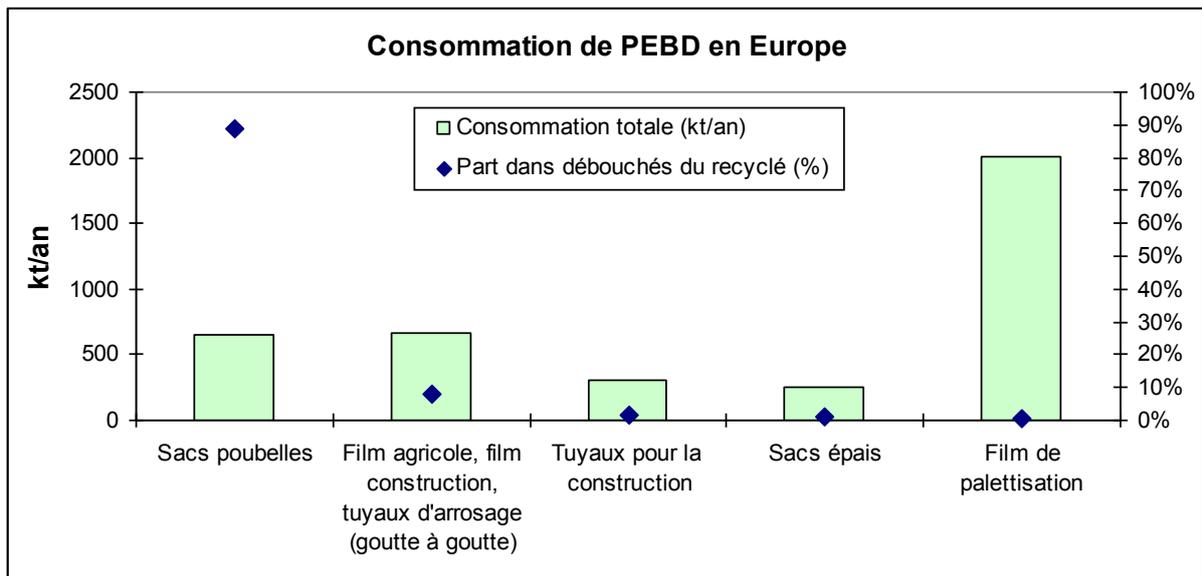


Figure 2-11

Source: [10] en particulier la contribution de AJI Europe

Une application qui pourrait se développer est l'utilisation du PEBD recyclé dans des produits moulés par extrusion / compression / moulage.

Les applications de type sacs poubelles et films agricoles sont saturées en Europe mais sont en croissance dans les pays émergents, tout comme les applications tuyaux et sacs épais.

2.6.1.5.3 Limites techniques et sanitaires liées aux sources et applications

L'origine (et donc le type de matériaux qui adhèrent au film) et la faible épaisseur des films sont des sources de limites au recyclage.

Concernant l'épaisseur des films, environ 60% des films de palettisation collectés sont constitués de films étirables. Ces films sont très fins et fréquemment pollués et sont donc beaucoup plus délicats à recycler que les films thermo-rétractables. En outre, du fait de leur porosité, ils accumulent une proportion élevée d'humidité lors du lavage, provoquant une consommation élevée d'énergie pour le séchage (surface à sécher importante) ainsi qu'une hétérogénéité des points de fusion des granulés. Les déchets < 25 microns d'épaisseur (étirables) posent des problèmes aux recycleurs. Les 40% restant sont constitués de films thermo-rétractables, dont 80% nécessite un lavage avant recyclage.

Concernant le PEBD issu des produits de type emballage, il est stipulé que "*Aucun additif toxique ou matériaux additionnels posant des problèmes de recyclabilité ou de danger en fin de vie n'ont été rapportés*" [19].

De même les films agricoles présentent des épaisseurs et des niveaux de contamination différents en fonction de leur utilisation. [19] La contamination des films agricoles consiste en :

- Terre, cailloux, sable (les stériles)
- Végétation
- Humidité
- Saleté, graisses
- Pesticides
- Résidus de colles, adhésifs, agrafes, étiquettes

La contamination atteint fréquemment 50% en poids mais peut aller jusque 80% du poids.

Par ailleurs, les films agricoles peuvent subir des dégradations suite à l'exposition aux UV, ce qui limite évidemment leur caractère recyclable. [19]

Au niveau des applications, les sacs poubelles utilisent pour une part importante le PEBD régénéré à partir des films agricoles, ce qui est possible en raison d'exigences faibles en matière d'épaisseur et de couleur. Des critères mécaniques doivent néanmoins être remplis en termes de résistances à la

rupture et à l'allongement (qui dépendent beaucoup de la qualité de la mise en œuvre) et de bonnes caractéristiques physiques de percement (pour lesquelles un contenu minimum en PEBD radicalaire – rétractable- est nécessaire).

Pour l'application « film de palettisation rétractable », les produits contenant du PEBD recyclé présentent des caractéristiques mécaniques moins bonnes que ceux fabriqués à partir de résine vierge, en particulier au niveau du maintien statique et dynamique. Pour compenser ces différences, il est nécessaire de prévoir des épaisseurs plus élevées, de l'ordre de 180 microns (contre 125 microns dans le cas de la résine vierge). D'autre part, le film se rétracte beaucoup moins bien et le produit est moins transparent (couleur légèrement laiteuse). Enfin, le produit à base de recyclé est vendu à un prix plus élevé que le produit à base de résine vierge. Pour toutes ces raisons, l'usage de recyclé est très peu développé pour la fabrication de film rétractable. Il existe toutefois des perspectives de développement sur ce segment. Le taux de substitution par rapport à la matière vierge est compris entre 0,6 et 0,8.

2.6.1.5.4 Bilan environnemental du recyclage

Le Tableau 2-10 présente les impacts du fait de recycler le PEBD plutôt que de l'éliminer. Les résultats sont extraits de résultats obtenus par ACV pour la fin de vie de films peu souillés en Europe utilisés pour produire des sacs poubelles. La matière recyclée remplace du PEBD vierge avec un taux de substitution de 0,8.

Tableau 2-10: Bénéfice environnemental du recyclage de PEBD

	Consommation d'eau	Consommation d'énergie non-renouvelable	Augmentation de l'effet de serre	Acidification	Eutrophisation
<i>Par kg de PEBD à recycler</i>	litres	MJ primaire	kg éq CO2	g éq. SO2	g éq. PO4
Procédé de régénération (1)	4.4	8.9	0.5	1.7	0.84
Production primaire évitée (2)	-5.2	-56.4	-1.6	-5.8	-0.16
Élimination évitée (3)	1.1	4.8	-0.5	0.3	-4.3
Total	0.4	-42.7	-1.6	-3.8	-3.58
Gain en % par rapport à la production de vierge	-7%	76%	101%	65%	2240%

Sources : (1) Pour le procédé de régénération: données collectées par RDC auprès de recycleurs européens, mix électrique européen; comprend le transport vers le recycleur (2) Ecoprofil du PEBD de PlasticsEurope (version 2005), taux de substitution par défaut de 1:0.8, pouvant être modifié dans le tableau Excel (ouvrir le Tableau 2-10); (3) Modélisation RDC et procédés de la base de données Ecoinvent, taux d'incinération de 20% et mise en CSDU de 80%.

En dehors de la catégorie de consommation d'eau, les résultats montrent un large bénéfice environnemental associé au recyclage du PEBD par rapport à son élimination. Cette analyse se maintient si on multiplie par deux les impacts du procédé de recyclage pour simuler un flux de films très souillés, à partir duquel on pourrait produire 45% de matière recyclée par kg entrant, plutôt que 90% (rendement modélisé dans le tableau).

La consommation d'eau peut significativement augmenter pour le traitement de films souillés et aller jusque quelques dizaines de litres par kg entrant.

2.6.1.6 POLYCHLORURE DE VINYL (PVC)

2.6.1.6.1 Données de marché

Le Tableau 2-11 et la Figure 2-12 reprennent par type d'application la consommation européenne de PVC.

Tableau 2-11: Consommation et recyclage de PVC, par application

Applications	Tuyaux (agriculture et construction)	Revêtements de sols	Profilés (dont fenêtres)	Autres (panneaux de signalisation, mobilier urbain, membranes imperméables, murs anti-bruit,...)
Consommation totale (kt/an)	1800	420	1615	240
Type de boucle	Fermée	Fermée	Ouverte	Ouverte
Source de PVC à recycler	Tuyaux Revêtements de sols	Revêtements de sols	Fenêtres Revêtements de sols	Cables Fenêtres Revêtements de sols
% moyen de recyclé incorporé (%)	1.1%	0.5%	0.9%	17%
Part max possible de recyclé	30%	Jusqu'à 100% dans les revêtements bas de gamme.	60-70%	30%
Part de l'application dans les débouchés du recyclé (%)	26%	3%	19%	52%

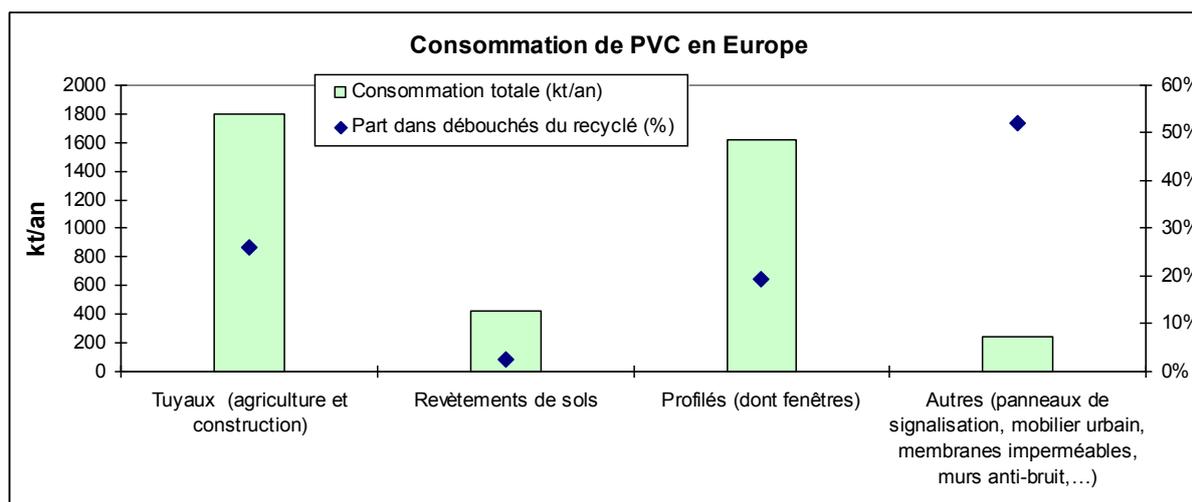


Figure 2-12

Source: [10] en particulier la contribution de AJI Europe

L'activité de recyclage du PVC contenu dans les câbles usagés a fortement diminué depuis 5 ans en Europe, 60 à 70% des câbles usagés collectés en Europe étant exportés vers l'Asie pour y être recyclés. Les pays asiatiques achètent ces déchets à des prix élevés du fait de leur contenu en cuivre et en aluminium. Dans certains cas, la fraction plastique obtenue après broyage des câbles usagés est soit recyclée en mélange (PEHD + PVC + élastomères) soit valorisée énergétiquement, soit exportée vers l'Asie. D'autre part, le PVC contenu dans les câbles est de plus en plus fréquemment substitué par d'autres matériaux, en particulier du polyéthylène réticulé. Enfin, on note la proportion croissante de charges comme le carbonate de calcium, qui peuvent représenter jusqu'à 80% du poids du "PVC" dans certains types de câbles.

En dehors des câbles, le tonnage de déchets PVC collectés en vue du recyclage en Europe est de l'ordre de 100 à 150 tonnes / an (correspondant à environ 100 tonnes de PVC effectivement recyclé).

La collecte de PVC devrait augmenter dans les prochaines années. Le programme de collecte de l'industrie du PVC, *Recovinyl*, vise à recycler 200 000 tonnes de PVC post-consommateur, en dehors du PVC visé par les directives sur les DEEE ou les VHU.

2.6.1.6.2 Limites techniques liées aux sources et applications

Il existe deux types de procédés de recyclage :

- Le procédé Vinyloop, procédé basé sur la dissolution du PVC dans un solvant
- Le recyclage mécanique du PVC

Il existe pour le moment une installation Vinyloop en Europe (Italie) avec une capacité prévue en 2010 de 10 kt. Le recyclage donne des granules de PVC d'une très bonne qualité, qui peuvent remplacer le PVC vierge, à l'exception des films minces. Un fabricant anglais propose des fenêtres en 100% recyclé.

Pour le PVC recyclé par le procédé mécanique, il doit être utilisé en multicouches pour certaines applications (comme les tuyaux) en raison de l'hétérogénéité des flux. La présence de colles et d'adhésifs et la teneur élevée en charges et en additifs limitent la qualité des produits recyclés.

Pour les revêtements de sols, dans le cas du recyclage en boucle fermée, le principal débouché est destiné aux sous-couches fabriquées par calandrage. L'épaisseur du produit final doit toutefois être >3mm pour pouvoir contenir du recyclé.

Pour les profilés, les différences de composition et de teneur en additifs dans les fenêtres usagées collectées ne posent généralement pas trop de problèmes. En théorie, il est possible de fabriquer des fenêtres composées de 100% de recyclé. Toutefois, la qualité de surface médiocre et la couleur grise des produits obtenus limitent considérablement les débouchés et incitent les recycleurs à utiliser le recyclé pour le « cœur » (co-extrusion) avec une teneur maximale de 60 – 70%.

Pour les autres applications (panneaux de signalisation, mobilier urbain, membranes imperméables, murs anti-bruit,...), lorsque le PVC est traité avec d'autres plastiques, la température de traitement est limitée à la plage de traitement du PVC, qui est relativement faible par rapport à celle d'autres plastiques. Pour le recyclage en mélange, il faut donc prendre garde à ne pas dépasser la température de transformation du PVC afin d'éviter les émissions de HCl (corrosion de l'extrudeuse) et la destruction de la structure du polymère. Afin d'éviter que le PVC ne dégrade trop la qualité finale du produit recyclé, il est préférable que la proportion de polyoléfines dans le mélange de plastiques soit au minimum de 70%.

2.6.1.6.3 Limites sanitaires liées aux sources et applications

La présence d'additifs classés comme le plomb, le cadmium et les PCB dans beaucoup de déchets de PVC à longue durée de vie soulève des problèmes spécifiques. En particulier, le recyclage des déchets de PVC contenant des métaux lourds entraîne une dilution de ces substances dans une quantité plus importante de PVC, étant donné qu'il est nécessaire d'ajouter du matériau vierge. Toutefois, la plupart des États membres qui ont interdit l'utilisation du cadmium comme stabilisant permettent le recyclage de déchets de PVC contenant du cadmium.

Les câbles HT et MT (isolation PVC) contenant plus de 50 ppm de PCB doivent être décontaminés ou éliminés conformément aux dispositions de la Directive Européenne.

2.6.1.6.4 Bilan environnemental du recyclage

Le Tableau suivant présente le bilan environnemental du recyclage mécanique du PVC. Le PVC régénéré est utilisé pour des châssis de fenêtres avec un taux de substitution de PVC vierge de 1 :0.8.

Tableau 2-12 : Bénéfice du recyclage mécanique du PVC

	Consommation d'eau	Consommation d'énergie non-renouvelable	Augmentation de l'effet de serre	Acidification	Eutrophisation
Par kg de PVC à recycler	litres	MJ primaire	kg éq CO2	g éq. SO2	g éq. PO4
Procédé de régénération (1)	1.1	2.9	0.16	0.7	0.11
Production primaire évitée (2)	-10.3	-42.6	-2.81	-4.1	-0.25
Elimination évitée (3)	-0.3	-0.3	-0.07	-0.2	-2.86
Total	-9.5	-40.1	-2.72	-3.6	-3.00
Gain en % par rapport à la production de vierge	92%	94%	97%	89%	1206%

Sources : (1) Pour le procédé de régénération : données basées sur des visites de recycleurs européens par RDC, mix électrique français; comprend le transport vers le recycleur (2) Ecoprofil du PVC polymérisé en suspension de PlasticsEurope (version 2005), taux de substitution par défaut de 1:0.8, pouvant être modifié dans le tableau Excel (ouvrir le Tableau 2-12); (3) Modélisation RDC et procédés de la base de données Ecoinvent, taux d'incinération de 20% et mise en CSDU de 80%.

Le bénéfice environnemental calculé pour une application en châssis de fenêtre sur base des données retenues est large pour toutes les catégories d'impact. En première approche, on constate que les impacts du procédé de recyclage sont relativement faibles par rapport à ceux présentés pour le PET, le PEHD et le PEBD. Dans le cas d'une valorisation en mélanges avec d'autres plastiques ou en substitution à d'autres matériaux, les impacts du recyclage ne devraient pas absorber tout le bénéfice de la production évitée de la matière substituée.

2.6.1.7 AUTRES MATIERES PLASTIQUES

Source : [10] en particulier la contribution de AJI Europe

2.6.1.7.1 Polystyrène (PS)

Le gisement de déchets d'emballages thermoformés en PS

« La plupart des déchets de corps creux thermoformés en PS sont aujourd'hui collectés en mélange avec les déchets ménagers. Depuis quelques années, de nombreuses expériences de collecte se sont développées (gobelets, pots de yaourts et autres produits laitiers frais, barquettes de margarine) en particulier en Grande-Bretagne, aux Pays-Bas, en Allemagne et en Suisse. Ces collectes ne représentent toutefois que des quantités limitées.

Le gisement global annuel de déchets s'élève à environ 1100 ktonnes (pots, gobelets, plateaux souples...). Une faible fraction de ce gisement est recyclée : de l'ordre de 70 à 100 ktonnes / an au maximum.

Les débouchés des produits recyclés

Les principaux débouchés du PS recyclé sont constitués :

- de produits moulés par injection pour des objets domestiques tels que des étagères, plateaux, cassettes video ou audio, cintres,... Ce marché présente des débouchés assez porteurs à moyen-terme. Le taux de substitution par rapport à la matière vierge est de l'ordre de 1.
- de produits extrudés en plaques tels que la couche intermédiaire des emballages pour les œufs.

Quelques applications existent également dans l'automobile.

Le PS recyclé est peu utilisé en mélange avec d'autres résines. Pour les usages avec contact alimentaire (recyclage en boucle fermée) le PS recyclé est utilisable en tant que couche intermédiaire dans des produits multicouches co-injectés (gobelets à café contenant 25 à 30% de recyclé).

Toutefois, les expériences réalisées pour fabriquer des pots de yogourts n'ont pas été concluantes car il est nécessaire d'incorporer de l'oxyde de titane pour remédier au problème de couleur, ce qui rend le produit trop lourd. Pour les applications moulées et thermoformées, il n'y a pas d'obstacle technique à l'incorporation de recyclé en mélange avec du vierge jusqu'à une proportion de 30 à 50%.

La principale contrainte pour le recyclage réside dans la propreté du déchet utilisé, qui doit provenir soit d'une collecte sélective en amont soit d'un tri manuel de bonne qualité dans les déchets ménagers. Le tri est rendu difficile par la difficulté de différencier le PS et le PP pour certains objets. Un tri complémentaire est souvent nécessaire par un procédé humide ainsi qu'un lavage, afin d'éliminer les restes de nourriture et les étiquettes.

L'obtention de produits recyclés de bonne qualité lors du moulage par injection est liée au respect des contraintes de viscosité. La solution la plus communément adoptée consiste à utiliser des mélanges vierge / recyclé.

2.6.1.7.2 Copolymère acrylonitrile-butadiène-styrène copolymère (ABS)

Le gisement de déchets

L'ABS représente environ 30% en poids du total des plastiques contenus dans les DEEE. Il est très souvent sous la forme d'alliages. Ainsi, 60% de l'ABS utilisé dans les équipements informatiques est constitué de mélanges, en particulier avec le polycarbonate (PC) et dans une moindre mesure avec le HIPS et le PPO.

Dans le cas des DEEE, on trouve de l'ABS principalement dans les éléments suivants :

- *Matériel informatique : boîtiers d'unités centrales (ABS ou alliages ABS/PC et ABS/HIPS), claviers (coque en ABS ou ABS/PC) et boîtiers d'écrans de micro-ordinateurs (ABS/PC). L'usage des alliages ABS/PC s'est fortement développé au cours des 5 dernières années.*
- *Gros électroménager : toutefois, la part relative de l'ABS a tendance à diminuer dans le GEM au profit du HIPS. Cette tendance se poursuivra dans le futur.*
- *Télécoms : boîtiers de téléphones mobiles (alliages ABS/PC)*
- *Photocopieurs : panneaux d'habillage extérieur et tiroirs.*
- *Imprimantes : habillage extérieur (ABS pur ou alliages ABS/PC). La part relative de l'ABS dans cette catégorie a globalement diminuée depuis 5 ans (substitution par le PS).*
- *Cartouches de toner : alliages ABS/PC. La part de l'ABS a diminué depuis 5 ans au profit du PP.*
- *Petit électroménager : petites pièces en plastique situées à proximité des moteurs électriques, en alliage PA/ABS/PP.*
- *Produits bruns : enveloppes extérieures des téléviseurs à écrans plats (environ 10% du poids de l'appareil). De plus, 60 à 70% des appareils mis sur le marché ont des enveloppes en alliages ABS/PC et 30 à 40% en HIPS ou en PPO/PS. Le développement des alliages ABS/PC est dû à des contraintes techniques, liées en particulier à la température d'utilisation élevée. Pour mémoire, l'enveloppe des téléviseurs à tubes cathodiques est majoritairement en HIPS.*
- *Applications professionnelles : dans les interrupteurs, l'ABS représente 60% des plastiques contenus dans ces équipements.*

Les débouchés de l'ABS recyclé

Les applications des produits à base d'ABS recyclé sont extrêmement diverses : pièces pour les EEE, pièces automobiles non apparentes, cageots (co-injection), pièces pour téléphones, valises, meubles de bureaux, ... Les mélanges vierge / recyclé permettent d'obtenir des produits de meilleure qualité. Toutefois ces débouchés représentent des tonnages faibles, environ 20 à 30 kt/an au niveau européen, pour une consommation de résine vierge de l'ordre de 800 kt/an.

De nombreux obstacles s'opposent à l'utilisation d'ABS recyclé sur une grande échelle :

- *L'ABS est souvent utilisé en alliage, en particulier avec le polycarbonate (PC) et dans une moindre mesure avec le HIPS et le PPOS. En outre, les retardateurs de flamme bromés sont présents en quantités significatives dans les pièces en ABS et en alliages ABS/HIPS ou ABS/PC. Ceci constitue un obstacle important pour le recyclage matière dans la mesure où les pièces en plastique recyclé obtenues à partir d'alliages ABS/PC contenant des retardateurs de flamme*

phosphorés ont des performances médiocres. Par exemple, il n'est pas possible d'utiliser de l'ABS recyclé pour fabriquer des alliages ABS/PC car la présence de RF bromés entraîne une dépolymérisation du PC. Il en résulte une forte dégradation de la qualité des produits recyclés ;

- La présence d'autres contaminants que les retardateurs de flamme dans les déchets d'ABS traités est également un obstacle. Les tests de performance réalisés sur des produits moulés en plastiques recyclés issus de DEEE montrent que la résistance à l'impact des produits recyclés peut être diminuée d'un facteur dix par rapport à celle des produits fabriqués avec des résines vierges, à cause de la présence d'encre d'impression et de colles. L'utilisation de mélanges vierge / recyclé constitue un moyen pour améliorer les performances des produits recyclés. La réalisation de produits multi-couches est également une possibilité pour accroître les performances techniques des produits recyclés (par exemple la combinaison d'un alliage ABS/PS recyclé pour le « cœur » du produit et d'un ABS vierge pour la surface).

- Enfin, malgré des développements en cours techniquement prometteurs, le recyclage en boucle fermée des plastiques issus des DEEE (dans des EEE neufs) devrait rester limité en volume car la fabrication des EEE est très majoritairement réalisée hors d'Europe.

Dans les appareils fabriqués aujourd'hui les retardateurs bromés ont été totalement remplacés par des non halogénés. A moyen-terme, la part des DEEE contenant des retardateurs bromés devrait donc diminuer progressivement. La production d'une matière recyclée ayant des propriétés mécanique proches de celles de l'ABS vierge en réalisant un mélange d'ABS recyclé et de PC recyclé semble être une perspective intéressante, sachant que le PC ne subit pas de dégradation marquée au cours du recyclage, et que le mélange ABS-PC est un matériau que l'on trouve de plus en plus fréquemment dans les DEEE (cf. ci-dessus). »

2.6.2 Papiers - cartons

2.6.2.1 INTRODUCTION

Toute discussion portant sur la production ou le recyclage de papiers et cartons soulèvent la question de la disponibilité de la ressource bois. Ce point est abordé dans la discussion des bénéfices du recyclage des papiers-cartons.

Les fibres cellulosiques non seulement se raccourcissent au cours de cycles de recyclage mais aussi tendent à perdre leur rugosité. C'est ainsi que leur résistance mécanique diminue avec les cycles de recyclage et qu'il est nécessaire de les mélanger avec des fibres vierges. Une fibre de bois peut être recyclée en moyenne entre quatre et sept fois (ou entre deux et cinq fois selon d'autres sources). Au-delà de ce nombre, les propriétés mécaniques sont trop dégradées pour leur trouver des débouchés.

2.6.2.2 DONNEES DE MARCHÉ

Les tableaux (Tableau 2-13 et Tableau 2-14) et la Figure 2-13 présentés ci-dessous proviennent de la publication du CEPI « Key Statistics 2006 European Pulp and Paper Industry ». Ils décrivent les applications des papiers cartons et les couples grades – applications possibles.

Tableau 2-13

Applications	Journaux	Papiers graphiques	Emballages - cartons ondulés	Emballages - cartons plats (type boîte de céréales)	Emballages - autres	Papiers sanitaires	Autres
Consommation totale (kt/an)	10 930	32 124	22 740	6 456	7 013	6 453	3 415
Production totale (kt/an)	11 244	39 073	24 570	8 412	8 074	6 389	4 469
Consommation de PCR	9 485	3 801	22 428	3 389	4 484	3 287	2 042
Taux d'incorporation moyen (%)	84%	10%	91%	40%	56%	51%	46%
Part de l'application dans les débouchés du recyclé (%)	19%	8%	46%	7%	9%	7%	4%

Source : CEPI, Key Statistics 2006 European Pulp and Paper Industry.

Tableau 2-14

Gisements Applications	Mixed grade (boîte de céréales)	Newspapers & magazines (journaux)	High grade (papier d'impression des bureaux)	Corrugated & Kraft
Cartons plats (type boîte de céréales)	18%	3%	16%	2%
Journaux	2%	65%	2%	0%
Cartons ondulés	50%	2%	16%	83%
Papiers graphiques	2%	19%	15%	0%
Papiers sanitaires	3%	7%	39%	0%
Autres	25%	4%	12%	15%
Total	100%	100%	100%	100%

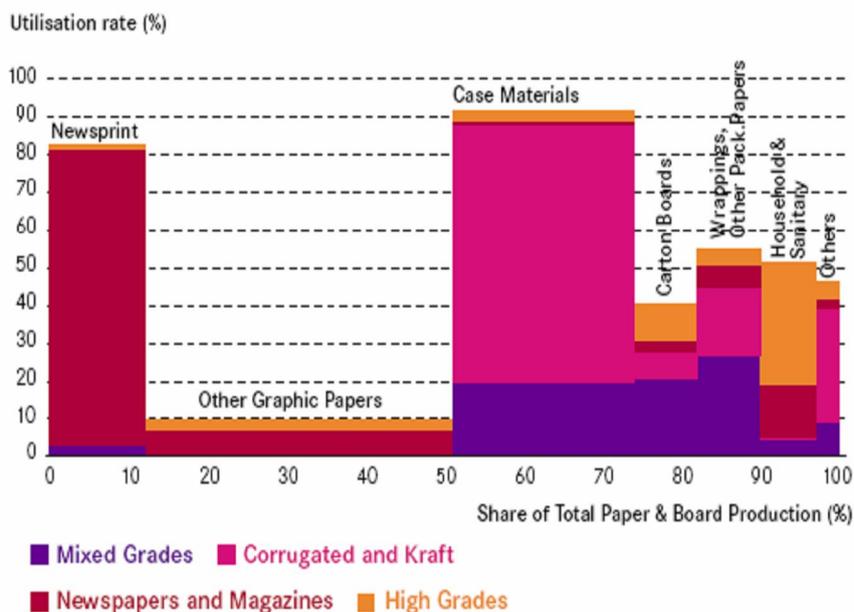


Figure 2-13

L'unité en ordonnée correspond au taux d'utilisation de papiers cartons récupérés (PCR) du secteur, soit : la quantité de PCR utilisée / la quantité de papier produite. Les 4 couleurs correspondent aux différentes qualités de PCR définies selon la nomenclature du CEPI.

Par exemple, le secteur des journaux (« Newsprint ») consomme annuellement 9 485 t de PCR (essentiellement du grade « Newspaper & magazine ») et produit 11 244 t. Le taux d'utilisation de PCR est dans ce cas de 84,4 %.

L'unité en abscisse correspond à la part que représente le produit sur le marché global du papier. Par exemple, le secteur des journaux (« Newsprint ») produit chaque année 11 244 t de papier journal, alors que la production globale de papier est de 102 231 t. La part de marché des journaux est donc de 11 %.

Ces données montrent que les applications en journaux et en caisse carton sont proches de la saturation. La production de papier graphique consomme peu de recyclé mais est limitée dans l'incorporation pour des raisons de qualité exigée. Les autres applications (cartons plats, ménagers et sanitaires, etc.) peuvent absorber les différents types de grades, y compris le « mixed grades » de plus basse qualité mais potentiellement avec des limites d'incorporation.

Il existe donc plusieurs marchés des fibres en fonction des grades et des types de pâtes (chimiques ou mécaniques) que les papiers cartons récupérés (PCR) peuvent substituer. Ces marchés sont très tendus et sensibles aux effets de prix et aux effets conjoncturels.

2.6.2.3 LIMITES TECHNIQUES ET SANITAIRES LIEES AUX SOURCES ET APPLICATIONS

D'un point de vue technique, tous les papiers peuvent être recyclés (les problèmes se font de plus en plus rares).¹² Il n'y a pas de problème de désencrage [7] ni de couleur.

Néanmoins, les papiers-cartons issus de MBT (cf. 2.3.5.1) ne sont, selon la norme EN 643 définissant les grades de papiers cartons récupérés [5] pas utilisables dans l'industrie papetière. Ils pourraient néanmoins être utilisés pour la conception de fibres destinées à des couches intermédiaires (cannelure....).¹³

Un rapport ADEME mentionne une problématique liée à la présence de phtalates dans les cartons importés d'Asie, les papiers destinés au contact alimentaire devant respecter une limite en la matière.[7]

¹² Guy Prevot (Envalys). Communication privée, janvier 2010.

¹³ Laurent Chassin (Séché Eco industries), Communication privée, avril 2010.

2.6.2.4 BILAN ENVIRONNEMENTAL DU RECYCLAGE

2.6.2.4.1 Discussion qualitative de la disponibilité de la ressource bois

L'utilisation de PCR lors de la production de papier est en concurrence avec une utilisation de pâte vierge, et donc avec une utilisation de bois. En d'autres termes, le recyclage du papier permet une diminution des consommations de bois. La question qui se pose est : « L'arbre "libéré" par le recyclage du papier et carton va-t-il être utilisé par un autre utilisateur ou bien rester sur pied ? » ou, en d'autres termes, « y a-t-il une compétition entre les différents usages du bois ? ».

Pour répondre à ces questions, il faut analyser l'état des marchés mondiaux du bois. Dans le présent et dans le court terme, les forêts ne sont pas exploitées à pleine capacité et la production de bois peut même être en augmentation. Par contre, à long terme (et c'est cette perspective qui nous intéresse), les données actuelles ne permettent pas de déterminer l'état futur du marché. Deux situations extrêmes sont dès lors modélisées, la situation réelle sur le marché se situant quelque part entre les deux.

Les deux situations sont illustrées dans le graphique ci-dessous de même que le cas intermédiaire :

- Cas illimité : L'approvisionnement en bois est entièrement élastique ou "non contraint" et correspond à la ligne bleue horizontale "O Illim"
- Cas limité : L'approvisionnement en bois est totalement inélastique ou "contraint" et correspond à la verticale, la ligne verte "O Lim"
- Scénarios intermédiaires correspondant à l'ensemble des lignes diagonales situées entre les deux positions extrêmes (O Int = ligne en pointillés rouge).

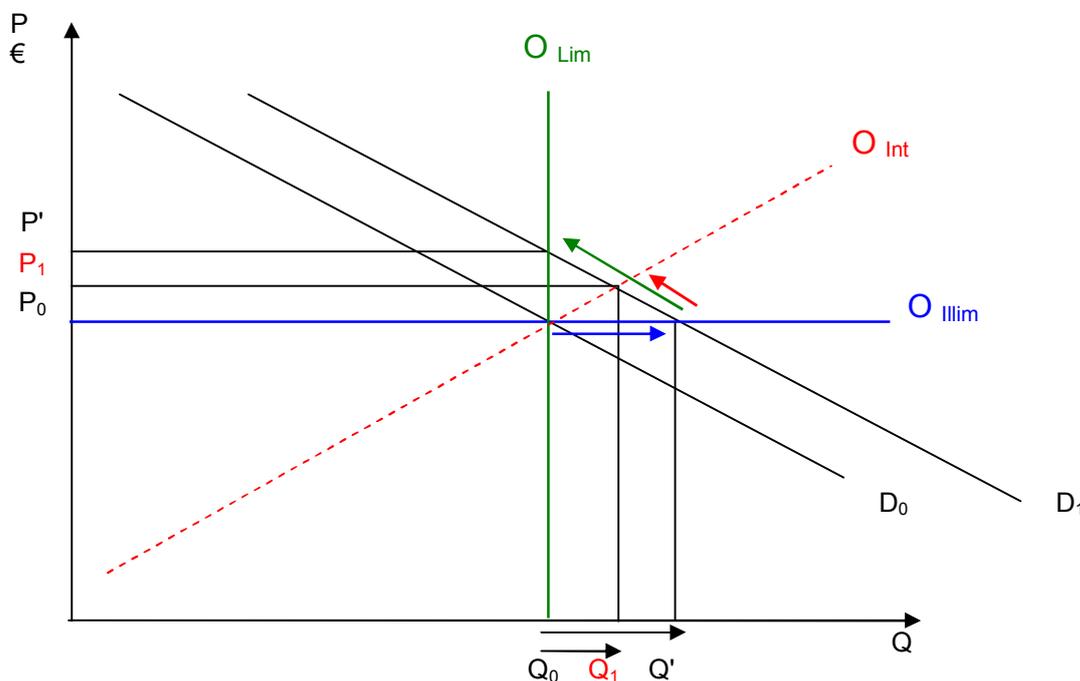


Figure 2-14 : Courbes d'offre et de demande pour le bois

2.6.2.4.2 Conséquences sur la modélisation de la ressource bois

1. Cas illimité : "Bois non contraint" - offre élastique

Ce scénario considère que l'approvisionnement en bois est en mesure de répondre à toute augmentation de la demande de bois, sans augmentation de prix : lorsque la demande augmente de D0 à D1, l'augmentation de l'approvisionnement en bois est égale à l'augmentation de la demande du secteur du carton, c'est-à-dire "Q'-Q0" Il sur la figure (sans augmentation de prix). Par conséquent, la consommation de bois pour le carton n'a pas d'incidence sur les autres secteurs consommateurs de bois.

En conséquence:

- La consommation de bois n'a pas de conséquence directe. Si ce bois n'a pas été utilisé pour la production de carton, il restera dans la forêt (alors que coupé, il permettrait à un autre arbre de grandir et de capturer du carbone)
- En fin de vie du bois, le recyclage permet d'éviter la consommation de bois (et évite ainsi le stockage du carbone)

Ce scénario est celui qui est actuellement surtout utilisé dans les ACV.

2. Cas limité : "Bois contraint" - offre inélastique

La modélisation est fondée sur deux hypothèses:

- L'approvisionnement en bois ne peut pas s'adapter à une augmentation de la demande de bois. Ou en d'autres termes, le taux de consommation est plus élevé que la vitesse de croissance des forêts.

En dépit d'une croissance attendue de la production de bois et de la possibilité de créer des plantations d'arbres à courte rotation, l'offre ne sera pas en mesure de répondre à la demande. La demande sera de plus en plus rapide par rapport à l'offre en raison de:

- Une croissance modérée de la demande de bois pour "usage traditionnel" (construction, meubles, papier, ...), liée à la croissance économique mondiale
 - Une très forte croissance de la demande liée au bois comme source d'énergie en raison de la compétitivité des ressources en bois avec des ressources fossiles et les biocarburants de deuxième génération.
- Le bois de l'industrie de l'énergie agit comme un tampon entre l'offre et la demande de bois.

Par conséquent, le modèle estime que la consommation du bois pour la production de carton prive le secteur de l'énergie-bois de cette quantité de bois. Lorsque la demande augmente de D_0 à D_1 , la diminution de la consommation pour le secteur de l'énergie est égale à l'augmentation de la demande du secteur du carton, c'est-à-dire " $Q'-Q_0$ " sur la Figure ci dessus alors que le montant total de l'offre demeure Q_0 (et les prix augmentent de P_0 à P'). En conséquence, le secteur de l'énergie devra recourir à la substitution, c'est-à-dire les combustibles fossiles, pour produire de l'énergie.

De même, une consommation de bois évitée grâce au recyclage permet de consommer ce bois pour la production d'énergie et, par conséquent, conduit à économiser les ressources fossiles.

2.6.2.4.3 Evaluation quantitative des bénéfices du recyclage

Le Tableau 2-15 et la Tableau 2-16 présentent les impacts respectivement du recyclage du carton ondulé et du papier de bureau. Les résultats sont présentés pour les deux cas extrêmes possibles de modélisation de la disponibilité de la ressource bois, soit illimitée, soit limitée.

Tableau 2-15: Bilan environnemental du recyclage de carton ondulé

	Consommation d'eau	Consommation d'énergie non-renouvelable	Augmentation de l'effet de serre	Acidification	Eutrophisation
<i>Par kg de carton ondulé à recycler</i>	litres	MJ primaire	kg éq CO ₂	g éq. SO ₂	g éq. PO ₄
Production de carton ondulé incluant du recyclé - sans transport vers recycleur (cas bois illimité)	-46.6	1.3	1.21	-2.4	-0.61
Production de carton ondulé incluant du recyclé - sans transport vers recycleur (cas bois limité)	-47.7	-29.8	-1.17	-9.5	-0.59
Elimination évitée	1.5	5.5	-0.97	0.9	-1.28
Total (cas bois illimité)	-45.2	6.8	0.24	-1.5	-1.89
Total (cas bois limité)	-46.2	-24.3	-2.14	-8.6	-1.87

Tableau 2-16: Bilan environnemental du recyclage de papier

	Consommation d'eau	Consommation d'énergie non-renouvelable	Augmentation de l'effet de serre	Acidification	Eutrophisation
<i>Par kg de papier à recycler</i>	litres	MJ primaire	kg éq CO ₂	g éq. SO ₂	g éq. PO ₄
Production de papier recyclé AVEC désencrage (sans transport vers recycleur)	26.4	20.3	0.99	4.6	0.67
Elimination évitée	1.5	5.5	-1.50	1.0	-1.40
Production primaire évitée (cas bois illimité)	-52.3	-15.3	0.96	-5.0	-1.12
Production primaire évitée (cas bois limité)	-53.3	-43.8	-1.22	-11.3	-1.09
Total (cas bois illimité)	-24.4	10.5	0.45	0.6	-1.8
Total (cas bois limité)	-25.5	-18.0	-1.73	-5.8	-1.81

Sources: Calculs ACV réalisés sur base d'inventaires de la base de données Ecoinvent et de modélisations de RDC

Les impacts du désencrage des papiers de bureaux représentent une consommation d'énergie importante qui justifie en grande partie les différences de résultats entre le carton ondulé et le papier de bureau. Des résultats similaires sont rapportés dans la littérature [22]: « Due to the higher energy requirement of recovered fibre processing (de-inking, etc), the emissions savings of paper production from recovered fibre over virgin are lower than for cardboard wherever it takes place. »

Les conclusions relatives au signe du bilan par catégorie sont semblables pour les deux types de matériaux. Dans le cas où la ressource bois est limitée, un recyclage pratiqué plutôt que l'élimination apporte un bénéfice environnemental pour toutes les catégories considérées. Par contre, pour une modélisation de bois illimité, le recyclage est défavorable pour les catégories de consommation d'énergie non-renouvelable, effet de serre et acidification. Pour la comparaison avec d'autres études de la littérature concernant la catégorie gaz à effet de serre, il faut bien noter que les résultats présentés ici prennent en compte la capture et les émissions de carbone biogénique. Sans les prendre en compte, on obtient un bilan légèrement favorable pour le carton ondulé (-0.1 kg éq CO₂ / kg) et légèrement défavorable pour le papier (0.1 kg éq CO₂ / kg). Ces résultats sont proches de ceux présentés pour le cas du recyclage au Royaume-Uni de carton et de papier caractérisés par des bilans de l'ordre de respectivement -0.2 et 0 kg éq CO₂ / kg. [22]

2.6.2.4.4 Modélisation alternative

Une analyse applicable en France, voire par extension à d'autres pays européens, est en outre présentée ici.¹⁴ La discussion n'aborde pas les interconnexions avec les marchés mondiaux. L'analyse est basée sur les constats suivants :

- Les forêts françaises devraient être davantage exploitées en vue de l'amélioration des peuplements.
- Le prix pour l'application bois-énergie ne constitue pas un incitant suffisant pour justifier à lui seul une coupe de bois
- Les producteurs de papier favorisent l'approvisionnement en PCR plutôt qu'en bois de coupe pour des raisons de coûts, ceux-ci étant plus faibles pour les PCR car ils sont en partie supportés par la collectivité
- Couper du bois pour le marché de la trituration s'accompagne d'une production de bois énergie (les parties de l'arbre qui ne servent pas à la trituration)

L'idée qui ressort de l'analyse est qu'il vaudrait mieux en termes de bilan environnemental brûler les PCR (vu les besoins en biomasse énergie) et pousser les producteurs de papiers à s'approvisionner en bois sur pied. En corollaire, du bois-énergie pourrait en plus être disponible.

2.6.3 Verre

2.6.3.1 INTRODUCTION

Il existe deux principales familles d'applications pour le verre : le verre d'emballage (corps creux) et le verre plat. Les durées de vie des produits sont dans la plupart des cas longues pour les verres plats (au moins plusieurs années) tandis que les emballages ont des durées de vie inférieures, de quelques semaines à un ou deux ans (et plus pour les bouteilles re-remplissables).

Une particularité du verre est d'être produit dans les mêmes fours verriers, qu'il soit ou non constitué de matière recyclée.

2.6.3.2 DONNEES DE MARCHÉ

Le Tableau 2-17 et la Figure 2-15 donnent les productions annuelles en Europe des grandes familles d'applications du verre et des estimations du recyclage.

¹⁴ Cette analyse fait suite à une discussion avec Guy Prevot de la société Envalys.

Tableau 2-17 : Applications et recyclage du verre

Applications	Emballages	Verre plat	Verre de table et cristal	Fibres de verre	Autres
Production européenne totale 2005 EU-25 (10 ⁶ t/an)	21.7	10.0	1.5	0.7	2.6
% moyen de recyclé incorporé (%)	50%	Faible	0%	0%	
Part max possible de recyclé	Faible (verre blanc) Elevé (verre coloré)	Faible	0%	0%	
Taux moyen de recyclage	65%	Faible	0%	Très faible	

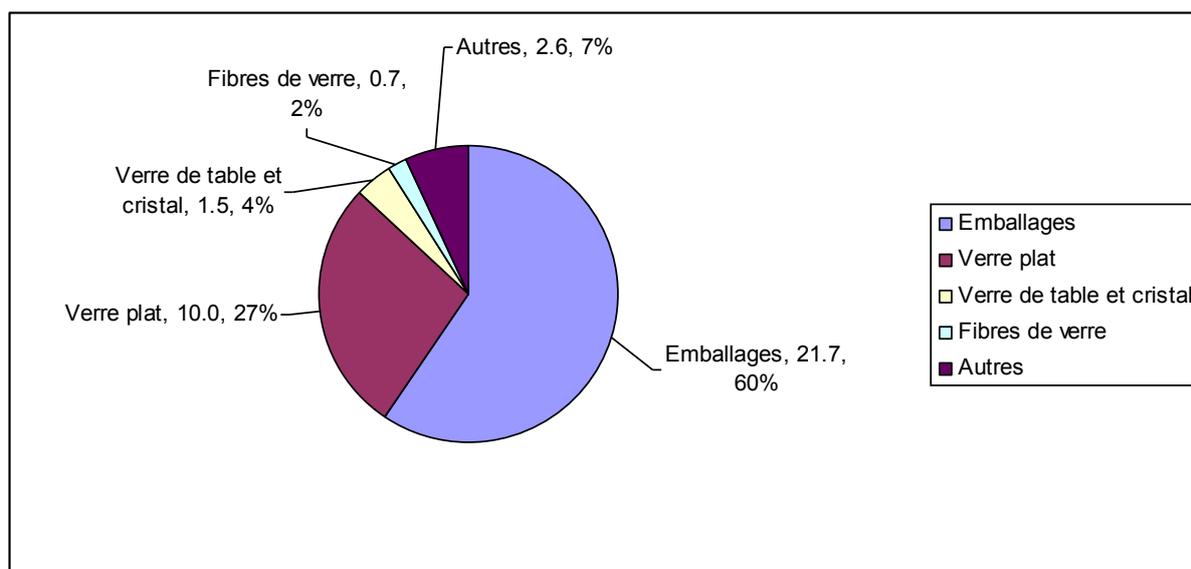


Figure 2-15

Sources : Sites internet et contacts avec les Fédérations européennes des producteurs de verre d'emballages (FEVE) et de verre plat (Glass for Europe) ;
<http://www.feve.org/PDF2008/FEVEGreenWeek.pdf> et
<http://www.glassforeurope.com/en/industry/facts-and-figures.php>

A l'heure actuelle, le calcin provient quasi exclusivement du verre d'emballages pour lequel un taux de collecte sélective de 65% a été atteint en moyenne en Europe en 2008.

Tableau 2-18 : Applications et recyclage du verre plat

Applications du verre plat	Bâtiments	Transports	Photovoltaïque	Appareils	Design
	Façades et fenêtres	Automobiles et autres		Fours, vitro-céramiques	Tables, chaises; décoration
Part dans le verre plat (%)	75%	max 20%	3-4%	1-2%	
Recyclage	Des filières se développent mais pas d'objectifs européens chiffrés	Pour les VHU, en 2015 obligation de recyclage ou réutilisation de 85% en poids des matériaux et obligation de valorisation matière de 95% des matériaux			
Incorporation actuelle de calcin	Non sauf pour certaines applications	Quasi aucune	Non	Non	
Incorporation future de calcin	Des filières se mettent en place: les recycleurs trouvent un intérêt à répondre aux exigences de qualité du calcin imposées par les applications du verre plat				

Source : Site internet (<http://www.glassforeurope.com/en/industry/facts-and-figures.php>) et contact téléphonique avec la Fédération Glass for Europe

Selon Glass for Europe, l'utilisation de calcin interne se pratique évidemment depuis longtemps. Au niveau de calcin post-consommateur, un usage grandissant en est fait. Le calcin doit néanmoins être très bien traité. A titre indicatif, le niveau d'exigence sur la qualité du calcin est comparable à celui pour les flacons de luxe, donc bien supérieur au bocal blanc.

2.6.3.3 LIMITES TECHNIQUES ET SANITAIRES LIEES AUX SOURCES ET APPLICATIONS

La contamination du calcin par la vitrocéramique issue des équipements culinaires, vitres pare-feu, etc. et par la présence de céramique et de verre non-fusible pose des problèmes dans le four.

Un frein essentiellement lié aux coûts limite la collecte du verre plat des bâtiments et des VHU.

Dans le cas du verre plat des VHU, il est en outre difficile d'isoler les peintures émaillées des pare-brise et les réseaux chauffants des lunettes arrière ainsi que la feuille interne de PVB.

Aucune limite sanitaire au recyclage n'a été identifiée.

2.6.3.4 BILAN ENVIRONNEMENTAL DU RECYCLAGE

L'incorporation de calcin dans le four verrier

- réduit de 2,5 à 3 % la consommation de chaleur par tranche de 10% de calcin ;
- réduit les émissions de CO₂ liées à la décarbonatation des matières premières vierges
- évite l'approvisionnement en matières premières vierges

Tableau 2-19 : Bilan environnemental du recyclage du verre

	Consommation d'eau	Consommation d'énergie non-renouvelable	Augmentation de l'effet de serre	Acidification	Eutrophisation
Par kg de verre à recycler	litres	MJ primaire	kg éq CO2	g éq. SO2	g éq. PO4
Réduction des impacts de la production de verre à partir de 100% de calcin (extrapolation) ¹⁵	-17.9	-4.8	-0.70	-2.5	-0.16
Elimination évitée	-0.8	-0.4	-0.02	-0.2	-0.02
Total	-18.7	-5.2	-0.7	-2.7	-0.2
Pour comparaison: production de verre 100% vierge	18.8	10.79	0.91	3.3	0.21

Source : Modélisation RDC et base de données ecoinvent

Les bénéfices de l'utilisation de calcin sont larges pour toutes les catégories d'impacts présentées au Tableau 2-19.

2.6.4 Acier

2.6.4.1 INTRODUCTION

Les marchés de l'acier sont très vastes. A titre indicatif, quelques indications de la taille des gisements et les bénéfices environnementaux du recyclage de l'acier sont présentés dans les paragraphes suivants. Une caractéristique importante de ces marchés est la longue durée de vie de la plupart des produits à l'exception des emballages.

Concernant le recyclage de l'acier, l'étude de cas n°3 (cf. partie 5) se concentre sur la problématique de la présence de cuivre dans le flux d'acier à recycler.

2.6.4.2 DONNEES DE MARCHÉ

Les différentes applications de l'acier et leur part relative sont données à la Figure 2-16. Les données de marché et relatives au recyclage sont en outre fournies au Tableau 2-20 en distinguant les marchés de l'acier long et de l'acier plat.

¹⁵ Une grande partie des impacts évités (plus de 90% pour la consommation d'eau) est due à l'approvisionnement évité en soude.

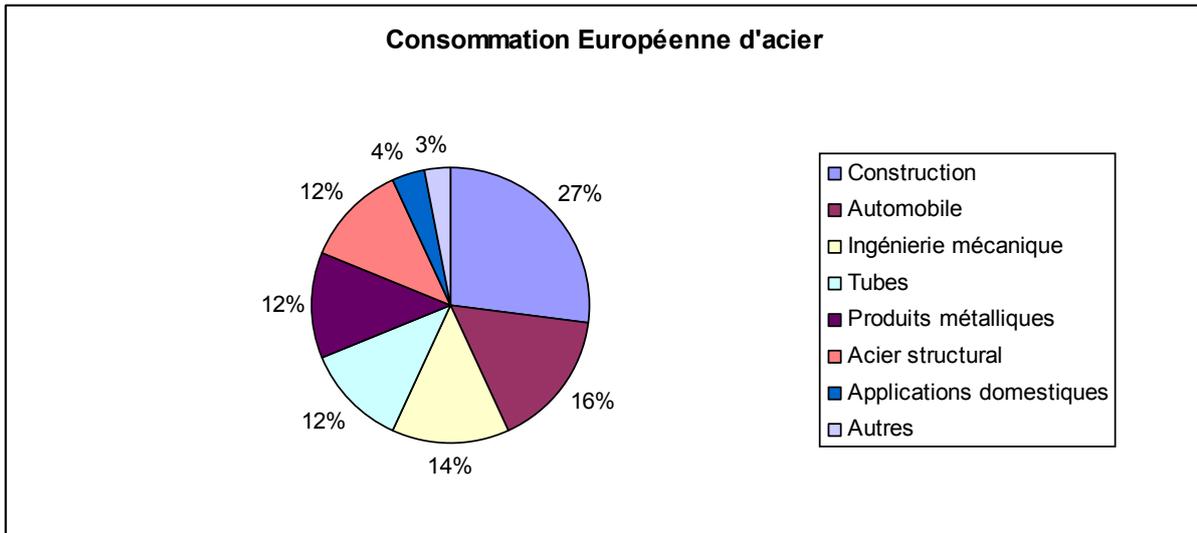


Figure 2-16

Tableau 2-20 : Données de consommation et recyclage

	Acier plat	Acier long
Consommation totale Européenne (10 ⁶ t) Moy 2007-2009 [23]	92.2	63.6
Consommation en %	59%	41%
% moyen de recyclé incorporé	Faible	Elevée
	En moyenne acier recyclé = 40% de la consommation totale [24]	
Part max possible de recyclé [25]	Elevée	100%
Part de l'application dans les débouchés actuels du recyclé (%)	Faible	
Taux moyen de recyclage	65% des emballages (#) 92% tous secteurs confondus	

Source : [23], [24] ;

(#) : <http://www.arcelormittal.com/packaging/contentpage.asp?idSp=17&idSection=58>

Concernant les possibilités d'incorporation d'acier recyclé en fonction des applications, Philippe Russo écrit ceci : [25]

« Toutes les applications de l'acier absorbent des ferrailles. Les quantités et qualités de ferrailles consommées selon les applications sont variables et issues d'une optimisation technico-économique globale. Aujourd'hui, en Europe de l'ouest, les ferrailles sont plus utilisées pour faire des produits longs, mais il existe aussi des usines à produits plats basées sur la filière électrique et qui consomment donc majoritairement des ferrailles. Les autres usines à produits plats en consomment également, mais de façon minoritaire.

Si les quantités de ferrailles augmentent, les usines absorbant ces ferrailles ne seront pas saturées, car on augmentera la part des ferrailles dans les usines où elles ne sont pas aujourd'hui majoritaires. »

L'analyse de ces données suggère que le taux de récupération de ferrailles ne peut pas augmenter beaucoup puis qu'il est déjà autour de 92%. Par contre, la quantité absolue de ferrailles peut augmenter si le gisement d'acier en fin de vie augmente. Un accroissement du gisement se traduirait par une augmentation des capacités de production dans les fours à arc électrique et plus d'incorporation dans les applications plates.

2.6.4.3 BILAN ENVIRONNEMENTAL DU RECYCLAGE

Tableau 2-21 : Bilan environnemental du recyclage de l'acier

	Consommation d'eau	Consommation d'énergie non-renouvelable	Augmentation de l'effet de serre	Acidification	Eutrophisation
<i>Par kg d'acier à recycler</i>	litres	MJ primaire	kg éq CO2	g éq. SO2	g éq. PO4
Production secondaire (+ transport vers recycleur)	2.8	9.4	0.4	2.2	0.22
Production primaire évitée	-14.3	-22.3	-2.9	-6.6	-0.25
Élimination évitée	2.6	3.5	0.7	1.1	-0.02
Total	-8.9	-9.4	-1.7	-3.3	-0.06
Gain en % par rapport à la production de vierge	62%	42%	60%	50%	23%

Source : Modélisation RDC et base de données ecoinvent et IISI

Le recyclage de l'acier apporte un bénéfice environnemental pour toutes les catégories présentées. L'étape de broyage des ferrailles peut néanmoins résulter en des émissions résiduelles de métaux de contamination dans l'eau et le sol. A l'étape de refonte, il peut y avoir des émissions résiduelles dans l'air de métaux.

2.6.5 Aluminium

2.6.5.1 INTRODUCTION

L'aluminium secondaire sert de matière première aux deux grandes voies technologiques de fabrication d'alliages à base d'aluminium.

- Remelters : producteurs d'alliage de corroyage (wrought alloys), généralement sous forme de billettes (extrusion billets) et de plaques (rolling ingots). Cette voie consomme principalement du scrap d'alliage de corroyage, propre et trié par catégorie d'alliage (un dosage est nécessaire).
- Affineurs (Refiners) : producteurs d'alliage de fonderie (casting alloys) et aluminium désoxydant, à partir de scrap de compositions diverses.

2.6.5.2 DONNEES DE MARCHÉ

Le Tableau 2-22 et la Figure 2-17 donnent les productions annuelles en Europe des grandes familles d'applications du verre et des estimations du recyclage.

Tableau 2-22

Applications	Emballages	Construction	Transport	Ingénierie	Autres
Consommation totale Européenne (10 ⁶ t)	1.98	3.35	4.46	1.74	0.87
% moyen de recyclé incorporé (%)	50%		Elevé		
Part max possible de recyclé			Elevée		
Taux moyen de recyclage (%)	Canette: 52% en 2005	90 à 95%	90 à 95%		

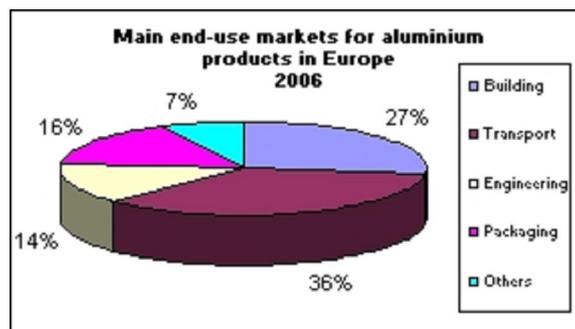


Figure 2-17

Source : Site internet EAA (European Aluminium Association) : <http://www.eaa.net/en/statistics>

2.6.5.3 LIMITES TECHNIQUES ET SANITAIRES LIEES AUX SOURCES ET APPLICATIONS

Les problèmes de recyclage identifiés concernent l'aluminium utilisé en multicouches avec des plastiques (et du carton, dans le cas des briques alimentaires).

2.6.5.4 BILAN ENVIRONNEMENTAL DU RECYCLAGE

Tableau 2-23 : Bilan environnemental du recyclage de l'aluminium

	Consommation d'eau	Consommation d'énergie non-renouvelable	Augmentation de l'effet de serre	Acidification	Eutrophisation
Par kg d'aluminium à recycler	litres	MJ primaire	kg éq CO2	g éq. SO2	g éq. PO4
Production secondaire (+ transport vers recycleur)	16.1	20.8	1.2	5.8	0.25
Production primaire évitée	-50.3	-197.5	-14.0	-62.2	-3.6
Elimination évitée	9.0	51.1	3.7	16.2	0.97
Total	-25.2	-125.5	-9.1	-40.2	-2.40
Gain en % par rapport à la production de vierge	50%	64%	65%	65%	66%

Source : modélisation RDC et base de données ecoinvent

Le recyclage de l'aluminium apporte un bénéfice environnemental pour toutes les catégories présentées. Le procédé produit beaucoup de dioxines (intervenant dans la catégorie toxicité humaine) mais les installations sont soumises à des normes strictes d'épuration de fumées. Sur des installations non soumises à ces normes et mal équipées, des émissions de dioxines seraient à prendre en compte (cf. 2.4.3).

2.7 Références

- [1] Bernardo C.A. *The Recycling of Thermoplastics: Prediction of the Properties of Mixtures of Virgin and Reprocessed Polyolefins*. Polymer Engineering And Science 36 (4): 511 (1996)
- [2] COTREP - *Avis Général GENERALITES MULTICOUCHES DANS LE PET / FT 36* (février 2008) ; ECRIN, *Traitement de surface par plasma-ions (PISE)*, Echanges & Coordination Recherche – Industrie - Octobre 2003, n°10.
- [3] Janke et al., *Scrap-based steel production and recycling*, Materiali in tehnologije 34 : 6 (2000)
- [4] Evans R. and Guest G., *The aluminium decoating handbook*
- [5] EN 643 : *Liste européenne des sortes standard de papiers et cartons récupérés*
- [6] DEFRA , *Mechanical Biological Treatment of Municipal Solid Waste*, p33, 2007
- [7] ADEME, *Document de réflexion pour l'élaboration d'une stratégie de développement du recyclage en France*. Juillet 2008
- [8] ADEME, *Caractérisation des plastiques contenus dans les DEEE et état des lieux de la valorisation de ces plastiques*. Juillet 2005
- [9] ADEME, *Etat des lieux de la valorisation des matériaux issus du traitement des véhicules hors d'usage*. Septembre 2008.
- [10] MEEDDAT. *Monétarisation des bénéfices environnementaux liés au recyclage des plastiques et des papiers/cartons*. Publication à venir
- [11] ADEME *Bilan environnemental sur les filières de recyclage : l'état des connaissances ACV*, 2001
- [12] Wone S.S. et Rochat D. *Rapport technique de l'état des lieux de la gestion des e-déchets au Sénégal*. Juillet 2008
- [13] Afssa – Saisine n° 2001-SA-0315. AVIS de l'Agence française de sécurité sanitaire des aliments relatif à l'évaluation des risques sanitaires liés à l'emploi de matériaux en poly(éthylène téréphtalate) recyclé destinés ou mis au contact des denrées alimentaires et des eaux de boisson
- [14] OVAM (Office flamand des déchets, Belgique). *Promouvoir les débouchés des matériaux recyclés (Afzetmarkt voor gerecycleerde materialen bevorderen)*. Mars 2008
- [15] Assadi R. et al. *Irreversible structural changes during PET recycling by extrusion*. Polymer 45 (13): 4403-4412 (2004)
- [16] Devaux J. Cours MAPR 2690 *Valorisation et traitement des résidus solides*, UCL, Belgique, 2000-2010
- [17] De Grood S (Visteon Corporation) *Effects of Re grind/Reprocessed Materials on Thermoplastics*. GPEC 2004 Paper Abstract #6
- [18] Koseva S. et al. *Journal of environmental protection and ecology* 3 (2) 496 (2002)
- [19] Delgado C et al. *Assessment of the Environmental Advantages and Drawbacks of Existing and Emerging Polymers Recovery Processes - Annexes to final report*. JRC Scientific and Technical Reports, 2007
- [20] RECORD, *Etat de l'art concernant la compatibilité des matières plastique* (ETUDE N° 00-0904/1A). Septembre 2001
- [21] CEPI, *Key Statistics 2006 European Pulp and Paper Industry*.
- [22] Gentil E. et al. (Technical University of Denmark). *Carbon Footprinting of Export of Second-life Materials Using Life Cycle Thinking*, 2008
- [23] EUROFER. *European Steel Figures 2005-2009*
Etude RECORD n° ° 08-0910/1A

[24] Lindroos T.J. Sectoral Approaches in the Case of the Iron and Steel Industry. VTT Working Papers 111, 2009

[25] Philippe Russo (ArcelorMittal). Communication privée, mai 2010

3. Etude de cas n°1 : Le recyclage du PEHD en présence de PP

3.1 Introduction

Le premier cas d'approfondissement sélectionné par le comité de suivi concerne les limites du recyclage du PEHD résultant de la présence de PP dans le flux à recycler. Les raisons suivantes justifient l'intérêt de ce cas d'étude :

Le PEHD et le PP constituent des polymères de commodité, produits en grande quantité ;

Différents messages sont véhiculés concernant les problèmes potentiels causés par le PP dans le PEHD à recycler. Il est donc utile d'approfondir et de clarifier le sujet ;

Ce couple de polymères illustre bien les difficultés rencontrées lorsque des polymères se retrouvent en mélange.

Pour aborder ce cas d'étude, nous analyserons d'abord pourquoi le PEHD et le PP se retrouvent dans les mêmes flux de déchets. Les problèmes susceptibles de se poser lors du recyclage de PEHD en présence de PP sont ensuite décrits. Les solutions qui peuvent être apportées pour permettre l'existence de filières de recyclage pour ces flux de déchets sont finalement discutées.

3.2 Origines de la présence de PP dans le PEHD

3.2.1 Applications du PEHD vierge

Les sources de déchets en PEHD dépendent des applications dans lesquelles ce plastique est utilisé. La Figure 3-1 présente les principales applications du PEHD en Europe de l'Ouest. Il s'agit pour la plupart d'applications massives mono-matériaux, c'est-à-dire que le polymère n'est pas en mélange ou en multicouche avec des matériaux de natures différentes. Le PEHD peut néanmoins être associé à d'autres matériaux comme par exemple dans le cas des bouteilles où le PEHD est associé à des bouchons (en PEHD ou PP), à des étiquettes et éventuellement à des opercules en aluminium.

Les différents grades de PEHD se distinguent par

- La masse moléculaire;
- La distribution de masses moléculaires;
- Les additifs.

Les différents grades de PEHD peuvent aussi être positionnés sur une grille indice de viscosité – densité en fonction des applications du PEHD, comme présenté à l'annexe 2 (cf. 3.7.2).

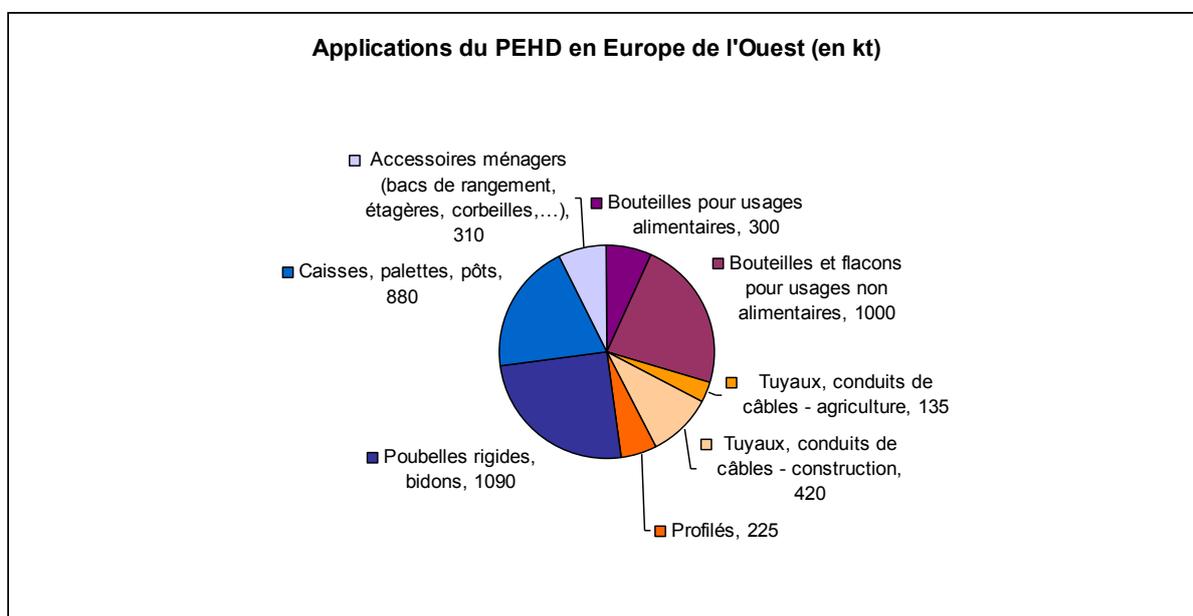


Figure 3-1 : Applications du PEHD vierge en Europe de l'Ouest [10]

Les propriétés du PEHD vierge sont présentées en annexe au point 3.7.1. Dans toutes les applications du PEHD, les propriétés de coût faible et de facilité de mise en œuvre contribuent au choix de ce matériau. Pour les applications suivantes, d'autres propriétés du PEHD justifient en outre son choix :

- Tuyaux et conduits : Excellente résistance chimique et résistance à l'hydrolyse.
- Bouteilles et flacons alimentaires : conformité aux spécifications de la Food & Drug Administration
- Bidons : résistance chimique et résistance à l'impact.

Pour les applications dans les tuyaux, des méthodes de contrôle (« testing ») ont été mises au point afin de choisir les meilleurs matériaux possibles. Il s'agit donc d'évaluer a priori la durabilité du « matériau en fonction » en simulant un vieillissement forcé (sources : [26] et [27]).

3.2.2 Les flux de déchets de PEHD

3.2.2.1 LES FLUX POST-CONSOMMATION DE BOUTEILLES ET FLACONS

En fonction des pays, les bouteilles et flacons en PEHD peuvent être mélangés dans les balles avec des bouchons en PEHD et PP ainsi qu'avec des bouteilles et flacons en PP ou en polyéthylène basse densité linéaire (en anglais, Linear Low Density PE, LLDPE). La teneur en PP des balles de PEHD dépend, comme illustré dans le Tableau 3-1 :

- de la présence ou non de bouteilles et flacons en PP sur le marché;
- des modes de collecte ou du fonctionnement des centres de tri dans les pays.

Tableau 3-1: Teneur en PP des balles de PEHD

Pays	Présence de flacons et bouteilles en PP sur le marché	Types de flux collectés	Teneurs moyennes en PP des balles "PEHD" (y compris les bouchons)
France	Oui	Flux bouteilles et flacons PEHD et PP non séparés avant mise en balles	6,5% [28]
Belgique	Oui	Flux bouteilles et flacons PEHD et PP non séparés avant mise en balles	Au moins 10%
Royaume-Uni	Oui	Flux bouteilles et flacons PET, PEHD et PP non séparés avant mise en balles	
Allemagne	Oui	2 flux bouteilles et flacons PEHD et PP mis en balles séparément	3 %
Espagne	Peu	Flux bouteilles et flacons PEHD et PP non séparés avant mise en balles	< 3 % ?
Italie	Très peu	Flux bouteilles et flacons PEHD et PP non séparés avant mise en balles	< 3 % ?

Source: Plarebel (communication privée d'An Vossen, mai 2009)

Hormis en France et en Espagne, les recycleurs sont équipés pour séparer le HDPE et le PP des bouteilles et flacons (mais pas les bouchons), comme décrit au point 3.4.3. Les teneurs en PP dans

le PEHD recyclé sont inférieures à 3% en Europe hormis en France (et en Belgique) où les teneurs sont en moyenne de 6%.

3.2.2.2 LES FRACTIONS POLYOLEFINES DES RESIDUS DE BROYAGE

Les résidus de broyage des installations traitant les VHU et les DEEE contiennent du PP et du PE. Dans ces flux, le PP est présent en plus grande quantité que le PE (sources [8] et [9]). Les flux de résidus polyoléfinés sans séparation ultérieure ne rentrent donc pas dans ceux spécifiquement étudiés ici contenant le PEHD comme matériau principal. Néanmoins, si les résidus polyoléfinés font l'objet d'une séparation ultérieure (cf. 3.4.3), le recyclage de la fraction PEHD comportant du PP résiduel s'intègre dans notre cas d'étude.

3.2.2.3 LES FLUX POST-CONSOMMATION COLLECTES EN DECHETTERIE

Les déchetteries acceptent de nombreux déchets plastiques sous formes de films, bidons, fûts, pots ou tuyaux. Certains de ces déchets sont en polyéthylène ou en polypropylène. Ils sont le plus souvent collectés ensemble car la distinction entre les deux types de matériaux peut ne pas être réalisée à la déchetterie.

3.3 Problèmes liés à la présence de PP dans le flux HDPE

Les problèmes rencontrés dans les mélanges de PEHD et PP ont été discutés sous l'angle général des mélanges de polymères (cf. 2.6.1.1). Le cas particulier des mélanges PEHD / PP est ici abordé à la fois du point de vue scientifique et selon le regard des praticiens du recyclage.

3.3.1 Etude de la miscibilité des mélanges PEHD / PP

Bien que le polyéthylène et le polypropylène aient des structures chimiques proches, les molécules de PEHD et PP ne sont pas miscibles à l'échelle moléculaire, même à l'état fondu [33]. L'incompatibilité du PE et du PP à l'état solide provient des différences de structure cristalline et de températures de fusion.

La morphologie des polymères semi-cristallins est contrôlée par les conditions de cristallisation. On observe des sphérolites dans tous les types de mélanges PE/PP. La taille des sphérolites de PP diminue avec la quantité de PE. Le nombre, les dimensions et la structure des domaines de polyéthylène dépendent de l'histoire thermique.

Néanmoins, ce n'est que vers des teneurs en PP de 10 à 15% qu'une séparation de phase avec apparition d'une phase non miscible à l'échelle du micron prend place (sources :[28] et [41]) La microstructure d'un mélange avec séparation de phase est illustrée à la Figure 3-2 pour un mélange PEHD/PP 80/20 (en masse) analysé par microscopie électronique à balayage. [35]

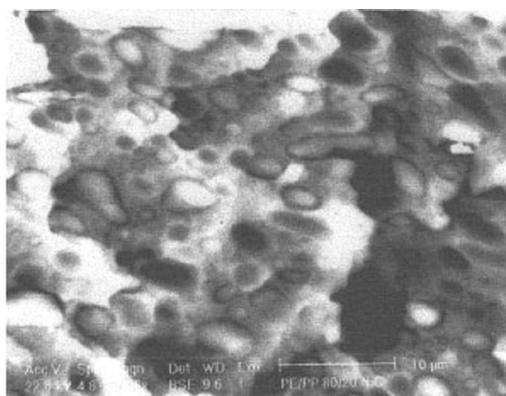


Figure 3-2 : Microstructure d'un mélange PEHD/PP 80/20 [35]

Par ailleurs, la dispersion du PP dans le PEHD est meilleure lorsque les viscosités de ces polymères à l'état fondu sont proches que dans le cas où le PEHD a une viscosité plus faible. [37]

3.3.2 Propriétés mécaniques et rhéologiques

Les propriétés mécaniques des mélanges PEHD/PP (à majorité PEHD) dépendent notamment de la qualité de la dispersion du PP dans le PEHD. Comme indiqué au paragraphe précédent, la dispersion dépend des viscosités relatives des deux polymères à l'état fondu.

L'effet du contenu en PP sur le module de flexion et sur la résistance aux chocs est présenté à la Figure 3-3 sur base de courbes expérimentales, en distinguant les mélanges avec PEHD et PP de même viscosité (cas a) et ceux caractérisés par une plus faible viscosité du PEHD (cas b). [37] La rigidité (caractérisée par le module de flexion) augmente avec l'addition de PP, bien que dans une moindre mesure pour le cas avec PEHD de plus faible viscosité. Par contre, la résistance aux chocs diminue fortement avec la teneur en PP. En outre, la résistance aux chocs de PEHD vierge seul a un niveau plus faible dans le cas b.

Comme indiqué à l'annexe 1 (cf. 3.7.1), le PP est en effet plus rigide que le PEHD (cf. module de Young et de flexion) et moins résistant aux chocs.

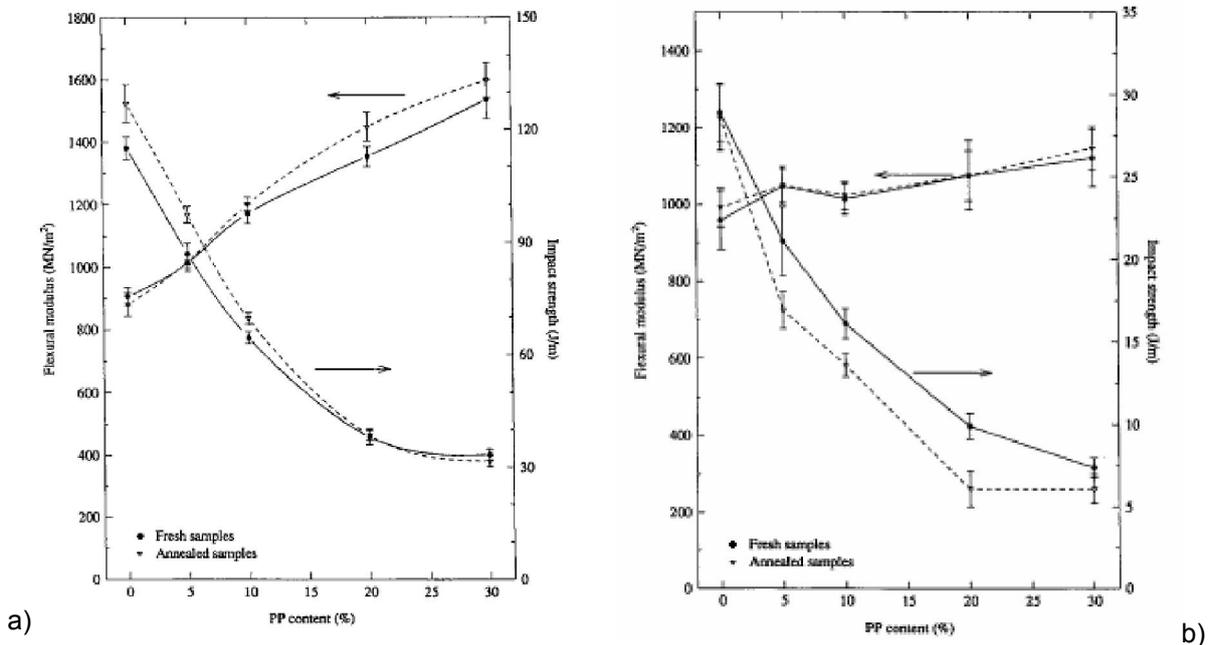


Figure 3-3: Effet de la teneur en PP dans des mélanges PEHD/PP (a) même viscosité; (b) viscosité PEHD plus faible (Flexural modulus = module de flexion; Impact strength = résistance aux chocs)

D'une manière générale, la présence de PP peut causer des problèmes à basse température car la résistance aux chocs à froid du PP est moins bonne que celle du PEHD.

La présence de PP gêne les applications basées sur le moulage par soufflage ou l'extrusion de profils, pour les raisons suivantes [44] :

- La séparation de phase tend à rendre le PEHD secondaire cassant;
- Une grande différence d'indice de viscosité existe entre le PEHD des flacons et bouteilles par rapport aux bouchons qui sont injectés;
- Au-dessus de 5% de PP, une ségrégation de phase se produit lors de la cristallisation;
- La contamination par le PP entraîne une réduction de la résistance de la ligne de soudure des pièces moulées. En effet, en raison du caractère immiscible du PP avec le PEHD, il y a ségrégation du PP à l'avant du front d'écoulement lors du moulage, et donc sur les lignes de soudure.

Remarque : Une étude plus approfondie de la littérature serait nécessaire concernant les propriétés mécaniques des mélanges afin :

- de comprendre les mécanismes actifs dans les différentes gammes de composition;
- d'obtenir des informations sur des mélanges à base de résines de grades différents, mis en œuvre dans des conditions différentes.

3.4 Solutions

3.4.1 Types de solutions

Si le flux de HDPE contient du PP, il y a 3 types de solutions pour pouvoir quand même le recycler :

- L'utiliser dans des applications peu exigeantes, qui tolèrent bien la dégradation des propriétés engendrées par la présence du PP
- Séparer le PP du HDPE, afin d'amener la teneur en PP à un niveau plus bas qui permet d'éviter la dégradation des propriétés engendrées par la présence du PP ou à tout le moins de la contenir dans une marge faible qui permette de continuer à utiliser le HDPE recyclé pour des applications exigeantes
- Ajouter des compatibilisants (ou autres additifs) au mélange pour améliorer les propriétés.

Ces 3 points sont discutés ci-dessous.

3.4.2 Applications du PEHD recyclé qui tolèrent le PP

Même si certaines propriétés sont affectées par la présence de PP, l'utilisation du PEHD recyclé contenant du PP est néanmoins possible pour toute une série d'applications. Dans un premier temps, ce chapitre aborde d'un point de vue théorique les applications possibles du flux de PEHD recyclé. Ensuite, les applications actuelles du PEHD recyclé sont présentées sur base des débouchés observés dans plusieurs pays. Finalement, les contraintes liées à la présence de PP dans le PEHD sont discutées en fonction des applications.

3.4.2.1 APPLICATIONS POSSIBLES DU PEHD RECYCLE EN FONCTION DU GRADE, DE LA COULEUR ET DE LA COMPOSITION DU FLUX

Les procédés de transformation accessibles pour différents flux de matières à recycler sont décrits au Tableau 3-2, sur base d'une étude américaine. [42]

Les flux considérés sont :

- PEHD grade bouteille – couleur naturelle : cette fraction est composée de résines homo-polymères de même grade
- PEHD grade bouteille – coloré : flux post-consommateur composé d'une variété de sources, surtout des bouteilles de détergent opaques. Plusieurs homo-polymères, copolymères de différents grades sont utilisés pour fabriquer ces récipients. Plusieurs autres matériaux peuvent se retrouver dans ce flux, dont des emballages en PP.
- PEHD grade film : les sources les plus communes sont les sacs d'épicerie collectés en magasin et les films agricoles

Tableau 3-2 : Applications accessibles en fonction du flux (grade, couleur, composition)

	PEHD grade bouteille – couleur naturelle	PEHD grade bouteille - coloré	PEHD grade film
Injection moulage	****	****	***
Injection moulage – mousse structurelle	***	**	*
Injection -soufflage	****	****	**
Film soufflé	****	***	****
Procédés multicouches	****	**	***
Extrusion – profil	**	**	*
Extrusion - fibre	*	*	*
Extrusion – feuille ou cast film	***	***	**

Légende :

**** = Utilisation réussie de manière étendue dans l'industrie

*** = Utilisation commerciale par un nombre réduit de producteurs

** = réalisable mais peu utilisé commercialement

* = Rare / non testé / grades de résines généralement incompatibles

Dans les applications mentionnées, la MPS est souvent mélangée avec de la matière vierge.

Les applications en fibres ne sont pas accessibles en raison de la contamination possible et de la non-adéquation du grade avec les spécifications nécessaires pour les fibres.

Les applications pour lesquelles on observe une différence dans les débouchés entre le flux « couleur naturelle » et le flux coloré de PEHD sont :

- Injection moulage – mousse structurale : en raison des spécifications attendues pouvant ne pas être atteintes par le flux PEHD grade bouteille – couleur naturelle et limites pouvant apparaître suite à une éventuelle décoloration ou des taches
- Film soufflé : le flux coloré peut être utilisé dans les applications film où la translucidité n'est pas requise
- Procédés multicouches : usage possible des deux types de flux dans les couches internes du multicouche, mais pas de filière développée pour le moment pour le flux coloré

Le Tableau 3-2 est à considérer à titre illustratif car c'est la composition exacte du flux coloré qui détermine les applications et techniques de mise en œuvre qui sont effectivement accessibles.

3.4.2.2 VALORISATIONS ACTUELLES DU PEHD RECYCLE

La Figure 3-4 présente pour la France en 2007 les applications du flux de PEHD/PP régénérés issu du flux de bouteilles et flacons triés (comme décrit au Tableau 3-1, la fraction PEHD contient du PP).

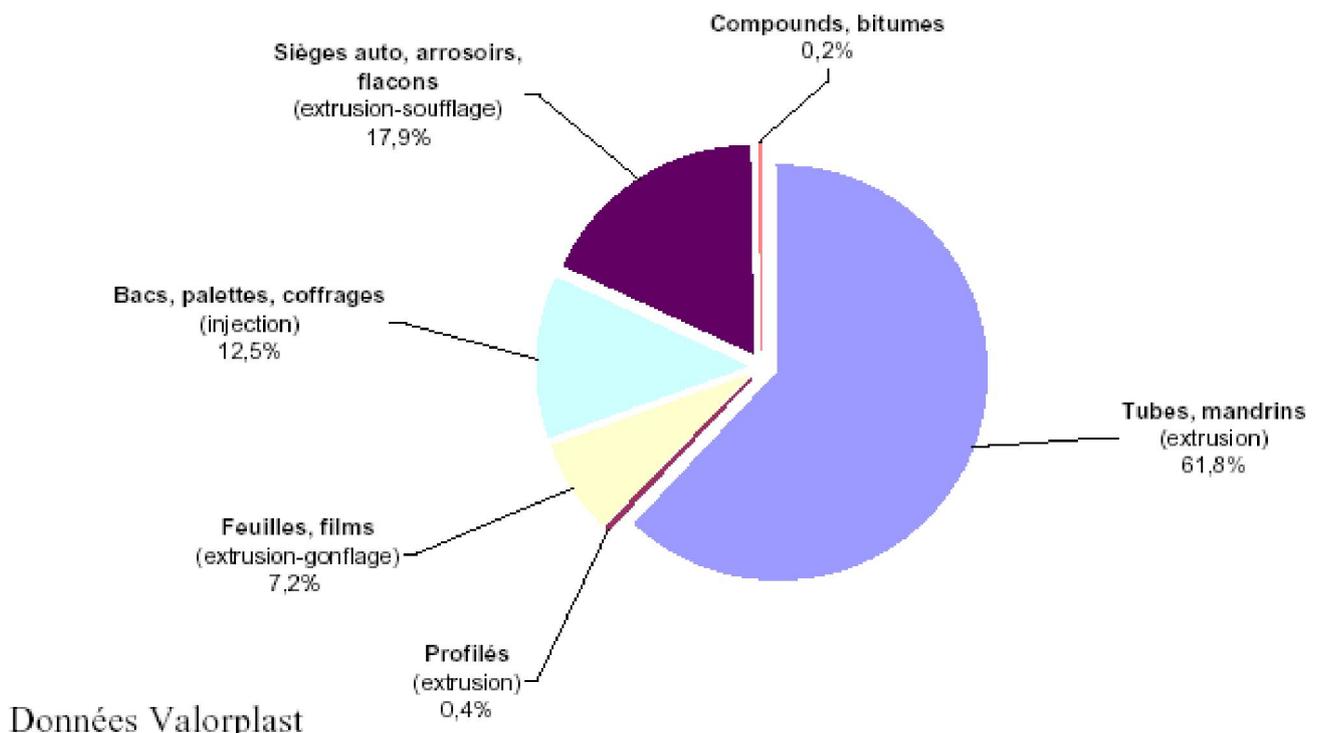


Figure 3-4 : Applications du PEHD/PP recyclé en France, 2007. Source : Valorplast [28]

En Belgique, le PEHD recyclé issu du flux post-consommation des ménages sert à la fabrication de :

- Tuyaux d'irrigation et de drainage (plus de 70% des débouchés, qui sont donc très sensibles aux fluctuations conjoncturelles de ce secteur)
- Sièges de voiture
- Bacs
- Conteneurs à déchets
- Feuilles pour isolation

Parmi les débouchés mentionnés, l'application dans les tuyaux apporte la plus grande valeur ajoutée. (source : [41]). Les taux de substitution de matière vierge sont élevés. Par exemple, dans le cas des tuyaux pour la construction, le taux de substitution par rapport à la matière vierge est compris entre 0,7 et 0,9 (source [10]).

Au Royaume-Uni, une filière en boucle fermée pour les bouteilles de lait a été étudiée avec succès. [43] Le flux de bouteilles de lait en PEHD de couleur naturelle est récupéré en même temps que les bouchons et selon le type de collecte avec les récipients en LLDPE (bouteilles pour détergents). Ces bouchons et récipients constituent des contaminants pour le HDPE couleur naturelle, respectivement en raison de leur couleur et de leur grade. La MPS a en outre été décontaminée jusqu'à satisfaire les exigences requises pour le contact alimentaire.

Le PEHD régénéré sert aussi à la fabrication de bidons et flacons (noirs ou gris)¹⁶, davantage en boucle fermée, à partir des flux post-consommation industriels.

3.4.2.3 CONTRAINTES ACTUELLES LIEES A LA PRESENCE DE PP

3.4.2.3.1 Tolérances actuelles

Pour la plupart des applications mentionnées au point 3.4.2.2 (à l'exception des recyclages en boucles fermées bottle-to-bottle), les spécifications utilisées correspondent à une teneur en PP de maximum 5%. La présence de quelques % de PP dans le PEHD ne constitue pas donc une limite pour celles-ci. Des informations de terrain font même état d'une maximisation de la résistance aux chocs des tuyaux en PEHD recyclé contenant 3 à 4 % de PP [41], tandis que la propriété se détériore pour des teneurs en PP supérieures.

Selon un recycleur [45], il n'y a pas de problème pour fabriquer des tuyaux à partir d'un flux de PEHD recyclé post-consommation contenant jusque 5% de PP, pour les applications suivantes des tuyaux :

- protection de câbles
- tuyaux cannelés (corrugated pipes)
- fibres optiques

Pour les applications utilisant le moulage par injection, cette société tourne en boucle fermée avec des flux industriels contenant de l'ordre de 1 % de PP (tolérance de 2-3%). C'est le cas aussi des applications bouteilles et bidons, pour lesquelles des flux post-consommation sont en outre aussi utilisés.

Selon le COTREP [28], un ajout jusqu'à 10% de PP n'a pas d'influence significative sur les propriétés mécaniques du mélange (Il n'est cependant pas clair si cette limite de 10% tient compte de l'utilisation possible de compatibilisants).¹⁷ La proportion de PP présente dans le gisement ménager Français de bouteilles et flacons en PEHD/PP ne pose pas de problème aujourd'hui pour les principales applications que sont l'extrusion de tubes et l'extrusion-soufflage de corps creux. Cette proportion semble s'être stabilisée autour de 6,5% depuis 2005.

¹⁶ D'autres couleurs, comme par exemple le vert foncé, peuvent être obtenues à partir de flux isolés.

¹⁷ COTREP: Comité technique pour le recyclage des emballages plastiques (France)

Selon une autres source [44], la présence de PP de 3 - 5 % de PP ne pose pas nécessairement problème car

- la matière recyclée est souvent mélangée avec de la résine vierge;
- la séparation de phase peut être limitée par l'utilisation d'un équipement adéquat de mise en œuvre permettant une bonne dispersion du PP.

3.4.2.3.2 Problèmes identifiés

Selon le COTREP [28], une teneur de plus de 10% de PP rend le mélange très fragile et est donc à éviter. En particulier pour les applications dans les bouteilles, une moins bonne tenue mécanique des bouteilles est observée dans les échantillons contenant du PP. Elle est attribuée à une rupture au niveau de la ligne de soudure dont l'origine supposée est le déphasage à grande échelle du PP pour des compositions en PP tendant vers 10%.

Dans l'hypothèse où une augmentation significative du taux de PP serait observée en France, les applications soufflages pourraient être perturbées. Dans de telles conditions, il serait alors nécessaire d'effectuer une séparation entre les bouteilles en PP et celles en PEHD (possible aujourd'hui par reconnaissance infrarouge, cf. 3.4.3.2). Cette nouvelle opération aurait un coût significatif pour les régénérateurs, entraînant probablement une dégradation de la rentabilité du système.

3.4.2.3.3 Identification des filières empêchées

Les applications qui sont actuellement exclues pour valoriser le PEHD post-consommation régénéré sont reprises au Tableau 3-3.

Tableau 3-3 : Applications exclues actuellement pour le PEHD recyclé et facteurs limitant

Applications exclues	Limites	Source
Bouteilles et flacons alimentaires (sauf dans le cas particulier de la filière mise en place au Royaume-Uni [29])	Problème d'odeur, de couleur et limites liées au grade	[41]
Tuyaux sous pression Tuyaux pour la distribution d'eau	<ul style="list-style-type: none"> - Le grade du PEHD ne convient pas (ce qui limite ce débouché même en cas de flux de PEHD pur) - La présence de contaminants comme le PP limite les propriétés mécaniques comme la résistance aux chocs 	[45]
Bacs placés dans des frigos	Problème de résistance aux chocs à froid	[41]
Films minces	<ul style="list-style-type: none"> - Le grade du PEHD ne convient pas (ce qui limite ce débouché même en cas de flux de PEHD pur) - La présence d'impuretés crée des défauts dans le film - La présence de PP crée des défauts dans le film 	[41] [45]
Fibres	Limites liées au grade	[42]

Il est difficile d'établir une liste des applications ou filières susceptibles d'être développées si un flux post-consommation de plus grande pureté est rendu accessible (par exemple avec une teneur en PP inférieure à 1%). Une réponse hypothétique à cette question obtenue auprès d'un recycleur évoque des applications de types "feuilles" (sheet) et "feuilles pour la construction" (construction foils).

3.4.3 Les méthodes de séparation

Les flux décrits au point 3.2.2 et composés à la fois de PE et de PP peuvent être séparés de plusieurs façons. Une distinction doit être faite entre le tri manuel et le tri automatique.

Un tri manuel peut être efficace sur les grosses pièces. Celles-ci peuvent être séparées par exemple dans un trommel retenant les pièces supérieures à une certaine taille. Sur ces pièces volumineuses une pureté élevée des fractions de PE et PP est accessible.

Dans la perspective de recycler des flux les plus mono-matériaux possibles, plusieurs familles de méthodes ont été mises au point pour séparer automatiquement les plastiques mélangés. Ces techniques sont basées sur :

- les différences de densité (séparation par flottation ou centrifugation)
- la spectroscopie (infrarouge proche, rayons X)
- les différences électrostatiques

Elles sont en général appliquées après broyage des déchets sauf le tri par infrarouge proche (en anglais, near infrared ou NIR) qui peut être utilisé pour séparer les bouteilles et flacons non broyés. Comme décrit plus haut (cf. 3.2.1), ce tri par NIR est alors réalisé soit en centre de tri comme en Allemagne, soit chez le recycleur comme en Belgique.

Les principes de ces méthodes ont été développés pour la séparation des plastiques en général (déchets mono-matériaux dans un flux mélangé) et sont appliqués aux flux mélangés de PE et PP. Les paragraphes ci-dessous décrivent les différentes méthodes de séparation en discutant leur fonctionnement, leur caractère innovant, leurs limites et leurs performances (sources : [14] et informations provenant des fournisseurs d'équipement). Toutes les techniques présentées peuvent fonctionner en continu.

Les performances de séparation sont définies à l'aide de deux indicateurs, déterminés par rapport à la fraction séparée contenant le matériau à purifier :

- La pureté : la part (% en poids) du matériau d'intérêt dans la fraction séparée
- Le rendement (ou efficacité) : le ratio de la quantité du matériau à purifier qui se retrouve dans la fraction séparée par rapport à la quantité présente dans le flux de départ

D'une manière générale, le rendement est d'autant plus élevé que la teneur en matériau à extraire est faible dans le flux de départ. Par ailleurs, des flux contenant plus de deux matériaux peuvent être séparés en combinant plusieurs étapes de séparation en série.

3.4.3.1 SEPARATION SELON LA DIFFERENCE DE DENSITE

Le principe général de fonctionnement est d'immerger les morceaux de plastiques dans un milieu liquide présentant une densité intermédiaire entre celles des matériaux à séparer. Dans un système par flottation, le plastique le plus léger flotte tandis que le plus lourd coule. Les deux fractions peuvent ainsi être séparées. Un fractionnement peut aussi être obtenu sous l'effet d'une force centrifuge plutôt que par simple gravité.

Les gammes de densité du PEHD et du PP sont données au Tableau 3-4.

Ces polymères présentent des densités différentes mais proches et toutes deux inférieures à celle de l'eau. Le fait que les densités soient proches limite les performances d'un simple système par flottation. Néanmoins, plusieurs techniques ont été développées pour obtenir une bonne séparation à l'aide d'un milieu liquide de densité intermédiaire entre les densités du PP et du HDPE. Elles sont décrites au Tableau 3-5.

Tableau 3-4: Densités du PEHD et du PP

	PEHD	PP
Densité (kg/dm ³)	0,95 – 0,97	0,90 – 0,91

Source: <http://www.omnexus.com>

Tableau 3-5: Fonctionnement et performances des technologies de séparation par densité

Nom de la technique	Principe de fonctionnement	Source	Pureté (%)	Rendement (%)
Turbo Laminare Trenntechnik (TLT)	Méthode brevetée basée sur la flottation avec de l'eau mélangée à un autre fluide; élimination des bulles d'air et formation d'un flux laminaire	www.tlt-recycling.de	> 99,5% (si diff de densité >0,03 g/cm ³)	N.S.
Séparateur avec lamelles - Leiblein	Augmentation de la différence de densité par l'utilisation de chenaux penchés	www.leiblein.de	99 %	N.S.
Inverse Magnetic Density Separation (IMDS)	Un fluide magnétique est utilisé (comme par exemple des particules d'oxydes de fer en suspension dans l'eau). La densité du fluide peut être modifiée sous l'action d'un champ magnétique. Par la variation exponentielle du champ magnétique, les particules de plastiques vont se concentrer chacune à la distance de la surface qui leur est caractéristique, cf. Figure 3-5	[31]	98 %	70%
CO ₂ supercritique	La densité est adaptée par la pression exercée sur le milieu CO ₂ supercritique	[32]	> 99 %	> 99 %
Centrifugation Brid Humbold - Censor	Centrifugeuse à axe horizontal.	www.andriz.com	Jusque 99,9 %	
Hydrocyclone Herbold	Formation d'un vortex tel que les particules les plus lourdes sont accélérées radialement tandis que les plus légères se retrouvent au cœur de la spirale centrale	[29]	99,5 %	

N.S. = non spécifié

3.4.3.1.1 Limitations dues à la perturbation des densités

Les facteurs suivants peuvent influencer les densités des plastiques à séparer et ainsi affecter les performances de séparation :

- Présence de charges et pigments, etc. (comme discuté au point -, l'utilisation de charges tend à s'étendre à de plus en plus d'applications en raison de l'augmentation du coût des matières plastiques)
- Tension de surface
- Présence d'agrégats de PEHD et PP
- Température

3.4.3.1.2 Limitations dues à la perturbation de la densité du milieu fluide utilisé

Les facteurs suivants peuvent influencer la densité du milieu liquide et ainsi affecter les performances de séparation :

- Contaminants lavables qui migrent vers le liquide séparateur
- Température
- Evaporation d'un composant du liquide

3.4.3.2 SEPARATION PAR SPECTROSCOPIE

En fonction des liaisons chimiques présentes, les matériaux absorbent différentes longueurs d'onde d'un rayonnement infrarouge. Le spectre du rayonnement infrarouge réfléchi par un matériau fournit une signature caractéristique permettant son identification. Cette propriété est utilisée pour séparer différents plastiques en morceaux placés sur une bande transporteuse. Le rayonnement utilisé se situe dans le domaine de l'infrarouge proche (en anglais, near infrared or NIR). Lorsqu'un élément à éliminer est repéré, il est soufflé hors du flux à l'aide d'air comprimé.

Les gammes de performances accessibles par séparation NIR sont les suivantes, en fonction des réglages des machines (une performance pouvant être augmentée au détriment de l'autre) :

- Pureté: 80 – 98 %
- Efficacité : 80 – 96 %

De la même façon, les rayons X permettent de distinguer les matériaux en fonction de la composition atomique ou de leur structure cristalline. Les différences avec des techniques NIR sont, outre le coût plus élevé :

- Le rayonnement pénètre dans la matière et la signature n'est donc pas perturbée par la composition de la surface;
- La technique est davantage utilisée pour affiner une séparation à partir d'un flux de pureté au moins égale à 95% et avec des débits plus faibles, afin de maximiser le rendement et la pureté. La technique fonctionne d'autant mieux que la taille des particules est homogène.

Quelle que soit la nature du rayonnement, les limites des performances peuvent être liées à :

- Facteurs influençant la détection par le spectre émis
 - Pièce recouverte par une autre et qui n'est donc pas atteinte par la lumière
 - Présence de crasses
 - Présence d'étiquettes
- Facteurs influençant la séparation par flux d'air comprimé
 - Vitesse de la bande transporteuse
 - Forme et taille des objets à séparer (uniformité requise, 30 à 350 mm)
 - Agrégats de PE et PP

Les limites qui s'appliquent spécifiquement à la signature NIR sont :

- Humidité sur les surfaces
- Forte absorption du rayonnement par les plastiques noirs (donc pas de réflexion NIR)

3.4.3.3 SEPARATION SELON LA DIFFERENCE DE PROPRIETE ELECTROSTATIQUE

Cette méthode de séparation est basée sur les différences de charge de surface des différents matériaux. La nécessité d'avoir des surfaces tout-à-fait sèches constitue une difficulté de cette technique. En outre, pour le PE et PP, les différences de propriété rencontrées ne sont pas suffisantes pour obtenir une bonne séparation.

Nous attirons l'attention sur la technique IMDS (cf. schéma ci-dessous), qui est reconnue par des experts comme particulièrement prometteuse, entre autres du point de vue économique. Elle est en train de passer de la phase de développement à la phase commerciale. T.U. Delft, avec d'autres partenaires, a construit en 2009 une installation de séparation d'une capacité de 10 000 t/an avec, à terme, une capacité prévue de 25 000 t par an.

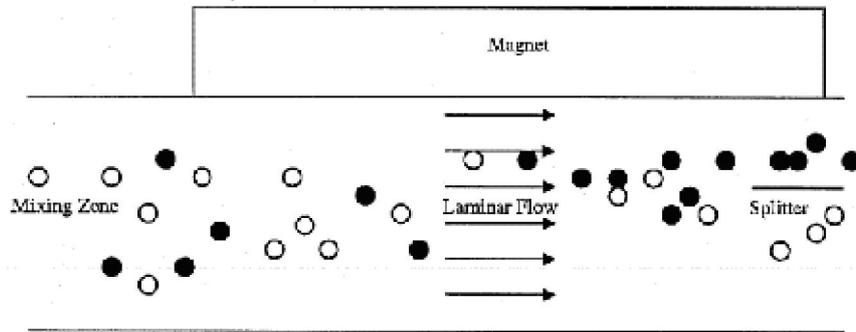


Fig. 6. A schematic drawing of the experiment with the IMDS. The black particles are the PP and the white particles are the PE.

Figure 3-5 : Principe de fonctionnement de la technologie IMDS

3.4.4 Compatibilisation des mélanges PEHD / PP

Des méthodes existent pour compatibiliser les mélanges de PEHD et de PP. Dans la littérature, plusieurs études portent sur la compatibilisation de ces mélanges, qu'ils soient majoritairement composés de PEHD ou de PP. La plupart des études sont motivées par la perspective du recyclage de flux de polyoléfinés mélangés. Les compatibilisants suivants sont utilisés :

- Compatibilisation in situ (extrusion réactive)
- Copolymère éthylène/propylène/diène (EPDM)
- Ethyl vinyl acetate (EVA)
- EPR Ethylène-Propylène (Rubbers)
- EP-g-MA

Ces différentes méthodes sont décrites dans la suite de cette section.

D'après les informations de terrain collectées, des compatibilisants seraient utilisés pour la fabrication de tuyaux à base de résines recyclées pour des compositions en PP de l'ordre de 6 à 10% [41] tandis qu'ils ne sont pas utilisés pour des flux contenant de l'ordre de 1 à 2 % de PP (en tout cas maximum 5% de PP). [45] Néanmoins, il serait préférable de ne pas avoir besoin de compatibilisants.

3.4.4.1 EXTRUSION REACTIVE

Le principe de l'extrusion réactive est de former in situ l'agent compatibilisant sous la forme d'un copolymère.

3.4.4.1.1 Addition de peroxyde [20]

L'ajout de peroxyde à l'état fondu entraîne l'apparition de radicaux portés par les macromolécules. Lorsque les macromolécules radicalaires de PEHD se recombinent, elles peuvent former

- soit des branchements (par réaction d'addition d'une macromolécule de PEHD)
- soit des copolymères PE-PP susceptibles de jouer le rôle de compatibilisant (addition d'un radical PP)

Le peroxyde aura donc un effet sur l'ensemble de l'échantillon en termes de masse moléculaire et d'architecture moléculaire. Pour le PP, l'effet du peroxyde consiste en une scission de chaînes. Un des problèmes majeurs dans la modification par un peroxyde est le contrôle de la dégradation du PP.

3.4.4.1.2 Addition de peroxyde et de monomères [39]

Des peroxydes et des monomères peuvent aussi être introduits dans le mélange lors de l'extrusion. La polymérisation in situ du monomère conduit à la formation d'un copolymère bloc qui constitue l'agent compatibilisant.

Les monomères appropriés sont les suivants :

- n-butylmethacrylate (BMA),

- t-butylamino ethylmethacrylate (TBBMA)
- combinaison de styrène/ anhydride maléique (ST/MAH).

Cette méthode de compatibilisation a permis d'augmenter la résilience des mélanges ainsi que leur résistance aux chocs.

3.4.4.1.3 Réactions interfaciales de couplage

Dans l'étude de Colbeaux et al. [40], un copolymère PP-PE est synthétisé in-situ dans le fondu par extrusion à partir de mélanges d'homopolymères PP et PE dans lesquels on a introduits un polypropylène et un polyéthylène greffés anhydride maléique (notés respectivement PPg et PEG) ainsi qu'un agent de couplage. Le couplage à l'interface met en jeu des mécanismes de diffusion des espèces couplantes (chaîne polymère greffées et agents de couplage) et de réaction de celles-ci aux interfaces sur des échelles de temps compatibles avec les temps de séjour dans l'outil d'extrusion.

La compatibilisation des mélanges PP/PE 70/30 considérés dans l'étude est mise en évidence :

- par la réduction des tailles de la phase PE
- par le comportement ductile des mélanges compatibilisés alors que le mélange non compatibilisé présente un comportement fragile
- par l'augmentation de l'adhésion interfaciale se traduisant par une déformation plastique intervenant lors de la propagation de la fissure à l'interface

L'avantage de cette méthode par rapport à l'addition de peroxyde est d'éviter la dégradation des propriétés causée par le peroxyde.

3.4.4.2 FORMATION PREALABLE DU COMPATIBILISANT

3.4.4.2.1 Copolymère éthylène-propylène (EPR)

En général, l'addition d'EPR dans le PP ou le PE améliore la résistance aux chocs mais diminue la limite élastique et le module. On constate des résultats similaires dans le cas des mélanges PE/PP, ainsi qu'une augmentation de l'allongement à la rupture. L'amélioration de la résistance aux chocs semble provenir de l'effet compatibilisant de l'EPR.[20]

La compatibilisation par des **copolymères éthylène-propylène greffé anhydride maléique (EP-g-MA)** a aussi été étudiée. [35] Les fonctions anhydride maléique permettent une éventuelle réaction ultérieure avec des polyoléfines fonctionnalisées ou d'autres polymères. L'effet de la compatibilisation sur la rhéologie du mélange est tout d'abord observé, comme présenté à la Figure 3-6. La viscosité est bien augmentée par la compatibilisation. L'observation des morphologies par microscopie électronique à balayage (SEM) montre à la l'effet de la compatibilisation d'un mélange PE/PP/EP-g-MAH 80/20/5. Elle se traduit par des tailles de particules plus fines et par la propagation des fissures dans les nodules et pas le long de l'interface.

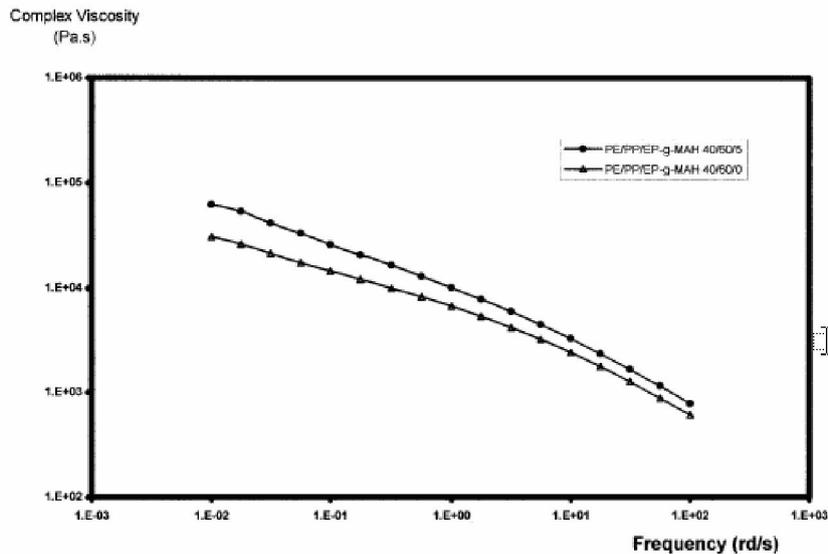


Figure 3-6: Variation de la viscosité à l'état fondu avec la fréquence avec et sans addition de EP-g-MA dans PE/PP 40/60 (180°C).

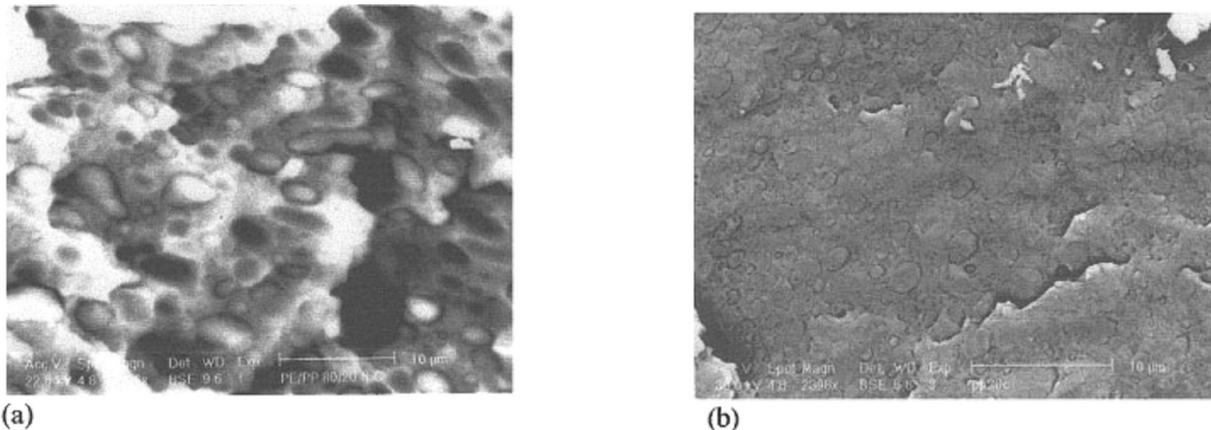


Figure 3-7: Morphologies des mélanges PE/PP (a) PE/PP/EP-g-MAH 80/20/0 (sans compatibilisant); (b) PE/PP/EP-g-MAH 80/20/5 (avec compatibilisant). Source [35]

3.4.4.2 Copolymère éthylène/propylène/diène (EPDM) et éthyl vinyl acetate (EVA)

Les propriétés mécaniques des mélanges de iPP (polypropylène isotactique) et PEHD (polyéthylène haute densité) peuvent être améliorées en présence d'EPDM (copolymère éthylène/propylène/diène) ou d'EVA (copolymère éthylène/acétate de vinyle).

Ainsi, l'addition de 5% d'EPDM à un mélange iPP/PEHD (90/10) conduit à des propriétés mécaniques proches de celles de l'HDPE, pour autant que les viscosités à l'état fondu des homopolymères PP et PEHD soient proches. La même tendance est observée avec l'addition d'EVA, sauf pour la résistance à l'impact où ce copolymère est moins performant.

3.4.5 Adaptation des cahiers des charges pour les applications

Certains cahiers des charges ont des exigences très fortes en termes de performances car ils sont basés sur les performances des matières premières. Comme les matières premières atteignent facilement ces performances, les exigences ne portent pas à conséquence sur les prix tant que l'on n'utilise que des matières vierges.

Ces exigences sont cependant souvent excessives en regard des applications visées. Il faudrait donc que ces cahiers des charges soient revus de façon à bien déterminer les besoins réels et ne pas exiger plus que le nécessaire (y compris une marge de sécurité évidemment). Ceci permet d'élargir le champ des applications des matières recyclées.

3.5 Conclusion

La part de PP collecté dans les flux de HDPE augmente progressivement. Ces matériaux sont difficiles à séparer car ils se ressemblent et ont des densités très proches. La présence de PP dans le flux de HDPE diminue les débouchés pour le HDPE en raison de la dégradation des performances techniques.

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, en particulier IMDS)
- 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)

En ce qui concerne les techniques de séparation, on peut combiner des séparations (consécutives)

- Manuelles (grosses pièces, de plus de 400 g par exemple)
- Optiques (sur flux pré-triés comme des emballages par exemple)
- Sur base de propriétés magnétiques.

3.6 Références

- [26] Bergström G. Durability testing for 100 year lifetime for buried non-pressure plastic pipes (2006)
- [27] Zanasi T. Qualification of pipe-grade HDPEs: Part I, development of a suitable accelerated ageing method. *Polymer Testing* 28: 96–102 (2009)
- [28] COTREP Fiche Technique 38 *Influence du taux de Polypropylène (PP) dans le flux de bouteilles et flacons en Polyéthylène haute densité (PEhd)*, Février 2008
- [29] Delgado C. *Technological reference paper on recycling plastics* Project WPII Creation of an information centre and networking in recycling in Europe, mai 2005
- [30] Scheirs J. *Polymer Recycling: Science, Technology and Applications* (Wiley Series in Polymer Science). Chichester ; New York. 1998
- [31] Bakker E.J. et al. *Upgrading mixed polyolefin waste with magnetic density separation* *Waste Management* 29 (5) : 1712 (2009)
- [32] Karmana E., *The Microsortation of high loadings of post-consumer mixed polyolefins using liquid carbon dioxide in a slightly agitated batch apparatus*. *Resources, Conservation and Recycling* 20: 143 (1997)
- [33] Choi Ph. *Molecular Modelling - an Enabling Technology for Chemical Engineers*. *The Canadian Journal of Chemical Engineering* 84 (3): 265 – 268 (2008)
- [34] Shanks R.A., *Polypropylene–polyethylene blend morphology controlled by time–temperature–miscibility*. *Polymer* 41 (6): 2133-2139 (2000)
- [35] Kallel T. et al, *Compatibilization of PE/PS and PE/PP blends. I. Effect of processing conditions and formulation*. *Journal of applied polymer* 90 (9): 2475-2484 (2003)
- [36] BLOM H. P. *iPP/HDPE blends : interactions at lower HDPE contents*. *Journal of applied polymer science* 58 (6) : 995-1006 (1995)
- [37] BLOM H. P. *i-PP/HDPE Blends. Characterization and Compatibilization at Lower i-PP Contents*. *Journal of applied polymer science* 61: 959-968 (1996)
- [38] BLOM H. P. *PP/PE Blends. IV. Characterization and Compatibilization of Blends of Postconsumer Resin with Virgin PP and HDPE*. *Journal of applied polymer science* 70: 2081–2095 (1998)
- [39] Hetteema R. et al. *Reactive Extrusion of Recycled Bottle Waste Material*. *Polymer Engineering and Science*, 42 (4): 665 (2002)
- [40] Colbeaux A. et al. *Compatibilisation de mélanges polypropylène/ polyéthylène par extrusion réactive* (http://pem.utbm.fr/materiaux_2002/file/pdf/CM19004.PDF)
- [41] Plarebel, An Vossen, communication privée (2009)
- [42] Recycling Technology Assistance Partnership (ReTAP) A program of the Clean Washington Center. *Targeting Plastics Manufacturers for Conversion to Recycled Plastics* (1997)
- [43] WRAP. *Large Scale HDPE Recycling Trial*, Février 2007
- [44] ExcelPas. *Markets for Coloured HDPE in Victoria*, Juin 1998
- [45] Société Remondis Plano, communication privée (2009)

3.7 Annexes

3.7.1 Annexe 1 : Propriétés du PEHD et du PP vierges

Le Tableau 3-6 présente de manière qualitative les propriétés du PEHD et celles du PP (isotactique) vierges, tandis que le Tableau 3-7 fournit pour une partie des propriétés des valeurs quantitatives.

Tableau 3-6 : Propriétés qualitatives du PEHD et du PP vierges (homopolymères)

	PEHD	PP
Coût	Très faible	Faible
Résistance chimique	Excellent	Bonne
Facilité de mise en œuvre (processability)	Excellente	Excellente
Résistance à froid	Bonne	Fragile en-dessous de -20°C
Propriété d'isolant électrique	Excellente	Excellente
Absorption d'eau	Très faible	Faible
Conformité FDA	Oui	Possible
Fissuration sous contrainte	Sensibilité	Bonne résistance
Rigidité	Plus faible que le PP	Plus élevée que PEHD
Stabilité dimensionnelle au moulage	Mauvaise (retrait)	Mauvaise
Résistance UV	Mauvaise	Mauvaise
Résistance à la chaleur	Faible	Faible
Soudure et joint à haute fréquence	Impossible	
Résistance aux chocs	Meilleure que PP	Mauvaise

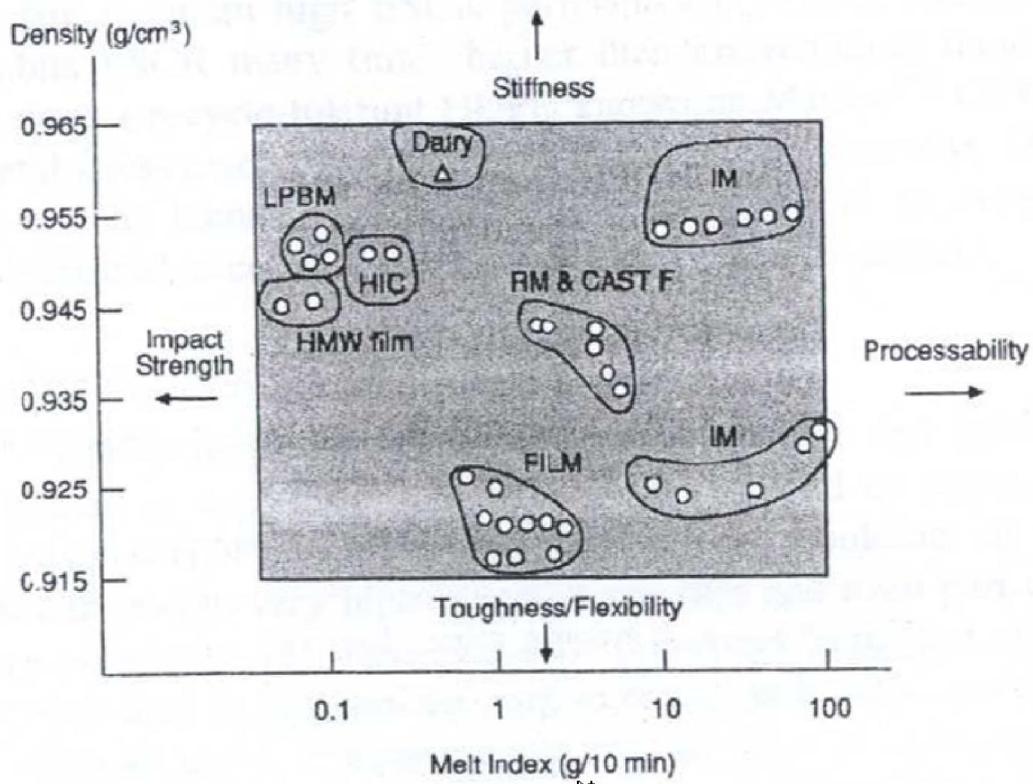
Source : www.omnexus.com

Tableau 3-7 : Propriétés quantitatives du PEHD et du PP isotactique vierges (homopolymères)

	PEHD	PP
Température de transition vitreuse, Tg (°C)	- 110 °C	-10 °C
Température de fusion, Tm (°C)	130-137 °C	160 – 170 °C
Module de Young	0.5 - 1.1 GPa	1.1 - 1.6 GPa
Module de Flexion [37]	907 MN/m ²	1864 MN/m ²
Résilience (Notched Izod Impact à t° ambiante) (Résistance aux chocs)	20 - 220 J/m	20 - 60 J/m
Résistance aux chocs (Impact strength) [37]	29-115 J/m	18.7 J/m

Source : www.omnexus.com; pour température de fusion: moyenne de la littérature

3.7.2 Annexe 2 : Positionnement des différentes applications du PEHD sur une grille indice de viscosité - densité



Source : [30]

4. Etude de cas n°2 : Présence de couches barrière sur les bouteilles PET

4.1 Introduction

De nombreux éléments sont susceptibles de gêner le recyclage des bouteilles PET :

- Colorants
- Additifs
- Colles, étiquettes & sleeve, bouchons
- Barrière
- Autres types de bouteilles présentes sur le marché (exemples : PVC, PLA)

Chacun de ces aspects doit être considéré afin de garantir l'efficacité des filières de recyclage.

Les couches barrières sont utilisées de façon croissante sur bouteilles PET. Les problèmes de couleur notamment qu'elles posent sont préoccupantes vu la croissance de la part de marché de ces bouteilles et vu les difficultés à résoudre les problèmes rencontrés. Une perturbation significative est anticipée pour les prochaines années, notamment pour les applications bouteilles du PET recyclé.

Pour ces raisons, une étude de cas est consacrée à ce sujet. Elle a pour but d'une part d'identifier le gisement des bouteilles PET concernées en quantité, en nature et en effets sur les filières de recyclage. D'autre part, l'étude discute des solutions qui peuvent être apportées à court terme et à plus long terme.

4.2 Caractérisation du gisement PET avec système barrière

4.2.1 Les propriétés barrière

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 live*) des produits. Il s'agit :

- D'empêcher la diffusion de l'oxygène vers l'intérieur de la bouteille afin d'éviter l'oxydation du contenu ;
- D'empêcher la diffusion du CO₂ vers l'extérieur de la bouteille pour les boissons gazeuses.

Ces technologies sont principalement utilisées dans le cas de boissons gazeuses (eaux gazeuses, bières) et dans le cas de jus, boissons fruitées et eaux aromatisées.

Certaines technologies barrière visent aussi à :

- limiter la migration de l'acétaldéhyde vers le contenu de la bouteille, l'acétaldéhyde étant un produit de dégradation du PET libéré en petite quantité lors de sa mise en œuvre.
- absorber les rayons UV (pour assurer la préservation des vitamines)
- éviter la migration des contaminants du PET recyclé

On distingue les couches passives et les couches actives (cf. Figure 4-1) :

- Les couches passives réduisent la perméabilité du matériau aux gaz
- Les couches actives sont conçues pour réagir spécifiquement avec un gaz susceptible de diffuser à travers le matériau (notamment l'oxygène). La couche active joue un rôle de tampon. Lorsque tous les sites actifs ont réagi, la diffusion du gaz n'est plus limitée à travers le matériau.

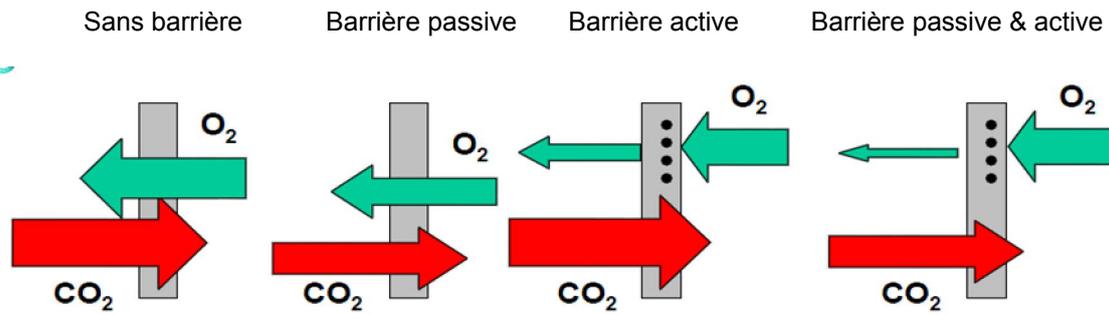


Figure 4-1 : Rôle des barrières passives et actives

4.2.2 Description des technologies barrière sur bouteilles PET

Les configurations de barrière passive sur bouteille PET sont les suivantes :

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

Des couches actives vis-à-vis de l'oxygène (= scavenger O_2) sont utilisées dans certaines technologies multicouches ou blends en mélange dans le nylon qui joue le rôle de matrice.

Les scavengers pour l'acétaldéhyde sont utilisés en Allemagne où les normes relatives à la migration d'acétaldéhyde sont plus strictes qu'ailleurs.

Remarque: Il n'y a pas de PVDC dans les barrières sur bouteilles PET.

Ces différents types de technologies sont décrits successivement ci-dessous.

4.2.2.1 COATINGS

Les coatings sont déposés sur l'intérieur ou l'extérieur des bouteilles déjà soufflées. Les deux procédés les plus utilisés actuellement consistent en des dépôts plasma réalisés sous vide sur la paroi interne des bouteilles :

- Dépôt de silice dans le procédé Plasmax (de SIG), épaisseur typique entre 10 et 100 nm
- Dépôt de carbone amorphe dans les procédés Actis et Actis Lite (de SIDEL) à partir d'un plasma acétylène, épaisseurs de 150 nm (Actis) et 60 nm (Actis Lite), concentration de 0,04% pour Actis

Il s'agit d'une barrière fonctionnelle qui peut non seulement réduire la perméabilité aux gaz O_2 et CO_2 mais aussi bloquer tout contaminant provenant du PET recyclé, lorsque la couche est interne.

4.2.2.2 MULTICOUCHE POLYAMIDE ET EVOH

Les multicouches sont des technologies dites « de préforme ». En effet, les couches sont co-injectées lors de l'injection de la préforme. Il existe deux configurations :

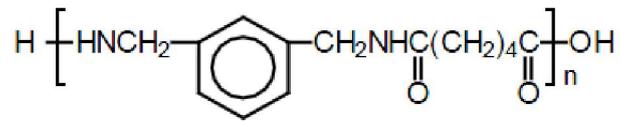
- 3 couches : PET / barrière / PET
- 5 couches PET/ barrière / PET/ barrière / P :

La couche barrière peut être composée de

- Polyamide (souvent du polyamide -MXD6); les principaux producteurs européens sont Kortec et Graham
- Polyamide (souvent du mXD6) avec scavenger O_2 ; le principal producteur en Europe est Artenius
- EVOH (copolymère éthylène-alcool vinylique)

Les concentrations en couches barrière s'élèvent à maximum 5% et actuellement à environ 2 ou 3 % [50].

Le polyamide-MXD6 est un polyamide semi-aromatique polymérisé à partir de meta-xylylène diamine et d'acide adipique dont la formule chimique est :

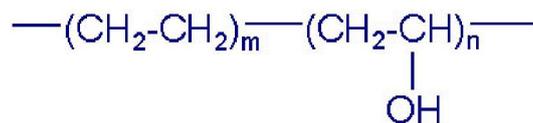


Nylon-MXD6

Sa température de transition vitreuse et sa température de fusion sont respectivement de 84°C et 234°C. En raison de sa composition chimique et de sa structure cristalline, le Nylon-MXD6 possède d'excellentes propriétés de barrière aux gaz, en particulier dans des conditions humides. Il présente en outre des atouts importants pour la mise en œuvre en multicouches dans les bouteilles, notamment : [51]

- Fenêtre de température de mise en œuvre (250-280°C) chevauchant celle du PET
- Adhésion sans besoin de molécule lien
- Propriétés rhéologiques proches de celles du PET
- Indice de réfraction proche de celui du PET

L'EVOH est un copolymère éthylène-alcool vinylique, dont la formule chimique est, avec m de l'ordre de 30 ou 40% de m+n :



L'EVOH possède aussi de très bonnes propriétés barrière mais une fenêtre de mise en œuvre dans des températures moins élevées, situées dans l'intervalle 180 – 240°C.

4.2.2.3 BLENDS POLYAMIDE

Pour les technologies monocouches blends, le matériau barrière est injecté en mélange dans le PET lors de la fabrication de la préforme. Pour cette raison, il doit avoir des températures de mise en œuvre compatibles avec celles du PET, comme le MXD6.

Les principales technologies actives sur le marché sont :

- PET+ MXD6 + scavenger O₂ : Actif de M&G et Polyshield de Invista
- Formulation PET avec scavenger O₂ : Amosorb de Colormatrix

Les concentrations en matériaux barrière varient typiquement entre 1 et 5%. [50]

4.2.3 Quantification du gisement [52]

Selon Schönwald Consulting [52], Le nombre de bouteilles PET avec couches barrière en Europe (continent) s'élevait en 2007 à 2,9 milliards de bouteilles, soit 2,5% de l'ensemble des bouteilles PET mises sur le marché. Ce chiffre est cohérent avec une information des recycleurs qui citent comme chiffres les plus récents une présence moyenne de 2,5 à 3% de matériaux barrière dans les balles (25 000 à 30 000 ppm).

Il est néanmoins important de souligner que derrière cette moyenne de 2,5% se cachent des pays avec une pénétration plus élevée des bouteilles avec barrière, comme la Belgique [50]. En effet, ce pays est souvent utilisé comme pays de test par les producteurs.

Des 2,9 milliards de bouteilles, il n'y a qu'un peu plus de 20% qui concernent l'Europe de l'Est avec des applications quasi exclusivement pour la bière.

Schönwald Consulting prévoit une croissance de minimum 9% par an du nombre de bouteilles avec barrière. En 2012, il y aurait au moins 4,5 milliards de bouteilles concernées (cf. Figure 4-2).

La répartition de l'utilisation de couches barrières entre les différents produits en 2007 est reprise à la Figure 4-3. Un nouveau secteur qui n'est pas représenté à la Figure 4-3 est celui des flacons en PET pour des applications sauces, ketchup et mayonnaise. Il n'y a pas de barrières pour les bouteilles d'eau plate mais il peut y en avoir pour les eaux vitaminées.

La répartition des différents types de technologies dans les bouteilles avec couches barrière est représentée à la Figure 4-2. Il n'est néanmoins pas possible, avec les données disponibles, de différencier les multicouches selon la nature de la barrière (Nylon ou EVOH), ni selon la présence de scavenger.

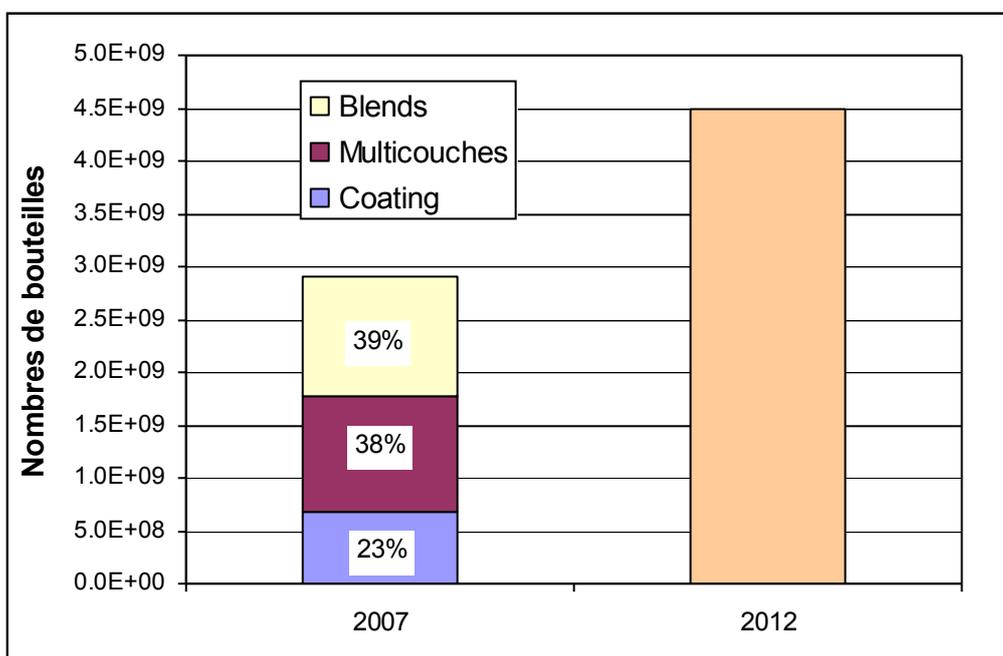


Figure 4-2

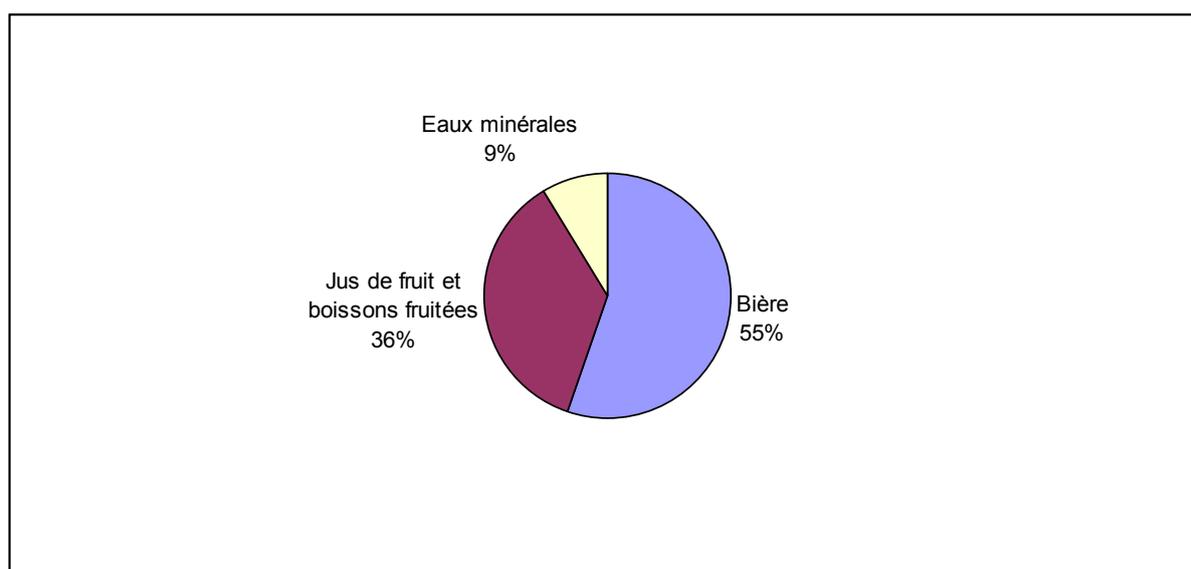


Figure 4-3

Selon Schönwald Consulting, les technologies multicouches vont perdre en part de marché au profit des coatings et des blends. Toutes les personnes contactées (recycleurs, industriels du tri, EPRO) confirment en tout cas la tendance actuelle à la prédominance des blends. Il semble en outre que les barrières multicouches EVOH disparaissent du marché. [53] En effet, l'EVOH doit préférentiellement être utilisé en 5 couches, ce qui rend la co-injection des préformes techniquement plus complexe. [50]

4.3 Effets des technologies barrière sur le recyclage

Les conséquences sur le recyclage de la présence de bouteilles PET avec barrière ont été appréhendées à travers

- Les commentaires des recycleurs et des utilisateurs de PET recyclé
- Les avis remis sur base de tests réalisés par différentes entités selon les protocoles qu'elles ont définis

Les premiers peuvent donner une appréciation sur le gisement total actuel et sur la possibilité de gérer les différents flux afin de livrer du PET recyclé de qualité appropriée pour les applications visées.

Les protocoles de tests demandés sur base volontaire par les producteurs de matériaux barrière ou par les producteurs de boissons permettent d'évaluer chaque technologie selon des critères définis.

4.3.1 Commentaires des recycleurs

La situation actuelle chez les recycleurs et les utilisateurs de PET recyclé est décrite ici sur base notamment des contacts pris avec SITA Recyclage, Artenius et EPBP. [54], [53], [50]

Les sites de régénération fournissant du PET recyclé pour des applications autres qu'en bouteilles ne rencontrent actuellement pas de problème lié à la présence de couches barrière.

Les spécifications des utilisateurs bottle-to- bottle sont formulées dans les cahiers des charges selon

- La teneur en acétaldéhyde
- L'humidité
- La couleur sur granule amorphe selon la mesure LAB*
- Les COV
- Les substances extractibles
- Points noirs sur granules amorphes (voire après, lors de l'injection-soufflage)
- Pourcentage de fines

Selon la décision de l'utilisateur, les valeurs retenues en spécifications correspondent à celles de l'AFSSA pour le contact alimentaire ou sont plus strictes (typiquement le cas des grands minéraliers).

Des difficultés sont actuellement rencontrées pour satisfaire les spécifications couleur. La couleur des granules dépend à la fois de

- La couleur dominante dans les balles (il peut y avoir plus ou moins de bleu)
- La nature et la quantité de matériaux barrières
- La présence d'agents de réchauffe (en anglais, *reheat agents*) qui foncent la couleur des bouteilles.¹⁸

En fonction des exigences à satisfaire dans les cahiers de charges, le recycleur doit gérer de manière très contrôlée et subtile les différents flux afin de les mélanger en vue d'atteindre les spécifications. Les informations sur lesquelles il se base pour qualifier les flux sont :

- La provenance (en fonction du pays notamment)
- Les résultats de test en batch de coloration consistant en un contrôle de couleur suite à un traitement thermique à l'étuve

Cette gestion des flux permet pour le moment de satisfaire les cahiers des charges. Les tendances laissent anticiper un problème à court ou moyen terme vu l'augmentation de la part des bouteilles avec barrière (la valeur minimale de concentration en barrière rencontrée dans les flux les plus purs augmente) et vu la demande croissante pour les applications bouteilles.

¹⁸ Ces additifs sont de plus en plus utilisés afin de capter les rayonnements infrarouges et ainsi réduire les consommations énergétiques lors de la réchauffe de la préforme. Parmi les substances utilisées se trouvent le noir de carbone, les oxydes de fer noirs, le nitrate de titane. Ces additifs posent d'autres problèmes de couleur que les couches barrière mais qui doivent être gérés simultanément.

4.3.2 Les protocoles de tests relatifs au recyclage

4.3.2.1 PRINCIPES DES PROTOCOLES DE TEST

Les principaux protocoles de test mis au point en Europe sont décrits ici.¹⁹

4.3.2.1.1 Petcore

Petcore (PET COntainers Recycling Europe) a établi en 2002 des lignes de conduite pour la réalisation de tests sur l'acceptabilité des matériaux barrière et additifs vis-à-vis des procédés actuels de recyclage des bouteilles PET et de leurs applications. [46] Ce système a été mis en place suite à la perception d'une menace potentielle des nombreux développements technologiques, notamment des couches barrière, sur les filières actuelles de recyclage. Des protocoles spécifiques ont été définis pour chacune des applications suivantes :

- Fibres
- Feuilles et films
- Strapping
- Bouteilles

Par exemple pour l'application bouteille, les tests concernent les étapes suivantes du procédé de recyclage :

- Extrusion des paillettes en granules (pas de granules collants, odeur, fumées)
- Polymérisation à l'état solide (conservation de la cinétique de montée en viscosité)
- Injection et soufflage (absence de problèmes de filtration, pas de déviation au procédé)
- Propriétés de bouteilles :
 - l'apparence est un facteur critique (couleur et transparence) ;
 - l'effet sur la formation d'acétaldéhyde doit être déterminé
 - les propriétés mécaniques sont testées

Les lignes de conduite fournissent, par type d'applications, des spécifications pour l'ensemble des aspects testés. Les tests permettent ainsi de :

- déterminer des valeurs seuils de contenu en barrière dans les paillettes au-delà desquelles la bouteille ne répond plus aux spécifications. Si le taux d'élimination du matériau barrière sur la ligne de régénération est connu, il est possible de déterminer la valeur maximum de concentration en barrière acceptable dans les balles en vue du recyclage dans l'application visée.
- formuler des avis sur l'acceptabilité des technologies testées, éventuellement sous conditions.

4.3.2.1.2 COTREP

En France, le Comité Technique pour le Recyclage des Emballages Plastiques (COTREP) s'intéresse au caractère recyclable des bouteilles et flacons plastiques faisant l'objet d'une collecte sélective. Toutes les composantes de l'emballage sont concernées (corps, étiquette, bouchon, etc.). Le COTREP émet²⁰ :

- des avis généraux qui constituent une base de connaissances à disposition des industriels
- des avis techniques évaluant la recyclabilité d'un emballage particulier (ou de l'un de ses composants) à la demande d'un industriel.

Les mêmes limites d'acceptabilité ont été adoptées dans les tests du COTREP que celles de Petcore, (en tout cas pour l'application bouteille).

¹⁹ Aux Etats-Unis, un programme équivalent est le *Champions for Change Program* de l'Association of Postconsumer Plastic Recyclers (APR). http://www.plasticsrecycling.org/recognition_program/innovations.asp

²⁰ <http://www.cotrep.fr/avis-et-publications/>

4.3.2.1.3 European PET Bottle Platform (EPBP)

La plateforme *European PET Bottle Platform* (EPBP)²¹ a été créée en 2008 pour rassembler au sein d'une même entité les 4 grandes fédérations européennes liées au marché des bouteilles PET :

- ABC (Alliance for plastic Beverage Containers sustainability)
- EPRO (European Association of Plastic Recycling and Recovery Organisations)
- EUPR (European Plastics Recyclers)
- Petcore

Comme les initiatives décrites ci-dessus, l'objectif est d'évaluer les technologies ou les produits et de permettre des innovations sur les bouteilles PET tout en minimisant les conséquences économiques et environnementales pour l'industrie européenne du recyclage PET.

La plateforme a établi de nouveaux protocoles de test pour évaluer le comportement au recyclage des nouvelles technologies d'emballage liées aux barrières, additifs, bouchons, étiquettes, etc. La publication de ces nouveaux protocoles est attendue en 2010.

L'évaluation par l'EPBP se fait sur base volontaire. Elle comporte tout d'abord un Quick Assessment, comprenant des tests facilement et rapidement réalisables et fournissant des résultats tranchés. Si une technologie satisfait à toutes les spécifications fixées par ces tests, elle est réputée compatible avec les filières de recyclage en place. Elle ne doit pas être soumise à d'autres tests. Si l'emballage testé ne satisfait pas à toutes les exigences, il doit être soumis à des tests supplémentaires.

A l'issue de cette procédure de tests, la technologie testée reçoit une évaluation

- « Yes », compatibilité totale avec les filières de recyclage
- « No », incompatibilité totale
- « Conditionnelle »

Etant donné que les protocoles de test n'ont pas encore été publiés, aucun avis n'a encore été rendu selon ceux-ci. Néanmoins, des avis transitoires ont été émis sur base des tests déjà réalisés selon les protocoles Petcore ou autres (cf. Tableau 4-1). La ligne "Barrier" relative aux barrières est discutée cas par cas ci-dessous.

²¹ <http://www.petbottleplatform.eu>

Tableau 4-1 : Recommandations transitoires de l'EPBP concernant la recyclabilité des constituants de la bouteille PET



**Design for recycling guidelines
PET BOTTLES**

		YES	CONDITIONAL ⁽¹⁾	NO
B O D Y (2)	Container	PET		PLA / PVC / PET-G
	Colour	clear / light-blue / green	other transparent colours	opaque
	Barrier	clear plasma coating	external coating / PA (3 layers)	EVOH / PA monolayer blends
	Additives		O ₂ scavengers / UV stabilisers / AA blockers / nanocomposites, etc.	
L A B E L	Direct printing	production or expiry date		other direct printing
	Labels	HDPE / MDPE / LDPE / PP / OPP / EPS (density <1 g/cm ³) / Paper	PET metallised labels	PVC / PS (density > 1 g/cm ³)
	Sleeves	PE / PP / OPP / EPS (density <1 g/cm ³) foamed PET / foamed PET-G	PET	PVC / PS (density > 1 g/cm ³) PET-G / full body sleeves
	Glue ⁽³⁾	no adhesive on body water-soluble adhesive or alkali soluble adhesives (<80°C)		adhesive not removed in water or alkali at 80°C
	Ink	EuPIA Good Manufacturing Practices		bleeding / reactive / hazardous
C A P	Closure	HDPE / LDPE / PP		metal / aluminium / PS / PVC / thermosets
	Closure liner	HDPE / PE+EVA / PP		PVC / EVA with aluminium
	Seals	PE / PP / OPP / EPS / foamed PET		PVC / silicon / aluminium
Other components			HDPE / PP / PET	PVC / RFID / non-plastic

⁽¹⁾ Some materials / bottle components are recyclable under certain conditions. Please check with EPBP, recyclers or recycling organisations.

⁽²⁾ All materials must meet the legal requirements for materials and articles intended to come into contact with food.

⁽³⁾ Ref. EUPR positive glue list

The information contained in this document is for general guidance only. Any details given are intended as a general recommendation based on the best of our knowledge at the time of publication. More tests can be done in future that might change the product/material classification. It does not necessarily guarantee compliance with the different recycling schemes. This is by no means a comprehensive list. Users are therefore advised to make their own enquiries to check for specific and up-to-date information.

4.3.2.2 COATINGS

Selon EPBP, les coatings plasma sont acceptés sans restriction. Les dépôts de carbone amorphe causent néanmoins un léger jaunissement au recyclage. Les dépôts externes sont acceptés sous condition.

Selon Petcore [46], les coatings sont en partie éliminés lors du lavage des paillettes.

4.3.2.3 MULTICOUCHES

Un délaminage des multicouches PA et EVOH peut se produire au cours des étapes de broyage et lavage du processus de régénération. L'élimination partielle des couches délaminées peut avoir lieu lors de la séparation aéraulique, lorsque cette étape existe (cf. 4.4.2.4). ([47],[51] & [62])

Le rendement de cette élimination peut dépasser 90%, ce qui signifie que moins de 10% du PA et ou de l'EVOH reste accroché sur le PET.[50] Le COTREP parle d'un rendement supérieur à 50%. [48] Le test de Petcore sur le Surbond-ETM de Graham parle d'une quasi élimination.[62]

Pour les multicouches à 5 couches, cette élimination de couche barrière s'accompagne aussi d'une perte significative du matériau PET.[46] En effet, dans les configurations à 5 couches, les couches de PET (ou au moins la couche centrale) peuvent être fines au point d'être éliminées lors de la séparation aéraulique. [50]

4.3.2.3.1 Multicouches polyamide

L'avis technique du COTREP sur les multicouches nylons consiste en une acceptabilité pour les applications fibres mais pas pour les bouteilles et les feuilles transparentes incolores. Un fort jaunissement des plaques et des préformes a été constaté et constitue le principal facteur limitant.

Selon les guidelines transitoires de l'EPBP et comme stipulé par exemple dans l'avis de Petcore pour la technologie de Mitsubishi,[51] , les multicouches (3 couches) avec Nylon sont compatibles avec le recyclage sous les conditions suivantes :

- Nombre de couches limité à 3 et délaminage ne pouvant pas être empêché par l'ajout de molécules de liaison
- Part de marché maximum (par producteur)
- Concentration maximale de la (des) couche(s) barrière
- Présence d'une bonne séparation aéraulique au cours du procédé

La présence résiduelle de nylon est une source de jaunissement. Un mécanisme de jaunissement du Nylon MXD6 est décrit dans la littérature. [58] La coloration proviendrait d'imines conjuguées formées par réaction d'acétaldéhyde (produit de dégradation du PET) avec les fins de chaîne amine du polyamide. Le rôle de l'acétaldéhyde est confirmé dans la description de deux brevets, notamment par le fait que le jaunissement est atténué en cas de présence de scavenger à acétaldéhyde.[59] et [60] En outre, un brevet mentionne l'aggravation du jaunissement en présence de cobalt qui peut être un composant de scavenger à oxygène utilisé dans les bouteilles PET. [59]

L'influence du scavenger doit être davantage étudiée afin de tirer des conclusions sur le comportement des barrières avec et sans scavengers. Ceux-ci ne semblent pas poser de problème au niveau de la coloration et des caractéristiques de mise en œuvre du PET. [50] Par contre, des études sont en cours afin d'étudier les réactions potentielles entre le PET et les scavengers lors du recyclage et leurs conséquences sur l'aptitude au contact alimentaire du PET.

4.3.2.3.2 Multicouches EVOH

Selon les guidelines actuelles de l'EPBP, l'utilisation de l'EVOH est à proscrire, quelle que soit sa configuration. L'avis négatif de l'EPBP provient du jaunissement très rapide de l'EVOH, à savoir qu'il intervient à partir de concentrations beaucoup faibles que pour le polyamide.

Le jaunissement en présence d'EVOH s'explique par la dégradation thermique de celui-ci. En effet, les températures de mise en œuvre du PET (lors de l'extrusion des granules) et de polymérisation à l'état solide sont respectivement de l'ordre de 260 à 280 °C et vers 220- 230 °C. A ces températures, l'EVOH est bien au-delà de sa température de fusion (182°C) et se dégrade. Cette dégradation consiste notamment en la transformation des groupes hydroxyles de l'alcool vinylique en groupes carbonyles et en doubles liaisons, ces dernières étant responsables de la couleur jaune. [61]

En 2007, Petcore a néanmoins déclaré recyclable en application bouteille et fibre les multicouches EVOH de la technologie SurShot™ et le matériau SurBond-E™ de Graham Packaging Company.[62] Cet avis a été émis en raison de la quasi-élimination de la couche barrière par délaminage et aspiration aéraulique.

4.3.2.4 BLENDS POLYAMIDE

Selon l'EPBP, les monocouches avec polyamide (blends) ne sont pas compatibles avec les filières actuelles de recyclage.

Le COTREP a remis un avis négatif sur l'utilisation d'une monocouche avec scavenger pour des applications en bouteilles claires ou incolores et un avis favorable pour utilisation dans des bouteilles colorées. [63]

Dans les configurations monocouches, la teneur en polyamide de 1 à 5% dans les bouteilles avec barrière est trop élevée pour que les spécifications en termes de couleur puissent être rencontrées. En effet, contrairement aux cas des multicouches où le PA peut être en partie éliminé suite au délaminage, toute la teneur en PA des bouteilles concernées se retrouve dans les paillettes en sortie. Ces concentrations causent un jaunissement excessif suivant le mécanisme décrit ci-dessus (cf. 4.3.2.3.1).

4.3.3 Modélisation d'une accumulation pour les applications bottle-to-bottle

Cette section a pour objet d'évaluer l'accumulation possible de couches barrière dans les bouteilles, à la suite de boucles successives de recyclage en bottle-to-bottle. La concentration supplémentaire apparaissant ainsi en moyenne sur l'ensemble des bouteilles du marché est calculée. La simulation

prend en compte les paramètres suivants, avec les valeurs illustratives suivantes (en italique dans le Tableau 4-2) :

- Taux moyen d'incorporation de RPET dans les bouteilles : trois niveaux, dont le niveau inférieur de 6% s'approche de la valeur actuelle du marché européen ;
- Part de bouteilles avec barrière dans le marché considéré : la valeur prise de 5 % est supérieure à la valeur actuelle de l'ordre de 2,5 % ;
- Concentration en barrière dans les bouteilles avec barrière prise selon la borne supérieure des concentrations actuelles.

Par hypothèse, le calcul ne prend pas en compte d'élimination de la couche barrière lors du recyclage. Il est donc davantage adapté aux barrières blends plutôt qu'aux multicouches.

Les résultats ci-dessous montrent l'augmentation en valeur absolue de la concentration en couches barrière dans les bouteilles ainsi que l'augmentation relative par rapport au niveau moyen volontairement mis. Les résultats absolus dépendent des trois paramètres tandis que l'augmentation relative (dernière colonne) ne dépend que du taux moyen d'incorporation. Les pourcentages de la dernière colonne peuvent donc être utilisés pour simuler l'accumulation à partir d'autres valeurs de part de bouteilles avec barrière et de concentration en barrière.

Même si l'augmentation relative de concentration en couche barrière reste faible pour des taux moyens d'incorporation jusque 10%, il est difficile de dire si les concentrations obtenues par accumulation peuvent poser problème parce que :

- Il n'y a pas de valeur limite acceptable déterminée (d'autant que cette valeur dépend fortement de la nature et de la configuration de la couche barrière)
- Les valeurs présentées ne sont que des moyennes tandis que des variabilités importantes apparaissent en pratique en fonction des spécificités locales des marchés étudiés ou de la provenance des flux traités par certains recycleurs et peuvent être sources de problèmes.

Tableau 4-2 : Simulation de l'accumulation de couches barrière

<i>Taux moyen d'incorporation de RPET</i>	<i>Part de bouteilles avec barrière</i>	<i>Concentration en barrière</i>	Concentration moyenne volontaire dans les bouteilles (% du poids de la bouteille)	Extrapolation de la concentration moyenne dans les bouteilles (% du poids de la bouteille)	Augmentation relative de concentration due à l'accumulation par rapport à la concentration moyenne volontaire dans les bouteilles
6%	5%	5%	0.015%	0.016%	6%
10%	5%	5%	0.025%	0.028%	11%
25%	5%	5%	0.063%	0.083%	33%

4.4 Solutions pour le recyclage de PET avec couches barrière

4.4.1 Eco-conception

Une manière de résoudre le problème du recyclage des bouteilles PET avec matériaux barrière à moyen terme est d'encourager l'écoconception.

D'une part, la première question à se poser en termes d'écoconception est celle de la réelle nécessité d'une couche barrière pour le produit considéré.

- L'utilisation d'une couche barrière peut être évitée par l'augmentation de l'épaisseur de la bouteille PET. Dans ce cas néanmoins, les impacts environnementaux de la surépaisseur doivent être mis en balance avec les bénéfices liés à l'absence de couche barrière.
- L'évitement d'une couche barrière non-compensé par une surépaisseur constitue néanmoins une solution bénéfique possible dans un certain nombre de cas. Un exemple nous a été rapporté. [50] Un producteur de boisson gazeuse envisageait d'utiliser une couche barrière sur des petites bouteilles PET de 20 cl. En effet, en raison du rapport plus élevé surface/volume des petites bouteilles, les pertes de CO₂ dans ces bouteilles étaient

excessives par rapport aux pertes dans les plus grands volumes. Notamment en raison des informations reçues sur les limites posées au recyclage par les couches barrière, le producteur a adopté une autre stratégie que celle des couches barrière. Etant lui-même utilisateur de PET recyclé dans des applications bottle-to-bottle, il ne voulait pas mettre en péril cette filière. Une étude de marché a été réalisée pour connaître la durée moyenne entre la mise en magasin et la consommation de la boisson en petits volumes. Des durées courtes ont été observées. La stratégie adoptée a été de réduire de 6 mois la durée de validité de son produit plutôt que de garantir à tout prix des validités équivalentes à celle des grands volumes, par l'utilisation de couches barrière.

D'autre part, lorsqu'une couche barrière doit être utilisée, il s'agit que les producteurs choisissent leurs technologies barrière parmi celles qui reçoivent une évaluation favorable dans les tests de recyclabilité (ou avec des conditions qui peuvent être satisfaites).

Néanmoins, le système volontaire actuel ne semble que partiellement porter ses fruits car malgré les recommandations négatives à l'égard des blends, ces technologies continuent de gagner en parts de marché. La forte réduction observée de l'utilisation des multicouches EVOH va dans le même sens que les recommandations de EPBP. Cette réduction est néanmoins davantage à attribuer aux difficultés de co-injection en présence de 5 couches, configuration préconisée avec le matériau barrière EVOH. [50]

A plus long terme, cette démarche de validation par protocoles de test vise à pousser l'innovation et idéalement à apporter une solution qui satisferait l'ensemble des marchés du PET et qui soit compatible avec toutes les applications du PET recyclé.

Des développements ont été réalisés en vue d'utiliser des nano-composites. Les polymères nano-composites sont des polymères dans lesquels sont dispersés de façon homogène quelques pourcents de feuillets d'argile par exemple.[64] [65] La perméabilité aux gaz est fortement réduite en raison du chemin tortueux à parcourir entre les feuillets. Néanmoins, l'utilisation de nanomatériaux est actuellement freinée par des risques toxicologiques soupçonnés et faisant l'objet d'études. En outre, un producteur affirme que les performances barrière ne sont pas bonnes sur les bouteilles.[53] Des problèmes de transparence sont rencontrés. [50] Enfin, le comportement au recyclage n'est pas bien connu.

D'autres développements sont par ailleurs en cours. Par exemple, un producteur va sortir fin 2010 une nouvelle technologie monocouche à base d'un autre polymère que le nylon. [53] Ce développement a néanmoins été davantage motivé par l'évitement d'un aspect visuel métallique gênant des bouteilles actuelles plutôt qu'en raison des problèmes causés par les couches barrière. Mais il devrait aussi se comporter mieux en termes de couleur que le nylon.

A défaut d'être compatible avec toutes les applications du PET recyclé, les compositions des couches barrière pourraient être uniformisées de façon à ce que ces bouteilles puissent être isolées et traitées séparément, vers des applications bottle-to-bottle spécifiques, sans contrainte de couleur.

4.4.2 Techniques de tri

Cette section vise à évaluer dans quelle mesure le PET présentant des couches barrières identifiées comme problématiques pourrait être extrait du flux à recycler, soit sous forme de bouteille, soit sous forme de paillettes.

Les méthodes possibles de tri discutées ici sont :

- Tri manuel sur base de la marque (ou d'une suspicion en l'absence d'étiquette)
- Tri optique, vraisemblablement à exclure en raison de la difficulté d'identification des couches barrières toujours présentes en trop faibles concentrations dans le PET (< 10%) [47]
- Tri sur base de la reconnaissance d'un marqueur spécifique associé aux couches barrières
- Séparation aéraulique

Les performances de séparation peuvent être évaluées à l'aide de deux indicateurs :

- La pureté : la part (% en poids) du matériau d'intérêt dans la fraction séparée
- Le rendement (ou efficacité): le ratio de la quantité du matériau à purifier qui se retrouve dans la fraction séparée par rapport à la quantité présente dans le flux de départ ; en d'autres mots, le rendement est faible lorsque beaucoup de bonnes bouteilles sont sorties du flux de PET à recycler.

4.4.2.1 TRI MANUEL

Le tri manuel est actuellement pratiqué sur bouteilles chez les recycleurs. Il consiste à donner des consignes de tri négatif aux opérateurs afin d'extraire les bouteilles qui sont supposées causer un problème. Les couches barrière n'étant pas visibles à l'œil nu, les consignes formulées portent principalement sur des marques et, en l'absence d'étiquettes, sur des volumes, des produits (types de boisson) ou des formes.

Les performances de ce type de tri sont limitées :

- La pureté du flux de bouteilles PET après tri n'est pas très élevée en raison :
 - Du caractère non exhaustif des consignes de tri qui peuvent être données; en effet, on ne connaît pas a priori la composition de toutes les bouteilles mises sur le marché
 - Des évolutions rapides des emballages utilisés pour un produit ; le type d'emballages utilisé pour un produit d'une marque peut changer dans des délais courts
 - De la difficulté de concentration des opérateurs (ou compromis concentration / rapidité)
- Le rendement peut être faible en raison de consignes trop sévères (par exemple, tous les volumes de 33 cl et moins doivent être extraits); il peut donc y avoir beaucoup de bonnes bouteilles dans les "groupes à risque" faisant l'objet de la consigne de tri.

4.4.2.2 TRI AUTOMATIQUE

Les tris automatiques se retrouvent sur de nombreuses lignes de régénération actuelles du PET. Ils peuvent servir au :

- tri couleur et matière sur bouteilles, visant à refuser les bouteilles colorées (hors bleu clair) et le PVC et à éliminer les éventuels contaminants résiduels (PETG, PS, EPS, PE, PP), les métaux et les cartons à boisson; le tri optique est en concurrence avec le tri manuel pour cette étape;
- tri sur paillettes servant à améliorer encore l'élimination des couleurs et, pour certaines technologies, à réduire le niveau résiduel de PVC à des teneurs pouvant descendre jusque 20 ppm; des puretés élevées peuvent être atteintes mais les rendements du tri sur paillettes sont en général mauvais ; En effet, lors de la détection d'une paillette non-désirée, celle-ci est éjectée par soufflage, de même que beaucoup de bonnes paillettes (typiquement 9 pour 1 mauvaise); En effet, en règle générale, le tri sur paillettes sert à affiner le tri après une première étape en amont.

Ces tris sont principalement basés sur l'utilisation de capteurs fonctionnant dans les longueurs d'onde visibles ou infrarouge proche (NIR) ou selon une détection par rayons X (RX).

Parmi les technologies basées sur ces trois types de rayonnement, seules les **techniques par RX** sont capables de séparer les couches barrière. Néanmoins, le coût de cette technologie est trop élevé pour pouvoir être amorti sur une ligne de régénération du PET, dans les conditions technico-économiques actuelles.

Les technologies **optiques et infrarouges** actuellement disponibles sur le marché ne permettent pas de détecter les matériaux barrière.

Les grandes sociétés qui développent les technologies de tri automatique s'intéressent à la question du tri des couches barrière utilisées sur le PET (entretiens avec les sociétés Pellenc ST et Titech). Ce marché est à lui seul trop petit pour justifier le développement de technologies spécifiques. Le tri des couches barrière fait plutôt l'objet d'un développement supplémentaire qui vient se greffer sur un programme destiné a priori à d'autres fins.

Titech mise sur le développement de capteurs permettant de trier plusieurs nouvelles substances non-désirées et de traiter des flux différents d'aujourd'hui, dans la perspective notamment en France de l'élargissement des collectes à d'autres emballages plastiques que les bouteilles et flacons. La société devrait annoncer en 2010 si le capteur développé convient pour le tri des couches barrière sur PET. Si c'est le cas, elle pourrait ainsi mettre une technologie à disposition peu de temps après.

Pellenc ST s'est lancé dans un important programme de développement de tri "universel", appelé "Tri+".²² Il devrait notamment "*déboucher à l'horizon de 2 ou 3 ans sur une technologie permettant de*

²² Les Echos, 10/02/2010 p18

séparer les multicouches bouteilles nylons et EVOH ainsi que les blends à l'échelle de la bouteille et de la paillette".

Dans tous les cas, et vu les teneurs importantes et croissantes des barrières sur bouteilles PET, le tri devra se faire en combinant le tri sur bouteille et le tri sur paillette.

Un tri sur paillettes basé sur la couleur pourrait aussi être envisagé en aval d'un traitement thermique qui causerait la coloration des paillettes contenant du PA ou de l'EVOH. [50]

Il reste néanmoins à ce jour beaucoup de questions sur les performances qui caractériseront toutes ces technologies en développement ainsi que sur leur adéquation pour chacune des configurations et natures de couches barrière actuelles, à savoir les mélanges (avec PA) et les multicouches (PA ou EVOH), voire sur les systèmes futurs.

4.4.2.3 TRI SUR BASE D'UN MARQUEUR

Ce paragraphe discute de la possibilité de marquer les bouteilles comportant des couches barrière à l'aide d'un marqueur qui puisse être facilement détecté chez le recycleur. Cette solution pose néanmoins plusieurs problèmes:

- Exigences techniques auxquelles le marqueur doit satisfaire de façon simultanée
 - Il ne doit pas gêner le recyclage
 - Il doit être facilement détecté par les capteurs infrarouges ou NIR
 - Il doit pouvoir être éliminé lors du recyclage (notamment parce que le PET recyclé à partir des bouteilles avec barrière doit pouvoir être incorporé dans des bouteilles colorées)
- Cela implique de définir les critères de non-recyclabilité ou de réaliser des tests sur toutes les bouteilles mises sur le marché
- Difficulté de faire accepter par les producteurs le marquage de leurs bouteilles, que ce soit sur base volontaire ou contraignante

4.4.2.4 SEPARATION AÉRAULIQUE

Le transport aéraulique des paillettes (en anglais, *air elutriation*) a pour but d'éliminer les fines. Cette étape n'est pas présente sur toutes les lignes de recyclage. En raison de sa contribution à la purification du flux, cette étape est parfois appelée tri aéraulique (notamment dans les fiches du COTREP [47] et [48]).

La séparation aéraulique prend place dans un tuyau vertical dans lequel circule un flux d'air (à vitesse contrôlée). Les paillettes sont alimentées en haut et rencontrent le flux d'air à contre courant. Les particules plus légères sont récupérées en haut tandis que les paillettes sortent en bas.

Cette technique ne permet pas d'éliminer des paillettes contenant du polyamide en blend. Par contre, elle permet d'éliminer les couches barrière présentes sous la forme de multicouches, avec 3 ou 5 couches PA ou EVOH (cf. 4.3.2.3) et délaminées au cours des étapes précédentes de régénération.

Nous ne disposons néanmoins pas d'informations sur la part des lignes de régénération qui sont équipées de ce système.

4.4.3 Choix d'applications du RPET moins exigeantes

Comme la couleur semble être le problème majeur rencontré lors du recyclage de bouteilles PET avec barrière, il est possible de distinguer deux groupes d'applications, celles qui ont des exigences de couleur et celles qui n'en ont pas.

Les applications sensibles à la couleur sont celles en couleur cristal ou claire :

- Bouteilles cristal ou claires
- Les feuilles claires

Ces deux applications sont justement celles qui nécessitent une étape de polymérisation à l'état solide. Or ce traitement thermique accentue les problèmes de dégradation des matériaux barrière.

Les applications peu sensibles à la couleur sont les applications colorées ou invisibles :

- Fibres de rembourrage
- Fibres visibles

- Bouteilles colorées (ambre, verte, rouge)
- Feuilles colorées
- Strapping

En cas de fort jaunissement, toutes les applications pourraient être affectées, à l'exception des fibres de rembourrage non visibles, voire le strapping.

Concentrer les couches barrière vers certaines applications moins sensibles peut être une solution, mais avec les limites importantes suivantes:

- le problème risque de se poser à nouveau dans un délai de quelques années. En effet, bien que les applications peu sensibles représentent encore plus de la moitié des débouchés du PET recyclé (cf. Tableau 2-5), elles pourraient arriver à saturation au cours des prochaines années, à l'exception des bouteilles colorées qui représentent plutôt un marché en croissance pour lequel les taux d'incorporation de PET recyclé peuvent être élevés, supérieurs à 50% dans les bouteilles de bière contenant du recyclé.[56] L'excédent de bouteilles à problème ne pourrait néanmoins pas être recyclé dans les bouteilles non-colorées.
- il faut en outre bien s'assurer au cours des tests effectués que d'autres propriétés que la couleur ne pourraient pas affecter les applications moins exigeantes par des concentrations élevées en matériaux barrière.

Pour orienter les bouteilles problématiques vers les applications moins exigeantes, les techniques de tri suivantes peuvent être utilisées :

- A court terme, en l'absence de tri automatique : donner des consignes de tri manuel encore plus strictes de façon à ne garder que les bouteilles d'eau, qui ne posent pas de problème de couches barrière;
- En cas de disponibilité future, utiliser des techniques de tri automatique,

Réduire la part d'incorporation dans les bouteilles qui consomment effectivement du recyclé (par exemple de 25% à 15%) peut aussi être une possibilité à court terme.

4.5 Conclusions

Le gisement des bouteilles avec couches barrière est en croissance. Il représente en moyenne 2,5% des bouteilles PET en Europe 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 les technologies blends posent le plus de problèmes au niveau du recyclage car le matériau barrière ne peut pas être séparé, comme c'est partiellement le cas lors de la délimination des multicouches. "

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 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, on peut privilégier les filières avec applications hors bouteilles et, pour les installations destinées au bottle-to-bottle, utiliser le tri manuel et avoir une gestion optimale des lots 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 d'eau.
- 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
 - Soit qui ne posent pas de problèmes au recyclage
 - Soit qui soient uniformisées de manière à ce qu'elles puissent être plus facilement isolées, traitées séparément et recyclées vers des applications soit moins exigeantes, soit en boucle fermée (par exemple: si c'est une technologie blends et que la couleur n'est pas limitante, les bouteilles peuvent être réutilisées en blends - hormis le fait que les scavengers ne sont plus actifs).

Les solutions mentionnées ici sont bien des solutions potentielles. Le choix des solutions à apporter au problème des couches barrière est de toute façon influencé par les autres difficultés rencontrées par les filières de recyclage du PET, par exemple la présence de sleeve en PVC ou d'agents de réchauffe.

4.6 Références

[46] PETcore News n°2, Octobre 2002

[47] COTREP - *Avis Général GENERALITES MULTICOUCHES DANS LE PET* / FT 36 (février 2008)

[48] COTREP - *Avis Général Impact des multicouches PET/Nylon* FT 37 (février 2008)

[49] EPBP. Technical meeting, 23 Juin 2008

<http://www.petbottleplatform.eu/downloads/public/EPBP%20Recycling%20guidelines%20PET%20bottles.pdf>

[50] Vossen A., Plarebel et EPRO. Communications privées (décembre 2009 et juin 2010)

[51] Mitsubishi & Nanocor, Multilayer containers featuring Nano-Nylon MXD6 barrier layers with superior performance and clarity, www.nanocor.com/tech_papers/NOVAPACK03.pdf

[52] Petcore News, 13 June 2008, <http://www.petcore.org/content/06132008-barrier-pet-bottles-grow-9-year>

[53] Degroote L. (Artenius), communication privée, mai 2010

[54] Margotin C. (SITA Recyclage), communication privée, mars 2010

[55] EPBP. Recycling guidelines PET bottles (Technical meeting, 23 June 2008)

<http://www.petbottleplatform.eu/downloads/public/EPBP%20Recycling%20guidelines%20PET%20bottles.pdf>

[56] Desoutter L. (SIDEL), communication privée mars 2010

[57] EUPR Press release. Limited approval to use Mitsubishi gas chemical's nylon mxd6 in multilayer containers with no tie layer or adhesive for bottle to bottle applications up to a maximum of 2% of the collected bottle stream, 4 November 2008

[58] Bandi S. et al. The mechanism of color generation in poly(ethylene terephthalate)/polyamide blends. *Polymer Degradation and Stability* 88 (2) 341-348 (2005)

[59] Kemmish et al. IPC8 Class: AC08K520FI ; USPC Class: 524217

[60] Knudsen R. IPC8 Class: AB32B100FI USPC Class: 428402

[61] Lagaron et al. *Degradation of high barrier ethylene-vinyl alcohol copolymer under mild thermal-oxidative conditions studied by thermal analysis and infrared spectroscopy*, *Polymer International*, Volume 50 (6): 635-642 (2001)

[62] Petcore News 22 March 2007. Petcore endorses recyclability of SurBond-E™ barrier material

[63] COTREP Avis technique VLP 08-01

[64] Brody A.L. Nanocomposite Technology in Food Packaging. *Foodtechnology* 10.07 p80 (www.ift.org)

[65] de Azeredo H.M.C. Nanocomposites for food packaging applications. *Food Research International* 42: 1240-1253 (2009)

5. Etude de cas n°3: Contamination de l'acier par le cuivre

5.1 Introduction

Grâce (notamment) à la transcription des directives européennes n° 2000/53/CE relative à la dépollution et au recyclage des VHU et n° 2002/95-96/CE relatives à la dépollution et au recyclage des déchets d'équipements électriques et électroniques, le flux d'acier recyclé augmente en volume et en proportion par rapport à l'acier consommé en Europe.

Depuis les années 1960, la proportion de cuivre dans les ferrailles augmente (issu majoritairement des VHU et légèrement des DEEE). La présence de plus en plus de pièces électriques dans les voitures a entraîné cette contamination des flux d'aciers à recycler par le cuivre (fils, alternateurs,...).

Un acier recyclé avec une trop forte proportion de cuivre pose des problèmes lors de la mise en œuvre. Ses propriétés sont modifiées et notamment sa ductilité. L'altération de sa qualité ne permet plus d'utiliser cet acier dans les étapes de mise en œuvre d'acier plat telles que la carrosserie de voiture, l'emballage, etc. La fissuration à chaud est le problème majeur de la mise en œuvre d'acier contaminé au Cu.

Les problématiques de la contamination du cuivre mais surtout de l'accumulation du cuivre sont montées en puissance avec l'augmentation de la part des ferrailles issues de l'automobile.

Une fois piégé dans l'acier, le cuivre ne peut plus être séparé. L'ajout de cuivre par les ferrailles "contaminées" mène donc à un phénomène d'accumulation.

Aujourd'hui, l'ensemble de la filière est sensibilisée à cette problématique et de nombreuses pistes d'actions sont mises en place pour contrôler cette contamination.

Par ailleurs, le cuivre dilué dans l'acier n'est plus disponible pour des utilisations comme cuivre pur. Cette problématique concerne donc également la gestion de la ressource cuivre en général.

5.2 Caractérisation du gisement: nature et amplitude de la contamination

5.2.1 Gisement d'acier et de ferrailles

La Figure 5-1 présente le tonnage annuel de la production d'acier totale (vierge + recyclé) et d'acier recyclé en Europe.

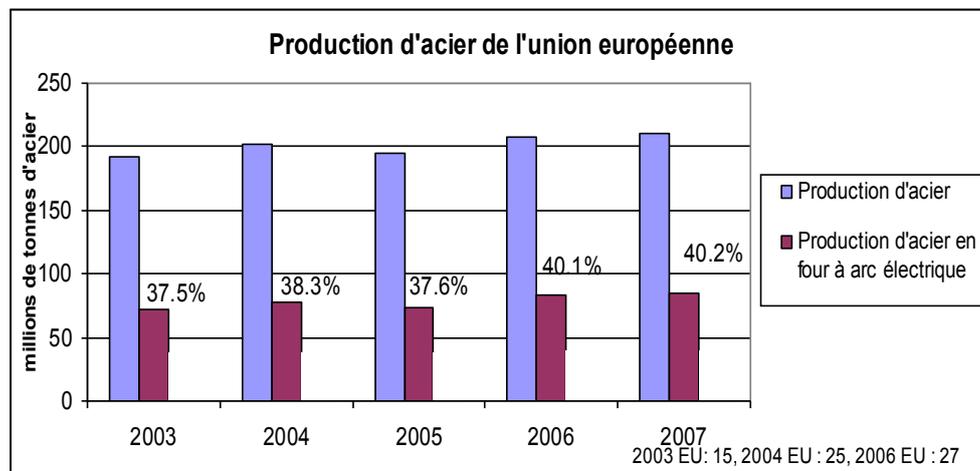


Figure 5-1 Production européenne d'acier (dont l'acier produit en four à arc électrique)
Source: [76]

La production d'acier en four à arc électrique utilise uniquement :

- des ferrailles de recyclage des producteurs d'acier
- des ferrailles issues du recyclage de déchets (VHU, métallurgie, DEEE,...)

Selon EUROFER, les aciéries européennes ont acheté 88 millions de tonnes de ferrailles en 2007 (la balance commerciale de ferrailles est bénéficiaire d'environ 5 millions de tonnes).

La Figure 5-2 présente les flux de recyclage d'acier et de ferrailles recyclées en 2006 en France. (Source:[67])

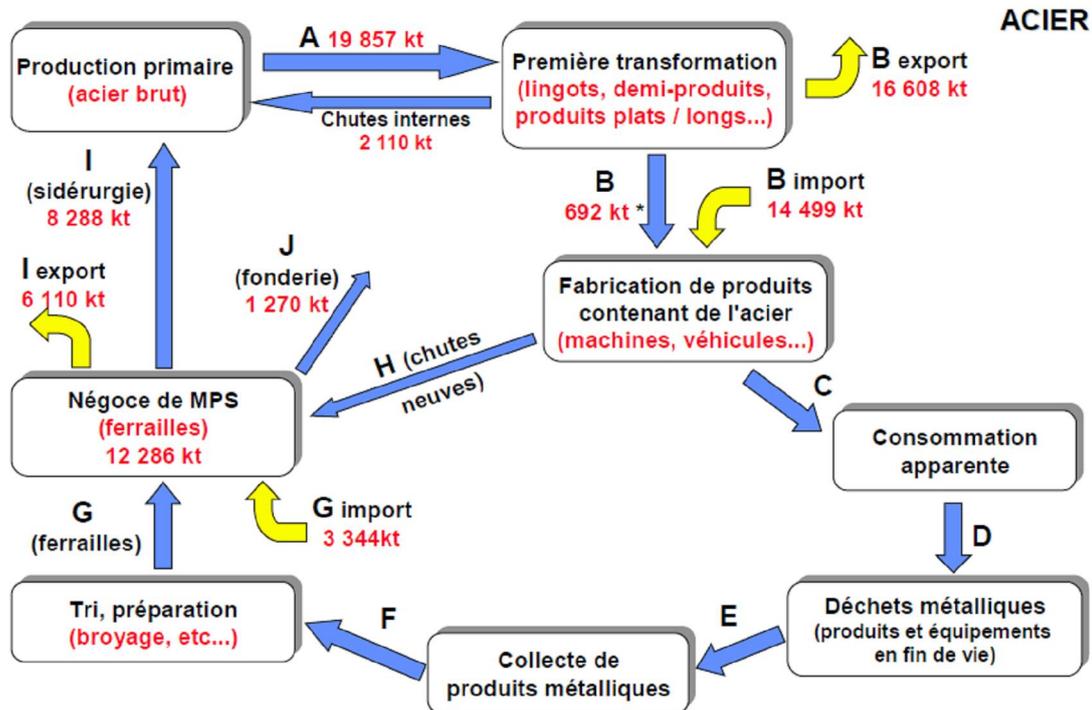


Figure 5-2 Production d'acier et ferrailles recyclées en France

Le taux d'utilisation des ferrailles, à savoir : 8,3 tonnes recyclées / 19,9 tonnes produites, est de 41,7% pour l'année 2006. Ce taux ne prend pas en compte le recyclage interne. Ce ratio varie très peu autour de 40 % depuis plusieurs années. Ce taux peut paraître très bas mais il reflète la longue durée de vie des produits en acier qui sont recyclés bien après avoir été produits. Dès lors, comme le marché est en croissance, le potentiel de recyclage correspond aux ventes de nombreuses années avant (la durée de vie d'une voiture est entre 7 à 15 ans).

L'effet positif de ce taux apparent de recyclage assez bas est la dilution des ferrailles dans de la matière vierge. De ce fait, il y a une dilution des éléments traces des ferrailles.

La Figure 5-3 décrit les origines des ferrailles collectées en France en 2002. Aucune donnée plus récente fiable n'est disponible. Chacun de ces flux ayant un taux de recyclage supérieur par rapport à 2002, il est certain que les parts relatives des emballages, des DEEE et des VHU ont augmenté.

Par exemple, le BRGM (bureau de recherches géologiques et minières) estime que les VHU représentent aujourd'hui 25 % de l'apport de ferraille en France.

5.2.2 Caractéristiques des ferrailles et pourcentage de cuivre

Le marché européen des ferrailles est guidé par le référentiel européen : "EU-27 Steel Scrap Specification" publié par l'EUROFER/EFR depuis 1996 [73].

Ce référentiel permet aux fournisseurs et aux acheteurs de s'entendre sur les qualités de la ferraille. La valeur de la ferraille est alors fonction de la teneur en fer, la quantité d'éléments résiduels (dont le cuivre) et les impacts sur l'environnement de la combustion des éléments traces (tels que les tissus, élastomères, métaux lourds).

Le Tableau 5-1 présente les quantités de cuivre limites (en pourcentage de la masse totale) pour chaque catégorie de ferrailles présente dans le référentiel.

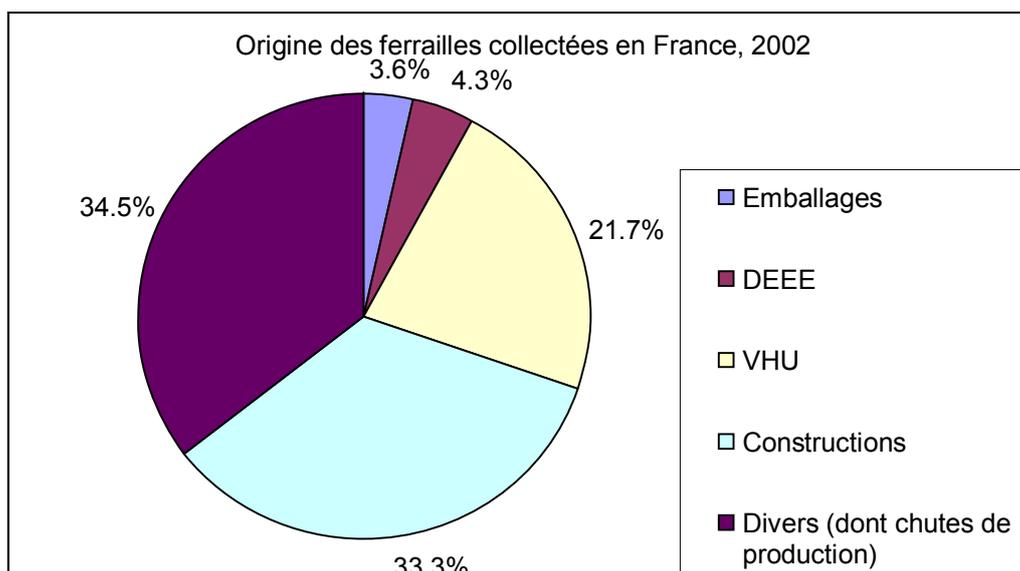


Figure 5-3 : Origines des ferrailles collectées en France en 2002 (Source:[69])

Tableau 5-1 : Catégories de ferrailles du référentiel européen EUROFER / EFR et les limites des quantités de cuivre correspondantes

Carbon Steel Scrap Specifications				
Category	Specification	Aimed Analytical Contents (residuals) %		
		Cu	Sn	Cr, Ni, Mo
Old Scrap	E3	≤0,250	≤0,010	Σ≤0,250
	E1	≤0,400	≤0,020	Σ≤0,300
New Scrap	E2	Σ≤0,300		
	E8	Σ≤0,300		
	E6	Σ≤0,300		
Shredded	E40	≤0,250	≤0,020	
Steel turnings	E5H	Prior Chemical Analysis could be required		
	E5M	≤0,400	≤0,300	Σ1,0
High Residual Scrap	EHRB	≤0,450	≤0,300	Σ≤0,350
	EHRM	≤0,400	≤0,300	Σ1,0
	E46	≤0,500	≤0,700	
Stainless and Special (High Alloy) Steel Specifications				
Alloyed Scrap	LA, MA, SS, HA	<0,500	<0,03	
Alloyed Steel Scrap Turnings	AT	<0,500	<0,03	
Alloyed Foundry Steel Scrap	AF	≤5	≤0,03	
Special Alloyed Steel Scrap	SA	≤5	≤0,03	

Les ferrailles de VHU et de DEEE broyés se retrouvent dans la catégorie E 40. C'est essentiellement pour cette catégorie que le dépassement du taux de cuivre est un problème majeur.

En effet pour les autres catégories :

- Les seuils de taux de cuivre sont supérieurs (EHRB, EHRM, E46)
- ou les sources de contamination par du cuivre sont moins concentrées (ex: E5H et E5M : ferraille issues de tournures)

L'équivalent aux USA de la catégorie européenne E 40 est la catégorie ISRI 210/211.

La circulaire exprimant les spécificités des ferrailles utilisées aux USA ne présente aucun taux maximum de cuivre. Cette circulaire publiée par l'ISRI (Institute of Scrap Recycling industries) précise des taux maximums de contamination pour :

Nickel	< 0,45 %
Chrome	< 0,20 %
Molybdène	< 0,10 %
Σ Ni, Cr, Mo	< 0,60%
Manganèse	< 1,65 %

La seule étude disponible estimant le taux de cuivre dans les ferrailles est une étude menée au Japon en 1996.

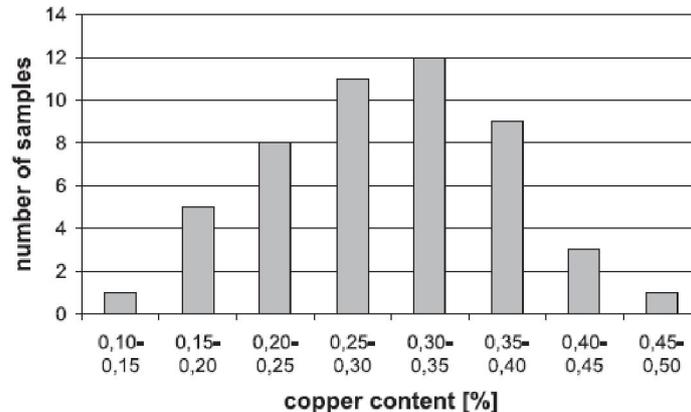


Figure 5-4 : Concentration en cuivre des ferrailles japonaises en 1996 (Source: [78])

Selon les chiffres de cette étude, le taux moyen de cuivre dans les ferrailles japonaises (en 1996) était de 0,297%. En moyenne, ces ferrailles ne respectaient donc pas le standard européen E40 (Cu <0,25%).

5.2.3 Origine du Cuivre présent dans les ferrailles

Selon la FFA (fédération française de l'acier), le cuivre présent dans les ferrailles provient essentiellement des VHU et plus légèrement des DEEE. En effet,

- La filière VHU est la plus concernée car :
 - C'est un des plus gros flux de ferrailles : 5 fois le tonnage de DEEE ([69]).
 - Le cuivre a été utilisé de plus en plus pour les fils électriques, les moteurs électriques et les produits électroniques des voitures. Aujourd'hui une voiture contient entre 20 et 60 moteurs électriques, allant même jusque 120 dans certains modèles. En 2003, le cuivre représentait environ 7,2 kg par VHU soit une proportion de 0,8% par VHU (avec un poids moyen de VHU de 930 kg (Source: [66]) Ce pourcentage est estimé à 1,5 % dans l'étude VITO [81].
 - Le mode historique de recyclage des VHU par broyage de gros volume ne permet pas de séparer très finement les ferreux et non ferreux par voie magnétique, surtout lorsque ces derniers sont mécaniquement solidaires.
- Le flux DEEE a un poids beaucoup plus faible que celui des VHU et les étapes de démantèlement et de démontage sont plus poussées et permettent de mieux séparer les flux.

Cependant, le taux de cuivre présent dans une tonne de DEEE à broyer est souvent plus fort que le taux de cuivre présent dans une tonne de VHU à broyer (Source : SITA recyclage).

Figure 5-5 : Coefficients de répartition des fractions les plus importantes des DEEE vers les 4 principaux flux de sortie d'un broyeur de DEEE avec séparation des ferreux et non ferreux (Source: [74])

[%]	Ferro	Aluminium	Copper	Residue
Aluminium	0.50%	82.58%	4.92%	12.00%
Copper	0.94%	5.00%	78.21%	15.85%
Ferro	95.00%	1.00%	1.00%	3.00%
Glass	0.56%	0.56%	10.00%	88.89%
Plastics	1.21%	0.50%	10.00%	88.29%
Ag	0.99%	0.99%	84.92%	13.10%
Au	0.99%	0.99%	80.00%	18.02%
Pb	1.18%	1.18%	80.00%	17.65%
Others	0.69%	0.67%	35.29%	63.35%

Selon Ecoinvent, moins de 1% du cuivre présent dans les DEEE se retrouve dans le flux des ferrailles.

Il n'existe pas de composition moyenne pour les DEEE. Toutefois, le rapport entre la quantité de fer sur la quantité de cuivre dans les DEEE varie entre 2 et 8 selon le type de DEEE (Source: [80]).

Selon les données Ecoinvent, la part de cuivre dans les ferrailles de DEEE est donc comprise entre 0,11 % (s'il y a 8 fois plus de Fe que de Cu) et 0,33% (s'il y a 2 fois plus de Fe que de Cu).

- Les métaux des résidus d'incinération sont beaucoup moins souvent solidaires mécaniquement des non ferreux. Le tri magnétique est donc beaucoup plus efficace.

En conclusion :

- Les ferrailles de VHU apportent, de par leur volume et leur difficulté de séparation, le plus de cuivre (en volume).
- Les ferrailles de DEEE sont potentiellement plus concentrées en cuivre que les ferrailles de VHU (car en amont du broyage, leur taux de cuivre est plus fort).
- Des études de caractérisation (en aval du broyeur) des ferrailles selon leurs origines permettraient de conclure sur les plus gros contributeurs à la problématique du cuivre dans les ferrailles.

5.2.4 Accumulation et concentration du cuivre dans les ferrailles

Le cuivre déjà présent dans l'acier issu de fours à arc électrique s'accumule au fil des cycles de recyclage. En effet, le cuivre ne peut pas être retiré de l'acier par des méthodes conventionnelles de raffinage. Le cuivre s'accumule donc au fur et à mesure des cycles de recyclage. Tout le cuivre présent dans les ferrailles s'accumulera donc dans l'acier recyclé.

Aujourd'hui le phénomène de concentration et d'accumulation du cuivre dans l'acier est contrôlé et stabilisé par les aciéries. Grâce à la politique de refus de ferrailles "hors normes" par rapport au

référentiel européen, les aciéries ne bloquent pas l'accumulation de cuivre dans les ferrailles mais elles contrôlent et limitent le phénomène de concentration.

5.3 Problèmes lors de l'étape de recyclage

Selon Phillipe Russo, Chef du Service Matières Premières et Recyclage d'Arcelor Research à Maizieres-les-Metz, aucun problème de productivité des fours à arc électrique n'est lié à la présence de cuivre dans les ferrailles.

Les problèmes liés au cuivre se concentrent uniquement sur la qualité de l'acier produit.

5.4 Impacts sur la qualité et les propriétés de l'acier

5.4.1 Perte de ductilité et fragilité à chaud

Les impacts du cuivre sur la qualité de l'acier sont doubles. D'un côté, le cuivre permet d'élever la résistance à la corrosion et la résistance mécanique de l'acier mais de l'autre côté, il entraîne une perte de la ductilité de l'acier. La ductilité désigne la capacité d'un matériau à se déformer sans se rompre.

Le cuivre est l'élément clé du phénomène de fissuration à chaud qui entraîne des fissures de l'acier lors de sa mise en œuvre (en anglais: "surface hot shortness").

Même si la première des conséquences est recherchée pour certaines applications de l'acier comme la construction, c'est la baisse de ductilité qui est l'enjeu majeur du cuivre dans l'acier. Son effet direct principal est l'apparition de défauts lors des étapes de moulage, emboutissage et de laminage.

La Figure 5-6 montre un exemple de fissures liées à la présence de cuivre dans l'acier

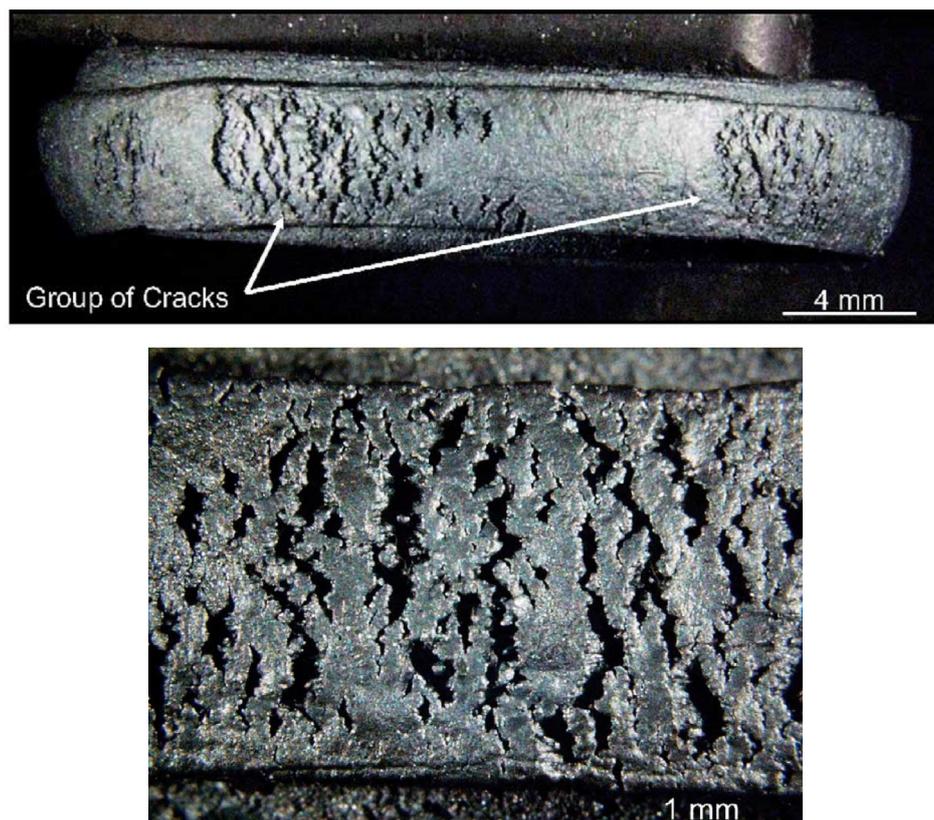


Figure 5-6 : Fissures liées à la fragilisation à chaud d'un acier avec 0,35 % de cuivre oxydé pendant 10 minutes à 1160°C

5.4.2 Les applications de l'acier concernées

Les mises en œuvre de l'acier ne nécessitant pas une forte ductilité sont très peu concernées par cette problématique. Plus la mise en œuvre de l'acier se rapproche des aciers durs²³, moins la problématique du cuivre est importante. Il s'agit des aciers dits "longs", utilisés entre autres pour la construction. Ces applications concentrent 40 % des tonnages de fer en Europe (source EUROFER / Eurostat). L'exemple le plus cité est le fer rond à béton.

En revanche, toutes les applications de l'acier utilisant la forte ductilité du matériau sont attentives à cette problématique, notamment dans les secteurs de l'automobile et de l'emballage. Plus le caractère ductile de l'acier est utilisé, plus le taux de cuivre devra être faible.

Ces applications sont celles utilisant des étapes d'emboutissage, de laminage et de moulage. Ces procédés sont utilisés pour produire les aciers dits "plats", dont les principales utilisations sont :

- Tôles
- Feuillards
- Emballages alimentaires
- Produits électroniques et électriques

La fissuration à chaud se produit à des températures entre 1050 °C et 1300 °C

Aujourd'hui, les aciéries sont attentives à ce problème, mais selon Philippe (*Chef du Service Matières Premières et Recyclage d'Arcelor Research*), le référentiel européen permet aux aciéries d'acheter les ferrailles avec la qualité souhaitée selon les applications.

De plus, chaque gamme de ferrailles trouve un marché grâce aux différents types d'applications de l'acier (présentées brièvement dans le paragraphe précédent).

5.4.3 Explication physique : migration vers les joints de grains

Le mécanisme de migration du cuivre vers les joints de grains est décrit comme le facteur principal entraînant le phénomène de fissuration à chaud.

Le joint de grain est la zone de contact et la frontière entre deux ou plusieurs cristaux d'acier. Dans un matériau homogène comme l'acier, deux cristaux voisins ont le même réseau cristallin, mais avec des orientations différentes. Le joint de grain est donc une frontière de désorientation.

Les joints de grains sont toujours présents dans l'acier, mais plus il y a d'impuretés dans l'acier, plus le réseau cristallin est divisé, plus les grains sont petits et plus il y a de joints de grains.

Les deux figures ci-dessous illustrent le joint de grain.

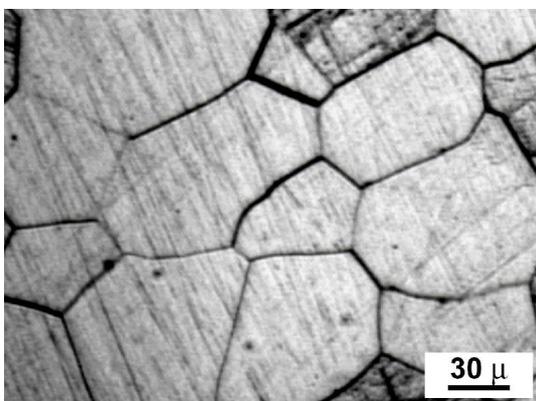


Figure 5-7 : Micrographie optique des joints de grain attaqués par un acide

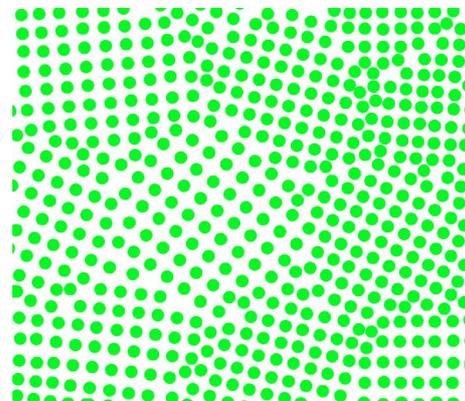


Figure 5-8 : Représentation schématique du réseau cristallin et des joints de grain

²³ Les aciers peuvent être classés selon leur ductilité: acier extra-doux, doux, demi-doux, demi-dur, dur, extra dur.

Les cristaux se raccordent aux joints de grain. Il y a donc « plus de place » au niveau d'un joint de grain, en raison des différences des réseaux, que dans le cristal.

De fait :

- Les atomes étrangers, comme le cuivre, s'y logent préférentiellement.
- Le déplacement des atomes dans les joints de grain est plus rapide

Lorsque la ferraille s'oxyde, les éléments plus nobles que le fer, tels que le cuivre, ne sont pas oxydés. De plus, le cuivre a une faible solubilité dans l'austénite (solution solide du carbone présent dans l'acier entre 911 et 1392°C). Il y a donc la création de phases liquides riches en cuivre qui migrent alors vers les joints de grains lors de la refonte.

D'autres éléments comme l'étain, l'arsenic et l'antimoine réduisent la solubilité du cuivre dans l'austénite; ils accroissent donc la sensibilité des aciers à la fissuration. De plus, ces éléments abaissent le point de fusion du cuivre élargissant ainsi la gamme de températures où les fissurations peuvent se produire.

En revanche, le nickel et le silicium réduisent les phénomènes de fissuration car ils augmentent la solubilité du cuivre dans l'austénite, ce qui fait que moins de cuivre se retrouve dans les joints de grains.

Note: Des méthodologies de calcul permettent d'exprimer le taux de ces éléments en taux équivalent de cuivre. Ces méthodologies sont utilisées pour déterminer les référentiels d'achat de ferrailles. Par exemple : $Cu + 6 (Sn + Sb) < k$ avec k, taux de résidu maximal dans les ferrailles (ordre de grandeur : 0,4 %

La constante k dépend de l'atmosphère du four, de la température et du temps de séjour.

Le cuivre situé dans les joints de grains fragilise ces derniers et provoque des fractures intergranulaires. Ces fractures entraînent la baisse de la ductilité de l'acier et provoquent des zones de faiblesses et des fissures lors de la re-chauffe de l'acier pour sa mise en œuvre.

5.4.4 Autres Paramètres qui influencent les fissures à chaud

Selon L.G. Garza & al, il a été constaté que le temps d'oxydation et la température sont des paramètres critiques pour la fragilité à chaud de l'acier.

Cette étude a testé la déformation de l'acier et l'apparition de fissures à chaud selon la concentration en cuivre (0,09 – 0,39 %), la température (1100 – 1200 °C) et le temps d'oxydation (10-30 min).

Selon cette étude, basée sur la catégorie d'acier 1045, avec un temps d'oxydation fixe, plus la concentration en cuivre est forte, plus la température critique pour laquelle une forte fissuration est observée est haute. 1160 °C pour 0,39 % de cuivre et 1110 °C pour 0.009 % de cuivre.

D'autres conclusions moins fortes sont présentes dans cette étude, mais il est certain que le taux de cuivre, la température et le temps d'oxydation sont 3 paramètres que la filière de l'acier plat doit maîtriser.

5.4.5 Valeurs seuils selon les applications

Selon ArcelorMittal, aucune valeur seuil du cuivre n'est connue pour les différentes applications de l'acier. Chaque application et chaque alliage ont leurs propres procédés et leurs propres règles concernant la composition des aciers et les paramètres d'oxydation.

Les produits vendus par les sidérurgistes respectent des normes européennes (résistance, ductilité,...), ces derniers sont exigeants sur la composition des ferrailles qu'ils utilisent.

Les contrôles visuels systématiques des ferrailles par les sidérurgistes peuvent donc entraîner le déclassement des ferrailles à cause de la présence d'inertes ou de cuivre. Ces ferrailles déclassées sont tout de même utilisées, mais elles sont échangées à des prix plus bas et sont mélangées avec des flux plus "propres". Pour la catégorie de ferraille E 40, les sidérurgistes acceptent un taux de cuivre pouvant aller jusque 0,450 % (soit 55% de plus que le seuil du standard européen) parallèlement à un abattement du prix.

5.5 Evaluation de la perte de ressource cuivre

Selon le bilan du recyclage de l'ADEME [67], 12,3 millions de tonnes de ferrailles ont été collectées en France et recyclées en 2006. L'hypothèse la plus conservatrice pour évaluer la perte de ressource en cuivre est de multiplier ce tonnage annuel par le taux maximal de cuivre toléré dans le référentiel européen des ferrailles E 46 soit 0.5 % (cf. paragraphe 5.2.2).

La perte maximale de cuivre est donc estimée entre 60 000 et 70 000 tonnes.

En revanche, avec la même méthodologie conservatrice utilisant le pourcentage de cuivre dans les ferrailles E 40 (soit 0.25 % selon le référentiel européen), la perte minimale est estimée entre 30 000 et 35 000 tonnes.

Pour résumer, la méthodologie la plus conservatrice nous indique que la perte de ressources en cuivre dans les ferrailles collectées en France est comprise entre 30 000 et 70 000 tonnes.

Selon le Bilan du recyclage de l'ADEME [67], environ 440 000 tonnes de cuivre ont été consommées en France en 2006 et 316 000 tonnes ont été collectées pour être recyclées en France ou à l'export.

La perte totale de cuivre dans les ferrailles représente, selon les hypothèses, entre 7 % et 14 % de la consommation de cuivre en France.

Réussir à recycler la différence entre 30 000 tonnes (seuil acceptable de cuivre dans les ferrailles de broyages) et 61 000 tonnes (seuil maximal de cuivre dans le référentiel), soit 21 000 tonnes, augmenterait le taux de cuivre collecté pour le recyclage de 4,5 %. Ce taux passerait d'environ 72 % en 2006 à 76,5 %.

Selon Olivier Tissot, directeur du Centre d'information du cuivre, aucune pénurie de cuivre ne se profile à l'horizon et les estimations actuelles projettent des réserves totales évaluées à 2,3 milliards de tonnes. Dès l'enjeu de la perte de ressource cuivre semble mineur par rapport à l'enjeu de perte de qualité de l'acier.

Note: Toutefois, la FFA (Fédération française de l'acier) précise qu'une forte part de cuivre issu du broyage de VHU se retrouve contaminé par de la gaine plastique qui pose un certain nombre de problèmes pour la valorisation et le recyclage de ce cuivre.

5.6 Les solutions pour mieux séparer le cuivre et l'acier à la source

Aujourd'hui la forte dilution de la ferraille recyclée dans de l'acier vierge est la principale solution à la problématique du taux de cuivre dans les ferrailles. Selon les chiffres du paragraphe 5.2, la fraction de ferraille susceptible d'apporter du cuivre représente environ **30 %** de la ferraille recyclée. De plus, **47%** de l'acier mis sur le marché français est d'origine "vierge".

Cette forte dilution permet aux aciéries de ne pas avoir de soucis pour se fournir en ferraille sans atteindre les limites de concentration en Cu établies dans le référentiel européen EUROFER / EFR.

Néanmoins, si cet effet de dilution s'estompe par une baisse de la demande d'acier vierge, des solutions existent et commencent à être mises en place pour que le marché des ferrailles continue à alimenter les fours à arc électrique en respectant le référentiel européen. Les différentes solutions visent à :

1. Produire des produits qui permettront d'avoir moins de cuivre dans les flux acier
2. Mieux séparer le cuivre de l'acier
3. (Atténuer les effets de la présence du cuivre)

L'écoconception pour le secteur de l'automobile est le premier levier pour éviter la contamination et l'accumulation du cuivre dans l'acier. Les solutions sont :

- Identifier tout le cuivre présent dans les voitures et le rendre plus accessible au démontage.
- Limiter l'utilisation de cuivre, en le remplaçant par de l'aluminium (qui a des propriétés voisines mais un coût supérieur). Utiliser les technologies à onde radio pour éviter les fils,...
- Séparer les liens mécaniques entre le ferreux et le non ferreux. Par exemple, le projet CEMIR de l'équipementier Faurecia a conçu un moteur électrique friable qui éclate au broyage libérant les fils de cuivre.

Toutefois certaines autres pistes d'écoconception augmentent la quantité de cuivre présent dans une voiture. Par exemple: les voitures hybrides.

1. **Séparation** : Les technologies utilisant le phénomène de fluorescence des rayons X sont déjà utilisées pour trier d'autres flux de déchets (plastiques, bois contaminés, verre). Ces technologies sont en développement pour extraire le cuivre des ferrailles. Le QXR-CE co-développé par Innov-X et OmniSource Corporation (USA) depuis 2007, est composé d'un spectromètre à rayon X qui permet d'identifier la composition des éléments présents ferrailles broyées et de les trier grâce aux capteurs de position infra-rouge. Selon la fiche produit de la machine "QXR series" de la société Innov-X, 90% du cuivre est séparé de ferrailles issues de broyeur. (<http://www.innovx.com/en/products/qxr/overview> ce lien explique les technologies utilisées) Cette technologie n'est pas encore applicable sur de gros flux de ferrailles.

Les producteurs de ferrailles potentiellement contaminées (surtout VHU, DEEE) vont progressivement s'équiper de nouvelles technologies pour atteindre les nouveaux rendements de nettoyage nécessaires.

- Le démontage permet de réduire considérablement le taux de cuivre dans les VHU destinés au broyage. Cette étape a néanmoins un fort coût par rapport au bénéfice de la vente du cuivre récupéré. La démarche d'identification et de facilitation du démontage du cuivre par les producteurs d'automobiles permet d'améliorer cet écart.
- Selon la fédération française de l'acier, pour l'instant le tri manuel est la seule façon de réduire significativement le taux de cuivre dans les ferrailles issues de VHU broyés. C'est surtout le lien mécanique entre les ferreux et non ferreux qui engendre ces contaminations.
- Des études sur la granulométrie de broyage ont aussi montré que des améliorations du taux de cuivre étaient réalisables. Seulement, comme pour la CSM, le flux de ferrailles "propres" est diminué.

2. **Atténuer les effets** : A l'échelle du laboratoire, certaines publications précisent que différentes méthodes permettent de diminuer le cuivre ou l'impact du cuivre dans l'acier, mais aucune de ces applications n'est utilisée à l'échelle industrielle.

- Selon D. A. Melford [71] , ajouter du silicium à la ferraille en fusion et augmenter le taux d'oxygène encourage la formation de $2FeO Si O_2$ à la surface et évite la formation de phase riche en cuivre à la surface en améliorant sa dilution. Cela évite alors les fissures à chaud. Selon D. A. Melford, le Nickel possède les mêmes propriétés.
- Des flux de sulfures peuvent permettre de réduire le cuivre dans les aciers (A. J. HARTLEY, 1980 [68]).
- Une autre méthode testée en laboratoire joue sur la vaporisation sélective du cuivre selon la pression dans l'acier fondu (A. J. HARTLEY, 1980 [68]).

Afin d'inciter les acteurs à mettre en œuvre les deux premières solutions (la troisième semble peu applicable en pratique), trois types d'incitants existent :

1. La sensibilisation
2. Les contraintes normatives
3. Les incitants économiques

1. La **sensibilisation**: Toute la filière est consciente de l'enjeu majeur qu'est la contamination de l'acier par le cuivre. L'ensemble des acteurs travaillent ensemble pour résoudre le problème: les producteurs automobiles, les producteurs de ferrailles, les aciéries,...
2. Les **contraintes normatives** : le législateur pourrait rendre les normes plus sévères pour obliger le système à s'adapter dans le sens d'une diminution de la concentration en cuivre.
3. Les **incitants économiques** : Le prix élevé du cuivre a un effet incitatif pour mieux trier et mieux valoriser ce flux. En effet le cours du cuivre a doublé en moins d'un an, passant à titre indicatif de 2 650 €/ tonne en février 2009 à 4 850 €/tonne en février 2010. Ce levier incitatif est d'autant plus fort que la pression des clients (les aciéries) s'accroît pour avoir des ferrailles respectant les normes européennes

5.7 Conclusion

La filière de l'acier a bien identifié les enjeux de la contamination du cuivre. La filière entière du recyclage des ferrailles travaille pour éviter que la concentration du cuivre dans l'acier n'atteigne un niveau qui serait néfaste, surtout pour les applications à forte contrainte de l'acier plat.

Le phénomène de migration des phases riches en cuivre vers les joints de grains entraîne des problèmes de fissuration à chaud. Ce phénomène est bien connu et maîtrisé depuis longtemps par les acteurs de l'acier (producteurs et utilisateurs). Des effets combinatoires entre le cuivre, la température et le temps d'oxydation existent.

Le marché français actuel de l'acier consomme encore 47 % d'acier d'origine vierge. Grâce à cette dilution des ferrailles dans de la matière vierge et grâce au référentiel européen assurant la qualité des ferrailles, la concentration du cuivre dans l'acier n'a pas encore atteint un niveau gênant.

La filière a déjà identifié les leviers d'amélioration du tri des ferrailles grâce aux moyens humains mais aussi techniques. L'écoconception des automobiles joue notamment un rôle important.

L'approche filière semble la plus efficace. En effet, chaque acteur gagne à avoir des ferrailles respectant le référentiel européen. Les aciéries peuvent se fournir avec de la matière première secondaire de qualité, les fournisseurs de ferrailles vendent une ferraille de meilleure qualité et donc à un meilleur prix et vendent plus de cuivre, les producteurs d'automobile se préservent d'un acier de mauvaise qualité directement limitant pour leurs applications en acier plat.

La perte de la ressource cuivre dans les ferrailles est estimée entre 6 et 14 % de la consommation nationale. Selon Olivier Tissot, directeur du Centre d'information du cuivre, aucune pénurie de cuivre ne se profile à l'horizon et les estimations actuelles projettent des réserves totales évaluées à 2,3 milliards de tonnes.

5.8 Références

Entretiens:

- Phillipe Russo - *Chef du Service Matières Premières et Recyclage d'Arcelor Research* (février 2010)
- Bertrand Creton - *fédération française de l'acier, Directeur Administration générale Communication/Documentation* (mars 2010)

Publications:

- [66] ADEME - Rapport annuel Véhicules hors d'usage (Septembre 2009)
- [67] ADEME, Bilan recyclage 1997-2006 (2007)
- [68] A. J. HARTLEY - Steelworks control of residuals (1980)
- [69] BIPE – Bilan des filières de recyclage, (2002)
- [70] BRGM - Eco-notes du BRGM (septembre 2008)
- [71] D. A. Melford - The influence of residual and trace elements on hot shortness and high temperature embrittlement (1980)
- [72] D. JANKE and al. - SCRAP-BASED STEEL PRODUCTION AND RECYCLING OF STEEL (février 2000)
- [73] EFR - EU-27 Steel Scrap Specification (may 2007)
- [74] ECOINVENT, report 8, Disposal of WEEE (2007)
- [75] FFA - L'acier en France en 2007 (2007)
- [76] IISI EUROFER; tonnages annuels acier eu (2008)
- [77] L.G. Garza and al. - Surface hot-shortness of 1045 forging steel with residual copper (may 2004)
- [78] L. SAVOY and al. - Copper and Tin in steel Scrap recycling (2003)
- [79] RESTEEL - Innovation dans le traitement des ferrailles métalliques (2009)
- [80] UNU, Waste Electrical and Electronic Equipment (WEEE), 2008
- [81] VITO - SCHEIDING VAN HET ZWAAR SHREDDERRESIDU EN MATERIAALRECYCLAGE (2001)

6. Etude de cas n°4: Valorisation du bois de classe B

6.1 Introduction

Les déchets de bois sont classés en fonction de leur teneur en substances dangereuses. Il existe trois classes de déchets de bois. En Europe ces classes sont :

- Déchets de bois non adjuvantés (ou déchets de bois de classe A), classés comme déchet banal par la « Liste Européenne des Déchets » du 3 mai 2000 [82]
 - Cette appellation regroupe la biomasse ligneuse, tous les déchets issus de la transformation primaire du bois non-traité, les bois non-traités.
 - Ex: tailles d'élagage, copeaux, certaines palettes, ...
- Déchets de bois faiblement adjuvantés (ou déchet de bois de classe B), classés comme déchet banal -
 - Ce sont des déchets de bois qui ont été traités par des produits peu dangereux ou contenant une faible quantité d'adjuvants et pouvant être brûlés dans des installations de combustion de bois. Les produits de traitement des bois de classe B sont le plus souvent des peintures, des vernis, des colles et des produits de préservation appliqués en surface.
 - Ex: poutres intérieures, certaines palettes, caisses et cagettes, panneaux de particules, ...
- Déchets de bois fortement adjuvantés (ou déchets de bois de classe C), classés comme déchet dangereux]
 - Ce sont les déchets de bois fortement adjuvantés (imprégnés ou souillés). Ils ne peuvent pas être brûlés dans des installations de combustion bois mais uniquement dans des installations de traitement de déchets.
 - Ex: Bois créosoté, poteaux télégraphiques traités CCA ou cuivre organique, copeaux ayant servi pour absorber un produit dangereux, ...

Les types de déchets de bois qui entrent dans la classe B (faiblement adjuvantés) sont ceux qui n'appartiennent à aucune des 2 autres catégories : A et C:

- Un déchet traité ne peut être intégré à la classe A.
- S'il a été imprégné ou souillé avec une substance classée comme dangereuse par la liste européenne des déchets (décision de la Communauté Européenne 2001/118/CE du 16 janvier 2001), alors le déchet de bois est intégré à la classe C.
- Sinon, ce déchet de bois est dit "faiblement adjuvanté", il est alors intégré à la classe B.

La classification d'un déchet de bois entre la classe B et la classe A est souvent sujet à l'interprétation et au jugement des acteurs de la filière lors des contrôles visuels. Aucun règlement et aucune norme législative ne définit des concentrations limites en éléments dangereux pour le classement des déchets de bois en classe B ou en classe C. Ce vide juridique est très partiellement comblé avec l'utilisation du référentiel de la fédération européenne des producteurs de panneaux. Ce référentiel fixe des limites de concentrations de certains éléments dangereux pour l'acceptation des déchets de bois dans la filière panneau.

La classe de bois B représente des tonnages très élevés. Actuellement, deux filières sont utilisées pour valoriser ce type de déchets bois:

- La première filière (en volume de déchets de bois utilisés) est l'intégration dans les panneaux de particules en couche
- La seconde est la valorisation énergétique dans des chaudières de combustion biomasse. Pour cet usage, et si la puissance de l'installation est supérieure à 2 MW, les installations sont soumises à autorisation préalable : rubriques 322-B4 et/ou 167-C de la nomenclature des Installations Classées pour la Protection de l'Environnement (ICPE).

Pour ces deux applications, le bois de classe B est utilisé en substitution du bois de classe A disponible en quantité trop limitée.

Une troisième filière consisterait à mélanger le bois de classe B aux DIB servant de combustibles dérivés des déchets (CDD), par exemple en cimenterie.

6.2 Caractérisation du gisement

6.2.1 Caractérisation quantitative du gisement

Les déchets du BTP représentent la plus forte part du gisement de bois de rebut, mais ce gisement souvent fortement adjuvanté (bois C) n'est pas pris en compte dans cette étude.

En 2005, le CREED²⁴ a estimé le tonnage annuel français de bois faiblement adjuvanté à 3 millions de tonnes. Très peu de statistiques sont disponibles sur les déchets de bois de catégorie B. Néanmoins, la Figure 6-1 présente le gisement de déchets de bois en France selon le groupe de travail ADEME, CTBA, SGFPBB, UNIFA sur la valorisation énergétique des bois faiblement adjuvantés. Les matériaux représentant le plus gros flux de bois de classe B sont : certaines palettes, éléments en lamellé-collé, chutes de panneaux, huisseries, poutres et charpentes.

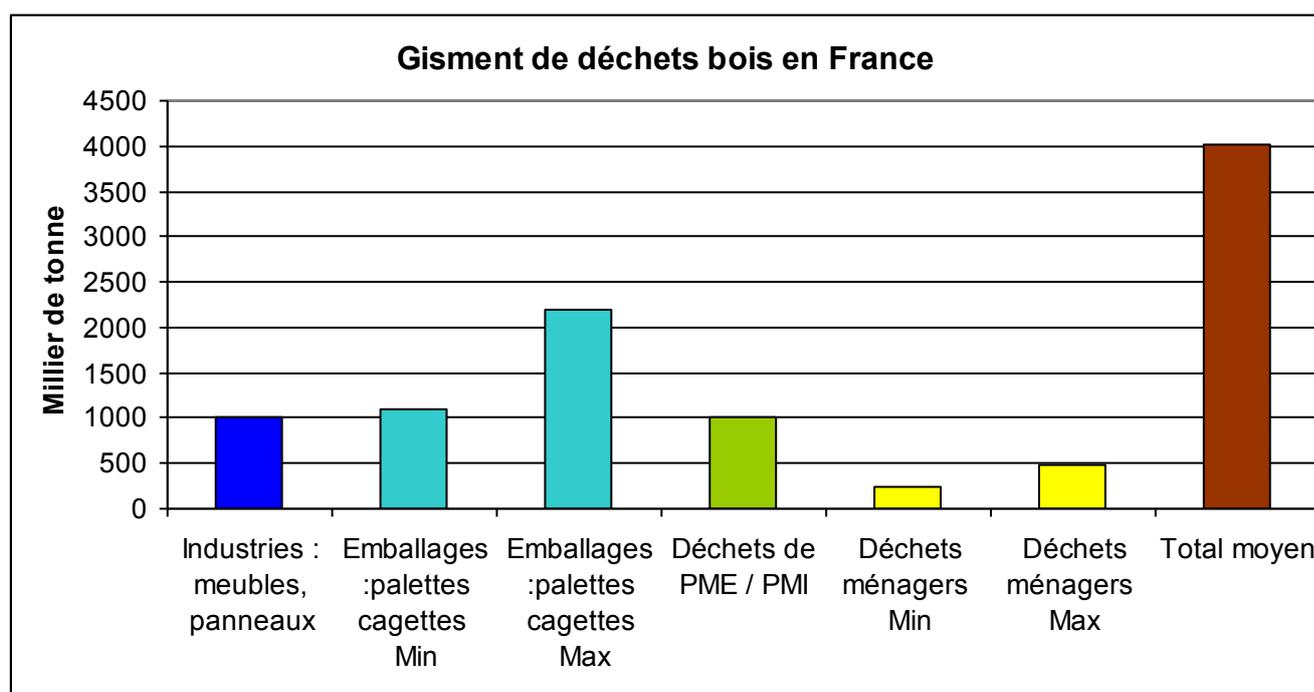


Figure 6-1: Gisement de quelques déchets de bois en France (en milliers de tonnes)

Le Tableau 6-1 présente (de manière non itérative) les valorisations selon la provenance des déchets de bois.

²⁴ Centre de recherche sur l'Energie et la Propreté

Tableau 6-1

Déchets (milliers de tonnes)	meubles, panneaux	palettes cagettes	PME / PMI	Déchets ménagers (kg/hab./an)
Gisement	1013	1100 à 2200	1000	4 à 8
Valorisation Panneaux		35		
Divers (vente)	225			
Valorisation Energie interne	628			
Valorisation Energie externe		17		
Éliminé	159	1*	1*	2*
Potentiellement valorisable	100	100 à 200 (cagettes) 1000 à 2000 (palettes)		

1* déchets brûlés à l'air libre ou mis en décharge

2* déchets incinérés

Le Tableau 6-2 présente les caractéristiques de quelques déchets bois.

Tableau 6-2

Matériaux	Composés chimiques	Quantité	Humidité	Principales utilisations/commentaires
Emballages				
palettes	faibles teneurs en produits de préservation	< 100 ppm	15 - 20%	transport, la teneur en PCP diminue depuis quelques années
cagettes	colles à moins de 5% de formaldéhyde sur 5% des cagettes			transport de produits alimentaires
Panneaux				
contreplaqués	colles UF	1 - 4%	6%	intérieure, peut être traité avec des produits de préservation, ignifuges, etc.
contreplaqués	colles PF	1 - 4%	8 - 12%	extérieure
oriented strandboard	colles PF ou PF/isocyanate	2 - 4%	8 - 12%	intérieure
de particules	colles UF	5 - 13%	8 - 12%	intérieure
MDF et autres panneaux de fibres	colles UF	5 - 13%	4 - 12%	intérieure pour finition

Note : UF = urée-formol; PF phénol-formol,

6.2.2 Caractérisation de la composition des bois de classe B

Les seuls éléments de la législation européenne (directive 2000/76/CE relative à l'incinération des déchets et la "Liste Européenne des Déchets" du 3 mai 2000) définissant la composition du bois de classe B sont les suivants :

- Déchets issus de bois traité avec des adjuvants ne comprenant pas ou très peu de composés halogénés ou de métaux toxiques.
- Ils n'ont donc pas été traités pour une utilisation extérieure (traverse de chemin de fer, poteaux électriques, ...) par du sel de cuivre, sel de bore, xylène, toluène, lindane PCB, créosotes, ...

Outre ces explications, il n'existe aucune limite de concentration en éléments polluants (comme les métaux lourds) spécifiant les limites entre les déchets de bois de classe B et les déchets de bois de classe C.

En pratique c'est le contrôle visuel des acteurs de la filière et l'historique du déchet qui permettent d'orienter les déchets dans la filière de déchets de bois A, B ou C.

Notons, par exemple, les cas des palettes qui se retrouvent dans la filière de bois de classe A ou dans la filière de bois de classe B selon un simple contrôle visuel. Ce contrôle n'est pas toujours suffisant pour vérifier qu'un lot de palettes n'a subi aucun traitement de préservation.

Note: Toutefois, la fédération européenne des producteurs de panneaux a établi les limites standards de livraison de bois recyclé A et/ou B. Au vu du vide législatif concernant la composition des différentes classes de bois, ces standards sont souvent repris pour fixer les limites de composition du bois de classe B. Le Tableau 6-3 présente ces limites standards.

6.2.3 Caractérisation qualitative des adjuvants

Les paragraphes suivants présentent quelques caractéristiques des déchets de bois en fonction des éléments repris dans les standards EPF (European Panel Federation) [86] et en fonction des éléments disponibles dans la littérature [83].

La concentration de l'ensemble de ces produits dans les déchets de bois est à l'heure actuelle inconnue, du fait de la méconnaissance des produits et des quantités employées par le passé et de la perte de ces produits par le relargage dans l'environnement durant leur utilisation. Les adjuvants les plus souvent présents dans le bois de classe B peuvent être rangés en quatre catégories :

1) les résines ou colles:

Ces produits sont largement employés pour la fabrication de panneaux, dans l'industrie de l'ameublement. Cinq catégories de résines peuvent être distinguées :

- les thermodurcissables : La principale colle employée est à base d'urée-formol, d'autres colles sont à base de phénol-formol, d'urée-mélanine-formol ou des colles UF/PF ;
- les thermoplastiques : On désigne sous cette appellation les colles néoprène, polyamides et autres résines synthétiques dissoutes dans des solvants organiques ;
- les colles en émulsion : Ce sont principalement les colles vinyliques ;
- les colles thermofusibles : Elles sont à base de cire ou de paraffine ;
- les colles naturelles : Les caséines

La quantité de colle nécessaire dépend de l'essence de bois, de l'application, de son humidité, du type de résine employée, etc.

2) les produits de préservation du bois:

Certains adjuvants ont pour objectif de préserver le bois des attaques d'insectes et de champignons afin d'augmenter sa durabilité; il est donc important que les produits de préservation restent fixés dans le bois. A priori, seule une faible partie de ces produits est relarguée dans l'environnement durant leur vie. Ils peuvent être rangés en cinq grandes familles :

- 1° les produits en solutions organiques. Elles contiennent plusieurs matières actives fongicides associées à des insecticides, un solvant (représentant 90 à 95% en poids du produit) et divers adjuvants permettant de fixer et de stabiliser les matières actives dans le bois.
- 2° les sels hydrosolubles sont des solutions aqueuses. L'eau sert de solvant, contenant les matières actives notamment des sels d'arsenic, de bore, de fluor, de cuivre et de zinc qui nécessitent d'être fixés dans le bois. Parmi ces sels hydrosolubles, le plus couramment utilisé est le C.C.A. (chrome-cuivre-arsenic). Du fait de la toxicité de l'arsenic, des produits à base de bore (C.C.B.) en substitution de l'arsenic sont apparus sur le marché,
- 3° les produits issus de la distillation de la houille. Le mélange est relativement complexe, riche en composés phénoliques, pyridiniques et en hydrocarbures aromatiques polycycliques
- 4° les émulsions aqueuses contenant des matières actives en solution dans l'eau
- 5° les lasures sont destinées à la protection du bois, à la décoration et aux traitements contre les insectes et champignons. Elles sont appliquées uniquement à la surface des pièces de bois.

Les quantités appliquées sont variables, en moyenne de 300 g/m² pour les traitements de surface.

3) les produits ignifuges

On utilise le trempage dans des sels ignifuges inorganiques à base de phosphates d'ammonium et de borates. On utilise aussi le taciement en surface en évitant le contact du bois avec l'oxygène de l'air par dépôt d'une couche de produit, tel que le sel de bore, un vernis ou une peinture intumescente (mélamine, paraffines chlorées).

4) les produits de revêtement et de finition

Seul un film fin (quelques dixièmes de millimètre) est déposé à la surface des matériaux, qui ne contiennent que de très faibles quantités de produits, en général < 0,1 %.

Divers revêtements peuvent être appliqués sur les bois extérieurs : les vernis, les peintures, les lasures, les enduits et les apprêts.

La diversité des types et formulations rend difficile la connaissance de la composition de ces produits. On distingue à l'heure actuelle deux types de peintures, à base de solvants ou à base d'eau. Les pigments employés dans les peintures peuvent contenir des composés métalliques tels que le chrome, le cuivre, ou le zinc, qui ne représentent toutefois en poids que moins de 5% des peintures.

6.2.4 Teneur en lindane et PCP de divers déchets bois

Une campagne d'essais a été effectuée en Allemagne en 1995 afin de déterminer la concentration en lindane et en pentachlorophénol dans divers déchets de bois. [83]

La concentration en lindane dans les échantillons de bois non souillés est faible (< 0,24 mg/kg). Ce composé n'est pas détecté dans les emballages, les palettes et les poutres. Seule une faible fraction de copeaux recyclés contient des teneurs supérieures à la limite de détection. Le bois des décorations intérieures et des fenêtres est le plus contaminé.

Les concentrations en PCP sont significativement plus fortes que les concentrations en lindane. Dans la plupart des échantillons de bois non souillés, ce polluant n'est pas détecté (< 0,05 mg/kg). Les teneurs en PCP dans les emballages et les palettes sont faibles. Cette teneur est plus élevée pour les copeaux recyclés (valeur maximale à 4,43 mg/kg), ce qui signifie que des bois traités ont été employés. Les échantillons les plus contaminés sont les fenêtres et les décorations d'intérieur où ce polluant est détecté sur pratiquement tous les échantillons. De fortes teneurs sont parfois mesurées, notamment sur les fenêtres (un échantillon contient 163 mg/kg, soit 25 fois plus que ce que préconise le référentiel de la fédération européenne des producteurs de panneau).

Le PCP²⁵ n'étant pratiquement plus employé, la teneur dans les palettes décroît régulièrement. Comme la référence citée date de 1995, on peut supposer qu'il y a déjà eu une sérieuse amélioration depuis. Toutefois il faudra encore attendre quelques années avant d'avoir éliminé complètement ce composé, les palettes pouvant être réparées et réutilisées ou recyclées en partie. Le PCP n'étant pas interdit, il pourrait encore être employé dans de rares cas en France, et des palettes traitées au PCP peuvent entrer aisément sur le territoire français.

6.2.5 Teneur en métaux lourds de divers déchets bois

Une étude a été menée en Allemagne en 1996 afin de connaître les teneurs en métaux lourds de pièces de bois utilisées dans le bâtiment. [83] La concentration de 13 métaux a été recherchée dans 62 échantillons en prélevant à la surface de chaque pièce de bois une couche de 3 mm.

Le mercure n'a pas été détecté; l'étain et le cuivre apparaissent à des teneurs proches des limites de détection. Le cadmium est dosé à de très faibles teneurs probablement dues à l'emploi de ce métal comme agent de stabilisation pour le PVC. De grandes quantités de fer et de manganèse sont mesurées mais ces métaux ont un impact mineur sur l'environnement et sont également présents dans le bois naturel. De fortes teneurs en plomb, zinc et baryum ont été mesurées. Ces éléments sont présents dans les peintures et n'apparaissent pas en si grande concentration dans le bois naturel.

Dans de nombreux cas, un à deux éléments sont présents en forte concentration dans les échantillons. Ces fortes teneurs sont souvent dues à l'emploi de pigments dans les revêtements. Afin

²⁵ PCP: pentachlorophénol

d'estimer l'emploi de pigments spécifiques ces dernières décennies, les échantillons ont été classés en plusieurs groupes en fonction de leur âge et de leur couleur.

- L'élément zinc, sous forme d'oxyde de zinc, est un important pigment blanc. Les échantillons les plus anciens sont les plus fortement contaminés, ce composé ayant été remplacé par le dioxyde de titane (TiO₂) depuis les années 90.
- Le plomb a également été largement employé comme pigment blanc.
- De fortes teneurs en baryum ont également été détectées sur les échantillons les plus anciens, cet élément a également été employé par le passé afin d'obtenir certains effets de couleur.

La dépendance entre la couleur et le métal contenu dans l'échantillon est grande :

- La détection simultanée sur un échantillon de Ba et de Zn indique par exemple l'emploi de Litophone (BaSO₄ et ZnS) comme pigment blanc.
- En ce qui concerne les échantillons avec une coloration apparente rouge et orange, un seul échantillon sur onze contient du cadmium, ce qui est probablement dû à l'emploi de CdS comme pigment orange.
- Les pigments rouges sont obtenus au moyen d'oxydes de fer, de plomb et de chrome. Sur cinq échantillons les teneurs en Pb et en Cr apparaissent avec un ratio 10:1, ce qui conduit à soupçonner l'emploi de Pb₂CrO₄.PbO comme pigment rouge.

6.2.6 .Caractérisation quantitative des filières de recyclage

Selon Louis de Reboul, président de la commission bois process énergie de FEDEREC:

- 80% du bois de classe B est valorisé en panneau de particules. Le bois de classe B voyage alors à travers la France et vers les pays frontaliers comme la Belgique et l'Italie.
- 20 % en filière énergie dans certaines installations autorisées. La proximité des installations pouvant accueillir ces déchets est déterminante.

Sur base de la visite de l'entreprise Selva-bois, basée à Seclin dans le Nord, la totalité du bois de classe B va aux producteurs de panneaux car aucun centre de valorisation énergétique autorisé à incinérer du bois de classe B n'est présent dans son secteur géographique. Pourtant il collecte et achemine du bois dans un rayon comprenant Paris et Bruxelles.

De plus, peu d'unités de valorisation énergétique achètent du bois de classe B à un prix concurrentiel de la filière panneaux (environ 30€ /t selon Selva bois en janvier 2010).

6.3 Prétraitement du bois de classe B

Pour chaque application du bois de classe B, une partie du prétraitement est le même. Le bois est broyé en plaquettes, déferrailé et les fines sont séparées des plaquettes.

Le prétraitement n'a pas pour objectif de dépolluer le bois faiblement adjuvanté. L'objectif est de séparer les éléments perturbants et non valorisables lors de la production de panneaux, c'est-à-dire les fines. Toutefois, comme une fraction des traitements de surface du type vernis et peinture est évacuée avec les fines, la concentration en adjuvants diminue. Aucun chiffre n'est disponible sur le rendement de "nettoyage" par les broyages et tamisages.

L'étape supplémentaire pour la filière panneau est la micronisation. Cette étape n'a pas non plus d'objectif de dépollution des adjuvants présents. Elle consiste à broyer très finement, atomiser les copeaux de bois.

6.4 Valorisation dans la filière "panneaux"

Aujourd'hui la filière de valorisation de bois de classe B en panneau est très développée en Italie et en Belgique. En France, l'utilisation de bois de classe B dans les panneaux est plus faible mais tend à croître. Une partie du flux de bois de classe B français part donc en Belgique et en Italie.

Aujourd'hui le marché européen du panneau absorbe une forte majorité du tonnage de bois de classe B. Cependant, depuis quelques années, les ventes de panneaux agglomérés diminuent. On peut donc penser qu'une baisse de la demande en bois de classe B pourrait avoir lieu pour l'industrie

du panneau, laissant ce gisement disponible pour les installations productrices d'énergie. La dynamique des politiques de soutien du bois énergie comblera sans difficulté cette baisse probable de la consommation de bois B par la filière panneau. Les tendances prédisent même une forte concurrence entre ces deux filières.

Le dossier de presse du 11/08/2008 de l'industrie de l'ameublement concernant "la hausse des matières premières qui fragilise les Industries Françaises de l'Ameublement" (<http://www.unifa.org/presse/mp.pdf>) illustre cette tendance :

"Après une hausse de 60% en deux ans, l'industrie du panneau a vu ses cours se stabiliser. Mais pour combien de temps lorsque l'on connaît les projets gouvernementaux en « bioénergie » qui vont consommer une matière qui est la même que celle utilisée pour les panneaux."

Une fois que le bois de classe B est nettoyé des composés inertes et non ligneux (métaux, inertes, cailloux, tissus,...), aucun problème technique n'a été recensé limitant l'utilisation de bois de classe B dans la production de panneau. Les déchets de bois sont mêmes avantageux par rapport à la biomasse brute car le déchet de bois est déjà sec.

Le référentiel EPF sur la livraison de bois recyclé précise les conditions d'intégration de bois recyclé dans les panneaux de particules. Le Tableau 6-3 présente les valeurs limites de certains polluants dans la composition des bois recyclés acceptés dans l'industrie du panneau.

Les enjeux environnementaux de la combustion du bois sont les émissions de polluants dans l'air. Ici les enjeux environnementaux principaux sont :

- l'accumulation de polluants dans un matériau qui deviendrait dangereux à la fabrication et à l'utilisation
- les émissions potentielles dans les habitations des composés présents dans le panneau

Aujourd'hui, les enjeux environnementaux et sanitaires des panneaux à particules sont surtout les formaldéhydes issus des colles utilisées pour la fabrication des panneaux eux-mêmes et non les polluants issus du bois de classe B.

Les enjeux sanitaires humains sont aussi importants que l'incinération du bois, mais l'échelle est différente :

- l'air pour l'incinération,
- l'habitation et le lieu de production pour la filière panneau.

Les fiches FDES et le référentiel de l'EPF permettent de certifier la qualité du panneau et les impacts environnementaux de la production et de l'utilisation du panneau de particules. Le respect des normes et de ces fiches FDES assure aux clients le respect des enjeux sanitaires.

Tableau 6-3 : Valeurs limites en certains polluants lors de la production de panneaux issus de bois recyclé.

<i>Elements / Compounds</i>	<i>Limit values (g/kg dry panel)</i>
Arsenic (As)	0,025
Cadmium (Cd)	0,050
Chromium (Cr)	0,025
Copper (Cu)	0,04
Lead (Pb)	0,09
Mercury (Hg)	0,025
Fluorine (F)	0,1
Chlorine (Cl)	1
Pentachlorophenol (PCP)	0,005
Creosote (Benzo(a)pyrene)	0,0005

Ces valeurs sont les mêmes pour les limites de livraison de bois recyclé que pour les limites du panneau prêt à être vendu. Par ailleurs, il existe déjà en Italie des panneaux produits exclusivement à partir de bois recyclé.

6.5 Valorisation dans la filière "bois-énergie"

La valorisation énergétique du bois et de la biomasse est en forte croissance grâce au soutien de projets européens, transfrontaliers et nationaux.

Aujourd'hui, le bois de classe A est dirigé en totalité vers la production d'énergie industrielle, individuelle et collective. La différence de prix entre la vente du bois de classe A en énergie et la vente du bois de classe A en mélange avec du bois de classe B vers la filière panneau est de 30-50 € / tonne (source: Selva bois en janvier 2010). Cette différence motive à trier les deux flux de déchets et d'orienter la totalité du bois de classe A vers la filière chaleur.

Peu d'unités de valorisation énergétique achètent du bois de classe B à un prix concurrentiel de la filière panneau.

Le bois de classe B contient des adjuvants qui affectent peu la combustion dans la majorité des cas, mais qui sont susceptibles de libérer des polluants dans l'atmosphère. Ces polluants émis dans l'atmosphère auront des impacts potentiels sur l'environnement, la santé humaine et la santé des milieux naturels. Ils obligent dès lors à avoir une épuration des fumées.

6.5.1 Emissions de polluants lors de la combustion en chaudière industrielle

L'étude S. COLLET [83] compile des résultats de tests d'incinération de bois faiblement adjuvés dans des chaudières industrielles ou collectives. Ces chaudières n'avaient pas nécessairement le même traitement de fumées que ceux nécessaires et disponibles aujourd'hui. Certaines valeurs d'émissions (les plus élevées a priori) ne sont donc pas représentatives des technologies actuelles.

La série de tableaux ci-après présente quelques résultats de test d'incinération pour différents types de déchets issus de la littérature. Ces mesures sont pour la plupart des tests et non des mesures d'installations en fonctionnement.

Le Tableau 2-1Tableau 6-4 présente les résultats de mesures de tests d'incinération de palettes ayant reçu des traitements variables au PCP dans une chaudière collective de 2,6 MW.

Tableau 6-4 : Mesures de polluants lors de la combustion de palettes de classes A et B (en mg/Nm³ sec à 11% d'O₂ sauf pour les PCDD/DF en ng/Nm³)

Lot	Palettes tout venant	Bois non traité	Palettes dopées	Limites des émissions relatives aux installations de combustion (arrêté 30/0703)
Poussières	68	84 - 140	95 - 124	100
CO	400 - 870	400 - 870	400 - 870	300
COVT		< 20	< 20	110
HCL		0.2	0.6	
Pb+Cr+Cu+Mn		1.96	1.7	1
As		< 0.03	< 0.03	1
Hg+Cd		< 0.03	< 0.03	0.1
PCDD/DF (I.TEQ)		1.276	2.329	

La Figure 6-2 présente le ratio entre les émissions de polluants présentées dans le Tableau 6-4 par rapport aux limites des émissions pour les installations de combustion (arrêté du 30/07/03).

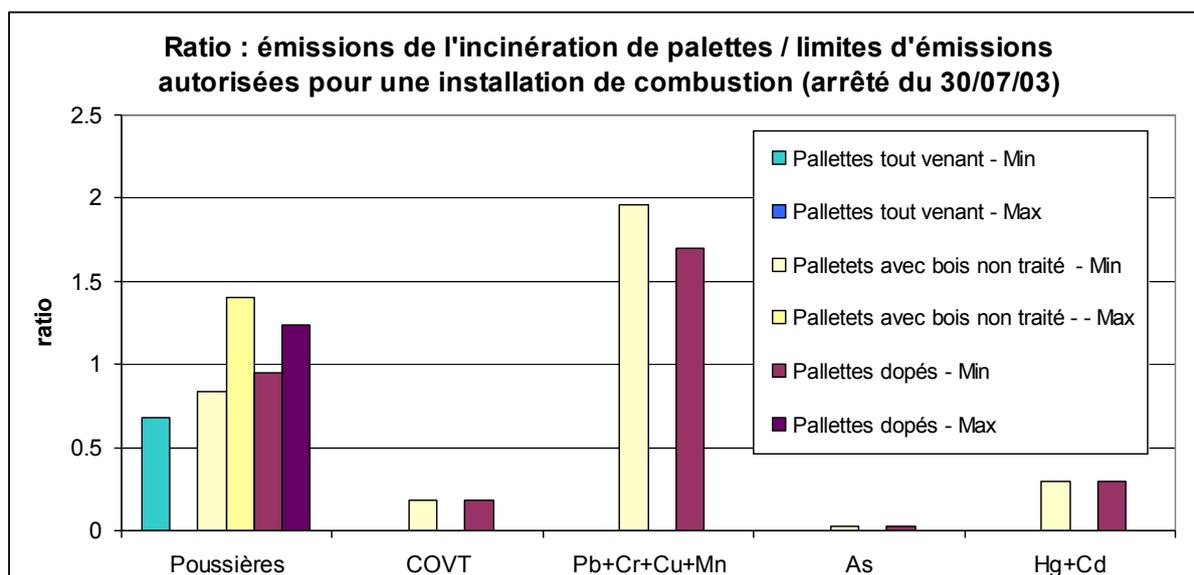


Figure 6-2 : Ratio quantité de polluants émise lors de la combustion de palettes / limites d'émissions autorisées pour une installation de combustion

Le Tableau 6-5 présente les résultats de mesures de tests d'incinération de bois ayant reçu des traitements en mélange avec du bois non traité avec un ratio 1:4. Les différents composés de traitement étudiés sont :

- chrome-fluor-bore (CFB), chrome-cuivre-bore (CCB), bore (B)
- bis-(n-cyclo-hexyldiazoniumdioxyde de cuivre (Cu-HDO)
- bifluorure d'hydrogène et de potassium (KHF₂), fluorosilicate (SF)
- insecticides dans les solvants organiques légers (LOS)
- créosote

Tableau 6-5 : Mesures de polluants lors de l'incinération de bois de classes B et C ayant reçu des traitements variables

Composé	Foyer	CO	NO _x	Cr	Cu	COVT	PCDD/PCDF
		mg/m ³ n	ng I.TEQ/m ³ n				
CFB	I	69	144	0.9	n.d	< 1	0.075
B	I	35	141	n.d	n.d	3.9	0.040
B	II	43	174	n.d	n.d	4.5	0.485
LOS	I	155	190	n.d	n.d	2.4	0.020
LOS	II	126	181	n.d	n.d	6.9	0.698
Cu-HDO	I	99	143	n.d	0.3	2	0.022
Cu-HDO	II	37	146	n.d	4.2	2	0.592
Créosote	II	55	155	n.d	n.d	7.7	0.028
Créosote	I	62	225	n.d	n.d	1.8	0.088
CCB	I	24	137	1.9	1	< 1	0.033
CCB	II	55	145	0.4	0.3	2.8	1.451
SF	II	67	163	n.d	n.d	4.2	0.171
KHF	I	301	280	n.d	n.d	2.3	0.033
Limites des émissions relatives aux installations de combustion (arrêté 30/0703)		300	600			110	

Toutes les émissions sont inférieures ou égales aux limites d'émissions d'une installation de combustion fixées dans l'arrêté du 30/07/03.

Le Tableau 6-6 présente des mesures de polluants lors de la combustion de différents panneaux de particules ayant des colles différentes. Les caractéristiques des colles sont présentées au paragraphe 6.2.3.

Tableau 6-6 : Mesures de Co, NOx et HCl (en mg/Nm³ sec à 11% d'O₂) lors de la combustion de panneaux de particules sur unité pilote

Panneaux	diverses essences	encollés UF	encollés MUF	encollés SUF	encollés MUF	encollés PF	encollés PU	bois massif
Unité	40 kW	116 kW		expérimentale				
CO		80 – 1070	30 – 220	56	112	56	56	
NO _x	100 - 1230	100 – 760	130	690	1080	220	345	110
HCl	0.1 - 34			12	34	2	2	2

UF : urée-formol, MUF : mélamine urée-formol, PF : phénol-formol, PU : polyuréthane

Pour l'incinération de bois faiblement adjuvanté, l'extrême diversité des composés de traitement employés ne permet de raisonner qu'au cas par cas ou à brûler ces déchets en mélange dans des unités de tailles suffisantes, équipées de systèmes d'épuration des fumées adaptés.

En raisonnant au cas par cas, il est nécessaire que la source soit suffisamment homogène et régulière. Il est également important de connaître ses caractéristiques afin de prédire son comportement lors de la combustion et pour estimer les émissions potentielles de polluants à l'atmosphère.

Les enjeux de l'incinération sont variables selon le type de déchets :

- Les cagettes, très faiblement adjuvantées (5% seulement des bois sont en contreplaqué) contiennent, en moyenne, moins de 500 ppm de colles. La combustion de cagettes n'est donc pas a priori significativement distincte de la combustion de bois naturel.
- Les palettes tout-venant (dont moins de 30 % sont traitées) sont susceptibles, du fait du produit anti-bleu employé, de générer des dioxines et furanes ainsi que d'autres composés organiques chlorés. Bien qu'en constante diminution, la teneur en PCP est à surveiller.
- Une multitude de panneaux sont commercialisés. Une approche au cas par cas est donc souhaitable étant donné qu'une source peut être aisément caractérisée (la nature et la composition des adjuvants présents dans les panneaux étant connues). La combustion de ces matériaux est susceptible d'intervenir principalement sur les émissions de polluants suivants :
 - les oxydes d'azote : les colles principalement les urée-formol ou mélamine-urée-formol ajoutent d'importantes quantités d'azote au bois. L'effet n'est cependant pas proportionnel car une partie de l'azote se transforme en N₂ lors de la phase de combustion (partie centrale de la flamme, en conditions anaérobies).
 - l'acide chlorhydrique : le chlorure d'ammonium et les revêtements PVC peuvent apporter du chlore en quantité au combustible. Des teneurs en HCl comprises entre 57 et 74 mg/Nm³ ont été mesurées (les teneurs en HCl lors de la combustion de bois naturel sont inférieures à 10 mg/Nm³).
 - les composés organiques chlorés : tels que les dioxines, les furanes, les PCB qui se forment lorsqu'il y a présence de chlore dans le combustible. Le bois naturel contient peu de chlore mais les bois adjuvantés sont susceptibles d'en contenir en quantités importantes. Rappelons que les émissions de l'ensemble de ces composés sont favorisées par une mauvaise qualité de combustion et que même à de faibles concentrations, le chlore n'est souvent pas un élément limitant.

- les aldéhydes, présents à de faibles teneurs dans le bois naturel et à de très fortes teneurs dans la plupart des bois encollés; ces composés sont susceptibles d'être émis lorsque les conditions de combustion sont défavorables.
 - les métaux lourds : divers additifs contenant des métaux lourds peuvent également être employés lors de la fabrication de panneaux, et engendrer des émissions de métaux lourds largement supérieures à celles mesurées dans le cas du bois naturel.
- Les mêmes remarques s'appliquent à l'industrie de l'ameublement qui utilise les matériaux fabriqués par l'industrie des panneaux d'autant plus que des adjuvants supplémentaires sont également employés.

Il ne faut également pas perdre de vue que pour l'ensemble de ces déchets, ainsi que pour le bois naturel, d'autres polluants ayant un impact sur la santé et/ou l'environnement sont émis :

- les composés organiques volatils totaux ou spécifiques tels que benzène et phénol en particulier
- le monoxyde de carbone et les hydrocarbures aromatiques polycycliques (HAP),
- les poussières.

Les émissions de ces polluants dépendent de la composition du combustible, mais également et surtout des caractéristiques et des conditions de fonctionnement des installations de combustion. Les impacts potentiels de ces polluants ne sont pas détaillés dans cette étude. Néanmoins, les problématiques de santé humaine et des milieux naturels sont particulièrement sensibles.

Le paragraphe 6.6 présentera les atouts et inconvénients de chaque filière selon la méthodologie ACV.

6.5.2 Traitements des fumées et conditions d'exploitation nécessaires

En France, la réglementation des déchets de bois s'articule aujourd'hui autour de la législation des Installations Classées pour la Protection de l'Environnement. Elle est floue quant à la valorisation énergétique de déchets de bois.

Le Tableau 6-7 présente les principales réglementations françaises sur la valorisation de bois de classe B en énergie:

Tableau 6-7

Valorisation énergétique	Contrôle des émissions
Combustion: pour les déchets de bois ne contenant pas de métaux toxiques ou de composés organohalogénés	Rubrique 2910 B: Arrêté du 20 09 02 ou 30 07 03 si P>20 MW. Arrêté préfectoral d'autorisation dès que P> 0,1 MW. RSD si P< 0,1MW.
Incinération : pour les déchets susceptibles de contenir des métaux lourds ou composés organohalogénés.	Arrêtés du 20 09 02, relatifs à l'incinération de déchets dangereux (rubrique 167 C4), et non dangereux (322 B4).

En France, les limites d'émissions pour une chaudière > 50 MWh sont résumées dans le Tableau 6-8.

Tableau 6-8 : Limites d'émission de certains polluants relatives aux installations de combustion et aux installations d'incinération de déchets (en mg /Nm³)

	SOx	NOx	Poussière	CO	HAP	COV	Cd,Hg,Tl	As Se Te	Pb
Installation de combustion	2 000	200- 600	50-100 selon la taille de l'agglomération	300	0.1	110	0.1	1	1
	SO ₂	NO+ NO ₂	Poussière	HCl	HF	Hg	Cd,Tl	As,pb,Sb, Cr,CO,...	
Installation d'incinération de déchets déjà existante	200	400	30	60	4	0.05	0.05	0.5	

6.6 Evaluations environnementales des filières

6.6.1 Méthodologie et champ de l'étude

L'Analyse de Cycle de Vie (ACV) est une méthodologie qui permet d'évaluer les impacts environnementaux d'un produit sur l'ensemble de son cycle de vie. Pour cette étude, l'ACV permet de comparer 5 scénarios. Toutes les phases communes aux 5 scénarios ne sont donc pas modélisées, notamment les étapes en amont du déchet de bois de classe B et les étapes de collecte, de broyage et de préparation du déchet et de transport vers l'unité de valorisation.

L'évaluation des impacts environnementaux, soit le calcul des pollutions engendrées sur plusieurs critères d'impacts, est basée sur des méthodes reconnues internationalement. Nous étudierons principalement:

- la participation à l'effet de serre g équ. CO₂ d'origine fossile
- la participation à la consommation d'énergie non-renouvelable MJ non renouvelable
- l'acidification de l'atmosphère g équ. SO₂
- l'eutrophisation des eaux g équ. PO₄

Les impacts du CO₂ biogénique et de la consommation d'énergie renouvelable sont exclus de cette étude ACV. Les enjeux de stockage et de décalage des émissions dans le temps ne sont donc pas abordés ici.

Note: la fin de vie des panneaux recyclés et des panneaux substitués n'est pas prise en compte. Une étude ACV plus complète permettrait de regarder ces problématiques plus en détail.

Le flux de bois de classe B peut être utilisé comme source de :

- Matière
- Energie

L'enjeu est d'évaluer les conséquences de sa valorisation dans l'une et l'autre application. Si une compétition s'instaure entre les deux filières, la filière actuelle de valorisation en panneaux doit trouver un matériau de substitution. Les impacts environnementaux évoluent fortement si ce matériau de substitution est de la biomasse (scénario 4) ou un matériau d'origine fossile (PVC: scénario 3).

Si le bois de classe B est valorisé en énergie, il s'agit de voir s'il remplace la production d'énergie d'origine fossile (scénario 1) ou remplace un autre projet de production d'énergie renouvelable (scénario 2).

Grâce à la méthodologie d'ACV simplifiée, nous avons comparé les 5 scénarios suivants:

- Scénario 1: Valorisation du bois B en panneau / Energie fossile

- Bois de classe B valorisé à 100 % en panneaux de particules. Les panneaux sont alors constitués de 30 % de bois catégorie B.
- Energie produite (équivalent de l'énergie valorisable par le bois de classe B) par un mix 50% - 50 % de chaudières industrielles fuel et gaz naturel.
- Energie de cimenterie produite (équivalent de l'énergie valorisable par le bois de classe B) par mix énergétique cimenterie (28.5% charbon, 64% lignite, 7.5% fuel)

Ce scénario bleu se rapproche du scénario actuel: 100 % de bois de classe B en panneau.

- Scénario 2: Valorisation panneau du bois B / Energie renouvelable
 - Bois de classe B valorisé à 100 % en panneaux de particules. Les panneaux sont alors constitués de 30 % de bois catégorie B.
 - Energie produite (équivalent de l'énergie valorisable par le bois de classe B) par un mix de sources d'énergie renouvelable.
 - Energie de cimenterie produite (équivalent de l'énergie valorisable par le bois de classe B) par mix énergétique cimenterie.
- Scénario 3 : Valorisation énergie bois B / panneau PVC
 - Le bois de classe B (30 %) des panneaux est remplacé par des panneaux de PVC (le poids équivalent du bois du scénario 1 est consommé en PVC)
 - Bois de classe B valorisé à 100 % en énergie par une chaudière industrielle.
 - Energie de cimenterie produite (équivalent de l'énergie valorisable par le bois de classe B) par mix énergétique cimenterie
- Scénario 4 : Valorisation énergie bois B / panneau biomasse
 - Le bois de classe B (30 %) des panneaux est remplacé par des résidus de bois de coupe qu'il faut sécher.²⁶
 - Bois de classe B valorisé à 100 % en énergie par une chaudière industrielle.
 - Energie de cimenterie produite (équivalent de l'énergie valorisable par le bois de classe B) par mix énergétique cimenterie.
- Scénario 5: Valorisation énergie cimenterie bois B / panneau biomasse
 - Le bois de classe B (30 %) des panneaux est remplacé par des résidus de bois de coupe qu'il faut sécher.
 - Energie produite (équivalent de l'énergie valorisable par le bois de classe B) par un mix 50% - 50 % de chaudières industrielles fuel et gaz naturel.
 - Bois de classe B valorisé à 100 % en énergie de cimenterie produite. Cette énergie permet d'éviter un mix énergétique cimenterie

L'unité fonctionnelle est la valorisation d'1 m³ de bois de classe B. Pour l'application en panneaux, cette quantité de bois de classe B intervient pour 30% en volume d'un panneau de 3,3 m³. Les 70% restants correspondent à une production de panneaux de particules standards à partir de bois vierge (base de données).

Le Tableau 6-9 donne un résumé des scénarios.

²⁶ Par rapport à la modélisation de la ressource bois discutée au point 2.6.2.4.3, il est considéré que le gisement de résidus de bois de coupe est illimité, c'est-à-dire qu'il ne serait pas utilisé sans l'application en panneaux.

Tableau 6-9

	Scénario 1	Scénario 2	Scénario 3	Scénario 4	Scénario 5
Fonction construction	Panneau bois B		PVC	Bois de coupe à sécher	
Fonction énergie	Chaudière gaz (50%) et fuel (50%)	Energie renouvelable	bois B		Chaudière gaz (50%) et fuel (50%)
Fonction cimenterie	28.5% charbon, 64% lignite, 7.5% fue				bois B

6.6.2 Résultats

Les figures suivantes présentent les résultats pour chaque scénario et chaque catégorie présentés dans le paragraphe 6.6.1.

Les scénarios en bleu sont ceux n'utilisant pas de ressource fossile ni pour la production d'énergie, ni pour la production de panneau. Les scénarios orangés utilisent des ressources fossiles soit pour l'énergie soit pour la production de panneaux.

La différence entre les scénarios permet d'estimer le gain ou l'impact potentiel d'une décision pour la filière de valorisation d'1 m³ de bois de classe B.

L'utilisation matière (panneaux) de bois B est la meilleure et la moins bonne option à la fois, selon les implications indirectes :

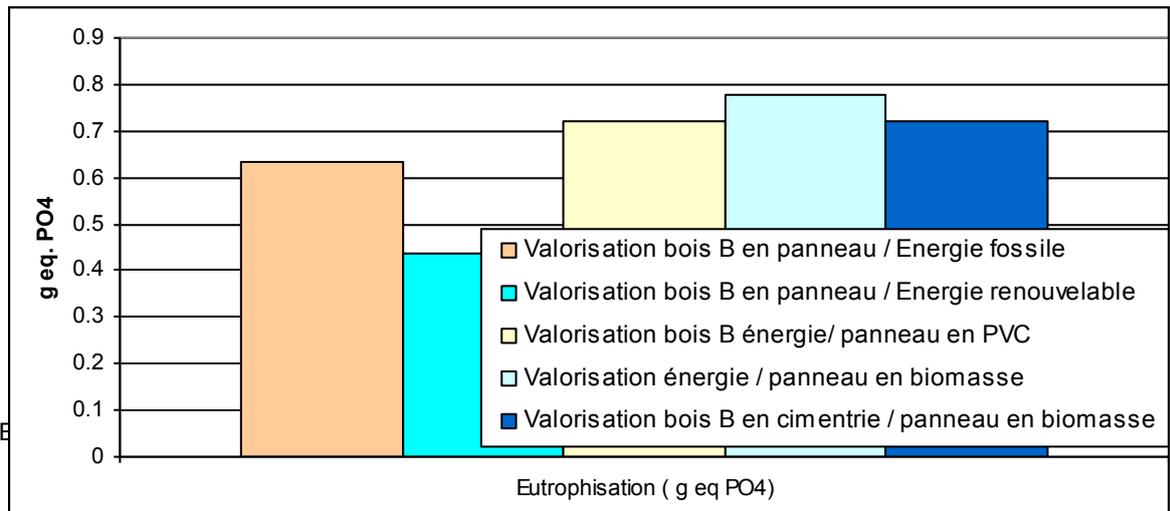
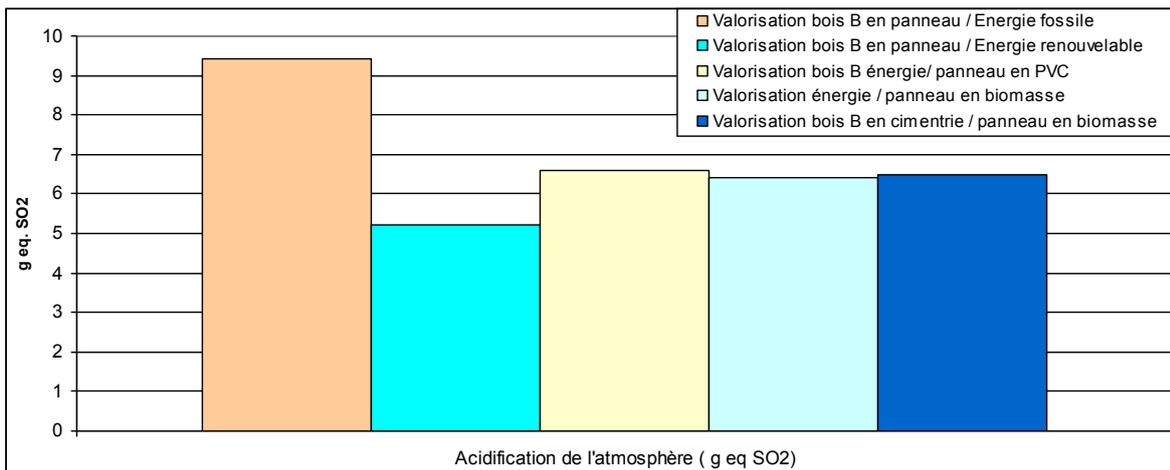
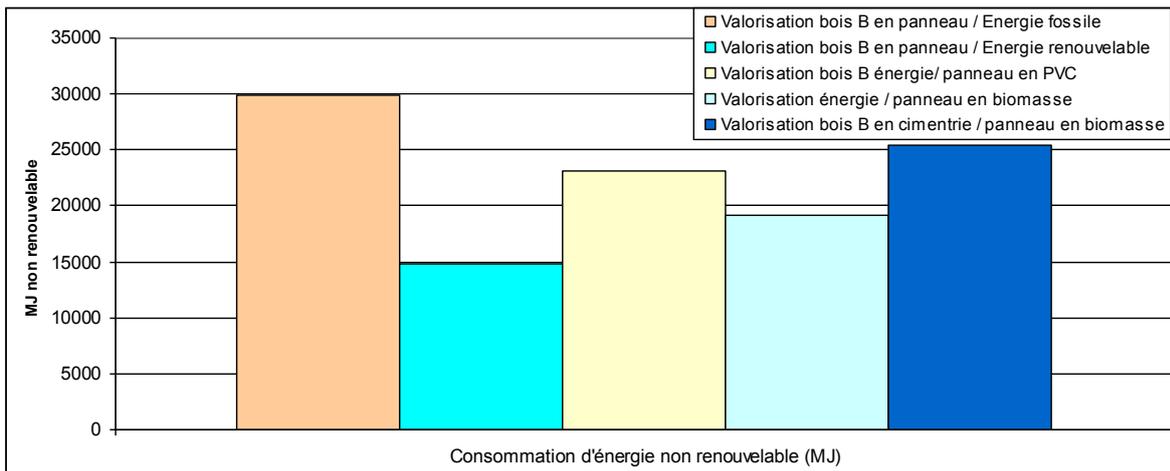
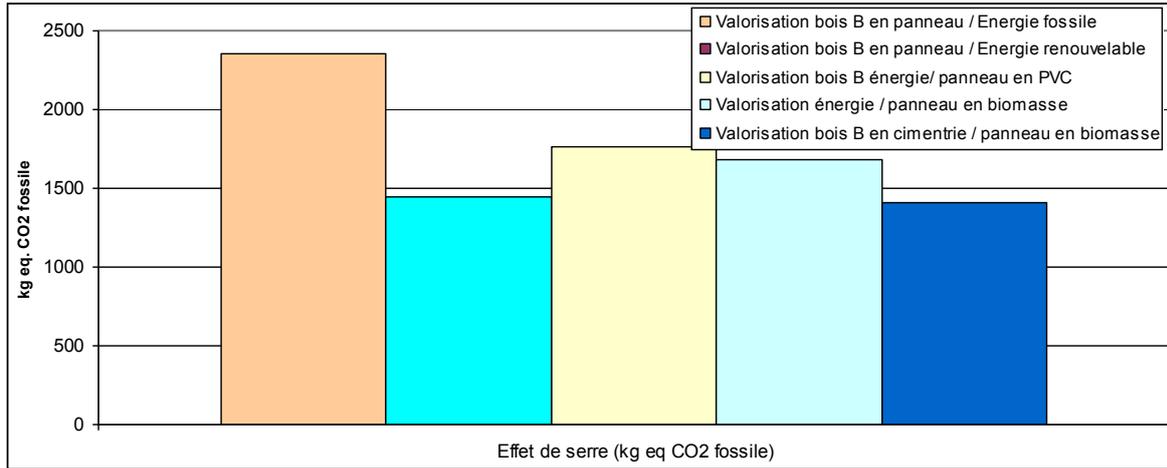
- Si, en l'absence de valorisation énergétique du bois B, la chaleur est produite à partir d'énergie fossile (scénario 1, orange), l'utilisation matière du bois B est la moins bonne option du point de vue environnemental pour toutes les catégories sauf l'eutrophisation de l'eau. Cette exception est due à la combustion du bois émet particulièrement plus de phosphore dans l'air que les ressources énergétiques fossiles. Ces émissions se traduisent par une participation plus forte à l'eutrophisation de l'eau. C'est l'unique catégorie d'impact pour laquelle les scénarios 3, 4 et 5 sont supérieurs au scénario 1. Cette exception est susceptible de disparaître si l'on prend en compte la fin de vie des panneaux (du moins s'il y a combustion)
- 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** (scénario 2, bleu fluo), alors l'utilisation de bois B en panneaux stimule indirectement la production d'énergie renouvelable et devient le meilleur des 5 scénarios (toutes catégories).

Les 3 autres scénarios, où le bois est valorisé énergétiquement, se tiennent de près et les résultats sont variables d'une catégorie à l'autre, sans qu'aucune option n'émerge. La comparaison entre les scénarios 3 et 4 n'est pas pertinente dans le cadre de cette étude mais bien celle entre le scénario 5 (valorisation du bois B en cimenterie) et comme source de chaleur (scénarios 3 et 4).

La valorisation en cimenterie (scénario 5) :

- Est plus favorable pour les catégories effet de serre (clairement) et eutrophisation (moins net vis-à-vis du PVC)
- Est moins favorable pour la catégorie consommation d'énergie non renouvelable
- Est neutre pour la catégorie acidification de l'atmosphère

Les différences entre les scénarios 4 (chaudière) et 5 (cimenterie) sont exclusivement dues au mix énergétique fossile évité et au rendement énergétique de l'installation (le mix énergétique d'une cimenterie a un moins bon rendement kg CO₂ émis / MJ disponible).



6.7 Conclusion

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, par des contrôles visuels des différents acteurs uniquement. En pratique, le référentiel de l'EPF (European Panel Federation) est souvent pris en référence mais il n'a pas de base légale.

Actuellement la quasi-totalité du bois de classe B est dirigée vers la filière panneau. La régulation du marché par les prix mais surtout les contraintes réglementaires liées à l'exploitation de chaudières capables de valoriser du bois de classe B impose la filière panneau.

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 pour 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.

L'ACV simplifiée doit faire intervenir la modélisation des conséquences de la consommation du bois dans chacune des filières en termes de ressources substituées. Cette modélisation dépend de l'état des marchés et des politiques en matière d'énergie renouvelable. Plusieurs scénarios extrêmes ont été étudiés. Les résultats montrent que :

- utiliser le bois B en panneau, obligeant ainsi les producteurs d'énergie à utiliser de nouvelles sources d'énergie renouvelable pour atteindre les objectifs européens, est bénéfique pour l'environnement.
- Si par contre cette substitution par de l'énergie renouvelable n'a pas lieu, l'option panneau devient la moins bonne (sauf pour l'eutrophisation, mais ceci pourrait être dû à une limite de la modélisation ACV utilisée dans cette étude).

6.8 Références

Entretiens:

Responsable commercial Selva-bois (janvier 2010)

Louis de Reboul - *président de la commission bois process énergie de FEDEREC-* (mars 2010)

Publications:

[82] Décision de la commission , Liste européenne des déchets 2000/532/CE (3 mai 2000)

[83] S. COLLET - *Emissions de dioxines, de furanes et d'autres polluants liées à la combustion de bois naturels et adjuvés* (février 2000)

[84] ADEME – *Etat de l'art de la réglementation européenne sur la valorisation des déchets de bois et des cendres de bois* (novembre 2007)

[85] PLANAIR ASEB ITEBE - *Valorisation énergétique des bois de rebut Etat des lieux en France*

[86] EPF - *Standard for delivery conditions of recycled wood*

[87] *Ecoinvent – LCI of wood as fuel and construction material* (septembre 2007)

[88] UNIFA - *La hausse des matières premières fragilise les Industries Françaises de l'Ameublement* (septembre 2008)

7. Conclusions générales

7.1 Limites générales

Le recyclage de déchets de pré-consommation en boucle fermée sur le site même de fabrication fait depuis longtemps partie intégrante de nos systèmes de production. 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. Le plus souvent, ce recyclage ne pose 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.

Néanmoins, des limites techniques peuvent se présenter même dans ces cas, inhérentes soit aux caractéristiques intrinsèques de la matière (cas rare, par exemple les résines thermodurcissables qui sont infusibles et auxquelles on ne peut donc pas donner une nouvelle forme), soit au caractère difficilement séparable des matières combinées pour en optimiser les propriétés (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 il n'y a pas de solution technique 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.

Les déchets de production qui ne peuvent pas être recyclés en boucle fermée sur le site-même sont envoyés chez un recycleur. Vu que ces flux peuvent représenter des quantités significatives, en flux séparés et sans contamination liée à l'usage, des procédés spécifiques peuvent être mis en œuvre pour les valoriser en boucle fermée ou dans des applications ayant le même niveau d'exigence que l'application de départ. L'intérêt de la boucle fermée est de laisser la place aux matières moins pures (post-consommation) dans les débouchés moins exigeants.

S'il n'est pas rentable de développer une filière spécifique, ces flux industriels peuvent être assimilés aux déchets post-consommation.

Les limites au recyclage qui se présentent exclusivement pour les flux post-consommation sont :

- Le risque de collecte en mélange et la difficulté subséquente de **séparation des matériaux** : 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.
- Le problème de **contamination** par des métaux, des agents pathogènes, des souillures d'hydrocarbures. Ces contaminants peuvent 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
 - 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.

En fonction des contaminations et du manque de pureté en termes de nature ou de couleur de la matière à recycler, la matière première secondaire est utilisée par ordre décroissant de préférence (à affiner au cas par cas) :

- dans les applications les plus exigeantes de la matière vierge, en substitution 1 :1 (ou en substitution légèrement inférieure à 1 :1)
- dans des applications peu exigeantes mais quand-même en substitution 1 :1 (ou en substitution légèrement inférieure à 1 :1)

- dans des applications en substitution de la même matière mais avec un surpoids important
- dans des applications en substitution d'un autre matériau ou en mélange avec d'autres matériaux

Les filières de recyclage post-consommation sont dominées à l'heure actuelle par les applications peu exigeantes présentant des bons taux de substitution. En termes de bénéfices environnementaux, 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 faudra donc aller vers de nouveaux débouchés.** Afin que le recyclage génère un bénéfice environnemental, il faut que les débouchés consistent en des applications plus exigeantes, même si les coûts des procédés à mettre en œuvre sont plus élevés.

En guise de synthèse :

- De réels problèmes techniques peuvent exister du fait
 - des limites liées à la nature de la matière mais elles sont rares
 - de l'aspect multi-matériau
- Des freins de nature économique sont rencontrés suite à :
 - La taille faible du gisement et l'évolution dans le temps de sa composition et de son volume qui empêchent de mettre au point une filière spécifique qui serait plus favorable du point de vue environnemental
 - Les coûts élevés de séparation ou de décontamination plus poussée
- Les limites environnementales sont rares mais peuvent survenir par exemple en cas d'impacts importants
 - de décontamination (déchets d'hôpitaux, déchets organiques décomposés en atmosphère anaérobie...)
 - de lavage (traitement des eaux de lavage de pots de yaourt, de films agricoles...)
 - de séparation (séparation par dissolution, distillation/condensation...).

7.2 Etudes de cas

Concernant les études de cas, les principales limites techniques et environnementales sont :

- Recyclage de PEHD en présence de PP :
 - actuellement, comme la part de PP est encore relativement faible, sa présence à raison de quelques % ne pose pas encore de problème technique.
 - 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. Des techniques de séparation vont devoir être mises en œuvre. Elles ne sont pas encore au point à échelle industrielle mais certaines en sont proches (séparation IMDS, une grosse installation a démarré en 2009 aux Pays-Bas).
- Présence de couches barrière dans les bouteilles PET
 - actuellement, comme la part de bouteilles PET avec couche barrière est encore relativement faible, sa présence à raison de quelques % ne pose pas de problème technique²⁷.

²⁷ Si en moyenne les bouteilles PET contiennent 6% de PET recyclé et que 5% des bouteilles ont des couches barrière qui représentent 5% en poids, la proportion de matériau barrière dans le PET recyclé est de 0,017%.

- Cependant, la proportion de bouteilles PET avec couche barrière augmente²⁸. Le problème principal est que l'aspect visuel se dégrade. Il est donc crucial que les bouteilles avec couche barrière puissent être séparées des autres et aller dans les applications fibres tandis que les bouteilles sans couche barrière pourraient aller dans les applications bottle-to-bottle. Actuellement, seul un tri manuel est possible mais pas suffisant. Les techniques de reconnaissance en développement (avec ou sans marquage) pourraient résoudre le problème.
 - En matière d'écoconception, 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). Pour les blends, le problème serait réduit si on parvenait à les identifier et les séparer pour les remettre en œuvre en tant que blends (perspective à long terme). Mais il resterait les problèmes de diminution d'efficacité des scavengers et du jaunissement.
- Contamination de l'acier par le cuivre
 - Une fois que le cuivre est en alliage dans l'acier, il devient impossible de l'extraire. Entre 6 et 14% du flux de cuivre est perdu comme élément contaminant dans l'acier. Il y a donc une perte de ressource (pas un enjeu majeur en tant que ressource mais un impact environnemental lié à l'absence de recyclage).
 - Il n'y a pas (encore) de problème actuellement car il y a suffisamment de débouchés pour l'acier contaminé au cuivre et qu'il y a un effet de dilution.
 - Si un problème de qualité/débouché devait se poser, des solutions techniques sont prêtes à être mises en œuvre, essentiellement pour avoir une meilleure séparation (lors du broyage des VHU et des DEEE).
 - Valorisation du bois de classe B
 - La classe B est définie de façon qualitative ("faiblement adjuvantés") dans la législation. Ce sont les producteurs qui ont quantifié les seuils.
 - Actuellement la grande majorité 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. 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.
 - Du point de vue environnemental, l'enjeu est la production alternative. En gros, 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.
 - 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.

²⁸ A terme, si les bouteilles PET contiennent 50% de PET recyclé et que 40% des bouteilles ont des couches barrière qui représentent 5% en poids, la proportion de matériau barrière dans le PET recyclé est de 1,9%, soit 100 fois plus.

- **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.