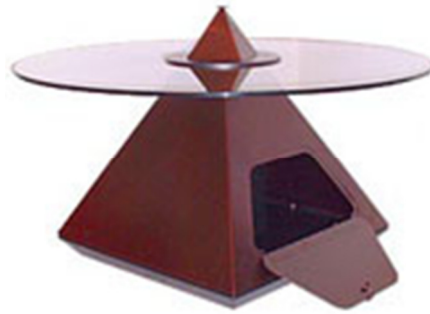
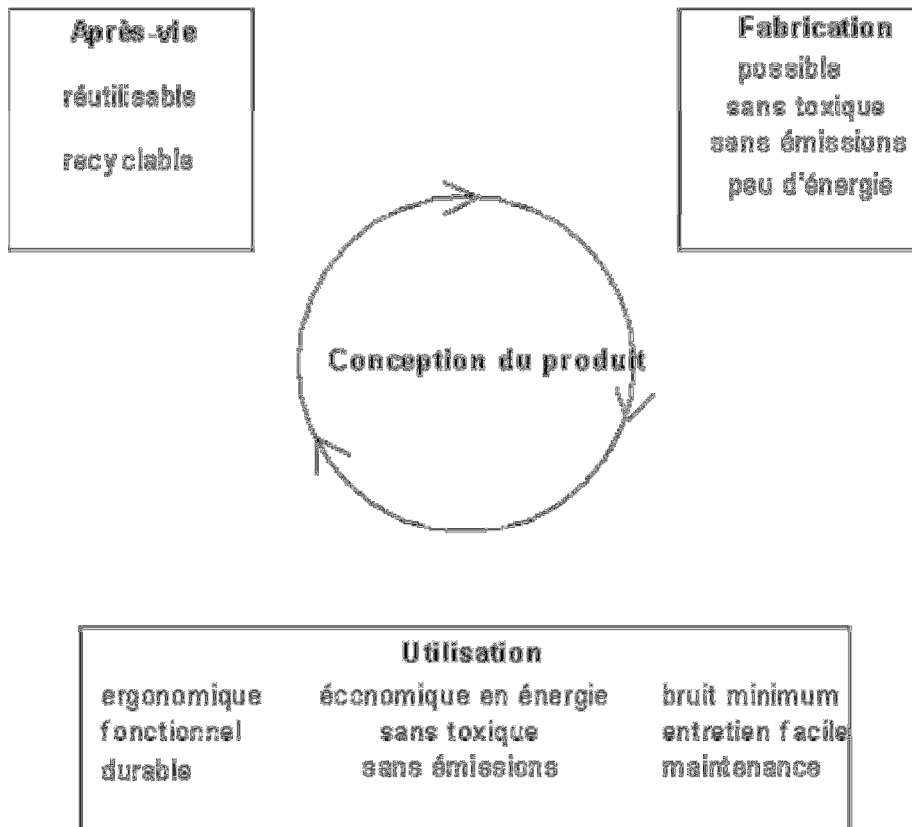


# Concevoir un produit en pensant " Environnement" : Application dans le secteur des matières plastiques et du collage



## 1. Niveau d'implication de la conception d'un produit

Penser environnement dès la conception d'un produit est une démarche qui peut intervenir à plusieurs niveaux et donner rapidement des résultats, mais qui, pour être complète, implique une réflexion sur l'ensemble du cycle de vie de celui-ci.





### Penser environnement dès la conception d'un produit :

- c'est minimiser l'impact de sa fabrication sur l'environnement,
- c'est prévoir un produit durable, utilisable sans génération de nuisances,
- c'est réduire, d'une manière générale, le volume de déchets, mais c'est aussi introduire ces déchets de manière la plus rentable dans un processus de recyclage.

**Cela peut être aussi tout simplement concevoir le produit à partir de matières recyclées.**

## 2. Fabrication

### 2.1. Exemples de la fabrication des composites

Dans l'industrie du composite, les résines polyester sont diluées au départ dans un monomère, le plus souvent le styrène. Au moment de l'application, le polyester co-polymérise avec le styrène, sous l'action d'un catalyseur éventuellement accéléré ou promotorisé.

Le taux de styrène optimum est compris entre 30 et 45 % pour les polyesters les plus classiques. Une partie de ce solvant participe à la réaction, une partie se volatilise et vient polluer l'air de l'atelier d'abord, l'atmosphère du dehors ensuite, s'il n'est pas capté.

Selon la nature du produit à fabriquer, il est possible dans certains cas de choisir des technologies de mise en œuvre qui minimisent la volatilisation des solvants : ce sont les techniques dites à moule fermé.

Il est possible aussi de capter les émissions nocives, mais il s'agit de solutions coûteuses et qui ne font souvent que déplacer le problème de la pollution.

On peut enfin dans de nombreux cas supprimer les émissions à la source en choisissant un autre matériau lors de la conception du produit.

**Théoriquement, du point de vue de la résine, on peut agir sur les points suivants :**

- Changer de monomère.
- Renoncer au polyester.
- Utiliser des résines à bas taux de styrène (high solids).
- Utiliser des résines LSE, à basse émission de styrène.
- Utiliser des techniques de polymérisation UV.
- Changer les proportions verre/résines ou inclure un maximum de charges.

#### 1. Monomère alternatif

Le premier moyen auquel on pense pour éliminer les émanations nocives est de supprimer le styrène. Il faut donc **trouver un monomère de substitution**. Malgré les recherches intensives, il n'y a pas vraiment d'alternative pour le moment, si on tient compte de tous les aspects technologiques, toxicologiques et économiques.



**Le styrène est de très loin le principal monomère utilisé pour les raisons suivantes :**

- prix très bas
- fabrication aisée, c'est à dire :
  - qualité très stable
  - pas d'isomères
  - pas d'autres produits parasites
- qualités physiques adéquates
- ni trop volatil (comme les monomères acryliques)
- ni trop lourd (comme les monomères allyliques)
- Plusieurs solvants alternatifs ont été examinés et testés.

| Monomère            | Point d'ébullition | Prix | Remarques                                  |
|---------------------|--------------------|------|--|
| Styrène             | 145                | 1    | Cancérogène                                |
| Acrylonitrile       | 77                 | 1.2  | TLV plus faible                            |
| Acide acrylique     | 141                | 1.6  | Tension de vapeur plus haute               |
| Acrylate de méthyle | 80                 | 1.1  | Faible réactivité                          |
| Allylacétate        | 104                | 6.9  | Faible réactivité, odeur                   |
| Chlorostyrène       | 199                | 1.9  | Visqueux, faiblement réactif               |
| Diallylphtalate     | 195                | 2.1  | Produits friables, très mauvaise odeur     |
| Divinylbenzène      | 101                | 1.2  | Haute tension de vapeur, faible réactivité |
| MMA                 | 165                | 1    |  |
| a-méthylstyrène     | 158                | 5.9  | Faible réactivité                          |
| Vinylpyridine       | 170                | 1.5  | Odeur nauséabonde                          |
| Vinyltoluène        |                    |      | Viscosité plus haute                       |

Chacun de ces solvants présentent des inconvénients par rapport au styrène. Ils sont **plus nocifs**. Ils conduisent à des réactions de réticulation ou à des **propriétés mécaniques finales moins intéressantes**. Les **prix sont plus élevés**, ou les **conditions d'évaporation sont pires** que celles du styrène.

D'une manière générale, aucun de ces solvants n'est aussi bien connu du point de vue toxicologique que le styrène, qui bénéficie d'une longue 'courbe d'expérience'.



Tous les efforts pour remplacer le styrène par d'autres monomères ont abouti à des produits pour des applications spéciales mais aucun produit de substitution universel ne s'est dégagé.

**A court terme, il ne semble pas possible de remplacer le styrène dans les formulations polyester.**

## **2. Renoncer au polyester**

### **Thermodurcissables**

Remplacer le polyester par un autre thermodurcissable comme l'époxy n'est pas toujours possible d'un point de vue technique; de plus, les matériaux alternatifs sont beaucoup plus coûteux, et souvent plus toxiques.

Certains fabricants travaillent aujourd'hui sur des hybrides polyester/polyuréthane qui seraient plus faciles à mettre en œuvre que les résines dites écologiques (bas styrène, LSE).

Les émissions sont réduites à un niveau très bas. Le matériau résultant combine les propriétés des deux constituants. Un avantage supplémentaire réside dans la rapidité du procédé : le temps de démoulage peut être réduit par un facteur 4, ce qui permet de diminuer considérablement le nombre de moules nécessaires.

Des produits sont déjà disponibles pour des applications en RTM, moulage au contact et projection simultanée.

### **Thermoplastiques**

Les thermoplastiques pallient aux inconvénients des thermodurcissables en offrant les avantages suivants :

- pas de dégagement de solvants, pas de réaction chimique pendant la transformation ;
- formulation simple (prête à l'emploi) ;
- stockage et consommation illimités ;
- cycle de transformation plus rapide et absence d'ébavurage ;
- recyclable par simple refusion ;
- tenue aux chocs et à l'impact améliorée.

La mise en œuvre de cette famille de matériaux implique bien entendu un changement radical des technologies de mise en œuvre.

Les thermoplastiques non armés ou armés de fibres courtes ne présentent pas de résistance mécanique suffisante pour remplacer les composites thermodurs.

Cependant, si on parvient à augmenter les performances de ces matériaux, en conservant des vitesses de production intéressantes (et des prix bas), il y a une place à prendre pour les thermoplastiques.

C'est l'objectif des thermoplastiques armés de fibres longues. Ils peuvent concurrencer les thermodurs pour certains types de pièces, en fonction des contraintes en service et des dimensions; la technique n'en est cependant qu'à ses débuts.

Le TRE (Thermoplastique Renforcé Estampable) ou GMT (Glass Mat Thermoplastic) se présente sous la forme d'une plaque de résine thermoplastique renforcée de fibres, sous forme de mats par exemple, avec des longueurs de coupe > 25 mm.

Ces plaques sont transformées par emboutissage ou par estampage. Des flans sont découpés comme pour le moulage du SMC, mais ici, le moule est froid ou légèrement chauffé et ce sont les flans qui sont chauffés à une température supérieure à la température de fusion de la résine. Après mise en place dans le demi-moule inférieur, le moule est fermé rapidement. Le temps de moulage, fonction du refroidissement de la matière dans le moule, est court (< 1 min).



Les pièces ainsi réalisées sont légères, rigides, fabriquées avec un procédé adapté à la grande série. Les fibres de verre longues leur confèrent une excellente résistance au choc et la matrice peut être choisie en fonction des résistances chimiques souhaitées.

### **3. Résines à bas styrène**

Le passage d'un taux de styrène de 40 % à 35 % provoque une diminution de moitié des pertes par évaporation. D'où l'idée de mettre au point une résine à bas taux de styrène. Le problème pour les fabricants est de maintenir une viscosité compatible avec une mise en œuvre convenable et une réticulation complète de la résine.

Il est possible de descendre jusqu'à 25% de styrène, mais la viscosité plus élevée demande un savoir-faire très important à la stratification et un temps de débullage considérablement plus long.

La longueur de cette phase entraîne finalement une émission qui reste conséquente.

C'est pourquoi ce type de résine n'a pas répondu jusqu'ici aux attentes des industriels.

Cependant, des résines à masse moléculaire plus faible ont été développées, ainsi que des additifs permettant d'obtenir une bonne évacuation de l'air et un excellent mouillage des fibres (même avec une résine plus visqueuse). Ces améliorations ont permis de maintenir une viscosité convenable avec un taux de styrène très bas. Les résultats sont excellents : là où une résine LSE donne des pointes d'émissions à 80-100 ppm (1 pic à 240 ppm) avec un niveau moyen de 65 ppm, une telle résine présente des pics de 65 ppm avec un niveau moyen de 35 ppm. Une résine standard donne des pics à plus de 1000 ppm.

### **4. Résines avec filmogènes (LSE)**

Afin de réduire l'émission du styrène, on a imaginé de fabriquer des résines 'écologiques' ou LSE (Low Styren Emission) en **incorporant au polyester divers additifs**, du type paraffine, qui forment une couche barrière sur la surface du composite et empêche l'évaporation du styrène.

L'agent filmogène est dispersé dans la résine liquide de manière homogène, mais a tendance à devenir incompatible. Dès que la mise en œuvre commence, l'évaporation du styrène détruit l'équilibre et la solubilité de l'additif est modifiée. Le filmogène va donc se séparer de la matrice vers la surface et former un film imperméable au styrène.

Ces résines n'empêchent pas toutes les émissions de styrène, parce que la couche barrière n'est pas efficace à tous les stades de la mise en œuvre du composite; elles n'ont pas non plus la même efficacité quel que soit le procédé utilisé, mais elles constituent un progrès indéniable.

On peut considérer que la réduction de l'émission totale du styrène est de 30-60 % lorsqu'on utilise des résines LSE. Ces produits sont donc à préférer chaque fois que c'est possible.

### **5. Résines UV (Ultra-violet)**

S'il n'est pas possible d'admettre la présence d'agents filmogènes en surface, une alternative consiste à stopper l'évaporation de styrène par la formation d'une couche durcie en surface.

Ceci suppose l'utilisation de résines photodurcissables dont la polymérisation est initiée par un rayonnement lumineux de longueur d'onde adaptée. Selon les cas, on peut réduire de 60 g/m<sup>2</sup> l'émission de styrène.

Ce procédé n'est pas nouveau. Des résines polyesters photoinitiées ont été utilisées dès 1950, mais ces anciens matériaux étaient limités par leurs propriétés.



Aujourd'hui, la plupart des résines polyesters standard ou vinylesters peuvent être traitées de manière à pouvoir réticuler lorsqu'elles sont exposées au rayonnement UV. Les formulations sont par exemple à base de cétones aromatiques comme initiateurs UV, utilisées avec des accélérateurs amines (méthyl-diéthanolamine).

Elles sont mises en œuvre par les procédés conventionnels (contact, projection...). Elles sont ensuite soumises à un éclairage UV sous un champ de tubes luminescents (UV commerciaux, lampes de solarium).

Comme la réticulation se fait dans le sens de la pénétration des UV, il se forme en quelques secondes en surface une peau durcie étanche au styrène.

En fonction des matières, les longueurs d'onde idéales varient dans une gamme de 360-420 nm. Il existe des lampes basse-tension de 40-100 watts et des lampes haute-tension de 400-4000 watts, ces dernières permettant une polymérisation plus rapide. La distance des lampes à la pièce influence aussi la vitesse de polymérisation. On peut utiliser des lampes qui n'émettent pas dans les courtes longueurs d'onde, ce qui permet d'éviter les problèmes potentiels pour la peau ou les yeux.

La lumière du soleil donne une réaction, quoique lente; par contre, une résine qui reste dans des locaux éclairés simplement par des ampoules à filaments reste utilisable.

Les émissions ne sont pas diminuées lors de la stratification, elles ne le sont qu'au moment du durcissement de la résine. Dès l'allumage des lampes, une couche durcie se forme en surface, suffisante pour empêcher l'évaporation du styrène.

D'autre part, l'utilisation de résines UV permet de réduire considérablement la quantité de solvants utilisés dans l'atelier en diminuant la fréquence des nettoyages des outillages.

Pour une résine normale, qui a un gel time court, de 20 à 50 minutes, il faut de nombreux cycles de nettoyages au cours d'une polymérisation, néfastes pour l'environnement et consommateurs de temps.

La résine UV, par contre, a un gel time infini tant qu'elle n'est pas exposée aux UV de longueur d'onde adéquate. Les outils peuvent donc n'être nettoyés qu'en fin de journée par exemple et leur durée de vie s'en trouve augmentée.

Ces résines sont particulièrement avantageuses dans l'imprégnation en continu (production de plaques par ex) et le moulage de pièces gel-coatées présentant une deuxième face transparente du côté qui n'est pas en contact avec le moule.

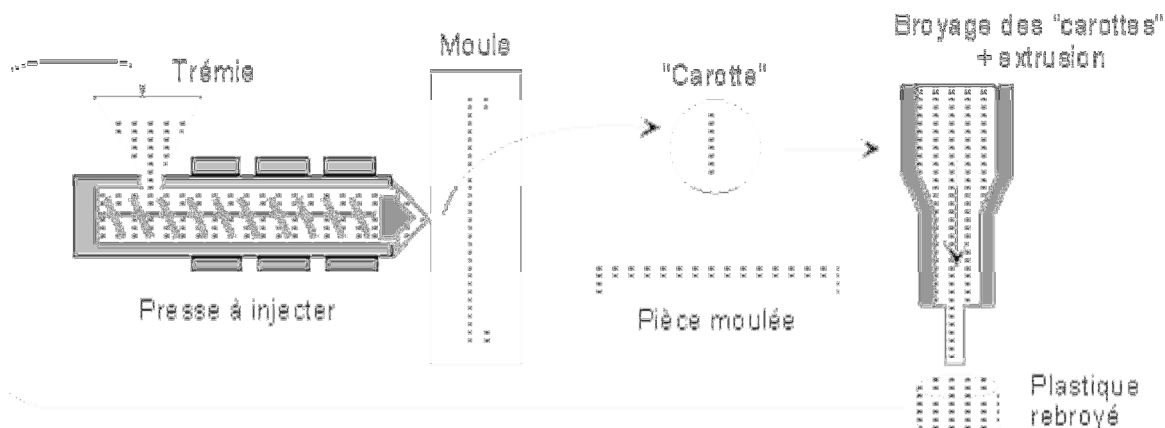
La polymérisation UV n'est possible que pour les systèmes transparents. Il y a une limitation en épaisseur pour les systèmes chargés. Pour des épaisseurs plus fortes, il faut rajouter un système catalytique et éventuellement terminer par un traitement thermique.

## **2.2. Déchets solides thermoplastiques**

La mise en œuvre des thermoplastiques a un impact relativement faible sur l'environnement : elle nécessite peu d'énergie; les pollutions de l'air et de l'eau sont faibles.

Les rejets des entreprises de transformation sont essentiellement des déchets solides. Ces déchets internes sont de plus en plus souvent recyclés : carottes et grappes d'alimentation, pré-production... sont granulées et réintroduites en faibles concentrations (10 à 20 %) dans le cycle ou font l'objet d'une autre production.

## Recyclage interne



Dans d'autres cas, les déchets ne peuvent faire l'objet d'un recyclage : la matière est mal identifiée, souillée, trop dégradée ou les lots sont trop fragmentés.

De toutes façons, un déchet qu'on ne produit pas ne devra pas être recyclé par la suite et ne consommera ni matières premières ni énergie pour sa fabrication et son recyclage.

Prévenir la génération de déchets implique une organisation générale du travail performante, une conception adaptée aux matières, une plus grande fiabilité des procédés, un système de qualité bien pensé...

Plusieurs exposés traitent aujourd'hui de la prévention par la maîtrise des techniques ou par une bonne organisation des ateliers.

J'évoquerai plutôt la réduction des déchets par une bonne conception et une bonne mise au point des produits et des moules.

### 2.2.1. Outils d'aide à la conception

Réduire les déchets internes en facilitant la **mise au point** d'une nouvelle production, en **optimisant** le produit pour en réduire les épaisseurs, en assurant une **constance dans la qualité** de la fabrication, en assurant les fonctionnalités d'une manière optimale... c'est mettre en œuvre les outils modernes de conception, de simulation et de prototypage aujourd'hui disponibles pour les entreprises.

Les règles de conception des pièces plastiques doivent tenir compte des spécificités de la matière; elles concernent fondamentalement les épaisseurs de paroi, les surépaisseurs, les surfaces planes et nervures, les rayons, les dépouilles de démoulage.

#### Citons un exemple permettant d'évaluer la complexité des phénomènes à prendre en compte:

- Les épaisseurs de paroi doivent être le plus constantes possible pour favoriser :
  - un écoulement continu et régulier dans les différentes parois,
  - ne orientation et une déformation homogènes des macromolécules,
  - un refroidissement régulier de l'ensemble de la pièce,
  - de faibles variations de retrait entre les différentes de zones de la pièce.
- Elles seront aussi les plus faibles possible, pour éviter une consommation excessive de matière, un poids plus important, un surcoût dû à l'allongement des temps de cycle. Mais il y a un minimum, en fonction des hauteurs des parois, de la longueur d'écoulement et du comportement rhéologique de la matière.



Or, une enquête française a montré que dans **plus de 90% des cas**, les concepteurs sont **incapables de justifier le choix de l'épaisseur** des pièces sinon par l'habitude ou par la crainte de ne pas remplir l'empreinte.

Ne perdons pas de vue qu'une épaisseur de 10 % en moins dans une pièce, c'est 5 % du prix de revient (en injection, la matière représente 45 % du prix de revient) mais aussi 19 % du temps de refroidissement en moins.

Les thermoplastiques présentent lors de leur **mise en œuvre un comportement complexe**, influencé de manière non négligeable par une multitude de facteurs aléatoires, peu connus ou non contrôlés. Ceci explique qu'entre le moment où l'idée d'une réalisation prend forme et celui où les outillages tournent 24 h sur 24, s'est écoulé un laps de temps de l'ordre de 6 à 18 mois, émaillé de multiples péripéties relationnelles et techniques (d'où génération de nombreux rebuts).

Au vu des contraintes actuelles de rentabilité et de délais, et tenant compte de la fonctionnalité et de la technicité des produits plastiques d'aujourd'hui, **une telle procédure n'est plus acceptable.**

L'expérience est toujours indispensable, mais, sachant que les règles de bonne pratique sont de plus en plus difficiles à appliquer compte tenu de la diversité des produits et des matières injectées, mais pour la soutenir, **les nouveaux outils sont de plus en plus indispensables :**

- **Les logiciels de simulation**, qui permettent de modéliser le processus d'injection ou d'extrusion dès le stade du dessin du produit et donc de visualiser et de corriger la majorité des problèmes de moulage potentiels avant d'avoir le moule en acier.
- **Le Prototypage Rapide (RPT)** qui permet de réaliser en quelques jours des modèles et des moules pour séries prototypes desquels seront tirées des conclusions importantes quant à la moulabilité et à la fonctionnalité de la pièce étudiée.

### **2.2.2. Simulation**

La construction des pièces plastiques - forme (aspect) et dimensions - se fait de plus en plus souvent avec **des systèmes CAO.**

L'optimisation, elle, nécessite une analyse des écoulements de matière lors du remplissage du moule, afin de mettre en évidence les particularités de la pièce lors de sa mise en œuvre.

Cette méthode d'analyse est particulièrement rentable pour les grosses pièces où l'économie de matière et de poids est substantielle si on parvient à réduire les épaisseurs.

L'étude du remplissage du moule permet de prévoir la position du front d'écoulement et ainsi de fixer avec certitude les cotes et les points d'injection du moule. Le temps et le travail de reprise à affecter sur l'outillage terminé peuvent alors être réduits au minimum. Les reprises sur l'outillage impliquant une augmentation des parois des pièces, celles-ci peuvent garder l'épaisseur minimale fixée.

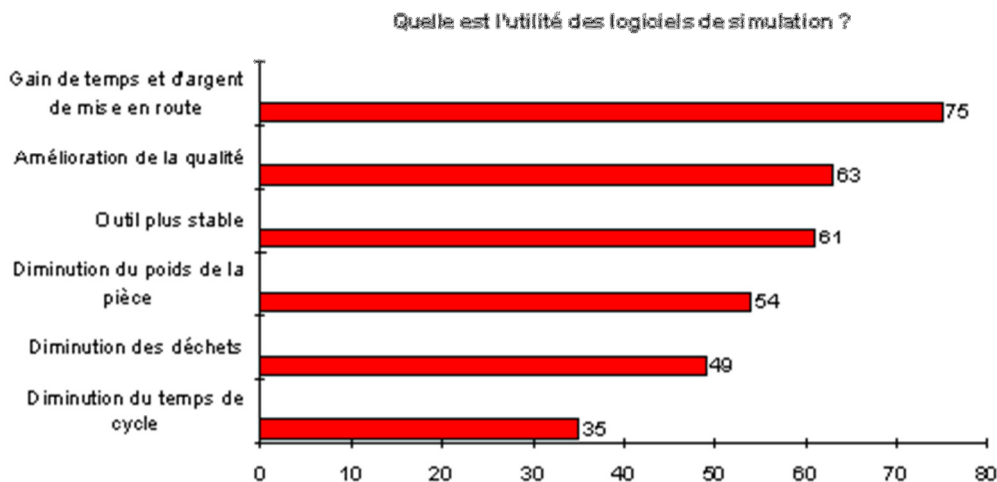
**Les logiciels de simulation sont utilisés pour :**

- Etudier le remplissage des empreintes du moule et positionner/dimensionner les canaux d'alimentation, les événements, les épaisseurs de parois.
- Etudier le refroidissement du moule pour optimiser le cycle et éviter les problèmes de distorsion de pièces moulées.
- Prédire les déformations de pièces et évaluer l'effet de mesures correctives.
- Définir des plages de fonctionnement de l'outil pour minimiser les opérations d'essais / erreurs lors de la mise en route et rendre l'outil d'usage plus sûr.

## Les bénéfices des outils de simulation:

Les outils de simulation, qui permettent une optimisation de la conception des produits plastiques, ont un impact non négligeable à différents niveaux.

Une étude américaine auprès de 400 utilisateurs a défini les avantages tirés d'une utilisation adéquate des logiciels de simulation :



### 1.- Gain de temps et d'argent :

En effet, utilisés à propos, ils permettent de **réduire** de façon majeure **les temps de mise au point des moules et les frais divers** qui y sont affectés. Les utilisateurs ont confirmé que le nombre d'itérations pour mise au point de moules complexes est de plus de 3 modifications majeures à 2 retouches mineures grâce à l'utilisation des logiciels de simulation. Cela se traduit en moyenne par un gain de 20 % sur le délai de mise en route et de 5 à 20 % sur le coût du moule.

### 2. - Amélioration de la qualité du produit :

Bien que difficilement quantifiable, la confiance plus grande ainsi que la meilleure conception permise se traduit en pratique par la **réalisation de pièces plus complexes** pouvant répondre à des contraintes qualitatives plus strictes.

### 3. - Outil plus stable :

L'amélioration de la qualité de fonctionnement de l'outil se traduit par une **plus grande stabilité** de celui-ci. A chaque démarrage de production, le temps de mise en température du moule est réduit de manière considérable autorisant ainsi une production rapide de pièces acceptables. D'autre part, la conception de l'outil rend celui-ci **plus tolérant vis à vis des variations aléatoires** de conditions de moulage. "Un bon moule peut fonctionner correctement sur une mauvaise machine, mais jamais l'inverse".

### 4. -Diminution du poids de la pièce :

Dans bien des applications d'injection plastique, l'épaisseur du produit moulé n'est pas imposée par des considérations de contraintes mécaniques, mais surtout par la considération de problèmes potentiels de remplissage de l'empreinte. Pour ne pas courir de risque à ce niveau, le concepteur a tendance à préconiser des épaisseurs inutilement grandes. Les logiciels de simulation ont permis de **réduire fortement cette tendance et par définition de générer des gains substantiels de matière**.



## 5. -Diminution des déchets :

Toujours dans l'optique d'un meilleur remplissage, les concepteurs ont tendance à sur dimensionner les canaux d'alimentation des empreintes. L'usage des logiciels de simulation a permis de mettre en évidence, dans de multiples cas d'utilisation en très grande série, que cette pratique n'avait aucun fondement, voire contrecarrait sa propre fonction. Les gains de poids sur les grappes d'alimentation peuvent être dès lors spectaculaires.

D'autre part, l'amélioration de la qualité fonctionnelle des outils citée dans les points 1, 2 et 3 implique un fonctionnement plus sûr **générant beaucoup moins de déchets**. Ne parlons pas des outils mis en production alors qu'ils n'étaient pas au point, pour des besoins impératifs de respect de délais et qui peuvent produire jusqu'à 25 % de rebuts !

Le gain moyen généré par ces deux points est estimé à 10% à la suite de l'enquête précitée.

## 6. -Diminution des temps de cycle.

Cet effet secondaire est bien entendu **important au niveau du coût global de la fabrication**. De nouveau, le gain obtenu est de l'ordre de 10% en moyenne.

L'utilisation d'un logiciel de simulation représente un investissement non négligeable en matériel et en compétences. C'est pourquoi l'entreprise a intérêt à faire appel à des services extérieurs. Il est possible de bénéficier d'un service complet depuis le dessin du produit jusqu'à la conception du moule avec simulation et même au-delà, jusqu'au prototype et à la présérie industrielle.

### *Un exemple*

En moulage par injection, la phase refroidissement constitue la part la plus importante du cycle (80%).

Dès lors, optimiser le refroidissement dans le moule, **c'est améliorer** :

- la productivité (plus de pièces/unité de temps)
- la qualité des pièces - moins de rebuts par réduction des tensions internes
- meilleure qualité, précision, stabilité dimensionnelle

C'est aussi **augmenter le rendement de l'énergie utilisée**.



### *Un exemple*

| <b>Facteurs de coût</b> | <b>Mauvais refroidissement</b> | <b>Refroidissement optimisé</b> |
|-------------------------|--------------------------------|---------------------------------|
| Moule                   | 6200 euros                     | 6200 euros                      |
| Matériau                | 49 cm <sup>3</sup> /pièce      | 49 cm <sup>3</sup> /pièce       |
| Déchets                 | 10 %                           | 2 %                             |
| Coût machine            | 50 euros/h                     | 50 euros/h                      |
| Temps de cycle          | 15 s                           | 10 s                            |
| Production              | 50 000 pièces/an               | 50 000 pièces/an                |

Le pare-choc de voiture présenté sur les illustrations a été injecté avec une température de poinçon et de matrice de 50 °C et refroidi avec un débit de fluide réfrigérant de 10 l/min. On observe une grande différence entre les températures sur les deux faces de la pièce et donc une déformation importante, entraînant des rebuts.

L'utilisation des outils de simulation a permis de vérifier le comportement de la pièce dans diverses conditions et d'optimiser les conditions de refroidissement. Un réglage des températures de 20 °C pour la face mobile et 60 °C pour la matrice, combiné à un débit de 40 l/min a permis de ramener la déformation à une valeur acceptable.

### *Quelques chiffres*

A l'échelle belge, l'impact réel de l'usage cohérent des techniques précédentes reste très difficile à chiffrer mais peut être considéré actuellement comme relativement peu important vu leur faible niveau de pénétration.

Par contre, si l'on imagine à terme un recours à la simulation comparable à ce qui existe aux USA par exemple, où un quart des firmes font appel à la CAO et où la proportion de moules étudiés par CAO est de 15 %, on pourrait arriver à une diminution considérable des rebuts.

En effet, si on calcule un nombre de moules "potentiellement étudiables" de 188/an en Belgique (en fonction du coût et la technicité des applications (matière et fonction)), et qu'on considère qu'il s'agit de pièces de 250 grammes en moyenne, produites par séries de 50000/an, les économies de matière à très haute valeur ajoutée et peu recyclable seraient de 167 837 kg. Les économies d'énergie seraient de 215 448 KWh.

Ces effets sont cumulables et, si la durée de vie moyenne des outils est de 4 ans et que chaque année un même nombre de moules est conçu, l'économie annuelle au bout de la quatrième année est de 1 678 370 kg de matière et 2 154 448 kwh.



### 2.2.3. Prototypage

Il faut pouvoir étudier, modifier, redimensionner des pièces souvent complexes de plus en plus rapidement, en évitant les va-et-vient entre les échelons de la conception, de l'outillage et de la fabrication. Une première approche est l'utilisation accrue des logiciels performants de CAO 3D. Une autre est le recours aux techniques de prototypage rapide.

Les RPT (Rapid Prototyping Technologies) permettent d'obtenir, avec un délai de quelques jours, un prototype matériel d'un concept informatique là où les techniques traditionnelles de modelage ou d'usinage CNC nécessitaient des semaines, voire des mois.

#### **Les techniques de prototypage sont utilisées pour :**

- Fabriquer rapidement un modèle de la pièce ou de l'ensemble étudié pour évaluer les problèmes de fonctionnalité et d'assemblage, pour supporter la démarche de conception du moule, pour illustrer la démarche commerciale.
- Fabriquer vite des préséries de pièces dans des moules prototypes afin d'en tester la fonctionnalité dans les conditions réelles d'utilisation et d'affiner le choix de matière prévue, de réaliser la certification du produit, voire de mettre en évidence des problèmes de moulage trop précis et spécifique pour être compatibles avec l'état de l'art de la simulation.

Pendant plusieurs années, le principal domaine des RPT consistait à réaliser rapidement un modèle matériel utilisable pour des évaluations esthétiques, géométriques ou, dans une mesure limitée, fonctionnelle. Leur principal inconvénient découlait des propriétés limitées des matériaux polymériques utilisés, et de leur incapacité à fournir des modèles en métal.

Aujourd'hui, cette limitation est en voie de disparition. La combinaison de nouveaux matériaux, de nouvelles RPT, avec des techniques traditionnelles de fabrication permettent de réaliser des prototypes métalliques et, bien mieux, des outils de mise en œuvre.

#### **Prototypage Rapide : principes**

Les techniques de fabrication d'objet reprises sous ce vocable possèdent toutes un ensemble de caractéristiques communes :

- La fabrication de l'objet est basée sur une définition tridimensionnelle précise et complète de celui-ci, réalisée sur ordinateur avec un logiciel de dessin surfacique ou volumique.
- Le processus de fabrication, contrairement à tout autre, est additif, la pièce étant réalisée par sections successives, empilées et solidarisées automatiquement. L'intérêt majeur de cette procédure est de simplifier la fabrication de n'importe quel objet tridimensionnel complexe en un ensemble d'opérations de travail dans le plan.
- L'outil de travail est dans la plupart des cas immatériel. Il s'agit d'un laser, d'un flux lumineux ou d'un distributeur chauffant, par définition universel et ne s'usant pas.
- La préparation, le suivi et la finition des pièces sont minimale, mais requiert une bonne maîtrise technologique et de l'expérience avec le procédé.
- Les principales applications de ce principe varient en fonction des modalités pratiques de réalisation des étapes de fabrication proprement dites.



### Prototypes Technologiques

L'un des impératifs fréquemment rencontrés lors du développement de produits performants est la nécessité d'en qualifier au plus vite la conception dans les conditions d'utilisation réelles ou lors de tests normalisés. Pour être pleinement significatifs, ces essais doivent se pratiquer sur des prototypes technologiques, c'est-à-dire réalisés dans le matériau final sélectionné pour l'application et si possible avec la technique de production utilisée pour la série.

Les RPT sont, par nature, incapables de subvenir à ce besoin. Il est nécessaire d'y adjoindre des techniques "aval" qui en utiliseront le modèle pour réaliser directement le prototype technologique requis ou indirectement, le moule nécessaire à sa réalisation.

La multitude de développements ou possibilités déjà disponibles dans ce domaine témoigne de son importance. Un dénombrement partiel des chemins technologiques permettant de passer rapidement du modèle RPT à la pièce plastique a fourni pas moins de 33 possibilités différentes.

### Rapid tooling

De plus, pour les prototypes technologiques de pièces plastiques, il est impératif d'adjoindre à la technologie RPT une technique aval de fabrication de moule. Des techniques de plus en plus performantes ont permis de dépasser la coulée de résines et la projection de métal à bas point de fusion. Il s'agit essentiellement d'outillages réalisés par frittage de poudre métallique, frittage suivi souvent d'un post-traitement tel qu'une imprégnation de résine pour assurer des états de surface "convenables".

Un autre procédé mérite d'être cité : c'est le procédé LLCC, qui consiste à stratifier et à assembler des tôles découpées par laser.

Ces techniques offrent de nouvelles capacités de réalisation d'empreintes pour mise en œuvre des plastiques, éventuellement utilisables pour réaliser non plus des prototypes, mais directement la fabrication en petite série, ce qui permet l'élimination des séries de mises au point et des rebuts consécutifs.

## **3. Utilisation**

Bien concevoir une pièce du point de vue de son utilisation, c'est la prévoir ergonomique, fonctionnelle, durable, économique en énergie, sans toxique, sans émissions, d'entretien facile, générant un niveau de bruit minimum, ...

De même, prolonger la vie de chaque produit, prévoir des possibilités de réparation en cas de panne, assurer la maintenance des éléments... sont autant d'actions qui vont parfois à l'encontre des habitudes de "consommation" classiques, mais qui permettent de réduire la quantité de produits en fin de vie entrant dans le circuit des déchets.

Ainsi, on étudiera la possibilité de limiter l'usure à quelques éléments facilement interchangeables, qui seront aisément accessibles pour inspection, révision, remplacement.

La conception des emballages, par exemple, peut être menée de manière à diminuer les restes d'adhésifs ou les déchets. Quelques exemples dans l'emballage des adhésifs :

- intégration d'une raclette dans le couvercle d'un seau de colle,
- nouveau piston qui permet de vider convenablement la cartouche,
- pipette rebouchable,



D'une manière générale, on ne compte plus les produits dont la durée de vie est abrégée et qui finissent en décharge par suite d'une mauvaise conception.

## Exemple de la conception d'un joint collé

Une bonne conception de produits passera toujours par l'élaboration d'un cahier des charges, c'est-à-dire d'un descriptif aussi complet que possible des fonctionnalités attendues de l'assemblage, des contraintes de toutes natures auxquelles il sera soumis, ainsi que de l'environnement dans lequel il sera placé.

Bien sûr, s'il est évidemment important de définir avec précision la valeur des contraintes mécaniques que doit supporter un joint collé de deux éléments portants d'un pont, il est sans intérêt d'essayer d'évaluer avec exactitude la force de pelage à laquelle doit pouvoir résister la semelle collée d'une chaussure.

Il existe quelques règles de base qui permettent de minimiser les contraintes dans un joint collé afin d'assurer la résistance de l'assemblage:

- Les caractéristiques des adhésifs sont telles qu'ils résistent en compression, cisaillement et traction mais beaucoup moins en pelage et en clivage. Quand on conçoit un joint, il faut donc :
- faire travailler le joint en traction, compression, cisaillement
- éliminer les forces de pelage et clivage, et donc les concentrations de contraintes
- optimiser la surface de distribution de la charge.

Dans les cas de pelage et de clivage, la force appliquée est concentrée sur une ligne de contrainte élevée et non pas répartie sur toute la surface collée comme c'est le cas en traction ou en cisaillement.

### Rappel

Un joint est soumis en service à des forces internes et externes appliquées à la pièce qui génèrent des sollicitations mécaniques de quatre types :

- en traction, les forces sont perpendiculaires au plan du joint et sont distribuées uniformément dans toute la zone collée.
- en cisaillement, les forces appliquées sont parallèlement au plan et distribuées sur toute la surface. Tout l'adhésif contribue à la résistance. Les charges de cisaillement se concentrent à l'extrémité d'un joint recouvert et affectent faiblement la portion moyenne.
- Les contraintes de clivage, indésirables dans les structures collées, sont similaires à des forces de traction car elles sont perpendiculaires au plan, mais elles se concentrent sur un côté du joint, le reste de la surface n'étant pas sous contrainte.
- Le pelage est également à éviter; il résulte de forces approximativement perpendiculaires au plan, mais confinées dans une ligne très mince au bord du joint. Quand le pelage intervient, le reste du joint ne contribue pas à la résistance.

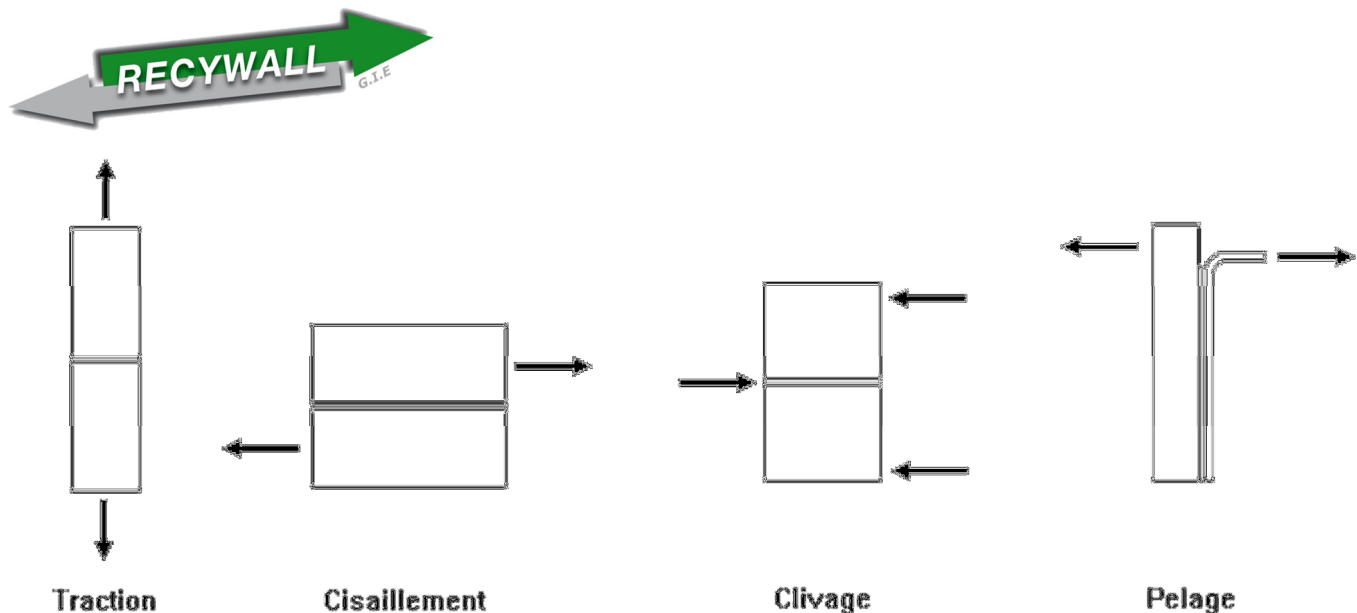


figure 1 : Type de sollicitation

**Une bonne conception** du joint visera à créer une surface de collage et de transmission des efforts mécaniques aussi grande que possible.

1. Prévoir dès le départ des surfaces de collage suffisamment importantes.

- La résistance croît avec la largeur du joint. Un joint de 2 cm est plus de deux fois plus résistant qu'un joint de 1 cm.
- Augmenter la longueur n'est plus efficace au-delà d'une certaine dimension: de grandes longueurs entraînent l'apparition de pelage aux extrémités du joint. Un joint long de 4 cm n'est pas deux fois plus résistant qu'un joint de 2 cm.

2. La liaison collée doit avoir une résistance comparable à celle des substrats. Il ne sert à rien de surdimensionner le joint : les niveaux de contraintes doivent être comparables.

3. Prévoir des joints privilégiant le cisaillement et la compression.

4. Eviter les assemblages dont la forme risque de se traduire par l'existence de concentrations de contraintes (de pelage et de clivage), comme les assemblages à angle ou bout-à-bout dans lesquels les surfaces collées, généralement petites, ne permettent pas de limiter suffisamment la contrainte. Le collage par recouvrement est préférable.

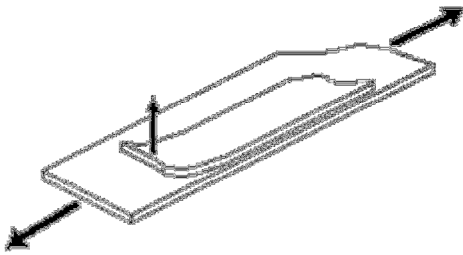
Quand les pièces risquent de se déformer sous charge et induire ainsi un pelage important, il faut réétudier la forme de l'ensemble; si la modification n'est pas suffisante, il faut envisager une autre technique d'assemblage.

5. On peut améliorer le joint à simple recouvrement en augmentant l'épaisseur de chaque pièce à coller ou en réalisant un joint en cisaillement à double recouvrement. Ces assemblages réduisent les forces de pelage et de clivage exercées sur le bord du joint collé à cause de l'asymétrie des pièces.



**RISQUE**

Décollement du bord par pelage suite à un effort de cisaillement



**SOLUTIONS**

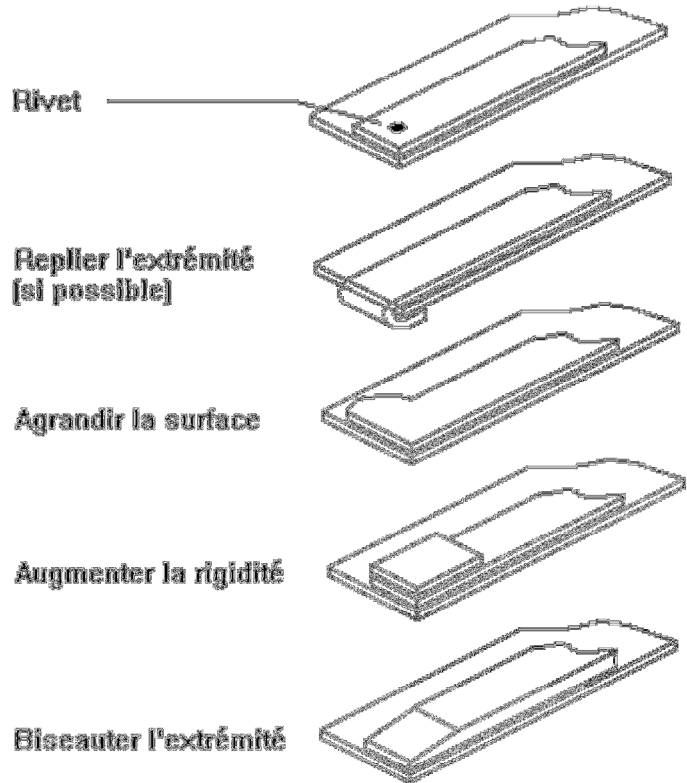


Figure 3 : Risque de décollement

- Eviter les assemblages soumis à la chaleur, la tenue thermique de la plupart des adhésifs courants se situe entre 80 et 200 °C.
- Dans le cas d'assemblages courbes, veiller à ce qu'il n'y ait pas de décollement de l'adhésif. En effet, le retour élastique des éléments courbes après polymérisation de la colle peut provoquer des tensions internes et causer le décollement des supports.

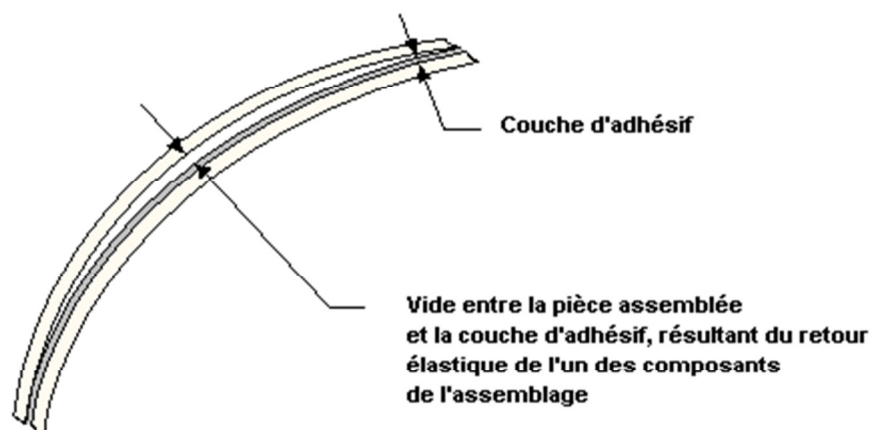


figure 4 : Assemblages courbes

- Tenir compte du fait que les résistances au cisaillement mentionnées dans les notices techniques sont des valeurs expérimentales obtenues en laboratoire, elles ont donc été déterminées dans des conditions idéales et sont donc bien souvent surévaluées.
- Il est judicieux de tenir compte de coefficients de sécurité pour se prémunir de contraintes imprévisibles.
- Il faut veiller à ce que l'épaisseur du joint soit comprise entre 0.1 mm et 0.5 mm, ce qui correspond à un bon compromis entre la résistance maximale et l'absence de défauts (bulles d'air).
- La longévité et la résilience ne sont pas toujours directement liées à la résistance indiquée dans la fiche technique de l'adhésif.
- La rigidité des substrats et celle de l'adhésif influe sur la résistance du joint. Plus le substrat est rigide par rapport à l'adhésif, moins la charge de rupture du joint est influencée par sa géométrie.
- L'adhésif doit pouvoir résister aux charges et aux contraintes non seulement initialement, mais aussi après avoir été exposé aux facteurs d'environnement (notamment chaleur et humidité, néfastes pour un collage).
- Les contraintes aux extrémités du joint sont notablement réduites par la présence du bourrelet de colle.
- Les figures suivantes reprennent quelques exemples de conception ainsi que des observations concernant leur utilisation :

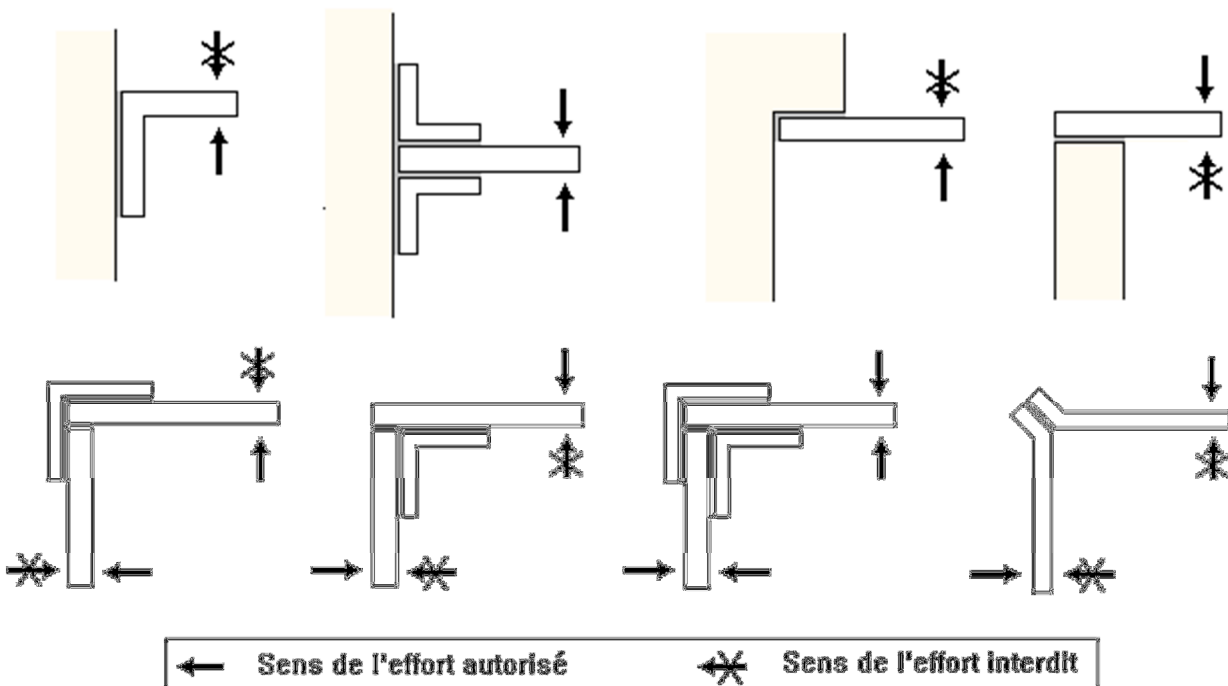


Figure 5 : Sens de l'effort

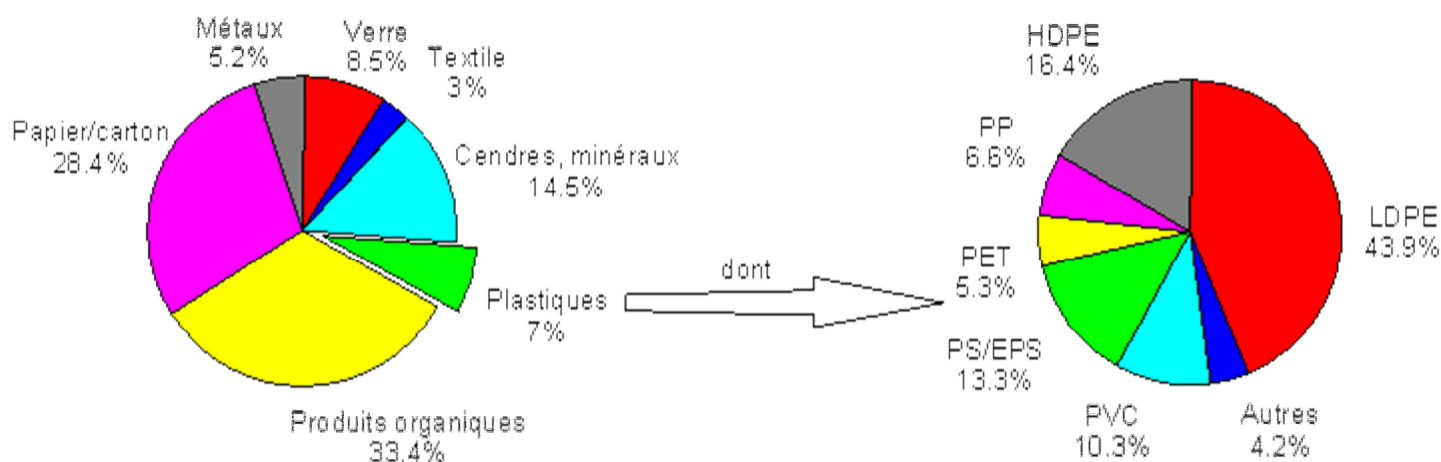
On notera toutefois que la conception d'une liaison collée aura bien sûr des conséquences sur les performances finales de la pièce, mais aussi sur l'industrialisation, la consommation d'adhésif et les techniques de contrôle. Une démarche très rigoureuse est donc indispensable pour bien réussir le collage.

## 4. L'après-vie

### 4.1. Introduction

Les plastiques ne représentent que 0.6 % des déchets en général, et 7 % du poids des ordures ménagères, mais beaucoup plus en volume.

Matériaux dans les déchets domestiques



Il est donc évident qu'ils constituent une pollution. Mais cette pollution est surtout visuelle. En effet, les **plastiques** ont dans la plupart des cas un **comportement neutre en décharge**.

Mais ce qui fait la qualité de ces matériaux lors de leur utilisation pose problème lors de leur rejet. Les plastiques sont légers, flottent dans l'eau, se soulèvent et se déploient dans le vent. Ils résistent à l'humidité, aux agents chimiques, à la biodégradation et ne se décomposent pas par des procédés naturels. Ils sont brillants, voyants, vivement colorés.

Le problème des déchets plastiques est d'autant plus crucial que la durée de vie des produits en utilisation est nettement plus courte que la durée de vie effective des matériaux.

La **mise en décharge** représente en outre un **gaspillage des ressources** et un coût de plus en plus difficilement supportable.

Le plastique dégradable, performant durant sa vie et qui s'auto-détruirait automatiquement, immédiatement et complètement après n'est pas encore pour demain.

Et si, théoriquement, de nombreuses matières plastiques sont recyclables, en pratique, la situation est beaucoup plus compliquée.

Les matériaux ne sont **recupérables**, et à fortiori **recyclables**, que s'ils sont identifiés, séparés, triés, et disponibles en lots suffisamment importants et homogènes. Ces contraintes pèsent différemment sur le produit, suivant les techniques de recyclage mises en œuvre. Dans le cas du recyclage mécanique, (recyclage matière) le seul réellement opérationnel aujourd'hui, en dehors du recyclage thermique (incinération avec récupération d'énergie) les contraintes sont maximum.



**Pour prévenir la génération de déchets de post-consommation dès la conception d'un produit, plusieurs voies peuvent être développées :**

- Réduire le volume des déchets,
- Diminuer les quantités de matières premières utilisées, sans compromis avec la fonction originelle et la sécurité,
- Rendre possible la réutilisation du même produit,
- Choisir des matériaux compatibles,
- Concevoir des produits recyclables,
- Faciliter le démontage des pièces assemblées,
- Permettre une collecte et un tri aisés dans un système précis de récupération,
- Concevoir en recyclé
- Rendre le produit "incinérable"

## **4.2. Réduire les matières entrant dans le flux des déchets**

Les limites de ce type d'actions sont vite atteintes, mais des réalisations pratiques ont été conduites avec succès.

Dans le secteur particulier de l'emballage, par exemple, plusieurs solutions peuvent être mises en œuvre, avec des limites qui ne seront pas détaillées ici et qui sont liées à la fonction-même du produit.

### **Elimination de l'emballage**

Pour le consommateur, ceci va à l'encontre des habitudes de vie, orientées vers le préemballage individuel (visserie, fruits...). Par contre, certains produits industriels peuvent être livrés en vrac.

### **Emballages de produits concentrés**

Exemple : une colle prête à l'emploi sous forme d'une dispersion était présentée en emballage de 5000 g pour le revêtement des sols. Une nouvelle présentation sous forme de 1000 g de poudre à mélanger à l'eau au moment de l'emploi pour atteindre le volume requis permet de réduire les emballages et de faciliter le transport pour un usage équivalent.

Evidemment, on s'expose aux erreurs de dosage (produits médicaux, jus de fruits, produit lessiviel...).

### **Emballages de plus grandes quantités**

Ces ensembles sont plus lourds pour le consommateur, posent des problèmes de stockage

### **Suremballage réduit**

Certains emballages ont été conçus pour être directement empilables sur des palettes, sans suremballage (gain 25% du poids des emballages).

Une bonne organisation de travail peut permettre de diminuer les emballages de protection au stockage, les intercalaires de gerbage etc.



### **Emballage "consommable"**

Certains fournisseurs de matières plastiques livrent les granulés dans des sacs de même matière que le contenu - ou dans une matière 100 % compatible - de manière à ce que l'emballage puisse subir la même mise en œuvre que son contenu.

Un fabricant de colles thermofusibles a mis au point un système de tubes ou sachets en polyoléfine : l'utilisateur introduit ces sacs en même temps que l'adhésif qu'ils contiennent dans le fondoir où ils fondent sans résidus.

Ce problème d'emballage, bien connu dans le secteur de la grande consommation, n'est pas un problème mineur pour les entreprises. Le CRIF, par exemple, a pu constater que les emballages de livraison des matières : octabins, sacs, housses ... représentait  $\pm 1/3$  du total des déchets de l'industrie de transformation des matières plastiques.

**L'entreprise privilégiera les fournisseurs mettant en place des solutions ingénieuses permettant de réduire le problème du déchet.**

Dans ses propres livraisons, elle veillera à éviter les suremballages, à privilégier les livraisons en vrac ou semi-vmrac, à remplacer les emballages perdus par des caisses ou conteneurs à usage multiple (palettes réutilisables), à éliminer les stocks inutiles de manière à diminuer les emballages intermédiaires (intercalaires...) etc.

### **4.3. Réduire les quantités de matière utilisées dans les produits**

Le fait même d'utiliser des matières plastiques plutôt que d'autres matériaux comme des métaux signifie un gain de poids non négligeable, dans des domaines aussi différents comme l'emballage ou les pièces techniques. Ainsi, un pot de yaourt de 125 gr pèse 5 gr en PS et 90 gr en verre.

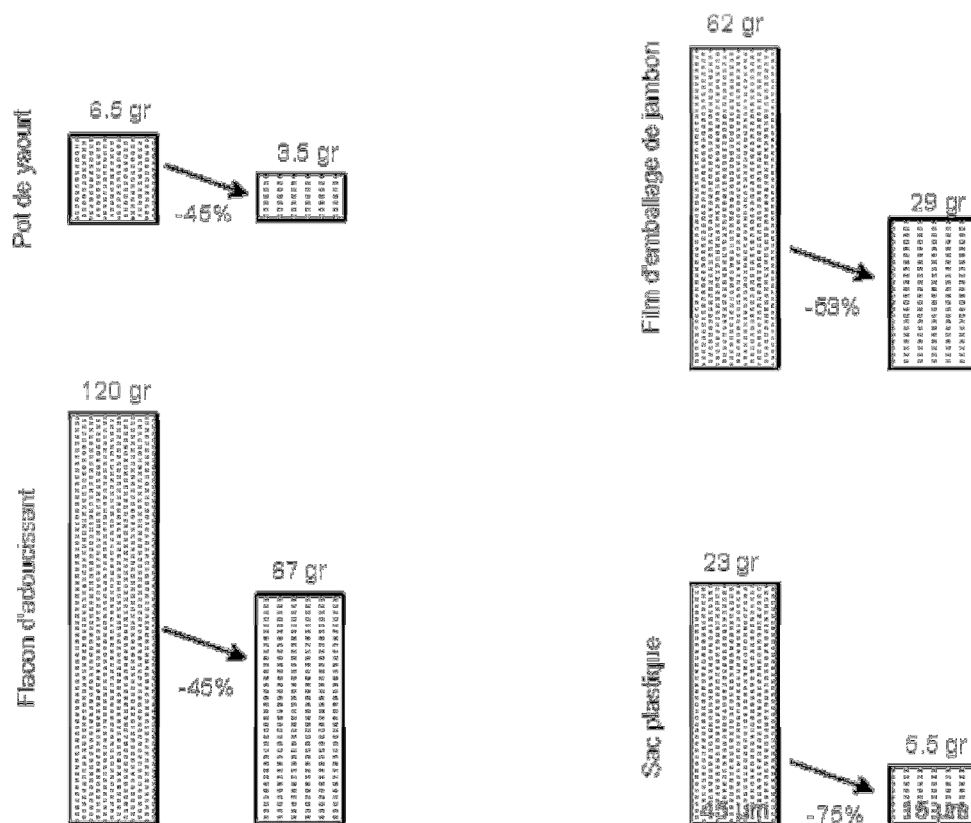
Le gain de poids sur les produits entraîne une diminution des déchets, mais il a également d'autres implications: transporter par exemple des bouteilles d'eau par camion, c'est transporter 96 % d'eau et 4 % d'emballage dans le cas du plastique contre 63 % d'eau et 37 % d'emballage dans le cas du verre, soit 40 % de charge utile en plus pour les bouteilles plastiques, soit une économie de fuel et une diminution des gaz d'échappement considérables.

Une pièce est conçue de manière optimale vis-à-vis des contraintes quand elle remplit ses fonctions avec le moins de matière possible. Et, depuis de nombreuses années, l'industrie des polymères tend à réduire au maximum les quantités de matières premières utilisées, sans rien perdre des fonctionnalités des pièces et en respectant les exigences de sécurité.

Le poids des emballages plastiques est aujourd'hui fortement réduit par rapport aux années '70, par un meilleur choix de matières premières (PEhd au lieu de PEbd), par une conception optimisée (intervention de la CAO notamment), et par des techniques de production améliorées.

Ainsi, la feuille rétractable de 1400 gr nécessaire pour garantir les marchandises sur palettes de 1.5 t a pu être remplacée par un film étirable de 350 gr (soit un gain de 75 %). D'une manière générale, un film rétractable moderne a une épaisseur de 80  $\mu\text{m}$  contre 180  $\mu\text{m}$ , il y a 15 ans.

## Quelques exemples :



Les boîtes de carton emballant les bouteilles par 6 ont été remplacées par un fonds en carton et un film rétractable (50 gr contre 200 gr).

Les recharges de plastiques souples pour adoucissants représentent une réduction en poids de plus de 70 %.

### Il y a de nombreuses façons de réduire l'épaisseur d'un produit :

- vérifier tout simplement s'il n'est pas surdimensionné;
- optimiser le design par ordinateur;
- choisir des matériaux plus résistants, sur base d'un rapport quantité/prix satisfaisant (comme des films ou des bouteilles biorientés);
- utiliser des sections minces avec des renforcements locaux comme des raidisseurs. Ceux-ci permettent de stabiliser de grandes surfaces et d'atteindre une bonne rigidité générale sans augmenter les parois;
- utiliser des mousses structurales;
- alléger les parois épaisses par un moulage avec injection de gaz ;
- utiliser des sandwichs avec couche interne en recyclé ou en matériau moussé;

### Remarque

Un contrôle convenable des épaisseurs au process, en extrusion notamment, doit permettre de maintenir avec précision les caractéristiques choisies : les quantités de matières épargnées peuvent devenir significatives sur de longues campagnes.



#### 4.4. Rendre possible la réutilisation du produit : "design for reuse"

**Le emploi**, c'est les utilisations multiples d'emballages, de produits et de pièces techniques, est un des moyens pertinents pour réduire le volume des déchets.

Un produit peut être réutilisé plusieurs fois : bouteilles "re-remplissables" PET pour boissons gazeuses, conteneurs de poudres à lessiver, conteneurs retournables, certains sachets de caisse dans les magasins, couverts stérilisés...

Les casiers à bouteilles, les palettes, les fûts munis d'un liner qui forme une enveloppe souple... sont autant de produits avec ré-emploi possible.

##### **Exemple :**

Une entreprise de flaconnage a décidé d'emballer ses produits, selon les dimensions des pièces et les secteurs clients :

- en vrac dans des conteneurs métalliques réutilisables,
- en caisses carton ou plateaux retournables.

Les caisses retournables sont réutilisées 6 fois avant d'être déclassées et introduites dans un circuit de recyclage (cartonnerie).

Le remplacement des caisses par des conteneurs métalliques pour le vrac a permis d'éviter la consommation de 12.000 caisses/an, tandis que l'introduction de caisses et de plateaux retournables a permis le gain de 30.000 unités/an.

##### **Pour que la réutilisation soit un procédé favorable, divers facteurs doivent être pris en compte:**

- Il faut pouvoir s'assurer d'un nombre de retours suffisants, sans quoi l'énergie nécessaire pour rendre le produit plus résistant sera gaspillée.
- L'infrastructure de collecte/tri/retour doit être suffisante. Les emballages "retournables" présentent un intérêt plus certain pour les emballages industriels, le retour étant plus facile à organiser et les risques de contamination étant moindres.
- Le ré-emploi devrait faire l'objet d'un écobilan. Ainsi, s'il y a des normes d'hygiène à respecter, le lavage peut représenter une dépense d'énergie et une pollution des eaux trop grandes.
- On a calculé qu'une tasse en porcelaine doit être utilisée 1800 fois pour avoir sur l'environnement un impact moindre qu'une tasse jetable en plastique. Or les collectivités les utilisent une centaine de fois.

Un produit ou d'une de ses parties peut être **réutilisé dans une tout autre fonction**; ainsi, les sachets de caisse peuvent finir comme garnissage de poubelles, les conteneurs comme éléments de jeu, les suremballages de protection lors des transports comme présentoirs en rayons... **C'est un concept classique.** Mais cette réutilisation peut être prévue et optimisée dès la conception et le produit aménagé pour être plus apte à ce second usage, après vérification de son acceptabilité par le consommateur.

Certains fournisseurs de matières plastiques livrent dans des sacs imprimés de telle sorte que les marques puissent s'effacer et l'emballage servir, pour le transformateur, à la livraison des produits injectés.

En vue de la réutilisation du produit ou d'une de ses parties, il faut **construire des éléments fonctionnels peu salissants à l'utilisation** et faciles à nettoyer : éviter les poches et creux à poussières; créer une surface anti-poussière... (important pour le recyclage des matières récupérées également !)

Les produits en fin de vie peuvent également être **valorisés sous diverses autres formes** hors du cycle traditionnel des plastiques : amélioration des sols ou bitumes routiers, par exemple.



## 4.5. Design for recycling - design for disassembly

Pour rendre le recyclage rentable, il faut diminuer les coûts et augmenter les revenus. Pour ce faire, la conception peut intervenir dans plusieurs directions :

- Augmenter les revenus, c'est produire un recyclé de meilleure qualité, disponible en plus grande quantité en standardisant les matières, en utilisant des combinaisons de matériaux compatibles, en augmentant les possibilités de séparation des non compatibles, en minimisant la portion de matériaux non recyclables et en l'isolant... C'est s'assurer que les produits s'insèrent dans les filières de recyclage.
- Diminuer les coûts, c'est simplifier le désassemblage, réduire le temps nécessaire à l'identification des matières, réduire le temps nécessaire au désassemblage des parties non recyclables (minimiser, isoler...), augmenter les produits récoltés afin de faire des économies d'échelle...

### 4.5.1. Choix des matières

#### **Privilégier le mono-matériau**

Dans la mesure du possible, les produits seront réalisés en une seule matière, plus aisément recyclable.

Ainsi, les barquettes de margarine autrefois multicouches PVC/carton/PVC sont aujourd'hui tout en PP ou en PVC.

Un autre exemple : l'emballage de suspension de certains bâtons de colle à papier est aujourd'hui entièrement en carton (gain : 40% du poids des emballages) et non plus sous blister.

Mais L'optimisation tant fonctionnelle que commerciale d'un produit passe de plus en plus par l'utilisation de matériaux différents. Ces assemblages "multimatériaux" doivent faire l'objet d'une réflexion dans l'optique du recyclage.

Exemple : les assemblages multimatériaux par extrusion comme les films métallisés ou les combinaisons thermoplastique/papier ne seront utilisés que sur base d'un écobilan. Les possibilités de désassemblage et de séparation économique sont en effet réduites et l'absence de recyclage doit être compensée, par exemple par un gain de poids ou une fonctionnalité multiple du produit.

#### **Choisir des matières compatibles**

L'incompatibilité physico-chimique des polymères les uns avec les autres et des polymères avec d'autres matériaux rendent le recyclage des matières très aléatoire.

Les compatibilités entre familles de polymères sont reprises dans le tableau suivant :

|         |      | Matière mélangée |    |      |    |     |     |    |     |    |     |     |    |
|---------|------|------------------|----|------|----|-----|-----|----|-----|----|-----|-----|----|
|         |      | ABS              | PC | PMMA | PS | PVC | SAN | PA | PBT | PE | PET | POM | PP |
| Matière | ABS  |                  | 3  | 3    | 2  | 2   | 3   | 0  | 1   | 0  | 1   | 1   | 0  |
| de la   | PC   | 3                |    | 3    | 0  | 1   | 3   | 0  | 3   | 0  | 3   | 0   | 0  |
| matrice | PMMA | 3                | 3  |      | 1  | 3   | 3   | 0  | 0   | 0  | 0   | 1   | 0  |
|         | PS   | 2                | 0  | 1    |    | 0   | 2   | 1  | 0   | 0  | 1   | 0   | 0  |
|         | PVC  | 2                | 1  | 3    | 0  |     | 3   | 0  | 0   | 0  | 0   | 0   | 0  |
|         | SAN  | 3                | 3  | 3    | 2  | 3   |     | 0  | 0   | 0  | 0   | 0   | 0  |
|         | PA   | 0                | 0  | 0    | 1  | 0   | 0   |    | 1   | 0  | 1   | 0   | 0  |
|         | PBT  | 1                | 3  | 0    | 0  | 0   | 0   | 1  |     | 0  | 0   | 0   | 0  |
|         | PE   | 0                | 0  | 0    | 0  | 0   | 0   | 0  | 0   |    | 0   | 0   | 3  |
|         | PET  | 1                | 3  | 0    | 1  | 0   | 0   | 1  | 0   | 0  |     | 0   | 0  |
|         | POM  | 1                | 0  | 1    | 0  | 0   | 0   | 0  | 0   | 0  | 0   |     | 0  |
|         | PP   | 0                | 0  | 0    | 0  | 0   | 0   | 0  | 0   | 1  | 0   | 0   |    |

====> 3 compatible; 2 compatibilité limitée; 1 compatibilité en petites quantités; 0 incompatible.

Autant que possible, il faut choisir des matériaux de la même famille ou de familles compatibles pour les parties individuelles d'un même produit afin de diminuer les frais de démontage en vue du recyclage ultérieur.

#### Exemples :

quelques déchets PVC dans un conteneur PET peuvent conduire à devoir rejeter toute une production : la matière PVC, en effet, atteint sa température de dégradation avant la température de travail du PET.

La compatibilité ne doit s'appliquer pas seulement aux bases, mais aussi aux additifs. Un PVC stabilisé au plomb ne peut être mélangé à une composition au thioétain. Il y a une réaction Pb/sulfure d'étain qui perturbe le fonctionnement des machines de mise en œuvre.

Les matières choisies doivent être compatible avec les qualités requises par le second usage qu'on veut en faire:

- Le PET coloré, par exemple, utilisé comme base de bouteilles ne conviendra pas pour la production ultérieure de fibres.
- Certains adhésifs ne sont pas compatibles avec les traitements mécaniques et chimiques mis en œuvre lors du recyclage du papier.



Les adhésifs non solubles ont tendance à former des agrégats collants au cours du traitement, lors de la formation de la pâte avec des déchets. Ils perturbent la fabrication et nuisent à la qualité finale du produit. On a mis au point des techniques plus ou moins performantes d'élimination de ces particules à un stade primaire du processus. On peut aussi choisir des adhésifs dits " recyclables " qui posent moins de problèmes à l'industrie du papier, soit qu'ils forment des particules dures, non collantes et moins gênantes, soit qu'ils forment des agrégats de densité différente de celle du papier et donc séparables plus facilement, soit encore qu'ils peuvent être dispersés dans l'eau et rester en suspension.

### **Eviter les matériaux à problèmes**

Certains matériaux, spécialement dans la finition et l'assemblage peuvent poser des problèmes au recyclage.

Le collage des étiquettes peut être remplacé par une impression directe ou un film rétractable.

Les encres seront choisies en fonction de l'absence de nocivité de leurs additifs et de leur compatibilité avec le support. On va de plus en plus vers des encres solubles dans l'eau.

Les inserts métalliques peuvent poser des problèmes de contamination et de dégradation du matériel de broyage : on choisira des métaux doux, des éléments en plastique ou d'autres systèmes d'assemblage (clips...).

La plupart des peintures posent des problèmes de contamination des granulés. Il faut veiller à la compatibilité des systèmes choisis ou préférer d'autres solutions, comme la coloration dans la masse, l'in-mould labelling etc.

**Exemple 1:** Lors du recyclage des bouteilles, les étiquettes et les base-cups laissent un résidu d'adhésif. Cette quantité pourtant faible, inférieure à 0.1%, peut décolorer et dégrader chimiquement le polyester recyclé.

Certains nouveaux hot-melts pour étiquettes sont disponibles sur le marché. Ils n'ont pas de groupes fonctionnels actifs et donc restent chimiquement inertes dans le polyester. Ils ont une bonne stabilité thermique et donc ne provoquent pas de décoloration de la matière. Ces nouveaux produits sont plus coûteux que les adhésifs classiques, mais à raison de 0.5 g par bouteille, l'impact sur le prix de revient de l'article est faible.

**Exemple 2:** On recycle actuellement une forte proportion de plastiques dans un véhicule. Mais les adhésifs structuraux comme l'époxyde ou le polyuréthane posent problème : ils doivent être éliminés manuellement, ce qui consomme de la main d'œuvre et génère des déchets non réutilisables qui vont en décharge.

La similitude chimique des adhésifs métacrylates avec de nombreux plastiques en fait des adhésifs adéquats dans de nombreux cas : ils s'allient avec le polymère de base lors du recyclage, avec une très faible perte en propriétés mécaniques.

### **Facilité de recyclage mécanique**

En théorie, tous les thermoplastiques peuvent se refondre, mais certains sont plus sensibles à la dégradation thermique que d'autres; ils perdent donc plus facilement leurs propriétés physiques au recyclage.

C'est le cas de certains additifs, comme les colorants à base de diarylide (pigment jaune-vert-orange) qui peuvent se dégrader à la chaleur lors du recyclage.

D'autres additifs, comme certains retardateurs de flamme, sont interdits dans quelques pays ou en voie de l'être dans d'autres; une seconde vie pour ces produits est donc problématique.

On préférera les matières plastiques qui peuvent être recyclées par un procédé éprouvé, et pour lesquelles il existe des circuits viables.



## **Intégration des fonctions**

Il faut envisager l'intégration des fonctions (et notamment des fixations) dans des ensembles les plus grands possibles pour éviter le démantèlement du produit en petites pièces lors du recyclage. Une grande quantité de petits éléments est un mauvais design.

Ainsi, le plastique permet la réalisation de charnières intégrales. Deux parties d'un objet en polyoléfine ou en PA (comme le dessous et le couvercle d'une boîte) peuvent être assemblées par un élément moulé simultanément dans lequel les lignes de flux orientent fortement les chaînes moléculaires pour atteindre une grande résistance à la flexion.

Dans des pièces épaisses, des charnières peuvent être créées en déformant par estampage la matière au-delà de sa limite élastique.

L'assemblage par soudage plutôt que par collage permet également de respecter le critère d'unicité de la matière et répond à des règles de design particulières.

## **Standardisation des matières**

Aujourd'hui, on choisit le meilleur plastique au meilleur prix. D'où une grande variété de matières en petits volumes. Dans une voiture, par exemple, qui contient entre 80 et 100 kg de polymères, il y a en moyenne une douzaine de familles thermoplastiques et quatre à cinq thermodurcissables. La BMW Série 7 contient 1000 composants en  $\pm$  600 compounds différents.

Autant que possible, il faut viser une homogénéité et une compatibilité non seulement à l'intérieur des éléments individuels d'un produit, mais également à travers une gamme d'articles.

En effet, l'économie du recyclage dépend -notamment- de la disponibilité d'une grande quantité de matériau (propre et uniforme) disponible en un seul endroit.

Mais réduire la variété des matériaux utilisés dans une même pièce, c'est s'aligner sur la pièce la plus critique, qui a les exigences les plus hautes. C'est opter pour la matière la plus performante et donc la plus chère pour la totalité du produit. Il faut donc souvent chercher un compromis en utilisant un même matériau dans un sous-ensemble facilement démontable.

### **4.5.2. Identification**

L'exemple donné plus haut dans l'automobile indique avec évidence l'intérêt d'un marquage des pièces. Identifier les types de matières, par pièces, par blocs ou par sous-ensembles facilite le tri des déchets en vue du recyclage.

#### **Plusieurs systèmes d'identification ont été mis au point :**

- étiquetage par barres-code. Le code est gravé dans le moule ou marqué au laser sur les pièces;
- standardisation des matières par produits (par exemple, tous les sacs de tel type seront en PEhd);
- incorporation d'additifs traceurs. Beaucoup de choses restent à faire dans ce domaine. Les fournisseurs travaillent à la mise au point de marqueurs moléculaires organiques;
- identification des produits par leur forme : on pourrait faire les bouteilles PVC carrées et les bouteilles PET cylindriques, par exemple;
- identification des produits par leur couleur;
- codes d'identification moulés.

Ce dernier système est le plus utilisé. Diverses dispositions sont décrites dans les normes. Celles-ci définissent plusieurs systèmes de codage : VDA 260, DIN 6120, ISO1043, SAE J1344, ASTM D400.



La standardisation et l'uniformisation n'est pas encore atteinte. En automobile par exemple, on utilise la norme DIN 54840.

Les directives européennes ont imposé, dans le domaine de l'emballage un marquage destiné à indiquer si les emballages sont réutilisables et/ou recyclables et à identifier la nature du matériau d'emballage (par numéro + éventuellement abréviation) afin de faciliter les activités de collecte, de tri, de réutilisation, ou de valorisation. Si l'emballage est constitué en tout ou en partie de matériaux recyclés, la proportion sera indiquée.

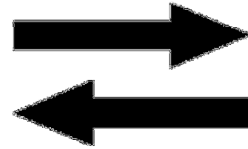
Ce marquage est à apposer sur l'emballage ou l'étiquette, et doit avoir une durée de vie adaptée au fait que l'emballage est soit réutilisable soit valorisable.

En ce qui concerne le plastique, le code commence par un 0; l'autre chiffre indique la famille de matière :

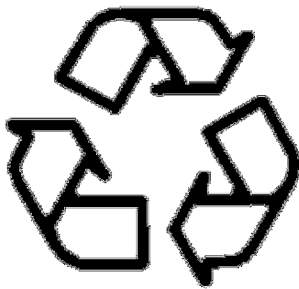
|                               |    |
|-------------------------------|----|
| PET                           | 01 |
| HDPE                          | 02 |
| PVC                           | 03 |
| LDPE                          | 04 |
| PP                            | 05 |
| PS                            | 06 |
| Autres<br>(dont multicouches) | 07 |

## Marques

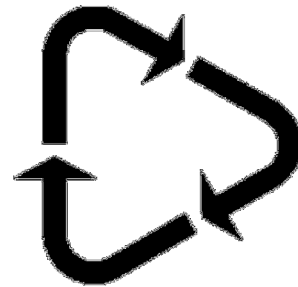
**Emballage réutilisable**



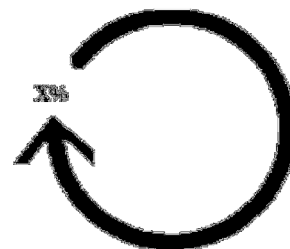
**Emballage valorisable**



ou



**Emballage composé  
en tout ou en partie  
de matériaux recyclés**



**X% = proportion de matériaux recyclés  
entrant dans la fabrication du produit**



### 4.5.3. Assemblage / désassemblage

Il s'agit de tenir compte, dans le choix des matières de la recyclabilité de chaque pièce individuelle, mais aussi de celle de l'assemblage, et donc de la séparation de la pièce d'avec les autres sous-ensembles etc.

Dans ce contexte, deux tendances coexistent :

- On privilégie, dans la mesure du possible, la réalisation de produits en **une seule matière**, plus aisément recyclable. Dans ce cas, par exemple, les assemblages par soudage peuvent être préférés au collage.
- D'autre part, une construction **monobloc** est préférable à un assemblage : elle permet de réduire le nombre de pièces, le coût de fabrication et le nombre de matières utilisées. Le démontage en fin de vie est supprimé. Par contre, il est impossible de réparer certains éléments en cas d'endommagement de la pièce. En principe, les pièces d'usure ne devraient pas être intégrées, puisqu'elles doivent pouvoir être remplacées facilement.
- Par contre, l'optimisation tant fonctionnelle que commerciale d'un produit passe de plus en plus par **l'utilisation de matériaux différents**. Il faut dès lors mettre en œuvre des règles de conception permettant un démontage aisé
- En effet, à la fin de la vie du produit, ces mélanges se retrouvent dans les déchets. Jusqu'il y a peu, ces ensembles allaient systématiquement en décharge. Aujourd'hui, on envisage la récupération, ce qui suppose avant tout des séparations préalables.

**Plusieurs cas de contamination (parties non recyclables, dégradées, salies, contenant des éléments toxiques...) peuvent se présenter dans un objet plastique :**

A : La contamination empêche le recyclage. Le produit doit être éliminé.

B : La pièce peut être recyclée, mais dans des applications de moindre qualité.

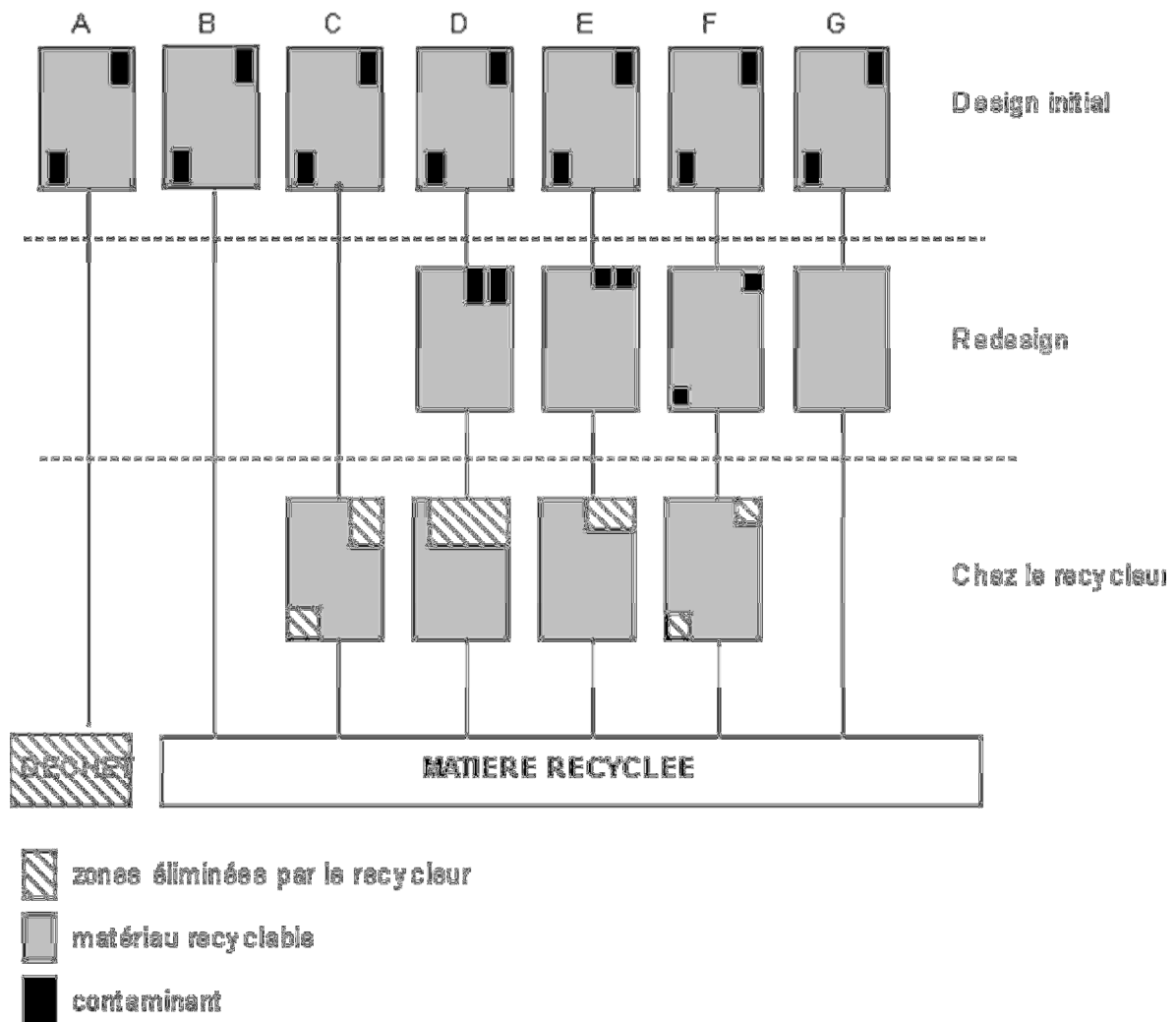
C : On peut démonter les parties contaminées, moyennant coûts en main d'œuvre. Une partie de la matière est éliminée.

D : On peut regrouper les zones à rejeter pour diminuer le coût du démontage

E : Il est possible de grouper et de minimiser les zones à rejeter. On diminue ainsi le temps de démontage et on augmente le volume recyclé.

F : On ne peut pas regrouper les zones contaminées, mais on peut les minimiser, d'où diminution de la matière à éliminer.

G : On peut supprimer la contamination.



L'intérêt d'un désassemblage dépendra des possibilités de reconditionnement et/ou de recyclage de tout ou d'une partie d'un produit. Elles seront fonction notamment de l'évolution du produit en service :

- Subit-il une usure? Une dégradation (thermique par exemple)? une contamination par des produits chimiques, des huiles, des poussières...?
- Quelles sont les parties abîmées ?
- Le recyclage du matériau serait-il affecté par la présence de parties endommagées ?
- Les éléments abîmés peuvent-ils être démontés et subir un traitement différent ?
- Quelle est la valeur des matériaux utilisés? Spécialement dans les grandes pièces ?

Le degré de désassemblage dépendra du degré de pureté du plastique recyclé, qui déterminera la filière de récupération : si le matériau peut être recyclé dans la même application, il devra être pur; si une application moins exigeante est envisagée, une certaine contamination pourra être admise.

Jusqu'où faut-il prévoir le démantèlement d'un produit? C'est une question qui doit faire à chaque fois l'objet d'une analyse, sur base des coûts, mais aussi en tenant compte des législations actuelles et futures et des éléments de marketing (image de marque...). Sans ces éléments, le temps nécessaire au démantèlement d'un produit conduit souvent à un coût prohibitif.

En fonction de ces éléments d'analyse, il faut concevoir les assemblages en vue d'un démantèlement aisé, permettant soit d'éliminer les zones gênantes (incompatibilité, contamination, dégradation...), soit de récupérer les grandes pièces valorisables.



### **Il faut privilégier les techniques de jonction qui ne posent pas d'obstacles lors du recyclage :**

- minimiser le nombre de composants;
- n'assembler de manière définitive que des matériaux homogènes;
- utiliser des fixations démontables entre les éléments de matériaux différents;
- revoir la configuration générale du produit en fonction du désassemblage : accessibilité des éléments de jonction, modularité...;
- éviter les orientations complexes; prévoir des modules démontables verticalement ou horizontalement (montage et réparation facilités également);
- minimiser le nombre de fixations;
- utiliser des clips moulés et ré-ouvrables;
- prévoir les outils nécessaires au démontage des fixations;
- standardiser les fixations (vis,...);
- prévoir des points de rupture faciles pour séparer les matériaux non compatibles;
- prévoir également des zones de rupture permettant un démontage de grandes pièces encombrantes en petits éléments plus faciles à manipuler (prévoir aussi des pièces entassables, des éléments repliables etc. pour réduire les volumes à la récupération);
- indiquer sur les produits les zones à casser pour faciliter le travail du recycleur;
- concentrer les matières à problèmes dans certaines parties accessibles et démontables du produit;
- si certains éléments doivent réintégrer un autre ensemble, le démontage doit être propre, facile et sans dommage.

La plupart de ces principes sont en contradiction avec les caractéristiques de l'assemblage par collage puisque les produits collés sont difficilement séparables et sont rarement démontables sans détérioration des éléments. Le collage ne se justifie donc que s'il apporte des améliorations substantielles sur d'autres plans.

### **Voici quelques exemples d'éléments de réflexion à prendre en compte dans un écobilan:**

- L'utilisation du collage permet de concevoir des produits légers, le joint de colle étant moins lourd que des éléments d'assemblage métalliques. Il s'adapte particulièrement à l'assemblage des matières plastiques, ce qui signifie un gain de poids non négligeable, mais aussi l'emploi de matériaux dont la production et la fabrication demandent peu d'énergie, et dont l'impact sur les pollutions de l'air, de l'eau et des décharges est faible.
- Il peut unir des matériaux différents dans leurs compositions, leurs modules, leurs épaisseurs et leurs coefficients de dilatation thermique, ce qui permet d'optimiser les pièces en utilisant un minimum de matière.
- Les structures collées offrent une plus longue durée de vie, une rigidité accrue et souvent une réduction de poids. Elles peuvent avoir des dimensions moindres que les structures rivetées ou boulonnées, pour une même résistance, puisqu'elles sont continues.
- Les joints collés ont de bonnes propriétés d'absorption et sont utilisés pour réduire le bruit dans des carters, capots, vitres, conditionnements d'air.

#### 4.5.4. Exemple de reconception

L'exemple suivant illustre la reconception d'un produit avec prise en compte des paramètres de recyclage, y compris le composant "adhésif" :

| Bouteille en plastique jetable de 1.5 l pour embouteillage d'eau gazeuse |                              |      |   |      |
|--|------------------------------|------|---|------|
|  | 1981                         |      |   | 1993 |
| <b>Bouchon</b>   | métal                        | 5 g  | Polyéthylène haute densité  | 3 g  |
| <b>Joint</b>   | PVC                          |      | Polyéthylène ou pas de joint  |      |
| <b>Corps de bouteille</b>  | Polyester téréphtalate       | 52 g | Polyester téréphtalate  | 42 g |
| <b>Etiquette</b>   | papier + colle thermofusible |      | papier + colle base aqueuse<br><br>ou polypropylène + colle en quantité min.<br><br>ou Polyéthylène haute densité manchon étirable sans colle |      |
| <b>Identification</b>  | sans                         |      | marquage  |      |
| <b>Embase</b>  | Polyéthylène haute densité   | 10 g | pas d'embase  |      |
| <b>Poids total (vide)</b>  |                              | 67 g |   | 45 g |

#### 4.5.5. Permettre une collecte et un tri aisé dans un système précis de récupération

Les possibilités de collecte et de tri au sein des filières existantes ou à créer doivent être prises en compte dès la conception du produit.

Les matériaux choisis pour un produit doivent être homogènes, mais aussi être compatibles avec le flux de déchets dans lequel il sera collecté, afin d'augmenter les chances d'un recyclage rentable. Le problème se posera différemment si le produit est mis au rebut avec des objets du même type (appareils téléphoniques, tasses à café dans les bureaux...) ou s'il entre dans un flux général de déchets (via les poubelles urbaines,...).

Chaque origine de déchets demande l'application d'une solution spécifique en ce qui concerne les structures de récupération.

Le tri est un des postes les plus onéreux dans la filière du recyclage, ses possibilités doivent donc être étudiées dès la conception du produit.

**La séparation des matières est le plus souvent faite par densité.** Une flottation permet de séparer les matériaux de densité suffisamment différente. En choisissant les matériaux constitutifs d'un produit, on cherchera à éviter les recouvrements dans les plages de densité. C'est particulièrement crucial si les matières sont incompatibles.

Une étiquette PVC sur un produit PEhd par exemple restera dans la fraction PET lors de la séparation par densité PEhd/PET et posera des problèmes au recyclage compte tenu de la différence entre les températures de fusion et les stabilités thermiques de ces matières.

| Matière | Densité   | Matière | Densité   |
|---------|-----------|---------|-----------|
| PP      | 0.9-0.91  | PMMA    | 1.17-1.20 |
| PEbd    | 0.91-0.93 | PC      | 1.2       |
| PEhd    | 0.94-0.96 | PVC     | 1.35-1.45 |
| PS      | 1.04-1.06 | PET     | 1.35      |
| PA      | 1.13-1.14 |         |           |

Ces densités sont relatives aux matières vierges, non pigmentées et non chargées. Une addition de 4 % de pigment peut faire augmenter la densité de 0.03 et créer un recouvrement.

**Un système de tri chimique (spectrométrie IR, éléments traceurs...) est toujours sensible aux contaminants.** Une étiquette PVC sur un produit PEhd créera une erreur de reconnaissance chimique.



## 5. Sortir "proprement" du circuit

La législation pose un certain nombre d'exigences, en ce qui concerne l'incinération, notamment pour les emballages.

Elle pose des exigences sur le caractère valorisable d'un emballage. Par exemple, en cas de valorisation par récupération d'énergie, la valeur calorifique du matériau doit être au moins celle du papier; l'incinération ne peut pas produire de cendres résiduelles représentant plus d'un certain pourcentage du poids incinéré. Si les déchets sont utilisés pour remplacer d'autres combustibles (carburants), ils ne peuvent avoir en émissions et en résidus une incidence plus grande sur l'environnement que le combustible qu'ils remplacent.

La législation prévoit notamment la réduction des teneurs en métaux lourds dans les produits incinérés. Bien que le plastique ne soit pas le principal responsable de ces poisons, des produits comme Pb, Cr, Cd, Hg, Zn, Cu, Mg, Ti proviennent de résidus de catalyseurs de polymérisation (quantités minimes), d'additifs de propriétés ou d'adjuvants de mise en œuvre, de composants des encres. Le concepteur sera attentif à ce problème lors de son choix de matières, spécialement en ce qui concerne les additifs.

## 6. Utilisation des plastiques recyclés

De nombreux produits peuvent être conçus avec de la matière recyclée.

**La technique du sandwich** offre la possibilité de réutiliser un certain pourcentage de déchets. Le cœur de l'objet est en matière recyclée tandis que les couches extérieures se font avec de la matière vierge pour des raisons de contamination, d'aspect de surface, etc.

Cette technique présente un moyen de recyclage des déchets de production et même de post-consommation selon le cas.

Aujourd'hui plusieurs fabricants de machines et de filières offrent des équipements parfaitement adaptés à une telle production.

**Exemple** : Une entreprise de flaconnage fait du "sandwich blow molding" avec le PE récupéré chez les clients (anciennes livraisons), ou des déchets plus contaminés. Les flacons sont sciés, découpés, broyés, démétaillés, puis régénérés, colorés, filtrés et regranulés sur une extrudeuse. La matière est réutilisée dans la couche centrale de nouveaux flacons.

D'autres produits peuvent être réalisés totalement à partir de matières recyclées :

- Une entreprise recycle des chutes PA de fabrication de l'industrie textile et fabrique des roulettes pour l'ameublement.
- Une autre transforme des chutes de PET (mylar) en fibres de rembourrage.
- Un transformateur de polystyrène expansé a mis en place un retour des calages chez les clients industriels.
- Deceuninck Recycling SA, à partir de déchets récupérés chez les menuisiers, refait des profilés PVC, ou, à partir de déchets plus contaminés, du mobilier urbain
- Stabilobloc a conçu des blocs de films, de bouteilles ou de carpettes de voitures pour remblayer ou soutenir les sols.
- Eryplast réalise des palettes de manutention à partir de bouchons de bouteilles ou de flacons.



Ceci implique bien entendu de tenir compte de la spécificité des déchets lors de la conception des pièces : les caractéristiques ne sont pas celles des matières vierges, puisque la matière est dégradée, souillée..., la qualité n'est pas constante, les coefficients de sécurité doivent être plus grands, les couleurs sont foncées, les techniques de mise en œuvre doivent parfois être adaptées, les approvisionnements peuvent ne pas être réguliers...

Auteur : F. MONFORT-WINDELS, SIRRIS