

ENTROPIE ET RECYCLAGE

QUELQUES EXEMPLES

Gérard Bertolini
Directeur de recherche au CNRS

Le recyclage permet de limiter ou de ralentir la création d'entropie du système matière; un recyclage intégral apparaît toutefois irréaliste, notamment en raison de dégradations physiques de la matière.

L'article vise à montrer que des taux de recyclage très élevés ne peuvent être atteints que par des recyclages « en boucle », par opposition à des recyclages « en cascade ». Les cas de quelques matériaux en fournissent une illustration : en premier lieu, le cas des papiers-cartons, en 2000, au niveau européen. S'y ajoute celui des plastiques et, de façon très succincte, de l'aluminium. En outre, le cas du verre renvoie à un article déjà publié dans *Déchets, Sciences et Techniques* n° 13, 1994.

Cependant, pour une vision plus globale, l'analyse devra intégrer les bilans énergétiques, environnementaux, économiques et sociaux.

A limit to sustainable development could be the exhaustion of some natural resources. A counterpoint is represented by a global closed-loop replenishing system, but real cycles cannot be completely closed. Concerning material systems a factor of entropy lies in losses of physical properties. However recycling is a way to reduce or slow up entropy of material systems. To reach very high recycling rates, loop recycling, and not only cascade recycling, is needed.

Cases of some materials provide illustration: at first the case of paper (and cardboard) for the year 2000 at an European level (on the basis of data from the European Recovery Paper Council). The case of plastics is surveyed too; by comparison with paper, their recycling rates are low; however not only mechanical recycling but also chemical (feedstock) recycling and energy recovery have to be taken into account. Another case is aluminium, with a high recycling rate, and the case of glass has been considered previously (*Déchets, Sciences et Techniques* n° 13, 1994).

For a global view, the logic in terms of material entropy would have to be supplemented by ener-

gy and environmental balances and economic and social aspects.

INTRODUCTION : LE CONCEPT

Vis-à-vis d'un développement durable, une menace réside dans l'épuisement de certaines ressources naturelles non renouvelables; tel est le cas notamment de matières premières (y compris à usages énergétiques) d'origine fossile. Même s'il s'agit de ressources renouvelables (comme le bois), dans quelle mesure sont-elles effectivement renouvelées ? Le rythme des prélèvements n'excède-t-il pas le rythme de renouvellement ? De plus, tout cycle « ouvert » de production – consommation s'accompagne de la production de déchets et constitue un cycle potentiellement polluant.

Un contrepoint – suivant un modèle d'« économie de cosmonaute », dans le cadre de vols de longue durée – est fourni par une économie « en cycle fermé » [en anglais: *closed-loop, self-replenishing system*].

En fait, un cycle ne peut être totalement fermé (ou « bouclé »), et, de façon plus limitée, le concept sera appliqué seulement aux matières premières principales (*input*) de fabrications; il ne s'agira donc pas d'un bilan-matière complet (qui devrait inclure des biens « libres » ou « gratuits », comme l'air), ni d'un bilan-énergie.

Un auto-approvisionnement nécessite un recyclage « intégral », donc une récupération (une collecte) « intégrale »; tel pourrait ne pas être le cas à l'échelle d'un pays, en raison de courants d'importations et d'exportations; mais, à l'échelle mondiale, cette double réalité apparaît incontournable. En outre, un auto-approvisionnement nécessite une stabilisation des consommations (une économie « stationnaire », du moins pour les produits considérés).

Dans la pratique, la récupération et le recyclage portent en premier lieu sur des chutes neuves d'industrie (*pre-consumer*). Vis-à-vis de déchets d'usage (*post-consumer*), ils présentent l'avantage de constituer des gisements concentrés et plus

homogènes; mais pour atteindre des taux de recyclage élevés, les seconds doivent être mobilisés. On considérera le taux de recyclage; de plus, on distinguera recyclage « en boucle » et recyclage « en cascade ».

Un recyclage en boucle se traduit par la fabrication d'articles similaires: par exemple, un journal redevient un journal, une bouteille redevient une bouteille. La notion de « similarité » devra toutefois être précisée.

A un recyclage en boucle sera opposé un recyclage en cascade: par exemple, des journaux récupérés sont incorporés dans la fabrication de caisses-cartons, ou des bouteilles en PET deviennent des fibres textiles de rembourrage, etc. La deuxième application est différente de l'application initiale. En réalité, non seulement elle est différente, mais, en général, les exigences qualitatives relatives à la deuxième application sont moindres, et la valeur économique (en la rapportant au poids de matière) est moins élevée. A l'image de la cascade sont associés l'amont et l'aval, et dès lors un ordre hiérarchique. De plus, pour n'être pas réduite à une simple « chute », la cascade comportera plusieurs paliers ou stades. Ces stades correspondent soit à des applications possibles, plus ou moins valorisantes, de la matière collectée, à un certain moment, soit à des recyclages successifs de la matière après usages, suivant un schéma « séquentiel ». Une autre notion majeure est celle d'irréversibilité: ainsi, un thermoplastique ne peut pas être refondu; un journal peut être transformé en caisse-carton, mais l'inverse n'est pas possible (soit un « effet de cliquet »).

On peut dès lors faire état d'une dégradation des usages; cette dégradation est liée d'une part à l'organisation du système économique (elle n'est alors pas inéluctable), d'autre part à des pertes de propriétés physiques, inévitables ou difficilement évitables, associées au vieillissement de la matière et à ses recyclages successifs.

Les notions introduites de système ou de cycle, ouvert ou fermé, de concentré ou dispersé, d'homogène ou d'hétérogène, d'irréversibilité et de dégradation des usages, renvoient au concept d'entropie, emprunté à la thermodynamique et appliqué à la matière. Cette transposition a déjà inspiré divers auteurs [réf. 1, 2, 3 et 4].

Un concept connexe est celui de « nég-entropie »; par exemple, le désencrage de vieux-papiers peut être considéré comme un facteur de *nég-entropie*; autre exemple, différentes sortes de plastiques peuvent être rendues compatibles entre elles, en mélange, moyennant certains ajouts et traitements spécifiques. Cependant, il ne saurait y avoir de complète réversibilité.

A défaut de recyclage intégral *ad infinitum*, l'enjeu consiste à limiter ou ralentir la création d'entropie du système matière. Un taux de recyclage très élevé ne peut être obtenu que moyennant des recyclages en boucle; tel sera l'objet central de l'analyse, en prenant l'exemple de quelques matériaux, et en particulier celui du papier.

Les recyclages en boucle ont d'autres vertus: ils assurent une « adéquation quantitative » (tel n'est par contre pas le cas de recyclages en cascade, qui risquent en outre de désorganiser d'autres marchés), ainsi qu'un gain en autonomie des fabricants.

On notera toutefois que la supériorité affirmée d'un recyclage en boucle vis-à-vis d'un recyclage en cascade ne constitue qu'une hiérarchie « de principe », au plan environne-

Le cas du papier en Europe

L'industrie papetière produit divers types de papiers-cartons; notamment:

- papiers à usages graphiques (autres que papier-journal)
 - journal
 - papiers d'emballage
 - cartons d'emballage
 - papiers pour ondulé
 - papiers domestiques et sanitaires
 - papiers industriels et spéciaux
- } ensemble: papiers impression-écriture
- } ensemble: emballages

mental et dans l'optique d'un développement durable. Elle est susceptible d'être contredite dans des cas particuliers; notamment, certains recyclages, fussent-ils en boucle, peuvent s'accompagner de pollutions importantes, et à des recyclages lointains sont associés des transports, c'est-à-dire des coûts économiques et environnementaux.

Ces productions sont réalisées à partir du bois (y compris des sous-produits d'exploitation forestière et d'autres résidus de bois), c'est-à-dire des fibres vierges, ainsi qu'à partir de papiers récupérés (chutes neuves ou déchets d'usage), c'est-à-dire de fibres cellulosiques de récupération (FCR). Le taux d'utilisation (T.U.), ou taux de recyclage, est le ratio (en %): tonnage de FCR utilisées (incorporé)/tonnage de papier produit (à partir de fibres vierges ou de FCR).

Le taux de collecte (T.C.), ou taux de récupération, est le ratio (en %): tonnage de FCR collecté (récupéré)/tonnage de papier consommé (en fait la consommation « apparente », assimilée au tonnage produit).

La période considérée est l'année. Dans un pays, le taux d'utilisation de FCR diffère du taux de collecte (récupération), en raison de courants d'importations et d'exportations, de pâtes, de papiers-cartons et de FCR. Par contre, à l'échelle mondiale, si on admet que ce qui est collecté (récupéré) est effectivement recyclé, au cours de la période considérée, le taux d'utilisation et le taux de collecte (récupération) coïncident.

Le tableau joint reproduit les statistiques fournies par l'EREC, c'est-à-dire le Conseil européen des papiers récupérés [5], relatives aux quinze pays de l'Union européenne (Autriche, Belgique, Danemark, Finlande, France, Allemagne, Grèce, Irlande, Italie, Luxembourg, Pays-Bas, Portugal, Espagne, Suède, Royaume-Uni), ainsi que la Norvège, la Suisse, la Hongrie, les Républiques Tchèque et Slovaque, soit au total vingt pays. Les chiffres concernent l'année 2000 et sont exprimés en milliers de tonnes.

Tableau I : Europe 2000 – Production de papier, récupération et recyclage

Sortes de papiers produits (sous-secteurs)	Production de papiers (quantités)	Utilisation de fibres cellulosiques de récupération (FCR)					Taux d'utilisation (T.U.)
		sortes hautes	journaux et brochures	mêlés	ondulés	Total FCR	
Papiers graphiques (autres que journal)	35.051 38,7	38,8 1.031 19,5	57,7 1.533 14,4	2,6 68 0,7	0,9 25 0,2	100 2.657 6,5	7,6 %
Journal	10.572 11,7	0,9 61 1,2	94,5 6.584 62,1	4,6 323 3,6	0 0 0	100 6.968 16,9	65,9 %
Total impression écriture	45.623 50,4	11,3 1.092 20,7	84,3 8.117 76,5	4,1 391 4,3	0,3 25 0,2	100 9625 23,4	21,1 %
Papiers d'emballages	7.510 8,3	10,5 413 7,8	8,2 323 3,0	48,6 1909 21,1	32,7 1.286 7,9	100 3.931 9,6	52,3 %
Cartons	7.803 8,6	21,1 822 15,6	18,5 720 6,8	43,3 1.685 18,6	17,1 663 4,1	100 3.889 9,4	49,8 %
Papiers pour ondulés	20.445 22,6	2,9 541 10,2	2,6 468 4,4	24,1 4.447 49,1	70,4 12.980 80,2	100 18.436 44,8	90,2 %
Total emballage	35.758 22,6	6,8 1.776 33,6	5,7 1.511 14,2	30,6 8.041 88,8	56,9 14.928 92,2	100 26.256 63,8	73,4 %
Domestiques et sanitaires	5.317 5,9	62,5 2.137 40,8	25,0 855 8,1	8,7 298 3,3	3,8 130 0,8	100 3.420 8,3	64,3 %
Autres (industriels et spéciaux)	3.845 4,2	15,0 275 5,2	6,6 122 1,2	17,9 329 3,6	60,5 1.109 6,8	100 1.834 4,5	47,7 %
Total	90.542 100	12,8 5.279 100	25,8 10.606 100	22,0 9.059 100	39,4 16.193 100	100 41.135 100	45,4 %

Les données fournies par l'ERPC sont en fait celles qui figurent au milieu des cases du tableau; les autres chiffres ont été calculés. De plus, vis-à-vis de la présentation initiale, l'ordre de certaines lignes et colonnes a été modifié.

L'objectif consiste à saisir, à partir de ces données, la création d'entropie du système: par analogie avec la seconde loi de la thermodynamique, on peut chercher à calculer un coefficient d'entropie variant de 0 à 1 (entropie maximale). Vis-à-vis du système papetier, et en première analyse, le coefficient d'entropie peut être assimilé à: $(100 - T.U.) / 100$; donc, globalement, dans le cas présent: $(100 - 45,4) / 100 = 0,546$.

On notera qu'en France, le taux d'utilisation est sensiblement supérieur et qu'il a fortement progressé, passant sur longue période de 24 % en 1950 à 57,7 % en 2000. Il a aussi beaucoup progressé dans la plupart des pays européens.

Cependant, le taux d'utilisation, dans un pays ou un groupe de pays, peut être sensiblement différent du taux de récupération. Dès lors, vaut-il mieux calculer le coefficient d'entropie à partir du taux d'utilisation ou du taux de récu-

pération? La question reste ouverte.

Le tableau présente pour inconvénient de ne pas reproduire les mêmes intitulés (les mêmes sous-secteurs et les types de FCR qui en résultent) en colonnes qu'en lignes:

– la première colonne relative aux FCR distingue les « sortes hautes »; ce sont essentiellement des chutes neuves du secteur impression-écriture. On notera en outre que sortes hautes et sortes basses correspondent à une hiérarchie des prix;

– la deuxième colonne est relative aux journaux et magazines, et non plus seulement au papier-journal;

– la troisième est celle des « mêlés »; la composition des

- papiers à usages graphiques :	30 %	} ensemble
- journaux-magazines :	40 %	
- papiers d'emballage :	25 %	} 35 %
- cartons :	70 %	
- ondulés :	80 %	} emballages : 65 %

- domestiques et sanitaires	} 5 %	(essentiellement des chutes neuves)
- industriels et spéciaux		

mêlés utilisés par le secteur impression-écriture n'est pas la même que celle des mêlés par le secteur de l'emballage. Les taux de récupération ne sont pas fournis dans le tableau; à défaut, et sous réserve, on peut avancer les ordres de grandeurs suivants (vis-à-vis desquels le tableau permet d'effectuer un test de cohérence):

Ces deux derniers secteurs ont des taux de récupération très faibles, mais des taux d'utilisation qui se sont sensiblement accrus au cours des dernières années et sont devenus relativement élevés; ils utilisent des FCR provenant d'autres secteurs.

Les taux d'utilisation et de récupération, donc les coefficients d'entropie, sont très différents suivant les sous-secteurs. Pour pousser plus loin l'analyse, des pourcentages en ligne et colonne ont été calculés: dans chaque case du tableau, le chiffre en haut à gauche est un pourcentage calculé en ligne; il retrace, pour chaque sous-secteur utilisateur, la structure d'approvisionnement en FCR. Le chiffre en bas à droite est un pourcentage calculé en colonne; il retrace, pour les diverses sortes de FCR, leur structure de débouchés ou structure d'utilisation par les différents sous-secteurs. La lecture du tableau apparaît difficile, mais le principe de l'analyse est le suivant: sur la base d'une matrice carrée dans laquelle les intitulés en colonnes seraient les mêmes que les intitulés en lignes, et moyennant un ordonnancement approprié des lignes, et le même pour les colonnes (il s'agit en fait d'un ordre hiérarchique), les chiffres figurant sur la diagonale principale retracent un recyclage « en boucle »; de plus, une forme « triangulaire », c'est-à-dire où les prin-

Structure impression-emballages T.U. d'approvisionnement écriture en FCR

impression-écriture	100 %	0 %	21,1 %
emballages	25 %	75 %	73,4 %

cipales valeurs sont concentrées dans un triangle séparé par la diagonale (l'autre triangle restant vide) indique un recyclage « en cascade » [6].

Le tableau (la matrice) conjugue des recyclages en boucle et en cascade. En le simplifiant beaucoup, et suivant une lecture en ligne, la structure d'approvisionnement en FCR est à peu près la suivante:

Le secteur impression-écriture n'utilise pratiquement que des sortes impression-écriture, soit un recyclage en boucle, mais son taux d'utilisation (de recyclage) est relativement faible. Ce taux est en fait plus élevé pour le journal que pour les papiers à usages graphiques.

Le secteur emballages a par contre un taux d'utilisation élevé (surtout le sous-secteur des papiers pour ondulés); il utilise principalement des sortes qu'il a lui-même produites, soit un recyclage en boucle et un auto-approvisionnement, mais aussi une proportion assez importante de papiers impression-écriture, soit un recyclage en cascade, qui confère à la matrice une forme « triangulaire ».

La faiblesse relative d'utilisation ainsi que la cascade des utilisations de FCR reflètent le concept d'entropie, auquel est associée l'irréversibilité: un papier impression-écriture peut à nouveau devenir, après usage, un papier impression-écriture, ou bien peut être incorporé dans la fabrication d'emballages; par contre, les cartons d'emballage ne peuvent pas être incorporés dans la fabrication de papiers impression-écriture.

L'enjeu consiste à limiter la création d'entropie du système, donc à accroître le taux de recyclage. Un (utopique) recyclage intégral (à 100 %) ne peut pas être atteint sur la base de recyclages en cascade; il ne peut l'être que par des recyclages en boucle, et à 100 %, des sous-secteurs.

Au demeurant, la forte progression des taux d'utilisation enregistrée depuis des décennies s'est traduite par des progrès notables dans le recyclage de papiers impression-écriture: développement des collectes de journaux-magazines, et de papiers de bureau, ainsi que des technologies de désencrage, pour les rendre aptes à être utilisés par ce secteur. Le désencrage constitue un facteur de *nég-entropie*. Toutefois, la séparation reste imparfaite: des fibres restent accrochées à l'encre, tandis que l'encre qui n'a pas été éliminée est ensuite dispersée dans la pâte à papier.

Pour les cartons, la forte proportion de FCR incorporée signifie que diverses fibres ont déjà subi plusieurs recyclages successifs; certaines ont déjà « une longue histoire » [7].

Cependant, peut-on imaginer un système d'auto-approvisionnement intégral, en utilisant un même stock de vieux-papiers *ad infinitum* ?

Un facteur d'entropie réside toutefois dans des pertes de propriétés physiques associées au « vieillissement »: racornissement des fibres, affaiblissement des liaisons inter-fibres, moindre égouttabilité de la pâte, pertes de résistances à la déchirure, à l'écrasement, etc. Néanmoins, des progrès du taux de recyclage peuvent encore être enregistrés dans le secteur papetier.

APERÇU RELATIF À QUELQUES AUTRES MATÉRIAUX

Verre

Nous renvoyons à ce sujet le lecteur à un article publié dans Déchets, Sciences et Techniques [8]. Il mettait en évidence, vis-à-vis d'un recyclage en boucle du verre creux d'emballage (en particulier des bouteilles), et pour atteindre un taux de recyclage élevé, la nécessité croissante d'un tri par couleurs. Il est en effet possible de modifier la couleur en passant du clair au sombre, mais l'inverse n'est pas réalisable, ce qui constitue un facteur d'irréversibilité (et la création d'entropie du système).

L'article s'appliquait d'autre part à rechercher, à défaut de recyclage en boucle, d'autres débouchés possibles correspondant à des recyclages en cascade.

Plastiques

Globalement, leur taux de recyclage ne dépasse guère 10 %.

Les thermoplastiques peuvent être refondus, mais non les thermodurcissables (environ 10 % du tonnage global); tout au plus ces derniers peuvent-ils être incorporés comme charge, moyennant un broyage fin.

Le recyclage porte en premier lieu sur des chutes neuves d'industrie; elles constituent des gisements homogènes et concentrés et peuvent permettre d'opérer un recyclage en boucle.

Certains déchets d'usage font également l'objet d'un recyclage en boucle; tel est par exemple le cas de bacs de collecte d'ordures ménagères réformés dont la matière est réincorporée par le fabricant dans la production de nouveaux bacs.

A défaut d'un recyclage en boucle, des déchets plastiques font l'objet d'un recyclage en cascade; mais, en raison d'un faible taux global de recyclage, la cascade est virtuelle plus que réelle, et le recyclage se traduit souvent par des applications peu valorisantes: articles bon marché, applications « cachées » (de dessous ou du derrière; par exemple: fonds de téléviseurs).

A partir de couleurs diverses ou mélangées, il n'est pas possible d'obtenir une teinte précise et homogène; dès lors, la solution souvent retenue consiste à passer au noir, ou du moins à une couleur foncée; tel est par exemple le cas des sacs-poubelles en régénéré.

Les progrès des technologies de co-extrusion et de co-injection ont cependant conduit à incorporer la matière régénérée en « sandwich » entre deux couches de résines vierges, ce qui permet d'éviter des défauts de surface (par exemple, PVC régénéré incorporé dans des tubes d'assainissement, entre deux couches de résine vierge).

Un autre obstacle au recyclage réside dans le fait que les mélanges ne sont possibles que pour un nombre limité de résines.

A défaut, les mélanges incompatibles s'accompagnent d'une perte des propriétés. Il est toutefois possible de rendre certains autres mélanges compatibles par des ajouts ou des traitements spécifiques, mais ils sont coûteux.

Il est plus intéressant de fabriquer des produits minces; au plan économique, la valeur au kilogramme est plus élevée. A défaut de caractéristiques performantes, les fabrications en régénéré sont relatives à des produits épais, dont des substituts du bois ou du béton.

Certaines substitutions risquent de désorganiser d'autres marchés: tel est par exemple le cas de pieux en plastique régénéré, en substitution à des pieux en bois (sous-produit traditionnel de l'élagage forestier). S'y ajoutent des exportations lointaines, notamment vers l'Asie et d'autres pays en développement. Greenpeace a dénoncé les effets locaux négatifs susceptibles d'en résulter; en particulier la concurrence (déloyale) exercée vis-à-vis de l'activité de petits récupérateurs locaux.

L'utilisation de régénérés pour des produits (notamment des emballages) au contact des aliments est interdite dans certains cas et en tous cas n'est à envisager qu'avec circonspection, ce qui limite le recyclage en boucle. Leur utilisation

dans des produits performants à longue durée de vie est également à envisager avec circonspection, parce que la connaissance du phénomène de vieillissement reste imparfaite.

Parmi les applications actuellement retenues figurent par exemple les composteurs individuels. Ce type d'application n'est pas à exclure; les exigences sont modestes et ce marché est en expansion. Toutefois, l'effet d'imitation par les fabricants se traduit par une offre pléthorique, assortie de prix très bas. D'une façon plus générale, des recyclages en cascades nécessitent de se poser des questions d'adéquation quantitative.

Parmi les produits plastiques dont la récupération s'est fortement développée au cours des dernières années figurent les bouteilles en PET (polyéthylène téréphtalate). A partir des bouteilles collectées, il est possible de fabriquer de nouvelles bouteilles, soit un recyclage en boucle; mais les risques associés au contact du régénéré avec les liquides alimentaires conduisent également à pratiquer la co-extrusion (incorporation de régénéré, mais le contact est assuré par une couche de résine vierge). S'y ajoutent des problèmes de coloration; le PET clair est plus recherché que les PET colorés.

A défaut d'un recyclage en boucle, le PET-bouteilles récupéré et régénéré est transformé, pour une part majeure, en fibres textiles (le PET est un polyester). L'exemple des vêtements polaires (et à ce sujet la marque Patagonia, qui jouit dans le public d'un prestige certain) est souvent mis en avant. Cependant, combien d'articles polaires faudrait-il acheter chaque année pour assurer les débouchés de l'ensemble du gisement des bouteilles en PET?

S'y ajoutent d'autres applications: rembourrage, tapis, moquettes, bandes (cerclage), films, plaques, etc.

D'autres voies de recyclage ou de valorisation sont dites « chimiques » (ou *feedstock recycling*), par opposition au recyclage dit « mécanique » considéré précédemment.

A partir du PET, il est possible (par glycolyse, méthanolyse, saponification, etc.) d'extraire divers produits intermédiaires: diméthyl téréphtalate, acide téréphtalique, éthylène-glycol, pour fabriquer de nouveaux articles en PET, y compris de nouvelles bouteilles; polyols pour fabriquer des mousses en polyuréthane; polyesters insaturés pour des applications diverses.

Le recyclage chimique des plastiques constitue une voie intéressante, permettant d'obtenir des produits de valeur. Moins prometteuse apparaît la solution consistant, à partir de plastiques, à produire un fuel (« dérivé »), qui ne peut être utilisé qu'après préparation poussée et dont la valeur est relativement faible. A partir de polyoléfines par exemple, il apparaît préférable de produire des cires et paraffines, dont la valeur est beaucoup plus élevée que celle d'un fuel^[9]. D'une façon plus générale, il apparaît préférable de « casser » le moins possible les macromolécules constitutives des résines et ainsi, là encore, de limiter la création d'entropie du système-matière.

L'analyse a été centrée sur la matière, et non sur les bilans énergétiques. On notera cependant à ce sujet que, vis-à-vis

de productions à partir de matières premières vierges, le recyclage permet généralement de réaliser des économies d'énergie (sous réserve de précisions relatives aux transports associés aux divers stades). Une objection mise en avant par les partisans de l'incinération est qu'elle permet, notamment dans le cas des plastiques, dont le pouvoir calorifique est élevé, de récupérer l'énergie « stockée »; mais cette objection ne résiste pas à l'analyse: au plan énergétique, le bilan le plus favorable résulte de recyclages successifs de la matière (si possible en boucle, à défaut en cascade), qui conservent l'énergie en mémoire, puis enfin – à défaut – d'une valorisation énergétique. Ainsi, les économies d'énergie s'ajoutent [10].

Aluminium

Les taux de recyclage des métaux sont élevés; ils sont plus élevés pour les non-ferreux que pour les ferreux, et plus encore les métaux précieux.

En ce qui concerne l'aluminium, on peut distinguer la transformation proprement dite de la fonderie, pour des produits plus épais. L'aluminium de récupération est surtout destiné à la fonderie: ainsi, des carters de moteurs redeviennent des carters (recyclage en boucle).

En fait, l'aluminium est principalement utilisé sous forme d'alliages, ou plutôt moyennant l'addition d'autres métaux modifiant ses propriétés. Les affineries d'aluminium (de seconde fusion) disposent d'un parc (stock) sur lequel les déchets sont soigneusement séparés en fonction de leur composition, sont analysés et sont mobilisés en fonction de la composition souhaitée du produit.

Alors que la production d'aluminium est forte consommatrice d'énergie, son recyclage permet d'économiser l'énergie (besoin en énergie vingt fois moindre, en excluant les transports).

Parmi les sources d'approvisionnement, les déchets ménagers constituent une part mineure. Il s'agit, outre d'ustensiles ménagers, de boîtes-boissons, ainsi que de feuilles; la part des produits minces, en particulier d'emballage, est importante. La récupération des boîtes-boissons s'est fortement développée. Ces boîtes sont en fait soit en acier (jusqu'alors avec un couvercle en aluminium, mais des boîtes « tout acier » sont apparues), soit « tout aluminium ». Aux Etats-Unis, les boîtes aluminium prédominent, et leur récupération conduit, dans une assez forte proportion, à fabriquer de nouvelles boîtes; en Europe, les choix de matière et les taux de récupération sont variables suivant les pays. Même pour les boîtes « tout aluminium » (et en laissant de côté la question des encres et vernis), les alliages d'aluminium sont différents suivant qu'il s'agit du corps de boîte (monopiece, incluant le fond, l'ensemble étant obtenu par étirage) ou du couvercle, et en particulier du système d'ouverture, constitué par un alliage d'aluminium renforcé en magnésium, pour accroître la rigidité. Dès lors, un recyclage en boucle intégral (pour limiter l'entropie du système) nécessiterait de séparer le couvercle du corps de boîte. Faut-il aller jusque là?

EN CONCLUSION

L'analyse assez approfondie du cas du papier et le tour d'horizon relatif à quelques autres matériaux ont permis de montrer la nécessité d'un recyclage en boucle, si on vise des taux de recyclage très élevés. Cependant, pour des matériaux (en particulier les plastiques) ou des gisements dont le taux de recyclage n'est encore que modeste, le développement d'un recyclage en cascade constitue une première étape de progrès. De plus, le raisonnement qui précède doit être tempéré par d'autres considérations: des considérations économiques et un bilan environnemental plus complet.

Gérard Bertolini, économiste

Directeur de Recherche au CNRS - LASS, Université de Lyon I

Bibliographie

- [1] H. Guitton : *Entropie et gaspillage*, éd. Cujas, 1975 (165 pages)
- [2] M. Faber, H. Niemes et G. Stephan : *Entropy, environment and resources (An essay in physico-economics)*, éd. Springer-Verlag, 1987.
- [3] T. Sirkin et M. Ten Houten : *The cascade chain (A theory and tool for achieving resource sustainability with applications for product design)*, Resources, Conservation and Recycling (n° special), vol. 10, n° 3, mai 1994, pp. 213 à 277.
- [4] F. Schneider : *Analyse des réemplois, recyclages, valorisations de déchets par l'étude de systèmes cascade*, Thèse de Doctorat, INSA de Lyon (LAEPSI), 1996.
- [5] Conseil Européen des Papiers Récupérés : statistiques 2000.
- [6] G. Bertolini : *La structure du marché des fibres cellulosiques de récupération*, Publications économétriques, vol. 13, fasc. 2, 1980 (pp. 1 à 19).
- [7] G. Bertolini : *Récupération – recyclage des papiers-cartons : le jeu de la réincarnation*, Environnement et Technique n° 139, 1994 (pp. 12 et 71).
- [8] G. Bertolini : *Recyclage du calcin (verre cassé) : recherche de débouchés alternatifs*, Déchets, Sciences et Techniques n° 13, 1^{er} trim. 1999 (pp. 12 à 17).
- [9] G. Bertolini et J. Fontaine : *Value recovery from plastics waste by pyrolysis in molten salts*, Resources, Conservation and Recycling, vol. 10, n° 4, 1987 (pp. 331 à 343).
- [10] G. Bertolini : *Homo plasticus ; les plastiques, défi écologique*, éd. Sang de la terre, 1991 (270 pages).