

# RÉUTILISER ET RECYCLER LES RESSOURCES : LIMITES ET OPPORTUNITÉS

Thomas Graedel

Professeur émérite d'écologie industrielle à l'Université de Yale



Un feu d'artifice traditionnel. Les couleurs vives sont produites par des composés de cuivre, de baryum, de calcium, de magnésium, de strontium et d'autres matériaux.

T.E. Graedel a rejoint l'université de Yale en 1997 après 27 ans d'activité au sein des laboratoires AT&T Bell. Il est actuellement professeur émérite d'écologie industrielle à Yale. Il est l'un des fondateurs du domaine de l'écologie industrielle et co-auteur du premier manuel de cette spécialité. En caractérisant les cycles des métaux utilisés dans l'industrie, il a contribué à explorer les aspects de la disponibilité des ressources, des impacts environnementaux potentiels, des possibilités de recyclage et de réutilisation, de la criticité des matériaux et de la politique des ressources. Il a été le premier président de la Société internationale pour l'écologie industrielle de 2002 à 2004 et a remporté le prix de la société ISIE 2007, qui salue l'excellence de ses recherches en écologie industrielle. Trois fois membre du Panel international des ressources des Nations unies, il a été élu à l'Académie nationale d'ingénierie des États-Unis en 2002.

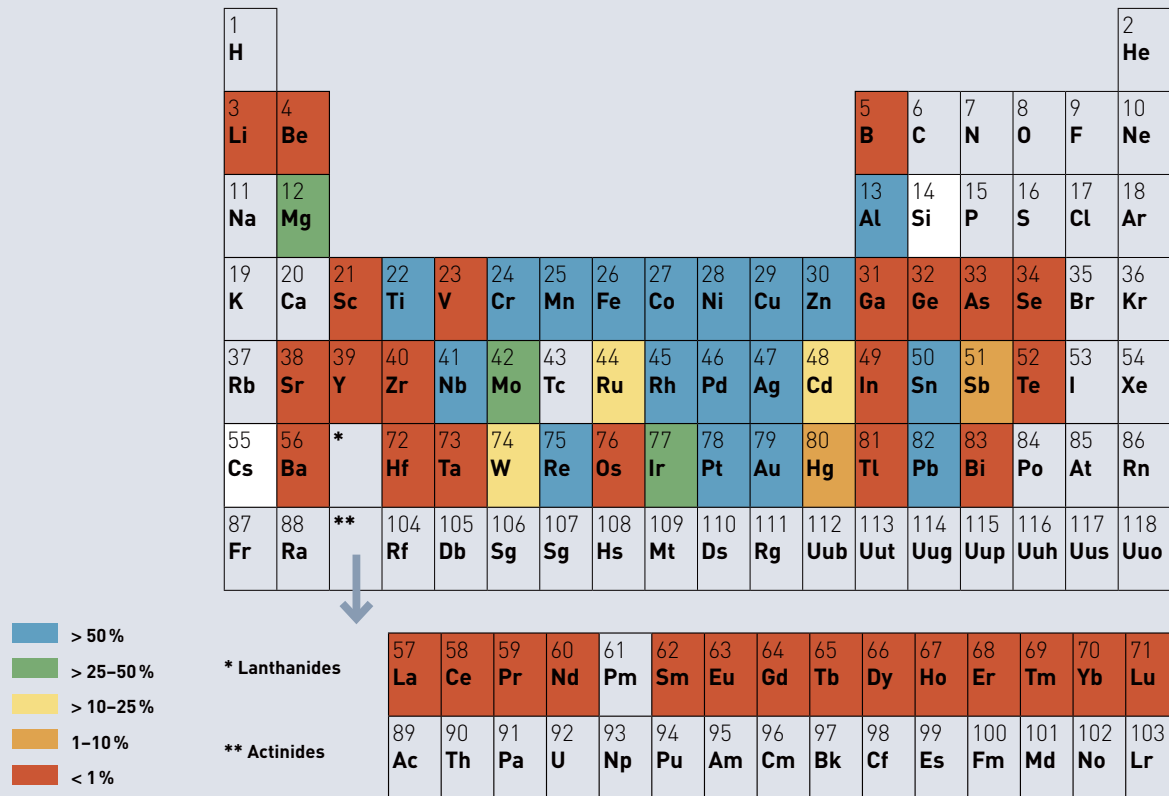
Aujourd'hui, les matériaux sont souvent mis au rebut après leur première utilisation. C'est particulièrement vrai pour les matériaux dont l'utilisation est intrinsèquement dissipative, pour les assemblages complexes où des éléments en concentration faible - mais essentiels - sont souvent perdus lors du recyclage et pour les matériaux utiles mais toxiques. Nous présentons ici le statut de la réutilisation et du recyclage, ainsi que cinq possibilités d'amélioration : (1) éliminer les utilisations dissipatives des matériaux ; (2) développer des technologies avancées pour la réutilisation et le recyclage ; (3) créer des dépôts appropriés pour les matériaux qui ne conviennent pas à une économie circulaire ; (4) concevoir de nouveaux produits pensés pour la circularité en fin de vie ; (5) créer et soutenir des chaînes de transport et de recyclage collaboratives internationales.

## INTRODUCTION

L'idée initiale de l'économie circulaire est de transformer notre société matérialiste en passant de l'approche classique de l'utilisation des matériaux (« extraction, utilisation, élimination ») à une approche favorisant la réutilisation. Dans cette approche, l'utilisation des matériaux retenus dans les boucles courtes du diagramme « générique » de l'économie circulaire<sup>1</sup> nécessite moins d'énergie et moins de nouvelles ressources (voire aucune) qu'il n'en faudrait pour effectuer des actions similaires dans les boucles longues. L'idée est intrinsèquement attrayante, mais pas sans difficultés. Il convient en effet de déterminer dans quelle mesure une telle transition est possible et souhaitable depuis divers points de vue : technologique, économique, social et politique. Car il convient de résoudre un certain nombre de problèmes, notamment dans la conception des produits, la technologie choisie pour le recyclage, la toxicité des matériaux, sans oublier la simple question de l'espace nécessaire pour une réparation et réutilisation effective pour parvenir à une économie véritablement circulaire.

<sup>1</sup> Diagramme des boucles de l'économie circulaire de la Fondation Ellen Mac Arthur.

## Taux de recyclage fonctionnel en fin de vie de soixante éléments, classés dans cinq catégories de pourcentages



(International Resource Panel, Recycling Rates of Metals, ISBN 978-92-807-3161-3, Programme des Nations Unies pour l'environnement, Nairobi, Kenya, 2011).

Schéma 1

## STATISTIQUES SUR LE RECYCLAGE

Avant de réfléchir à la direction à prendre pour l'avenir en matière de recyclage, nous devons évaluer la situation actuelle. Malheureusement, à de rares exceptions près, celle-ci n'est guère encourageante. Il y a près de dix ans, un comité du Groupe international des ressources des Nations unies a effectué une estimation du taux de recyclage fonctionnel en fin de vie des éléments du tableau périodique en distinguant cinq fourchettes de pourcentage, comme le montre le schéma 1. Nous remarquons que seuls quinze à vingt éléments sont associés à des taux de recyclage supérieurs à 50 % (le comité déclarant que peu d'entre eux semblent dépasser les 75 %). Nous remarquons surtout que plus de trente éléments ne disposent de pratiquement aucune solution de recyclage. Seuls quelques éléments se sont vu attribuer des valeurs comprises entre 0 et 50 %. Cela signifie que la majorité des éléments utilisés dans le domaine technologique ne sont utilisés qu'une seule fois avant d'être perdus à jamais pour leur secteur, un triste constat compte tenu de l'énergie et des efforts déployés pour les acquérir.

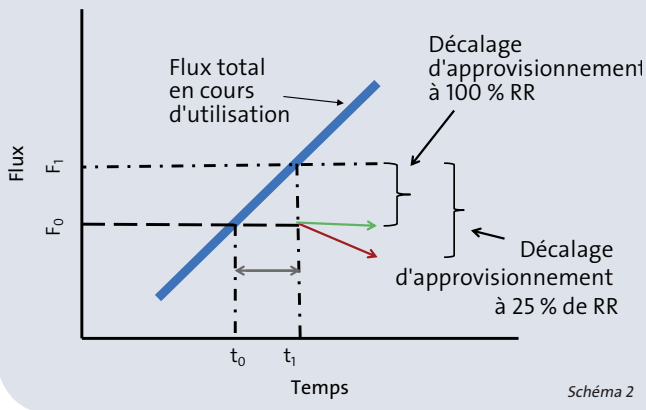
Les statistiques sur le recyclage n'ont jamais été très satisfaisantes car aucune réglementation n'exige leur collecte. En conséquence, à l'heure actuelle, les meilleures estimations des valeurs des taux

de recyclage des produits en fin de vie (EOL-RR) restent celles du Panel international des ressources de 2011 (voir schéma 1). Il semble donc nécessaire d'adopter une approche plus structurée, fondée sur les données, pour quantifier régulièrement les taux de recyclage. On peut espérer qu'une telle approche sera mise en place à l'avenir. Pour l'heure, tous les taux de recyclage en fin de vie doivent être considérés comme des « estimations éclairées fondées sur des données minimales ».

## COMMENT SONT VRAIMENT UTILISÉS LES MATÉRIAUX ?

Pourquoi les matériaux incorporés dans divers processus de fabrication ne peuvent-ils pas être réutilisés à la fin de vie des produits ? Pour répondre à cette question, simple en apparence, divisons en quatre catégories les modes d'utilisation des ressources : « en usage dissipé », « actuellement non recyclables », « potentiellement recyclables » et « non spécifiées » (généralement des utilisations à petite échelle dont les faibles volumes ne justifient pas un suivi). La catégorie « en usage dissipé » comprend des utilisations qui peuvent sembler bénéfiques (plaquettes de frein de véhicule, feux d'artifice, etc.) mais qui offrent peu ou pas de perspectives de récupération

## L'effet retardateur des matériaux dans les stocks de produits en cours d'utilisation



et de réutilisation des matériaux. D'autres applications, comme l'utilisation d'éléments de terres rares dans les poudres de polissage, pourraient être recyclables si une approche technologique avait été développée, ce qui n'est pas encore le cas. La catégorie des produits potentiellement recyclables correspond à une catégorie pour laquelle le recyclage existe mais n'est généralement pas employé pour des raisons de coût, de praticité ou faute d'incitation.

Dans un monde idéal, les matériaux disponibles grâce au recyclage satisferaient la demande existante pour le même matériau, et il ne serait pas nécessaire d'extraire de nouvelles ressources. En réalité, les matériaux restent mobilisés en phase d'usage dans notre économie pendant de longues périodes, souvent des décennies, alors que la demande augmente. Cette situation est appelée « effet retardateur des stocks ». Ainsi, dans un monde où la demande augmente, même un recyclage parfait ne suffit pas à satisfaire l'offre (schéma 2). En effet, certains matériaux ne sont pas immédiatement retraités pour être réutilisés. Il arrive que des appareils électroniques personnels soient conservés dans un tiroir de chambre pendant une dizaine d'années, ils deviennent alors ce que l'on appelle des « stocks comateux », c'est-à-dire des matériaux stockés de telle manière qu'ils risquent de ne jamais être récupérés. Par exemple, les câbles de distribution d'électricité mis hors service mais laissés en place parce que les avantages de les récupérer ne compensent pas les efforts et les dépenses nécessaires pour le faire. Enfin, il existe des stocks qui sont conçus pour ne jamais être récupérés et réutilisés, comme les pieux de fondation sous les grands bâtiments et les structures portuaires : on pourrait les appeler les « stocks abandonnés ».

Dans un monde où la demande augmente, même un recyclage parfait ne suffit pas à satisfaire l'offre.

Imaginez cependant que l'on décide de se débarrasser d'un produit contenant des matériaux potentiellement recyclables.



La mise en œuvre effective d'un recyclage technologiquement approprié peut comporter de nombreuses étapes, comme nous le verrons plus en détail ci-dessous.

La réutilisation et le recyclage sont des approches judicieuses pour faire face à l'accumulation de produits mis au rebut. Toutefois, dans certains cas, la réutilisation et le recyclage ne sont pas les approches idéales. Citons l'exemple d'un produit jeté, contenant des matériaux non pertinents dans l'économie actuelle, comme des matériaux ou des assemblages qui n'étaient pas considérés comme dangereux lors de leur première utilisation, mais qui suscitent aujourd'hui des préoccupations importantes : des métaux toxiques tels que le cadmium dans les trains d'atterrissage des avions, le plomb dans la peinture, ou des matériaux cancérigènes tels que les polychlorobiphényles dans les transformateurs. Ulrich Kral et ses collègues de l'Université technique de Vienne suggèrent de ne pas utiliser ces matériaux dans la conception de nouveaux produits mais aussi de déposer dans un « dépôt définitif » les anciens produits qui ne sont plus en service ou les matières dangereuses dissipées pendant l'utilisation. La fonction de ce dépôt est alors de détruire complètement une substance indésirable ou de la conserver pendant une longue période qui permettra d'envisager son recyclage ultérieur. Le schéma 3 présente ce processus.

Ce type de dépôt a notamment été mis en place par certains pays pour accueillir de manière responsable les déchets des réacteurs nucléaires. Ces matériaux étant potentiellement dangereux, les

*Dans un monde où la demande augmente, même un recyclage parfait ne suffit pas à satisfaire l'offre*

dépôts sont souvent controversés, notamment par les personnes vivant à proximité. Toutefois, malgré les difficultés sociétales soulevées par cette pratique, il est évidemment inapproprié de continuer à utiliser des matériaux dont la toxicité est connue ou suspectée sans prévoir une solution quand ils deviennent indésirables. Si des matériaux sont jugés si bénéfiques pour la technologie moderne que la société souhaite les utiliser, alors il convient de faire face aux défis qu'ils représentent et de prévoir des approches en dehors de l'économie circulaire.

## LE DÉFI DE LA COMPLEXITÉ DES PRODUITS

Il convient de réfléchir à la portée de ce qu'impliquerait une économie véritablement circulaire pour le secteur des dispositifs médicaux. Les fabricants de dispositifs médicaux utilisent non moins de soixante-dix éléments différents dans l'imagerie, la chirurgie robotique, les prothèses d'articulations, etc. Cette grande diversité d'éléments est similaire à celle de l'électronique moderne.

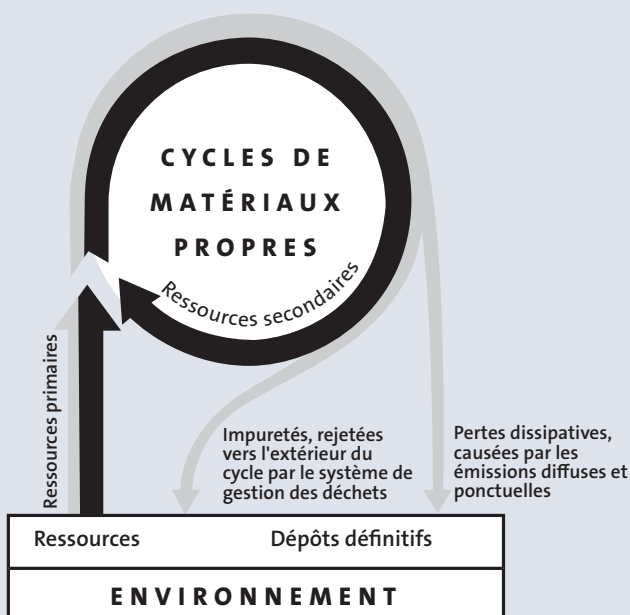
Et bien entendu, l'utilisation de chacun de ces éléments dans les dispositifs médicaux ou dans l'électronique sert un objectif : une meilleure imagerie des organes, un stockage et une récupération plus rapides des informations, etc. Un fabricant de dispositifs adhérent de façon dogmatique aux principes de l'économie circulaire devrait donc prendre en compte à la fois les questions de contamination et de stérilisation, mais aussi de retraitement de l'ensemble des éléments. Cela représenterait un engagement considérable pour les concepteurs, les fabricants de produits et leurs responsables. Cela signifie peut-être aussi qu'il est irréaliste d'adopter une posture dogmatique en matière d'économie circulaire quand il s'agit de produits à la pointe d'une technologie.

Supposons toutefois qu'un matériau (contenu dans un produit) ne soit soumis à aucune des contraintes de recyclage et de réutilisation évoquées ci-dessus et que ce matériau ait été mis au rebut. La réussite du désassemblage et du recyclage dépend d'une séquence en plusieurs étapes, comme le montre le schéma 4. Or, au cours du processus, il s'avère souvent impossible de désassembler complètement ou de conserver les composants une fois le désassemblage terminé.

Compte tenu des estimations sur la probabilité de réussite de chacune de ces étapes à l'heure actuelle, l'ensemble du processus de recyclage des produits se révèle assez peu efficace. Pour améliorer cette situation, des efforts sont nécessaires à toutes les étapes du processus de recyclage, mais aussi dès la conception du produit d'origine. Voici, ci-dessous, certains des principaux points :

- Si possible, récupérer un produit avant de le mettre au rebut et chercher à l'utiliser ailleurs (c'est ce qu'on appelle la « délocalisation »).
- Si la délocalisation n'est pas possible, chercher à « remanufacturer » le produit, c'est-à-dire le remettre dans son état et ses capacités d'origine ou, mieux encore, à le mettre au niveau des capacités les plus récentes de produits similaires (c'est ce qu'on appelle le « remanufacturing »).

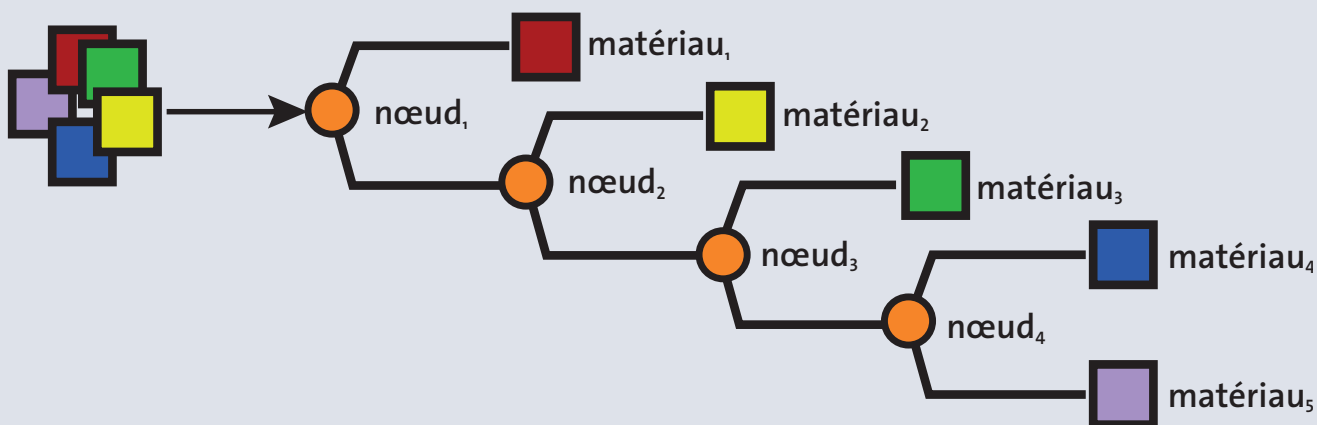
### Flux de matériaux basés sur une stratégie de cycle propre



(Reproduit avec la permission de U. Kral, K. Kellner et P.H. Brunner, Science of the Total Environment, 461-462, 819-822, 2013 ; Copyright, 2013).

Schéma 3

## Une séquence en quatre nœuds pour le désassemblage d'un produit générique



Reproduit avec la permission de J.B. Dahmus et T.G. Gutowski, Environmental Science & Technology, 41, 7543-7550, 2007. Copyright 2007 American Chemical Society.

Schéma 4

- Si le « remanufacturing » n'est pas possible, alors il s'agit de démonter le produit et de réutiliser ses composants. Pour réaliser cette étape, il faudra identifier de façon efficace les composants et rechercher les possibilités de réintégration dans l'économie. La meilleure façon d'envisager le démontage est de le prévoir dès le stade de la conception du produit, en limitant au maximum les étapes.
- Si les composants et les assemblages ne peuvent pas être facilement démontés ou que ce processus n'est pas viable sur le plan économique ou technique, il faudra alors les broyer ou les envoyer dans des installations de tri, où ils seront traités dans des réacteurs chimiques ou métallurgiques.

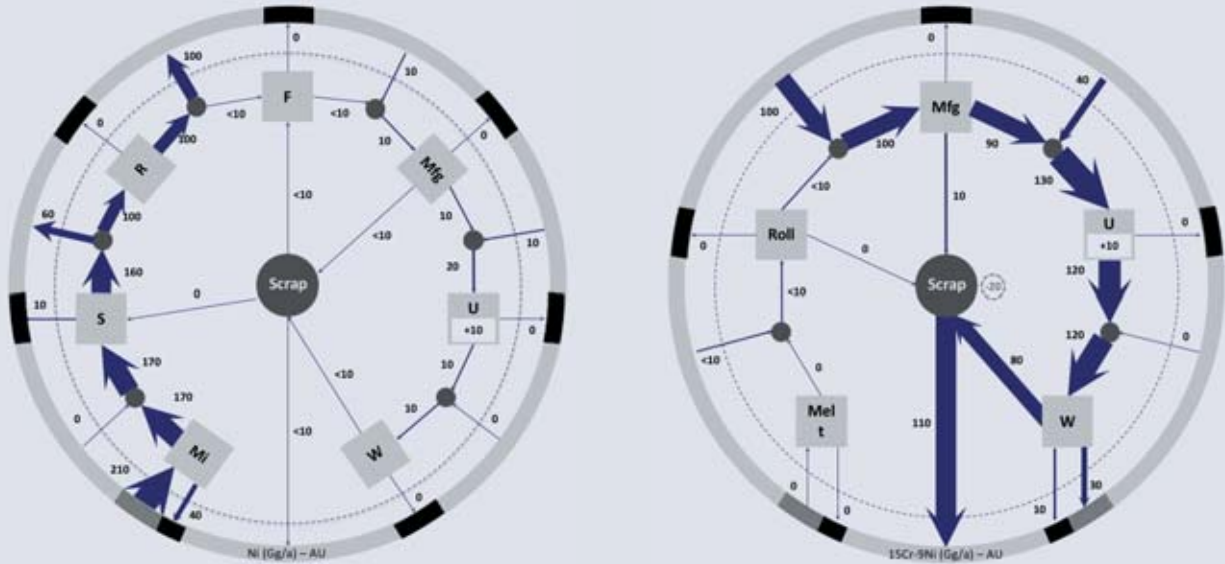
*L'ensemble du processus de recyclage des produits se révèle assez peu efficace. Pour améliorer cette situation, des efforts sont nécessaires à toutes les étapes du processus de recyclage, mais aussi dès la conception du produit d'origine*

## LA LOGISTIQUE SPATIALE

Une question peu abordée par les défenseurs de l'économie circulaire est celle des besoins spatiaux pour effectuer, concrètement, la réparation, la réutilisation, le remanufacturing et le recyclage. Dans notre monde technologique, des produits complexes sont souvent fabriqués dans un petit nombre d'installations spécialisées, vendus à des utilisateurs du monde entier, et peut-être revendus ou reloués plus tard, pour être finalement mis au rebut. Étant donné la complexité de ces produits, on ne peut pas s'attendre à ce qu'il existe partout des sites équipés des technologies de recyclage adéquates, permettant une remise à neuf et une réutilisation locales. Dans l'idéal, il faudrait réunir les produits en fin de vie une fois qu'ils sont obsolètes, avant qu'ils



## Les cycles australiens du nickel (à gauche) et de l'acier inoxydable (à droite) en 2010



Les unités utilisées sont les gigagrammes (mille tonnes) d'équivalent métallique par an (Graedel, T.E., B.K. Reck, L. Ciacchi et F. Passarini, On the spatial dimension of the circular economy, Resources, 8, 32 doi:10.3390/resources8010032, 2019).

Schéma 5

ne soient dégradés et démontés, pour veiller à ce qu'ils soient transportés vers une installation capable de les reconditionner ou de les recycler. Pour les produits les plus complexes, il existe sans doute peu d'installations adéquates dans le monde et les difficultés d'identification, de transport et d'économie deviennent rapidement insurmontables.

Cette question peut être illustrée par un exemple simple, celui du nickel en Australie, dont le cycle de la matière première est représenté au schéma 5 (à gauche). L'Australie possède de très grands gisements de métaux et une industrie minière très dynamique. Les quantités de nickel extraites et traitées sont considérables, mais le métal raffiné qui en résulte est largement exporté. Une grande partie de ce nickel est utilisée dans la production d'acier inoxydable dans d'autres régions du monde (l'Australie ne produit pas d'acier inoxydable, un alliage de nickel composé d'environ 74 % de fer, 15 % de chrome et 9 % de nickel) et ne dispose donc pas de la technologie nécessaire pour le retraiter. S'il faut le retraiter, cela doit être fait ailleurs. Ainsi, les importations d'acier inoxydable en Australie doivent être ensuite exportées pour une éventuelle réutilisation (schéma 5, à droite). Le message est clair : dans une économie mondialisée, il est très peu probable de trouver partout et pour chaque produit (selon sa complexité) des installations permettant une économie circulaire. Il faudra anticiper un volume d'échanges maritimes conséquent et une coordination politique et scientifique internationale.

## CONCLUSION

Les difficultés soulevées dans cet article suggèrent cinq points d'amélioration possibles :

- Diminuer ou éliminer les utilisations dissipatives des matériaux ;
- Inventer et développer des technologies de réutilisation et de recyclage pour de nombreux matériaux et produits, quand celles-ci sont inadéquates ou n'existent pas ;
- Développer des « dépôts », à l'échelle nationale ou régionale, pour les matériaux qui ne peuvent pas être conservés dans une économie circulaire en raison de leur toxicité, de leur radioactivité ou d'autres effets nocifs ;
- Concevoir de nouveaux produits en vue de la circularité en fin de vie et non de l'élimination ;
- Optimiser la collecte des composants et produits difficiles à remanufacturer ou à recycler et mettre au point un système international pour transporter ces objets vers des installations permettant de les réutiliser sous une forme ou une autre.

Aucune de ces possibilités d'amélioration ne sera facile à réaliser, certaines seront même très difficiles. Toutefois, nous pouvons en dire autant des activités et des approches technologiques qui les ont rendues nécessaires au départ. Dans certains cas, il conviendra d'initier une réflexion sur la conception des produits, le traitement des matériaux et le recyclage. Dans d'autres, il faudra des actions de coopération de la part des gouvernements. Toutefois, chaque pas dans la bonne direction induira une amélioration significative de la circularité. Une réflexion morale est nécessaire : une société technologique dont les activités ont vu naître ces grands défis doit être à la hauteur de ses responsabilités.