

# Introduction

**Michel CATHELINÉAU et Alexandre CHAGNES**  
*GeoRessources, CNRS, Université de Lorraine, Nancy, France*

## Gestion durable et économie circulaire

L'économie circulaire vise à augmenter l'efficacité de l'utilisation des ressources et à diminuer l'impact sur l'environnement, et en conséquence à limiter le gaspillage des ressources et l'impact environnemental du cycle des matières. Si des précurseurs avaient déjà envisagé le cycle de la matière dans l'économie, ce concept est surtout apparu vers les années 2000 et a été largement diffusé, depuis, en Europe par la fondation McArthur. Elle s'appuie sur le concept de production de biens et de services dans un cadre durable en limitant la consommation, c'est-à-dire le gaspillage des ressources et la production de déchets. Cette vision s'oppose à l'économie linéaire où les ressources sont exploitées, consommées sous la forme de biens, qui sont ensuite rejetés sous la forme de déchets après usage. En France, l'Agence de l'environnement et de la maîtrise de l'énergie (ADEME) soutient les initiatives visant à améliorer l'économie circulaire et tient à jour les statistiques concernant le devenir des déchets. Les cycles de la matière sont complexes, et impliquent de très nombreux acteurs qu'ils soient des industriels, des particuliers ou des collectivités, ceci dans un cadre légal qui évolue, et sous les impératifs économiques qui régissent nos sociétés. Cette vision intégrée impliquant de nombreuses interactions rend l'approche complexe mais efficace (figure 1).

Ainsi, l'économie circulaire repose sur :

1) l'offre et les acteurs économiques qui s'intéressent à l'approvisionnement durable en ressources qu'elles soient renouvelables ou non renouvelables, à l'écoconception des biens et services, au développement de l'écologie industrielle et territoriale, et à la mise en œuvre de l'économie de la fonctionnalité (recours à un service plutôt que la possession

d'un bien, comme par exemple la location des batteries des véhicules électriques plutôt que leur achat pour une meilleure gestion de la collecte et du recyclage) ;

2) la consommation (demande et comportement) qui regroupe les achats responsables, la bonne utilisation des produits, le recours au réemploi et à la réparation ;

3) la gestion des déchets bien que les déchets doivent être réduits au maximum dans un souci de consommation responsable afin de favoriser le recyclage, et si besoin la valorisation énergétique.

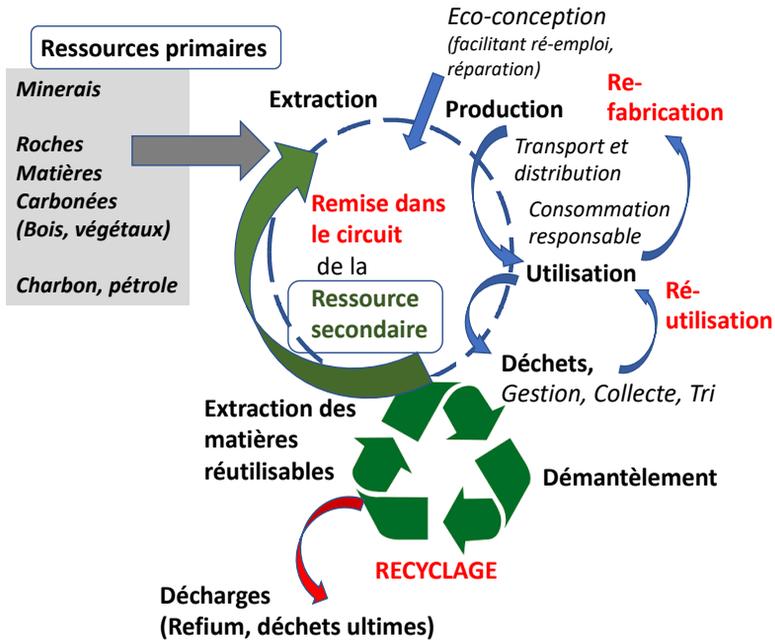


Figure 1. Principe de l'économie circulaire

L'industrie du recyclage représente en France environ 4 800 établissements qui sont impliqués dans la valorisation de déchets constitués de matériaux ferreux et non ferreux, de plastiques, de papiers et de cartons, de textile et de verre. Dans cet ouvrage, nous allons nous focaliser sur les enjeux de l'industrie du recyclage des matériaux non ferreux entrant dans les hautes technologies et qui sont stratégiques pour l'activité d'un pays, des cartons, des plastiques et des matériaux de construction, afin de réduire l'impact environnemental de nos activités sur l'environnement et de gérer durablement nos ressources.

Le recyclage est adossé au principe du développement durable, qui voit dans les déchets d'aujourd'hui non pas des ressources, mais bien des réserves – techniquement et

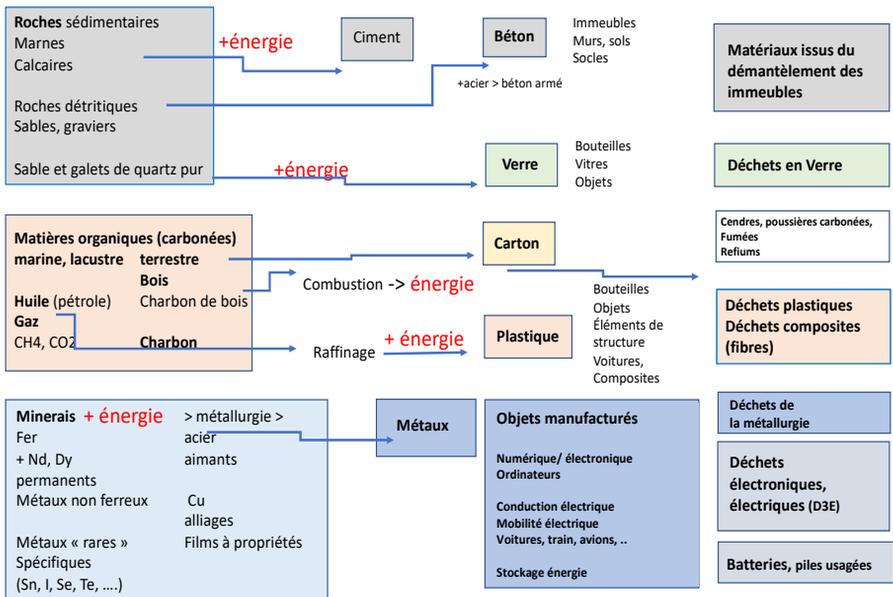
économiquement exploitables – de demain. À ce titre, tout ce que l’homme extrait pour répondre à ses besoins, à partir de ressources naturelles, doit désormais entrer dans le cercle de l’économie circulaire et ne plus en sortir. Cette ambition doit servir de guide au développement des nouveaux matériaux et des nouvelles technologies. En règle générale, les matériaux et technologies sur lesquels s’appuient très largement nos sociétés n’ont pas été conçus dans cette optique, et leur réconciliation avec les principes ci-dessus pose un grand nombre de défis technologiques, qui, pour être surmontés, nécessitent le développement de technologies de recyclage adaptées. En effet, les matériaux conçus et produits par l’homme, quel que soit le secteur d’activité auquel ils s’adressent, semblent se complexifier inexorablement pour leur conférer des fonctionnalités toujours plus avancées. La complexité des matériaux fonctionnels paraît malheureusement être synonyme de difficultés en termes de faisabilité et d’efficacité des différentes étapes du recyclage. Cette complexité peut se traduire par une « barrière énergétique (et économique) » justifiant ou non de mettre en place des processus complexes de traitement de la matière pour la recycler. Par exemple, la baisse de la demande en terres rares, conjuguée à la substitution des ampoules fluorescentes et au retour à la normale des exportations chinoises de terres rares, a poussé le groupe Solvay à fermer son activité de production de terres rares à partir des ampoules à basse consommation d’énergie usagées.

Le modèle économique de nos sociétés occidentales est probablement le frein le plus important à la mise en place de l’économie circulaire. Toute entreprise est en effet confrontée au maintien de la rentabilité qui est exigée par les actionnaires. Ces derniers sont essentiels à la mise en place d’un service ou d’une production de biens par l’apport de fonds initiaux (capitaux nécessaires au démarrage d’une activité). La mise en place d’une nouvelle usine de production de semi-conducteurs, de production de batteries (*gigafactories* en construction en Europe pour la fabrication de batteries qui, dans certains cas, sont adossées à des usines de recyclage) exigent en effet des capitaux initiaux de l’ordre de plusieurs milliards d’euros. Cependant, le maintien de ces activités exige de maintenir l’équilibre économique et la croissance. En jugeant les productions de proximité trop coûteuses (coût de la main-d’œuvre, impact financier du respect des normes sociales et environnementales) les entreprises ont favorisé une délocalisation à grande échelle. La réduction des coûts d’achats de matières premières est en effet passée par le choix d’aller chercher les fournisseurs les mieux-disants sur le marché mondial. Un tel choix a des avantages financiers à court terme mais aussi des inconvénients fondamentaux au long terme. Cela a conduit à des pertes depuis le savoir-faire jusqu’à la totalité de la chaîne de valeur, et a entraîné à la fois la délocalisation des exploitations minières, puis de la métallurgie et enfin de la fabrication des objets finis. Parmi les secteurs concernés, les secteurs des aimants permanents et des semi-conducteurs sont très représentatifs de ces évolutions. Les grands pays bénéficiaires sont des pays asiatiques, notamment la Chine. Enfin, la collecte, le recyclage de proximité limitant le coût énergétique du transport des déchets, ne sont pas inclus dans le modèle économique de l’industrie du recyclage, car pas économiquement viables. Les coûts sont ainsi en partie supportés par les populations et les collectivités territoriales.

## Les différentes catégories de matériaux recyclés

Il est possible de classer les principales substances suivant la nature des matériaux sources. La figure 2 permet d'identifier la plupart des sources primaires des matières, leur utilisation et leur devenir potentiel dans le recyclage.

Ces différentes substances font l'objet des chapitres de cet ouvrage, les métaux, les matériaux issus de l'utilisation des sables et graviers et roches sédimentaires (verre (oxyde de silicium dérivé du quartz), le ciment (dérivé de sédiments argilo-calcaires), les produits organiques et leurs dérivés carbonés : les matières d'origine organique (bois, produits agricoles, déchets ménagers, cartons et papiers issus de fibres animales et végétales) et les produits issus de l'utilisation des matières carbonées fossiles (produits dérivés comme les plastiques mais aussi les molécules hydrocarbonées incluant les plastiques principalement issus de la pétrochimie).



**Figure 2.** Les matières premières naturelles, leur utilisation et les déchets associés qu'il convient de recycler

## Les challenges actuels et futurs pour la société

Le problème des déchets produits par les municipalités et les industries est une des questions environnementales les plus urgentes de notre temps, après le problème de la réduction des gaz à effet de serre dans le cadre de la maîtrise des sources d'énergie.

En France, la transition vers une économie circulaire est reconnue officiellement par le ministère de la Transition écologique comme l'un des objectifs de la transition énergétique et écologique et comme l'un des engagements du développement durable, qui indique sur son site qu'il est nécessaire de progresser dans plusieurs domaines :

- **l'approvisionnement durable** : prendre en compte les impacts environnementaux et sociaux des ressources utilisées, en particulier ceux associés à leur extraction et à leur exploitation ;
- **l'écoconception** : prendre en compte les impacts environnementaux sur l'ensemble du cycle de vie d'un produit et les intégrer dès sa conception ;
- **l'écologie industrielle et territoriale** : mettre en synergie et mutualiser entre plusieurs acteurs économiques les flux de matières, d'énergie, d'eau, les infrastructures, les biens ou encore les services afin d'optimiser l'utilisation des ressources sur un territoire ;
- **l'économie de la fonctionnalité** : privilégier l'usage à la possession, vendre un service plutôt qu'un bien ;
- **la consommation responsable** : prendre en compte les impacts environnementaux et sociaux à toutes les étapes du cycle de vie du produit dans les choix d'achat, que l'acheteur soit public ou privé ;
- **l'allongement de la durée d'usage** des produits par le recours à la réparation, à la vente ou à l'achat d'occasion, par le don, dans le cadre du réemploi et de la réutilisation ;
- **l'amélioration de la prévention, de la gestion et du recyclage des déchets**, y compris en réinjectant et réutilisant les matières issues des déchets dans le cycle économique.

Le recyclage est un des paramètres clés de ces objectifs. Il présente de nombreux avantages. Notamment, il permet de :

- **réduire les importations** et donc la dépendance vis-à-vis de certains pays producteurs. Dans le domaine des métaux, l'Europe qui a été autosuffisante jusqu'au XIX<sup>e</sup> siècle, dont la France qui a produit des métaux jusqu'à la fin du XX<sup>e</sup> siècle, est actuellement très dépendante d'approvisionnements extérieurs. La Chine a le monopole de plus de 40 substances, et d'autres pays ont également ce statut de monopole (la République démocratique du Congo pour le cobalt, le Brésil pour le niobium et le tantalum). La plupart des pays européens ont dû fermer leurs sites miniers pour différentes raisons telles que des problèmes de compétitivité liés au coût de la main-d'œuvre ou des considérations environnementales. C'est le cas des trois pays européens les plus consommateurs de métaux : la Grande-Bretagne, la France et l'Allemagne. En Europe, les pays producteurs (Europe du Nord, Espagne, Portugal) ne contribuent qu'à hauteur de quelques pourcents de la consommation globale en métaux ;

- **créer de l'emploi** : le recyclage des métaux exige de la main-d'œuvre et du développement technologique, source de métiers qualifiés ;

– **diminuer l'impact environnemental**, ce qui exige également de développer des usines de traitement de produits recyclés particulièrement propres et économes en énergie, engendrant un certain nombre de contraintes réglementaires. Le broyage d'un disque dur d'ordinateur reste cependant un enjeu, si bien que l'utilisation de l'énergie pour broyer et séparer les pièces des déchets électroniques est à considérer et le taux de récupération des métaux reste très bas mis à part les substances faciles à valoriser comme l'or, l'argent et le platine ;

– **réduire la mise en décharge des métaux**, ou l'exportation de matières à recycler vers des pays où les conditions sociales et environnementales du traitement de ces déchets ne sont pas acceptables, ce qui reste encore le cas ;

– **optimiser la gestion des déchets ménagers** : une gestion inappropriée des déchets a un impact négatif direct sur la qualité de tous les éléments de l'environnement, donc sur l'état des écosystèmes et la santé humaine. Les émissions vers le sous-sol ou l'air provenant de décharges mal gérées peuvent engendrer un impact sur la qualité des eaux, des sols et de l'air, et impactent les surfaces de terres cultivables. Il reste crucial d'augmenter le niveau de récupération (y compris le recyclage) des déchets industriels par une politique réglementaire et/ou fiscale, et développer une gestion moderne des déchets municipaux pour assurer une augmentation de la valorisation afin de réduire le volume des déchets mis en décharge.

## Structure et aspects présentés dans cet ouvrage

Le présent ouvrage n'a pas la prétention de présenter de manière exhaustive tous les aspects du recyclage, mais aborde une série d'exemples de cycles de l'économie circulaire présentés dans la figure 2.

Après une sensibilisation au rôle de chacun dans la réduction des volumes de déchets individuels (chapitre 1), le chapitre 2 replace la consommation des métaux et de l'énergie dans la perspective historique et le rôle potentiel du recyclage dans la satisfaction des besoins futurs de la société notamment en métaux.

Les chapitres suivants abordent les aspects techniques, les difficultés et les perspectives futures du recyclage :

– des batteries et des aimants permanents, deux éléments clés de la transition énergétique (chapitre 4) ;

– la récupération des métaux contenus dans les déchets électroniques, électriques, notamment les cartes électroniques, autant de matériaux emblématiques de la révolution digitale (chapitres 5 et 6) ;

– le recyclage des plastiques sous deux angles (le recyclage des polymères, et des circuits courts de recyclage pour l'impression 3D). Le recyclage des plastiques est en soi un

monde, en raison de la grande diversité des matériaux, intégrant des molécules organiques, dérivés des hydrocarbures ;

- le recyclage des bois déjà utilisés en construction ou autres filières et présentant des spécificités issues de leur cycle anthropique ;
- le recyclage du verre ;
- le recyclage des constituants du BTP en particulier le béton.

Le dernier chapitre offre des perspectives nouvelles quant à la récupération de métaux dans les sols naturels ou pollués par les méthodes d'agromine.

## **Remerciements**

Cet ouvrage sur le recyclage sollicité par Ph. Boulvais et Y. Lagabrielle (Geosciences Rennes) a pu être achevé grâce au soutien logistique pour l'organisation de réunions de l'Institut Carnot Icéel et du Labex Ressources 21 (ANR-10-LABX-21-RESSOURCES 21). Il regroupe les savoir-faire développés en Lorraine sur le recyclage par ces deux organisations.