



LE RECYCLAGE AU DÉFI DES BESOINS CROISSANTS DE LA SOCIÉTÉ

Il est désormais au cœur de nos vies, nous y sommes incités pour préserver notre planète. Mais que recouvre exactement le recyclage, et où en est-on ? Avec **Robert Guillaume**, explorons les coulisses mais aussi les limites d'une activité aussi multiforme que cruciale pour le développement durable.

Dans le cadre de notre partenariat avec l'Académie des sciences, des académiciennes et académiciens analysent et apportent leur éclairage sur les grands enjeux du monde contemporain au travers de questions scientifiques qui font l'actualité.

On peut tout connaître sur le recyclage en interrogeant Internet : objets recyclés et matériaux concernés, procédés industriels utilisés et capacités des filières, aspects sociétaux généraux et particuliers, directives européennes, lois et réglementations françaises, etc. Les objets sont de typologies variées, légers ou lourds ; les matériaux, courants ou rares. La documentation, technique ou commerciale, est surabondante et les conférences pour traiter des aspects scientifiques et techniques multidisciplinaires du recyclage sont d'actualité. Pas un jour dans les médias sans référence au recyclage. Le recyclage des chiffons pour faire du papier, puis celui du papier usé pour faire du papier neuf, des ferrailles et autres métaux pour en faire des lingots de métaux neufs, des bouteilles en verre pour en faire d'autres bouteilles a été pratiqué depuis le siècle dernier pour des raisons purement économiques, sans trop se soucier des problèmes sociétaux et environnementaux qu'ils pouvaient engendrer. L'eau a été purifiée pour être potable dès que l'on a pu utiliser l'eau de Javel vers les années 1900. C'était relativement simple.

Aujourd'hui, c'est beaucoup plus compliqué. On continue à recycler papiers, métaux, verres à hauteur de millions de tonnes par an, ainsi que les eaux usées, mais avec des procédés et des filières ajustés à de multiples contraintes. Celles-ci concernent aussi des métaux devenus stratégiques/critiques – nous y reviendrons – et de nouveaux objets renfermant des matériaux composites ou étant eux-mêmes composites. Ils sont beaucoup plus difficiles à recycler que les métaux courants. Ils ont tous été mis sur le marché au fil des transformations de la société pour répondre à plus de communication, plus de mobilité, plus d'énergie, plus de numérisation dans tous les domaines, alors que sont apparues simultanément les contraintes pour lutter contre le changement climatique et ses conséquences.

LE RECYCLAGE CHIMIQUE EST COMPLIQUÉ

Le recyclage est défini aujourd'hui comme une activité qui vise in fine, lorsqu'on remonte les opérations de traitement de l'objet que l'on recycle, à préserver les ressources naturelles dont on s'est servi pour le fabriquer, tout en diminuant l'empreinte environnementale résultant de son utilisation. L'objet à recycler est donc considéré comme un déchet ; s'il n'est pas recyclé, il est éliminé comme tel par incinération ou enfouissement. C'est une définition large qui conduit finalement à considérer les déchets résultant de l'utilisation des biens que nous fabriquons ou les loupés de fabrication comme une source de ressources secondaires. En récupérant ces ressources et en les réutilisant, on a moins puisé dans les stocks de ressources



DIDIER GOUPY/SIGNATURES

naturelles, on a moins de déchets ultimes à gérer et on a moins émis de CO₂. Dans le cycle de vie des biens de consommation, le recyclage transforme l'économie linéaire (fabriquer, consommer, rejeter) en économie circulaire (fabriquer, consommer, recycler, rejeter). Le recyclage participe à l'économie durable telle que définie par l'ONU en 2015, c'est l'objectif n° 12 des dix-sept objectifs de développement durable, et il sous-tend les autres. À la limite, on peut considérer que l'incorporation du CO₂ dans la matière organique pour faire des carburants synthétiques est un recyclage. Un cycle vertueux de mono-recyclage peut être étendu au multi-recyclage en répétant les cycles de recyclage. La mise en pratique du recyclage, dès lors que l'on a un procédé et que l'on peut envisager une filière, nécessite des choix. Il convient d'abord de définir ce que l'on souhaite récupérer d'un déchet : les éléments chimiques ou les unités élémentaires qui ont servi à produire les matériaux dont il est fait ou bien certains composants pour réemploi immédiat. Dans le premier cas, il s'agit de recyclage chimique, et de

PROFIL
Radiochimiste spécialiste de la chimie des actinides, Robert Guillaume est membre de l'Académie des sciences. Son expertise porte sur la chimie associée au cycle du combustible nucléaire (de l'extraction de l'uranium à la gestion des déchets, en passant par le retraitement du combustible usé) et sur les problèmes d'énergie.

LE RENOUELEMENT DES GRANDES STRUCTURES D'ÉNERGIE ÉLECTRIQUE NON CARBONÉE DEMANDE DE SE PRÉPARER AU RECYCLAGE EN MASSE DE LEURS COMPOSANTS.

recyclage mécanique dans le second. Le recyclage chimique est compliqué car il faut nécessairement séparer les éléments ou des molécules de mélanges complexes. Beaucoup de procédés sont encore au stade de la recherche et développement ou du pilote, peu sont industrialisés. Le recyclage mécanique utilise aussi, à un moindre degré, la chimie. Ensuite, le recyclage ne peut être pratiqué que si les flux d'entrée des objets à recycler sont suffisants par rapport à la demande des ressources secondaires obtenues, et que si la balance économie d'énergie-émission de CO₂ penche du bon côté. La première contrainte est économique et elle obéit à la loi des marchés, la seconde est évaluée par l'analyse du cycle de vie des objets, science encore en développement, qui tient compte des besoins et des nuisances à toutes les étapes de vie de l'objet. Mais ce côté rationnel de la mise en pratique du recyclage peut être bousculé par la géopolitique, omniprésente dès qu'il s'agit de ressources naturelles.

TERRES RARES ET MÉTAUX CRITIQUES

Il y a beaucoup de domaines d'actualité et en devenir dans le recyclage, en raison des besoins prévisibles de la société en biens de consommation et en énergie décarbonée. Le recyclage de l'eau simple, molécule vitale en quantité illimitée, est adapté aux quantités colossales à traiter et à la nature des pollutions de plus en plus variées. Les eaux usées sont recyclées pour l'alimentation, l'industrie, l'agriculture et même la réalimentation des nappes phréatiques. Les polymères simples ou composites, issus des ressources fossiles, sont utilisés dans toutes les technologies. Leur composition varie à l'infini et la production mondiale se mesure en millions de tonnes. Les objets en plastique, ou en contenant, en fin de vie, ont envahi la planète. Le recyclage de ces polymères suit deux voies : la première pour réduire les impacts environnementaux, notamment pour les plastiques d'emballage, la seconde pour récupérer les monomères pour de nouveaux besoins. En Europe, 30 % des 60 millions de tonnes de déchets plastiques sont recyclés. Le démantèlement/renouvellement des grandes structures d'énergie électrique non carbonée)))

» (fermes éoliennes, fermes photovoltaïques, centrales nucléaires...) ou des moyens pour son stockage (batteries) se profile à un horizon de dix à vingt ans et demande de se préparer au recyclage en masse de leurs composants. Ils sont source d'énormes quantités de métaux, de plastiques et de béton, mais ils renferment surtout des métaux d'importance stratégique dont certains deviennent critiques, au fur et à mesure que les quantités disponibles diminuent au regard des besoins immédiats ou plus lointains de notre société. Disposer de métaux stratégiques/critiques assure l'indépendance industrielle d'un pays, c'est pourquoi il ne faut pas les perdre.

Par exemple, les terres rares sont utilisées dans tous les objets technologiques dont on ne saurait se passer. Les quantités sont extrêmement variables, allant de quelques milligrammes à la tonne par objet. Il faut 180 kg de terres rares par mégawatt pour une éolienne, 1,2 à 3,5 kg pour les batteries d'une voiture hybride ou électrique en fonction des technologies et 4,5 g pour un ordinateur. L'écran et le circuit électronique d'un smartphone renferment des terres rares, certes en faibles quantités, mais ils sont produits au niveau du milliard d'exemplaires chaque année.

CHIMIE ET BIOCHIMIE TRÈS SOLLICITÉES

Un autre élément stratégique est l'uranium utilisé comme combustible des réacteurs nucléaires, mais mal utilisé. En effet, les réacteurs à neutrons thermiques actuels ne permettent de tirer que 7 gigawattheures environ par tonne d'uranium. C'est 13 000 fois plus d'énergie que ce qui est tiré d'une tonne de produit pétrolier, mais ils produisent du plutonium qui se retrouve, avec l'uranium non utilisé, dans le combustible nucléaire usé déchargé périodiquement des réacteurs. En mono-recyclant ce plutonium, on obtient la même énergie en économisant 10 % d'uranium. En mono-recyclant en même temps l'uranium, on économise encore 10 %. C'est ce que fait la France. En multi-recyclant uranium et plutonium dans des réacteurs à neutrons rapides, on pourrait quasiment utiliser toute la potentialité énergétique de l'uranium et assurer une production d'électricité sur des millénaires, alors que les réserves en uranium actuel ne sont suffisantes que pour un siècle. Le déploiement des réacteurs à

LE DÉFI DU FUTUR EST DE PENSER À LA RECYCLABILITÉ DES OBJETS DÈS LEUR CONCEPTION.

LAURE BOYER / HANS LUCAS / HANS LUCAS VIA AFP



En Europe, 30 % des 60 millions de tonnes de déchets plastiques sont recyclés. Le recyclage de ce matériau fait toujours l'objet de recherches intenses.

neutrons rapides, s'il était rapidement décidé, n'aurait lieu qu'au prochain siècle, un temps nécessaire pour mettre en place ces réacteurs et le recyclage du combustible associé. Pour autant, la gestion des déchets nucléaires ultimes resterait, comme aujourd'hui, un problème majeur.

Le recyclage a demandé et demande encore des recherches. C'est dans le domaine du recyclage des plastiques et de l'extraction des métaux stratégiques qu'elles sont les plus intenses. Toutes les sciences sont sollicitées, en particulier la chimie et la biochimie. Le défi du futur est de penser à la recyclabilité des objets dès l'origine de leur conception. En conclusion, le recyclage est multiforme. Il est déjà en place pour récupérer composants et matière première des rebuts de fabrication des biens de consommation et des objets technologiques les plus répandus. Il freine l'épuisement des ressources naturelles et diminue par conséquent les nuisances qui vont avec, mais ce n'est pas une solution miracle, la demande de la société ne cessant de croître, sinon d'exploser. Il reste l'apanage des pays riches car recycler coûte de l'énergie. Il sera incontournable dans l'avenir, dicté par la raréfaction de certaines ressources spécifiques naturelles et la protection de l'environnement au sens large, émissions de CO₂ comprises. ●

EN SAVOIR PLUS

Le site de l'Académie des sciences : www.academie-sciences.fr

« **Recyclage et chimie** », conférence-débat de l'Académie des sciences coorganisée par Robert Guillaumont, 9 novembre 2021. En ligne (notamment la vidéo et les résumés des interventions).

« **Considération sur l'électronucléaire actuel et futur** », rapport de l'Académie des sciences, 14 juin 2021.