

Les limites physiques de la contribution du recyclage à l'approvisionnement en métaux

Par Jean-François LABBÉ
BRGM

Le concept d'économie circulaire, qui vise à optimiser le recyclage et l'efficacité de l'usage des ressources minérales non renouvelables, est souvent interprété à tort comme un concept d'économie fermée, autosuffisante, qui s'alimenterait en matières recyclées et n'aurait plus besoin de ressources naturelles primaires. Or, à l'échelle du monde, tant qu'il y aura croissance de la consommation d'un métal donné - ce qui est le cas de manière quasi continue pour la grande majorité des métaux depuis le début de l'ère industrielle -, il restera impossible de satisfaire la demande par le seul recyclage. Et le taux de croissance de la production minière nécessaire pour satisfaire cette demande devra mathématiquement rester au moins égal au taux de croissance de la consommation, et ce, même avec un taux de recyclage idéal de 100 %. Les enjeux du recyclage sont d'éviter le gaspillage de ressources non renouvelables et l'accumulation de déchets potentiellement gênants ou polluants. Mais le recyclage ne pourra pas éviter le recours aux ressources minières tant que les besoins continueront à croître à l'échelle de la planète.

Introduction

Un des moyens souvent présentés pour atténuer la demande primaire en matières premières minérales est d'optimiser leur recyclage à partir des biens en fin d'usage (en « fin de vie »).

Il est évidemment souhaitable, de façon à minimiser la consommation de ressources naturelles non renouvelables et le rejet dans l'environnement de déchets potentiellement nuisibles, de maximiser :

- la récupération et le recyclage des chutes et rebuts de fabrication (*new scrap*),
- la récupération des produits hors d'usage (« en fin de vie ») et le recyclage des matières qui les composent : métaux, minéraux, mais aussi plastiques et autres matières organiques (pour les métaux : *old scrap*).

De plus, les coûts financier et énergétique de l'obtention d'un métal provenant du recyclage sont généralement bien inférieurs à ceux de l'obtention du même métal à partir de ses minerais.

La collecte des rebuts de fabrication et des produits hors d'usage contenant des métaux et le recyclage des métaux qui les composent ont donc été et sont de plus en plus promus, encouragés et développés afin, d'une part, de minimiser les mises en décharge et, d'autre part, de réinjecter les métaux ainsi récupérés dans le circuit de la pro-

duction industrielle sous la forme de nouvelles matières premières dites « secondaires ».

La Figure 1 de la page suivante, reproduite du rapport de 2010 du groupe de travail *ad hoc* de la Commission européenne chargé de la définition des matières premières critiques, illustre cette réintroduction des matières dans le circuit de production.

Une interprétation au premier degré de ce schéma pourrait laisser croire que l'approvisionnement primaire servirait essentiellement à compenser les pertes se produisant aux différentes étapes du cycle (extraction minière, métallurgie, fabrication des semi-produits, fabrication des produits de consommation, usage de ces produits, collecte en fin de vie, puis procédés de récupération des métaux à partir de ces produits collectés). Cette interprétation pourrait conduire à la conclusion qu'il suffirait de faire des efforts pour minimiser les pertes en ligne et pour maximiser les taux de récupération pour réduire à une part très minime les besoins en approvisionnement primaire.

Cette idée, erronée, qu'un recyclage optimisé pourrait répondre presque totalement aux besoins en matières premières minières est souvent véhiculée par les médias et est appropriée par une partie de l'opinion.

En réalité, cette notion d'une économie tendant vers la circularité ignore tout simplement l'accroissement de la demande et la dynamique des flux.

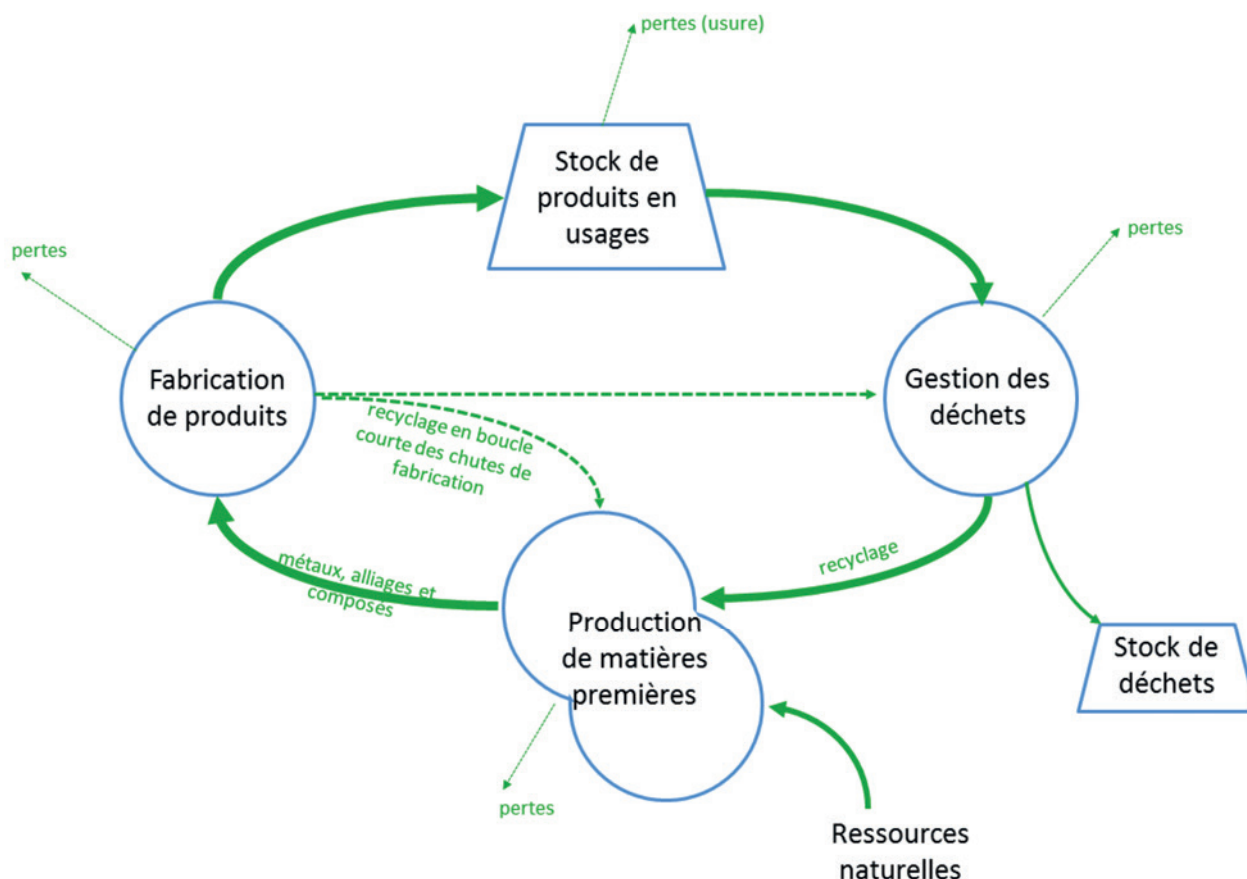


Figure 1 : Boucle de recyclage selon le rapport "Critical materials for the EU" du groupe de travail *ad hoc* de la Commission européenne, juin 2010.

En effet, comme nous l'expliquerons ci-après, dès lors qu'il y a croissance prolongée de la consommation d'un métal, le taux de croissance de la production primaire (minière) de ce métal nécessaire pour faire face à la demande doit rester au moins égal au taux de croissance de la consommation, et ce même avec un taux de recyclage de 100 %. Ce constat général avait déjà été exposé par François Grosse en 2010.

Croissance de la demande en métaux

Depuis le début de l'ère industrielle, il y a une croissance généralisée de la consommation de la grande majorité des métaux ⁽¹⁾, du moins en moyenne à moyen terme.

Ainsi, par exemple :

- la consommation de cuivre a crû en moyenne de 2,87 % par an depuis un demi-siècle, une croissance qui a même été de 3,45 % par an au cours des douze dernières années (de 2002 à 2014), et ce malgré la crise économique de ces dernières années (voir les Figures 2 et 3 de la page suivante) ;
- la consommation d'acier a augmenté de 3,62 % par an en moyenne depuis 1900, et même de 5,3 % par an depuis douze ans (de 2002 à 2014). Dans le détail, ces croissances ont connu des irrégularités importantes aussi bien dans le temps (elles ont été nettement plus faibles dans la période 1974-2002, voir les Figures 4 et 5 de la page 48) que dans l'espace (forte croissance

dans les pays émergents qui s'urbanisent et s'équipent en infrastructures, accalmie dans les pays matures déjà largement urbanisés et équipés) ;

- la consommation de lithium a augmenté de 7,5 % par an entre 2003 et 2013, et la plupart des analystes prévoient une poursuite de cette croissance à un niveau du même ordre pour de nombreuses années, tirée qu'elle est, en particulier, par la demande croissante de batteries au lithium ;
- pour des métaux « nouveaux » comme l'indium, la croissance a été de 8 % par an en moyenne depuis 25 ans.

Notons que les taux de croissance cités ci-dessus aboutissent à des doubléments de la consommation au bout des périodes indiquées dans le Tableau 1 de la page 49.

La durée de vie des métaux dans les produits

On ne peut insérer dans le circuit de recyclage que du métal ayant été extrait à un moment antérieur donné. Les temps de séjour d'un métal dans les produits et les infrastructures en cours d'utilisation (la « technosphère ») sont extrêmement variables selon les métaux et selon les usages.

(1) Il peut y avoir des baisses de production sur une à quelques années lors de périodes de crise, mais, globalement, sur le moyen terme, la consommation est nettement croissante pour la quasi-totalité des métaux, qu'ils soient majeurs ou mineurs.

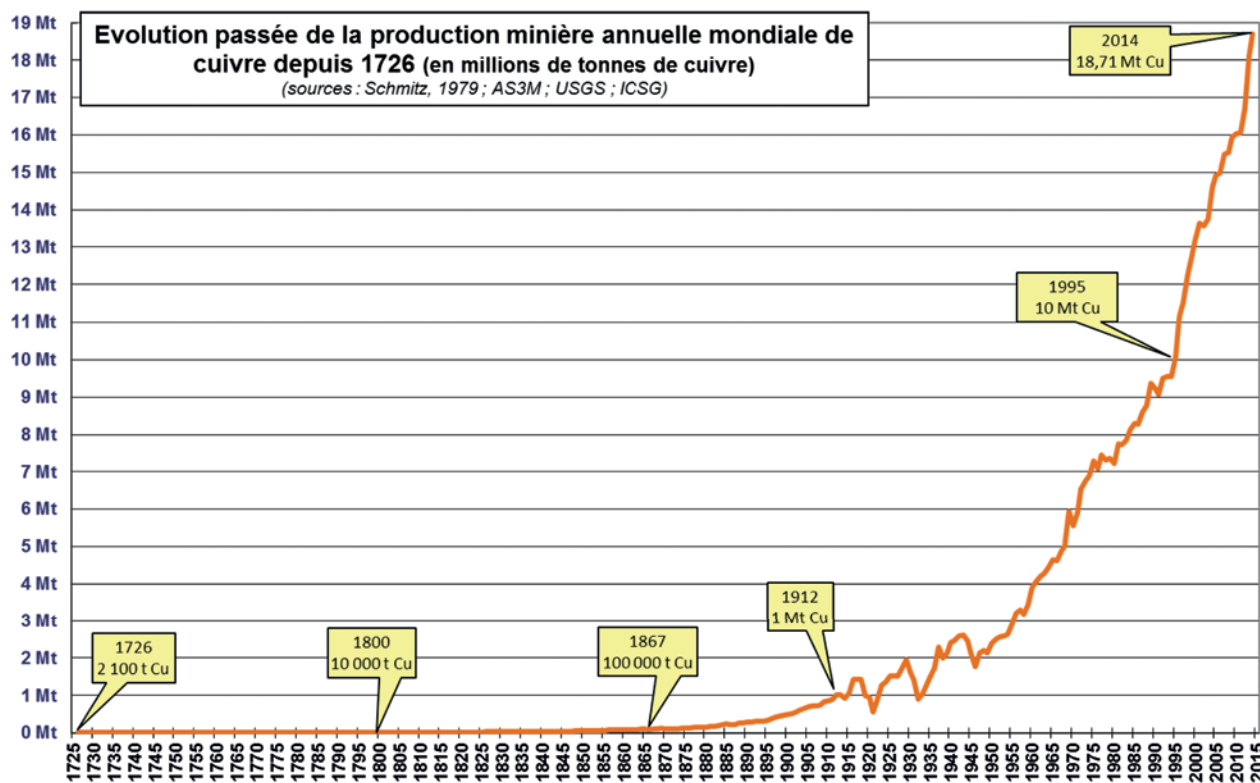


Figure 2 : Évolution historique de la production minière annuelle mondiale de cuivre.

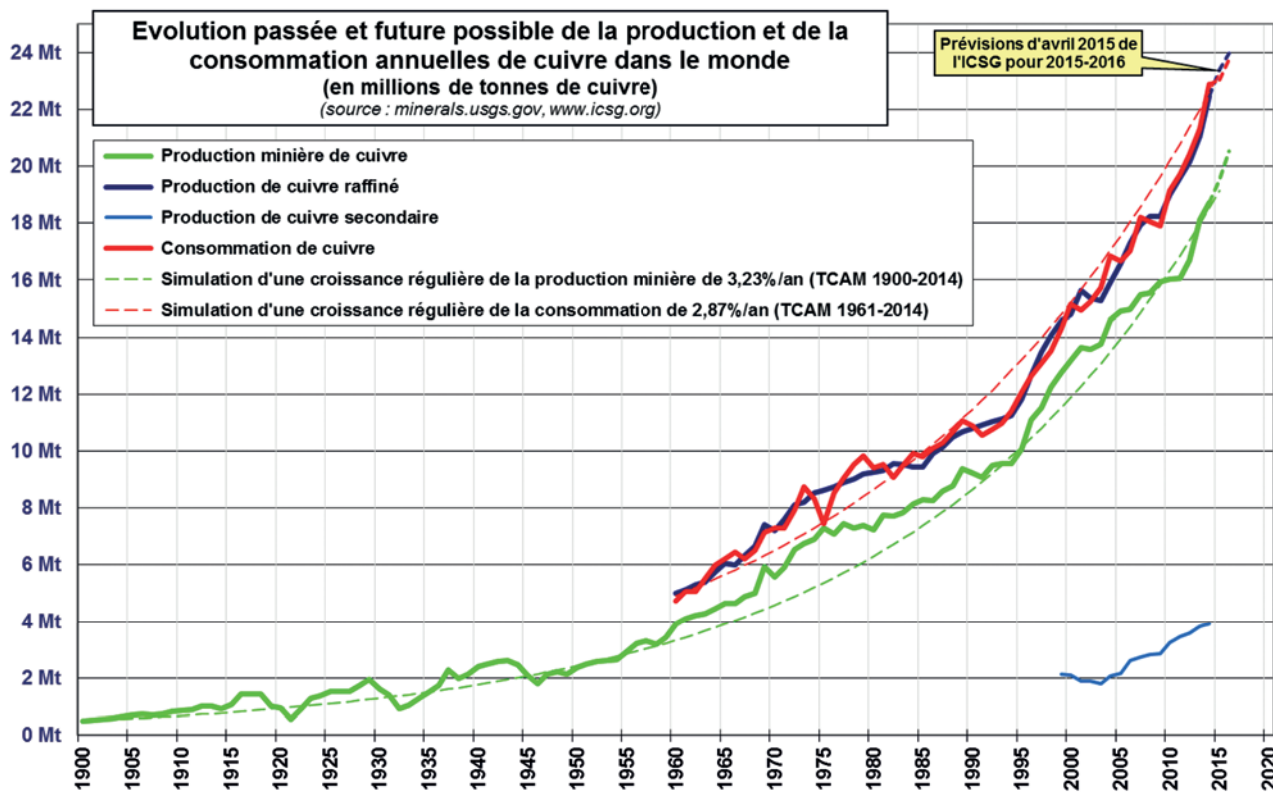


Figure 3 : Évolution des productions et consommations annuelles de cuivre dans le monde (production minière, cuivre raffiné, cuivre secondaire) et perspectives d'évolution à court terme.

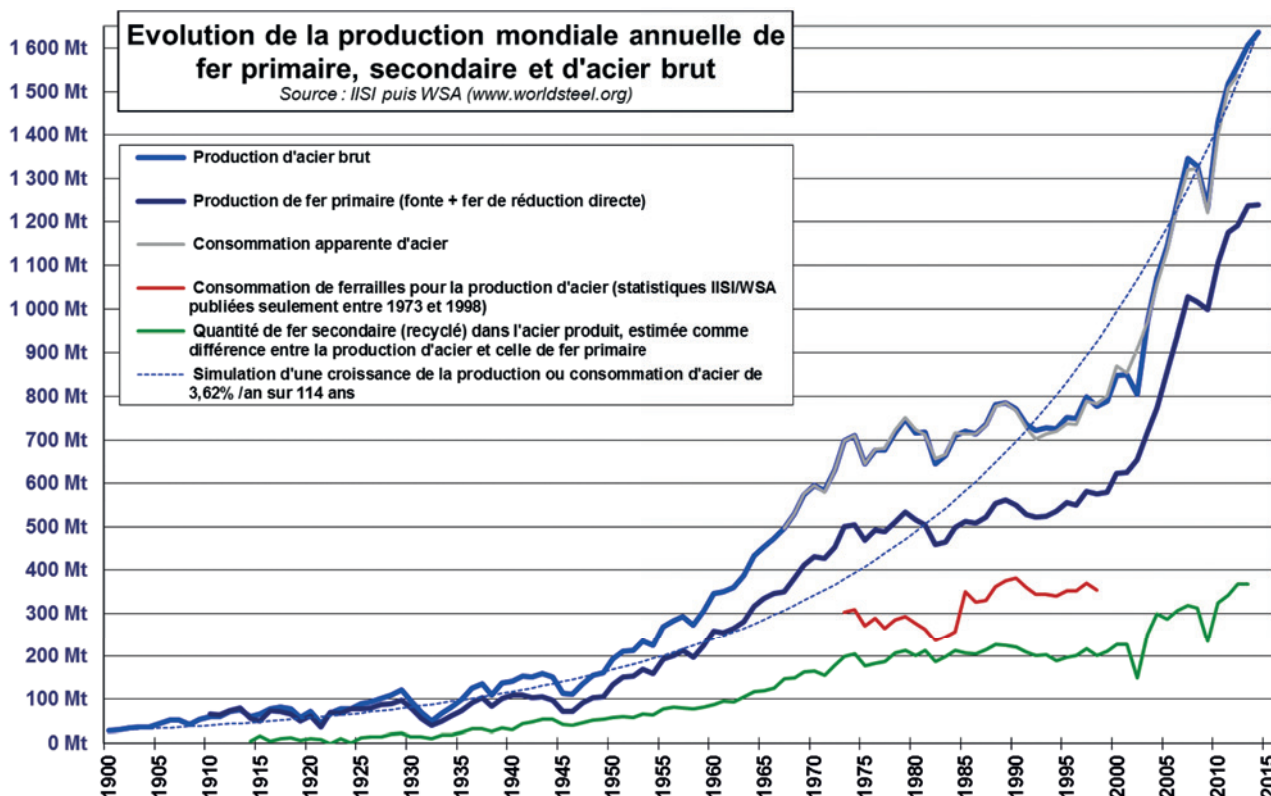


Figure 4 : Évolution des productions et des consommations mondiales annuelles de fer et d'acier.

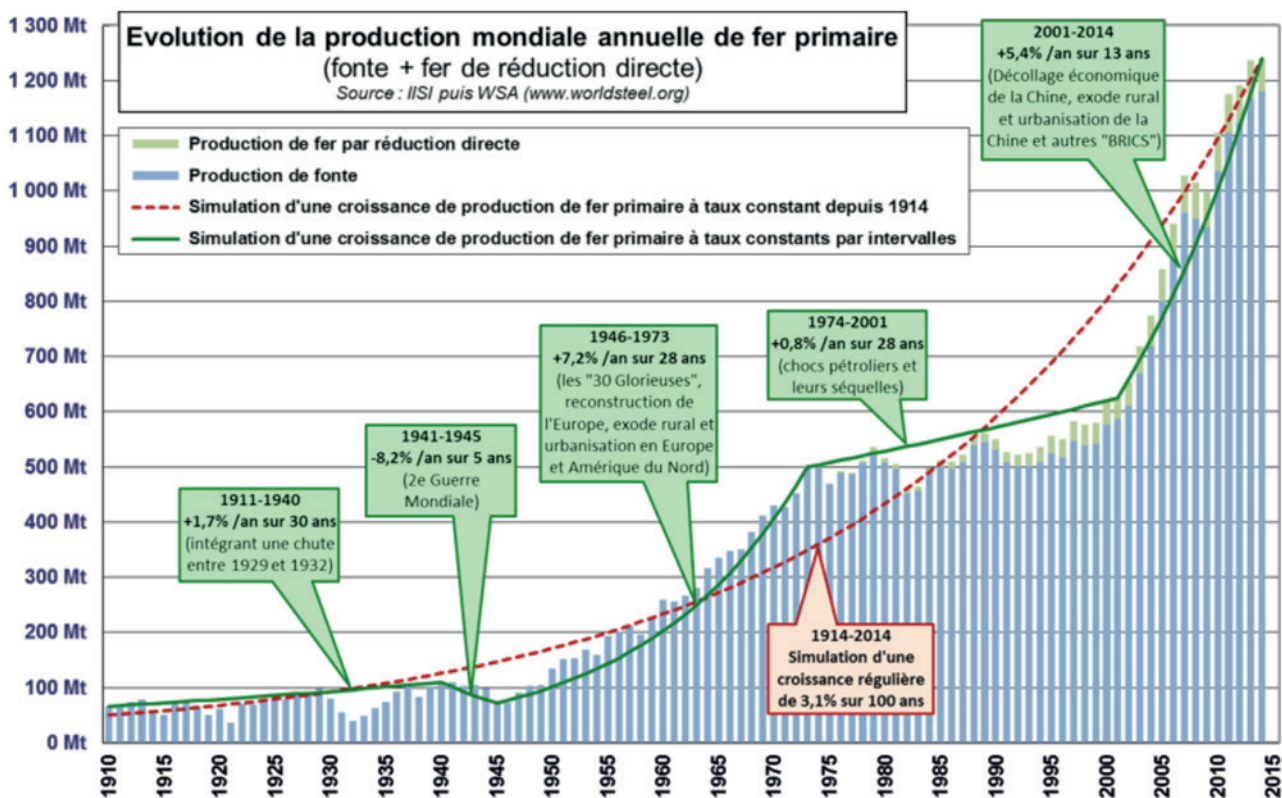


Figure 5 : Évolution de la production mondiale de fonte et de fer par réduction directe (correspondant en première approche à la production de fer primaire, c'est-à-dire issu des minerais de fer).

Taux de croissance annuel	Temps de doublement correspondant
1.00%	69.7 ans
2.00%	35.0 ans
2.85%	24.7 ans
3.00%	23.4 ans
4.00%	17.7 ans
5.00%	14.2 ans
7.00%	10.2 ans
9.00%	8.0 ans
15.00%	5.0 ans

Tableau 1 : Équivalence de quelques taux de croissance annuels et de temps de doublement de la consommation de métaux.

Ainsi, l'acier, l'aluminium, le cuivre et le zinc utilisés dans le bâtiment, de même que les métaux présents dans des infrastructures publiques ou collectives (rails, lignes à haute tension, lignes à moyenne tension, installations portuaires et aéroportuaires, bâtiments publics, glissières de sécurité, câbles de fibre optique, etc.) sont immobilisés pendant plusieurs dizaines d'années. Les métaux des véhicules sont immobilisés pendant 10 à 12 ans (en moyenne) avant de pouvoir alimenter le circuit du recyclage. Le plomb et l'antimoine des batteries au plomb sont immobilisés pour 5 à 10 ans. Les composants des panneaux solaires devraient être immobilisés pour 25 ans. Les métaux rares des écrans plats (indium, etc.) devraient être immobilisés une dizaine d'années au moins pour les téléviseurs et moniteurs, même si cette immobilisation est moindre pour les écrans des smartphones et autres appareils portables qui sont renouvelés plus fréquemment (en moyenne tous les 3 ans) en raison des évolutions technologiques et des effets de mode ⁽²⁾.

À l'inverse, le fer étamé des boîtes de conserve et l'aluminium des cannettes de boisson peuvent avoir un temps d'immobilisation allant de quelques semaines à quelques mois ⁽³⁾.

Pour un métal donné, comme le cuivre, le temps de résidence peut être très variable en fonction des usages. Graedel et al. (2010) ont publié les durées estimatives restituées dans le Tableau 2 ci-dessous.

Catégorie	Usages	Part d'utilisati	Durée d'immobilisatio
Construction, bâtiments	Fils électriques, "plomberie"	50%	25 - 40 ans
Infrastructures	Câbles électriques pour production et transport d'énergie et télécommunications	22%	50 ans
Transport	Équipement automobile, ferroviaires, constructions navale et aéronautique	5%	10 - 30 ans
Équipements grand public	Électroménager, appareils électriques et électroniques, éclairage	5%	10 ans
Équipements secteur tertiaire	Électronique et informatique, éclairage	10%	20 ans
Équipements industriels	Machines, éclairage	8%	20 ans
Produits chimiques		<1%	1 an
Total		100%	
Moyenne pondérée			35 ans

Tableau 2 : Temps indicatifs de résidence et d'immobilisation du cuivre selon ses usages (GRAEDEL et al., 2010).

En France, les pouvoirs publics constatent qu'il y a une insuffisance de logements, ils voudraient promouvoir la construction de plusieurs centaines de milliers de nouveaux logements par an. Or, construire des logements requiert impérativement de disposer de matériaux, mais aussi de divers métaux ou de leurs composés (armatures en fer à béton ou, pour les plus grands immeubles, ossatures en poutres d'acier ; câblage électrique et tuyauterie en cuivre ; robinetterie chromée ; gouttières en zinc ; serrurerie en acier ou en laiton ; radiateurs en fonte ou en d'autres métaux (selon les types) ; menuiseries parfois en aluminium ; ignifugation des gaines recourant à l'antimoine ; peintures au dioxyde de titane ; tungstène et terres rares pour l'éclairage... On comprend bien que si l'on voulait construire ces nouveaux logements uniquement avec des matériaux et des métaux issus du recyclage, il faudrait avoir démolé au moins autant de logements construits précédemment pour en récupérer les matériaux. Et même davantage, si l'on tient compte de l'augmentation des niveaux d'équipement, en particulier ceux imposés par l'évolution des normes.

Ainsi, même en France, il faut continuer à ajouter de nouveaux métaux et matériaux à ceux qui nous équipent déjà : dans la distribution électrique, on ne détruit pas une ligne haute tension pour en récupérer les câbles et les pylônes à chaque fois que l'on a besoin de construire une nouvelle ligne ! Les éoliennes en cours d'installation ne sont pas toutes construites avec les éléments recyclés d'un nombre équivalent d'anciennes éoliennes démantelées... Il en va de même pour les câbles électriques destinés à relier ces éoliennes au réseau. Il faut donc bien de nouveaux matériaux, de nouvelles matières premières.

Dans quelles limites le recyclage peut-il satisfaire nos besoins en métaux ?

Dans le cadre du projet Polinaires du 7^{ème} programme-cadre de recherche et développement de la Commission européenne, L.A. Tercero Espinoza (2012) écrivait : « *Comme la demande en la plupart des métaux s'accroît fermement d'année en année, même la récupération complète de la totalité d'un métal quittant la phase d'utilisation ne conduirait pas à la satisfaction de la nouvelle demande* [Ce point est illustré dans la Figure 6 de la page suivante]. *Ainsi, la contribution relative du matériau recyclé dépend du laps de temps entre la production primaire et le recyclage d'un métal donné. [...].* »

(2) L'obsolescence rapide, voire intentionnelle et programmée, de certains appareils mobiles n'est pas un gage de développement « soutenable », même si elle peut alimenter plus rapidement le circuit du recyclage. Il est plus durable de pouvoir garder le même téléphone mobile pendant 10 ans que de recycler 5 fois des téléphones d'une durée de vie limitée à 2 ans.

(3) À l'inverse, d'autres usages immobilisent les métaux pendant plus d'un siècle, voire bien davantage. Les 7 300 tonnes de fer de la Tour Eiffel sont immobilisés depuis 126 ans ; le plomb de jointure et de scellement des vitraux des cathédrales gothiques depuis 650 ans ; sans parler de l'or du masque de Toutankhamon... même s'il s'agit là de quantités minimes au regard des productions et des consommations actuelles.

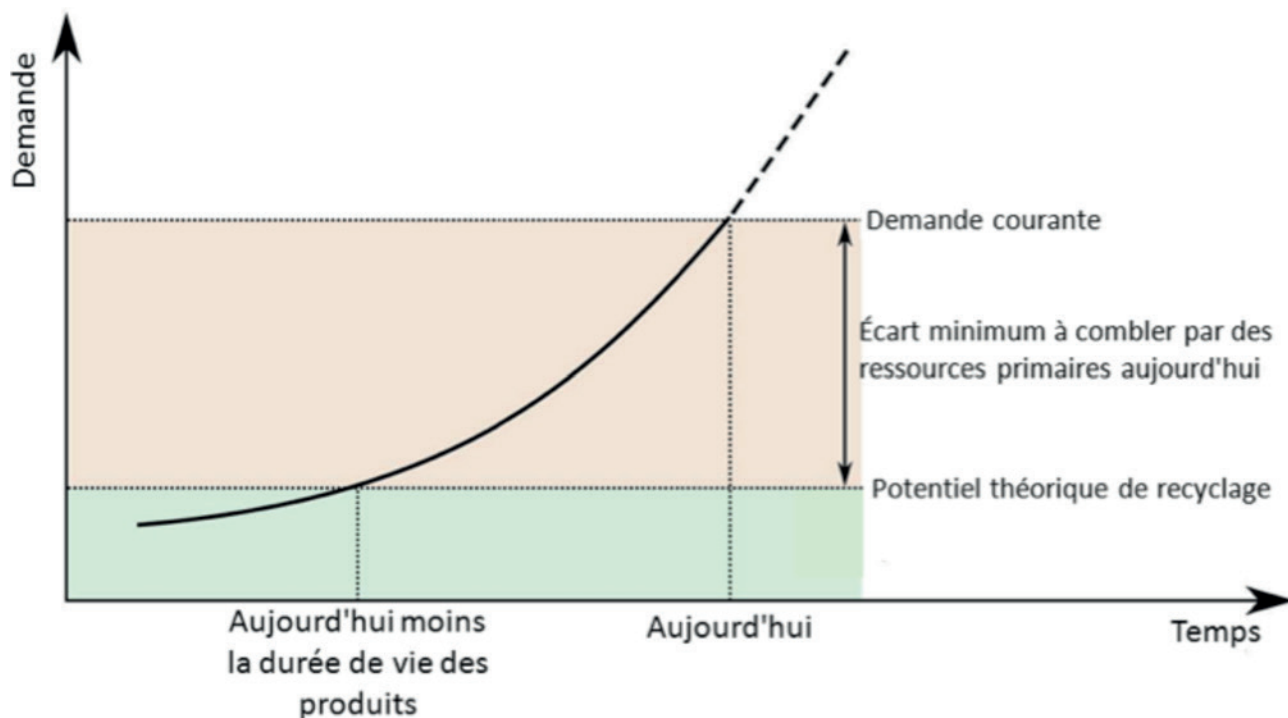


Figure 6 : Diagramme justifiant le besoin de matières premières minérales primaires même dans un scénario de recyclage à 100 % des produits en fin de vie (traduit de Tercero Espinoza, Fraunhofer ISI, mars 2012).

Tercero Espinoza ajoute : « Il est également important de noter que de la matière quitte constamment le cycle » (usure, pertes) et que « bien qu'il ne soit pas possible d'éviter que du métal quitte le cycle de manière irréversible, il est souhaitable d'explorer et d'exploiter toute mesure raisonnable susceptible de différer ces départs ». Il notait aussi qu'une contribution à la satisfaction de ce souhait serait de produire des articles ayant une plus longue durée de vie.

On comprend aussi qu'en cas de croissance continue de la demande, avec un taux de croissance moyen de la consommation sur le long terme de X % par an et un recyclage intégral de ce qui aura été consommé après un laps de temps préalablement déterminé progressant lui aussi de X % par an, le complément minier nécessaire devra lui aussi croître de X % par an, puisqu'il correspondra à la différence entre deux quantités croissant à un même rythme de X % par an.

C'est une réalité incontournable : en cas de croissance continue de la demande, le recyclage intégral des quantités consommées au cours d'un laps de temps fixé auparavant ne change rien au taux de croissance de la production minière nécessaire à la satisfaction de la demande.

Si la demande en un métal donné croît de 3 % par an sur la durée, l'offre minière devra elle aussi croître de 3 % par an pour la satisfaire, et ce, quel que soit le taux de recyclage, et même s'il était possible d'atteindre le taux maximum de 100 %. Le raisonnement est identique pour tout autre taux de croissance positif et pour toute durée moyenne d'immobilisation.

Le raisonnement peut se généraliser comme suit :

Soit un métal dont la consommation connaît un taux de croissance « R » régulier et positif, dont la durée moyenne de séjour dans son usage est « d » (nombre d'années) et dont le taux de recyclage est « K »⁽⁴⁾. La production minière (primaire) « PP_a » d'une année « a » nécessaire à satisfaire la demande « C_a » de cette même année « a » sera égale (abstraction faite du jeu des variations de stocks négligé ici) à :

$$PP_a = C_a - PS_a = C_a - K \times C_{a-d} = C_a - K \times C_a / (1 + R)^d = C_a \times (1 - K/(1+R)^d)$$

Où PS_a est la production secondaire de l'année « a », égale à K fois la consommation de l'année « a-d », K étant le pourcentage de recyclage effectif combiné du métal considéré.

Les taux de couverture de la consommation C_a par la production secondaire PS_a et la production primaire PP_a s'écrivent ainsi :

$$PS_a/C_a = K/(1+R)^d$$

$$PP_a/C_a = 1 - K/(1+R)^d$$

On voit donc que pour un taux de croissance fixe positif donné de la consommation, une durée de vie fixe donnée

(4) Conformément à la définition retenue par l'UNEP (2010), le taux de recyclage correspond au ratio de la quantité de produits effectivement recyclés sur la quantité de ces produits en fin de vie. Il combine le taux de collecte (part des produits en fin de vie effectivement collectés pour être mis dans le circuit de recyclage) et le taux de récupération de la substance donnée (ratio de la quantité de substance effectivement récupérée par rapport à la quantité présente dans les produits en fin de vie collectés et insérés dans le circuit du recyclage).

et un pourcentage de recyclage réel donné, la production minière nécessaire afin de satisfaire la demande reste toujours dans la même proportion que la demande et qu'elle devra donc évoluer dans le temps avec exactement le même taux de croissance.

Le recyclage, même optimal, ne change en rien le taux de croissance de la production minière nécessaire pour satisfaire une demande croissante d'un métal donné, tout du moins à l'échelle mondiale ⁽⁵⁾. Le taux de croissance annuel de la production minière nécessaire restera en moyenne égal au taux de croissance annuel de la demande, dès lors que ce taux de croissance reste positif dans la durée ⁽⁶⁾.

On déduit des équations ci-dessus que le pourcentage de la demande en un métal donné à satisfaire par la production minière sera d'autant plus élevé que le pourcentage de récupération sera faible, que la durée de séjour dans les usages sera longue et que le taux de croissance de la consommation sera élevé.

Le Tableau 3 ci-dessous illustre le pourcentage maximal possible de satisfaction de la demande par la production secondaire selon diverses durées d'immobilisation et divers taux de croissance annuelle pour quelques exemples de taux de recyclage ⁽⁷⁾.

Dans le cas du cuivre, en prenant une croissance annuelle de la consommation de 2,87 % (moyenne observée depuis 53 ans, voir la Figure 3 de la page 47), une durée moyenne de séjour dans ses usages de 35 ans (voir le Tableau 2 de la page 49) et un taux de récupération en

fin de vie variant de 43 % (GRAEDEL et al., 2011, citant GOONAN, 2010) à 53 % (GRAEDEL et al., 2004), le cuivre secondaire issu du recyclage « en fin de vie » ne pourra couvrir au mieux que 16,0 à 19,7 % de la demande.

Actuellement, ce taux de couverture de la consommation par le cuivre secondaire en fin de vie (*old scrap*) est de 15 à 17 % (voir la Figure 3 de la page 47).

Même si l'on parvenait, avec tous les efforts nécessaires, à un taux de récupération en fin de vie de 80 %, et en retenant les mêmes hypothèses de durée de séjour (35 ans) et de croissance annuelle (2,87 % par an), le cuivre secondaire issu du recyclage ne pourra jamais satisfaire davantage que 30 % de la demande.

Le schéma de la Figure 1 de la page 46 doit donc être adapté (voir la Figure 7 de la page suivante) pour visualiser les effets dynamiques liés au taux de croissance de la consommation.

Quantités absolues et taux de croissance

Nous avons vu que le taux de croissance de la production primaire nécessaire à la satisfaction d'une croissance de la demande à un taux positif durable devait être égal à ce taux quel que soit le taux de recyclage en fin de vie. Pourtant, l'approvisionnement en métal recyclé une année donnée diminue d'autant la production primaire nécessaire pour satisfaire la demande de l'année considérée.

En fait, avec le recyclage, il y a simplement un différé dans le temps d'un même besoin de production primaire pour satisfaire la même demande par rapport à ce qu'elle aurait

Taux maximaux possibles de couverture de la consommation par la production secondaire selon divers taux de recyclage en fin de vie "K"

K = 100%		Durée moyenne de séjour du métal dans ses usages (d)					
		1 an	3 ans	5 ans	10 ans	25 ans	50 ans
Taux de croissance annuel de la consommation (R)	0%	100%	100%	100%	100%	100%	100%
	1%	99.0%	97.1%	95.1%	90.5%	78.0%	60.8%
	2%	98.0%	94.2%	90.6%	82.0%	61.0%	37.2%
	3%	97.1%	91.5%	86.3%	74.4%	47.8%	22.8%
	4%	96.2%	88.9%	82.2%	67.6%	37.5%	14.1%
	5%	95.2%	86.4%	78.4%	61.4%	29.5%	8.7%
	10%	90.9%	75.1%	62.1%	38.6%	9.2%	0.9%

K = 60%		Durée moyenne de séjour du métal dans ses usages (d)					
		1 an	3 ans	5 ans	10 ans	25 ans	50 ans
Taux de croissance annuel de la consommation (R)	0%	60.0%	60.0%	60.0%	60.0%	60.0%	60.0%
	1%	59.4%	58.2%	57.1%	54.3%	46.8%	36.5%
	2%	58.8%	56.5%	54.3%	49.2%	36.6%	22.3%
	3%	58.3%	54.9%	51.8%	44.6%	28.7%	13.7%
	4%	57.7%	53.3%	49.3%	40.5%	22.5%	8.4%
	5%	57.1%	51.8%	47.0%	36.8%	17.7%	5.2%
	10%	54.5%	45.1%	37.3%	23.1%	5.5%	0.5%

K = 20%		Durée moyenne de séjour du métal dans ses usages (d)					
		1 an	3 ans	5 ans	10 ans	25 ans	50 ans
Taux de croissance annuel de la consommation (R)	0%	20.0%	20.0%	20.0%	20.0%	20.0%	20.0%
	1%	19.8%	19.4%	19.0%	18.1%	15.6%	12.2%
	2%	19.6%	18.8%	18.1%	16.4%	12.2%	7.4%
	3%	19.4%	18.3%	17.3%	14.9%	9.6%	4.6%
	4%	19.2%	17.8%	16.4%	13.5%	7.5%	2.8%
	5%	19.0%	17.3%	15.7%	12.3%	5.9%	1.7%
	10%	18.2%	15.0%	12.4%	7.7%	1.8%	0.2%

Tableau 3 : Pourcentages maximaux possibles de contribution de la production secondaire pour satisfaire la demande selon quelques exemples de taux de croissance, de durée de vie des produits contenant des métaux stratégiques et de taux de recyclage K.

(5) À l'échelle plus locale de pays ou d'ensembles géographico-économiques, l'analyse est plus complexe : les pays émergents consomment beaucoup de matières premières pour leur urbanisation, leurs infrastructures et la montée en puissance de leur consommation de biens matériels (voitures, électroménager, etc.), mais il s'agit de consommations nouvelles qui n'alimentent pas encore, ou que très peu, le marché du recyclage. En revanche, dans les pays à économie mature et à industrialisation plus ancienne, les équipements en fin de vie sont plus abondants, alors que la consommation s'est ralentie ou stabilisée du fait d'un quasi achèvement de l'exode rural, de l'urbanisation, de la construction des infrastructures majeures et d'un équipement des ménages se focalisant davantage sur le renouvellement. Mais il convient alors d'analyser le problème en profondeur pour bien distinguer ce qui relèverait, dans ces pays à économie mature, d'une réelle stabilisation ou d'une baisse effective de la consommation d'une substance donnée dans les produits finis consommés, de ce qui relèverait de la simple délocalisation industrielle, les métaux continuant à être consommés, mais seulement intégrés dans des produits finis fabriqués ailleurs dans le monde.

(6) Le taux de croissance de la production minière nécessaire pourra éventuellement diminuer transitoirement :

- si l'on augmente de manière significative d'une année sur l'autre le taux de recyclage effectif, mais cela ne sera que transitoire puisque l'on ne pourra pas dépasser un taux de recyclage de 100 % et qu'une fois ce taux atteint, l'équation mentionnée restera vraie ;
- si l'on se met soudainement à recycler du matériel plus ancien qui ne l'était pas jusqu'alors. Mais cela signifiera seulement qu'il n'avait pas été recyclé les années précédentes, cela ne jouera donc pas sur le moyen terme.

(7) Selon la formule : PS/C (ratio production secondaire sur consommation) = $K/(1 + R)^d$.

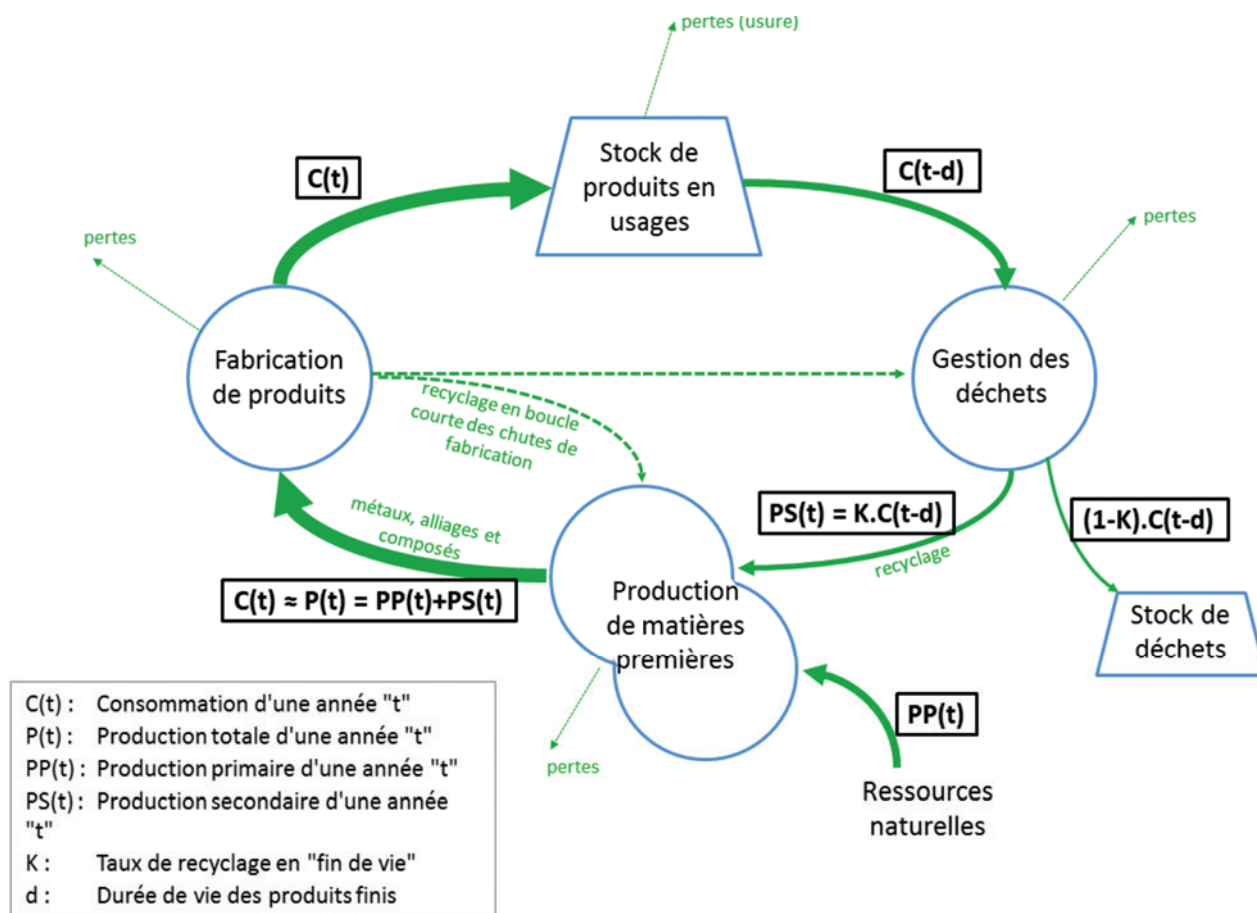


Figure 7 : Schéma simplifié de l'économie circulaire introduisant les notions de stock de produits en usage, de différentiel de temps et de flux entre la consommation et la remise en circuit des produits en fin de vie. Les boucles courtes (chutes de fabrication, ici en pointillés gras) et les diverses pertes (pointillés maigres) sont ici négligées ⁽⁸⁾.

été sans recyclage (voir le Tableau 4 et la Figure 8 de la page suivante) (voir aussi GROSSE, 2010 ⁽⁹⁾).

L'exemple de la Figure 8 se lit ainsi : pour une consommation de 100 en l'an 2000 et une croissance de 3 % par an, cette consommation atteindra 400 en 2047. Sans recyclage, la production primaire devrait donc être de 400 en 2047. Avec un recyclage de 80 % de ce qui aura été consommé 10 ans auparavant, la production primaire nécessaire pour satisfaire la demande en complément des quantités recyclées ne sera que de 162 en 2047, mais elle atteindra 400 en 2078, soit 31 ans plus tard. Ainsi, il y aura toujours un besoin des mêmes quantités primaires croissantes, mais 31 ans plus tard que cela aurait été le cas sans recyclage.

Ainsi, l'optimisation du recyclage, si elle est évidemment nécessaire, n'est en rien un gage de soutenabilité de la croissance. Elle recule juste l'échéance d'un nombre limité d'années.

L'exemple du cuivre

Les Figures 2 et 3 de la page 47 illustrent les évolutions historiques des productions et consommations de cuivre des origines à 2014.

Si l'on extrapole la production minière qui serait nécessaire pour satisfaire la demande avec un taux de croissance de

2,85 % (taux de croissance moyen réel de la consommation de cuivre de 1960 à 2012), on voit qu'il faudra extraire dans les 25 prochaines années (2015 à 2039 inclus) autant de cuivre qu'il en a été extrait depuis la nuit des temps jusqu'à 2014 (voir la Figure 9 de la page 54). Et il faudra en extraire autant au cours des 15 années suivantes.

Cela étant, ce doublement en 25 ans du cumul de la production primaire mondiale (c'est-à-dire le besoin d'extraire dans les 25 prochaines années autant de cuivre qu'il en a été extrait jusqu'à présent) ne doit pas étonner : c'est ce qui se passe depuis toujours. Le monde a extrait 327 Mt de cuivre entre 1991 et 2014 (en 24 ans), alors qu'il en avait extrait 314 Mt des origines à 1990. Et ainsi de suite ⁽¹⁰⁾.

(8) Le recyclage en boucle courte peut être intégré au processus de fabrication des produits finis utiles (voir TERCERO ESPINOZA, 2012).

(9) François Grosse présente une analyse comparable et en conclut que l'augmentation du taux de recyclage permet de différer l'échéance de la déplétion d'une ressource finie. Ce qui est vrai, mais cet « éloignement dans le temps » ne sera qu'un décalage se limitant à quelques années seulement.

(10) C'est une des propriétés intrinsèques des fonctions exponentielles : leurs primitives (qui permettent de calculer leurs intégrales, leur cumul) croissent exactement du même taux que les fonctions elles-mêmes.

Hypothèse de croissance annuelle de la consommation d'un métal donné	2.8%	3%	4%	5%	10%
Hypothèse d'un recyclage à 100% des quantités consommées 10 ans auparavant					
Taux de couverture de la consommation par le recyclage	75.9%	74.4%	67.6%	61.4%	38.6%
Différé dans le temps d'une même demande primaire absolue entre une contribution du recyclage de 100% des quantités consommées 10 ans auparavant et pas de recyclage.	52 ans	46 ans	29 ans	20 ans	5 ans
Hypothèse d'un recyclage à 80% des quantités consommées 10 ans auparavant					
Taux de couverture de la consommation par le recyclage	60.7%	59.5%	54.0%	49.1%	30.8%
Différé dans le temps d'une même demande primaire absolue entre une contribution du recyclage de 80% des quantités consommées 10 ans auparavant et pas de recyclage.	34 ans	31 ans	20 ans	14 ans	4 ans

Tableau 4 : Différé dans le temps d'une même quantité absolue de production minière nécessaire pour satisfaire une demande croissante avec des taux de recyclage de 100 % et de 80 %, par rapport à l'année où cette production minière aurait dû atteindre cette même quantité absolue en l'absence de recyclage.

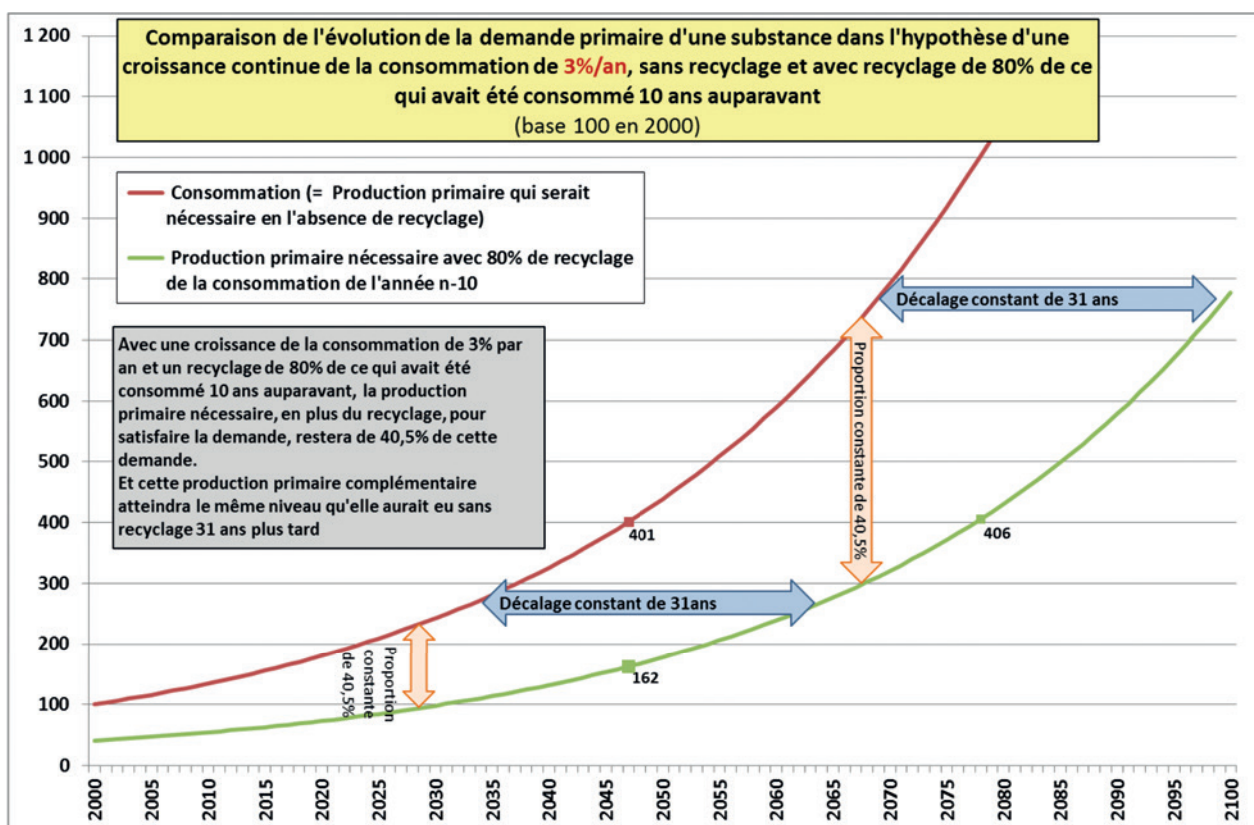


Figure 8 : Exemple de décalage dans le temps d'un même niveau de production minière nécessaire pour satisfaire une consommation croissante, avec et sans contribution du recyclage.

Ainsi, lorsque, dans le Tableau 1 de la page 49, on constate qu'une croissance régulière d'une production de 2,85 % par an conduit à son doublement tous les 24,7 ans : cela implique que le cumul total de la production depuis les origines doublera lui aussi tous les 24,7 ans. C'est-à-dire que pour toute période de 24,7 ans, on aura dû produire autant que depuis les origines jusqu'au début de la période considérée.

La minimisation des stocks de déchets par le recyclage

L'accumulation du stock de produits en usage obéit à cette même loi. À la fin de leur vie, les produits devenus hors d'usage quittent le stock en usage pour fournir un flux de déchets équivalent au flux de produits de l'année (t-d). Le stock grossit en fonction du taux de croissance

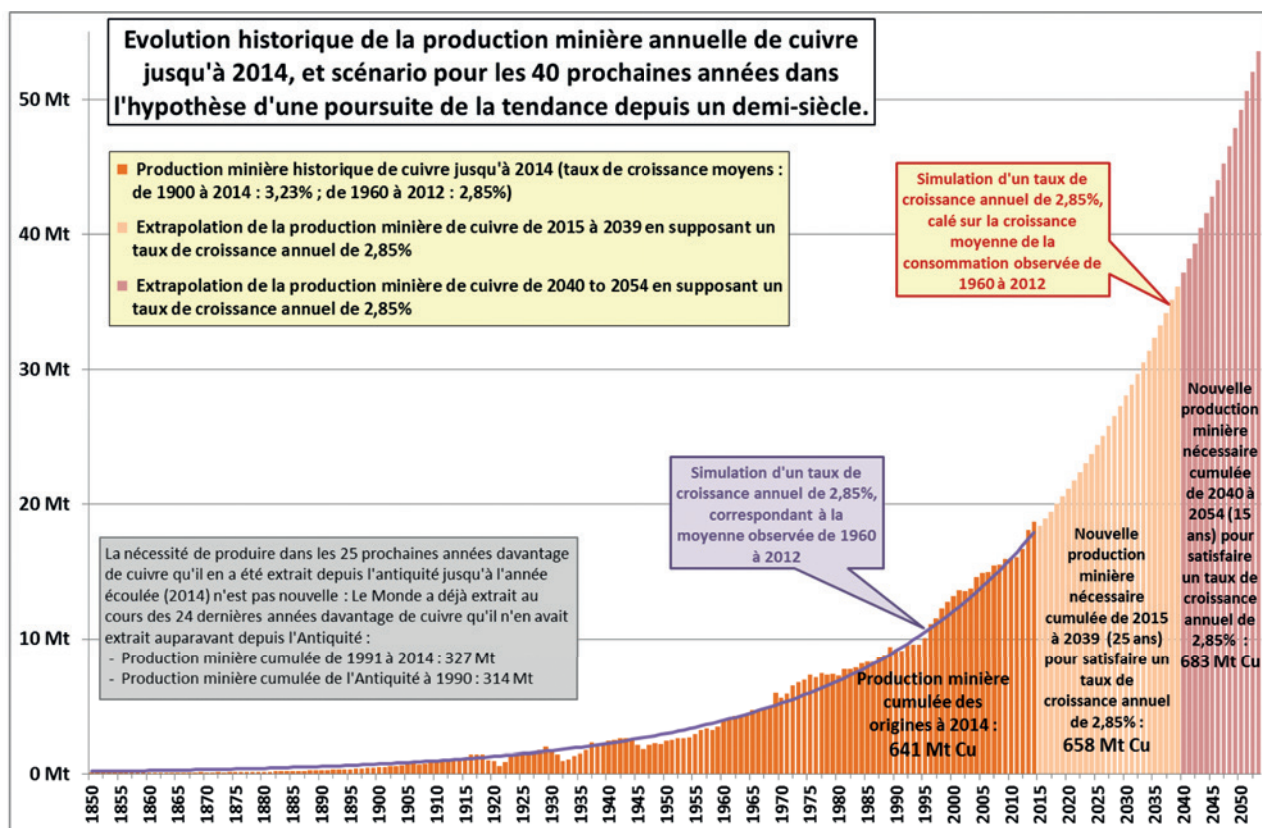


Figure 9 : Extrapolation des besoins de production primaire de cuivre dans les 40 prochaines années dans l'hypothèse d'une poursuite de la croissance de la consommation au taux annuel constaté depuis des décennies, soit 2,85%.

de la consommation, il en va de même du flux de déchets. Sans recyclage, l'ensemble de la production finirait, après la durée de vie « d » des produits, sous la forme de déchets qui s'accumuleraient dans l'environnement. Le stock des déchets générés correspond, avec un retard de « d », à la totalité de la production primaire. Le recyclage permet, en plus de sa contribution à l'approvisionnement en métaux, d'absorber tout ou partie de ce flux de déchets et donc d'éviter son accumulation dans l'environnement.

La demande va-t-elle effectivement continuer à croître ?

La Figure 9 ci-dessus interpelle. Extraire autant de cuivre dans les 25 prochaines années qu'il en a été extrait depuis l'origine, cela n'a rien d'anodin. Non que les ressources physiques n'existeraient pas, mais elles seront à des teneurs de plus en plus faibles, à des profondeurs de plus en plus grandes, entraînant donc des coûts énergétiques d'exploitation et de traitement de plus en plus élevés (sans compter des conflits croissants autour de l'usage des surfaces nécessaires et les oppositions sociétales croissantes à l'extraction minière).

Or, selon toute probabilité, la demande de la plupart des matières premières minérales, notamment des métaux, continuera à croître, tirée par les divers facteurs suivants :

- a) la croissance démographique (avec toujours plus de besoins à satisfaire), l'exode rural et l'urbanisation (des besoins accrus en logements en dur, en infrastructures urbaines, en

électricité et en énergie, ainsi qu'en logistique alimentaire (pour acheminer la nourriture des campagnes vers les villes : transports, chaîne du froid, conserverie), etc. Rappelons qu'en France, 85,8 % de la population est urbanisée, alors qu'en Chine le taux d'urbanisation n'était encore que de 53,7 % en 2013 (CIA Factbook). Cela laisse augurer d'une poursuite du boom du développement et de la croissance des villes chinoises, qui aujourd'hui tire la consommation de nombreuses matières premières minérales. Et cette tendance à l'urbanisation ne se limite pas à la Chine ⁽¹¹⁾.

- b) l'aspiration d'une part croissante de la population mondiale à une société de consommation, à l'acquisition de biens personnels (voiture, électroménager, équipements de communication et de loisir, etc.). Cela concerne une part toujours plus grande de la population chinoise (déjà le plus grand marché automobile de la planète), mais aussi de celles de bien d'autres pays : ainsi, en Afrique, désormais, une très grande proportion des habitants possède un téléphone portable, voire plusieurs.

¹¹⁾ Même en France métropolitaine, la projection probabiliste médiane de la population est de 71,1 millions d'habitants en 2050, selon l'ONU (2015), soit 7 millions d'habitants supplémentaires d'ici là (soit une augmentation d'un ordre de grandeur correspondant à une fois l'agglomération parisienne comprenant Paris et sa petite couronne). Pour loger et doter cette population supplémentaire des infrastructures et équipements collectifs nécessaires, il faudra construire l'équivalent d'une nouvelle agglomération parisienne. Ne la construire qu'avec des matériaux recyclés impliquerait de démolir d'abord l'intégralité de l'agglomération parisienne existante ou d'une quantité équivalente de logements et d'infrastructures.

• c) Les évolutions technologiques : décollage relativement récent des besoins en néodyme (Nd), en praséodyme (Pr) et en dysprosium (Dy) pour les aimants permanents, et donc pour les moteurs électriques et pour les équipements électroacoustiques miniaturisés (désormais très répandus dans les équipements technologiques mobiles) ou pour certains générateurs équipant les éoliennes ; décollage des besoins en indium pour les écrans plats, des besoins en lithium avec le développement des piles et batteries au lithium observé depuis 15 ans et se poursuivant avec les perspectives de développement de voitures électriques et de celui d'alliages légers.

À l'inverse, certaines évolutions technologiques ou des restrictions réglementaires (pour des raisons sanitaires ou environnementales) peuvent conduire à une baisse des besoins et donc de la production (cela concerne le cadmium (Cd) et le mercure (Hg), et peut-être plus tard, le plomb (Pb)). Mais les métaux concernés par des baisses durables de leur demande sont une infime minorité. Même le plomb connaît toujours une demande croissante en raison du développement du marché automobile chinois.

Il est fort probable que la production ou même que la partie accessible des ressources souterraines ne permettra pas à chaque habitant de la Terre d'avoir à sa disposition autant de métaux que l'Occidental moyen d'aujourd'hui, ni a fortiori que l'Étatsunien moyen.

Le doublement tous les 25 ans de la quantité de cuivre extraite de terre (on pourra refaire des calculs similaires pour les autres métaux tant majeurs que mineurs) se heurtera forcément à une limite, si ce n'est de ressources physiques, au moins de coût financier et environnemental de l'accès à cette ressource ⁽¹²⁾.

Et, comme nous l'avons vu, le recyclage ne pourra pas résoudre durablement ce problème.

Conclusion

Tant qu'il y aura croissance de la demande d'un métal donné (croissance des métaux utilisés dans le bâtiment, par exemple, tant que le développement urbain mondial se poursuivra, mais le raisonnement vaut également pour les « petits » métaux technologiques), il sera nécessaire que la production minière suive la même croissance, et ce quel que soit le taux de recyclage de ce métal. L'approvisionnement secondaire, du fait qu'il est différé dans le temps, restera inférieur aux besoins et à la production primaire. La production minière restera donc cruciale et indispensable au niveau mondial.

Mais cela ne remet évidemment pas en cause l'impérieuse nécessité du recyclage, de sa contribution optimisée aux approvisionnements et à la minimisation de l'accumulation des déchets.

Il convient donc :

- de nous préparer à ce que la croissance matérielle globale fléchisse un jour ⁽¹³⁾, c'est inéluctable ;
- de poursuivre nos efforts d'optimisation du recyclage ;
- en attendant, d'admettre que la production minière reste indispensable et qu'il convient donc de ne pas se l'in-

terdire, pensant à tort qu'il suffirait, à la place, de recycler. Il conviendra donc de promouvoir l'activité minière (y compris en France), là où se trouvent des gisements, tout en promouvant une responsabilisation sociale et environnementale optimale de cette activité ;

- de poursuivre et approfondir les analyses de cycle de vie et le suivi des évaluations des productions, des consommations et des taux de recyclage réels de chacun des métaux et de leurs évolutions.

Bien évidemment, les tendances récentes à la stagnation économique, voire à la récession, si elles se généralisaient davantage, pourraient conduire à une baisse effective de la consommation, notamment des métaux. Et si cette récession devenait durable, voire définitive, on pourrait alors effectivement imaginer un possible approvisionnement de l'économie matérielle au moyen du seul recyclage. Mais comme des pertes seront inévitables à chaque cycle, cela conduira inéluctablement à une baisse progressive de la quantité de biens matériels détenus par l'humanité (logements, biens d'équipement et de transport, etc.).

(12) Mais il y aura forcément aussi une limite physique de la ressource. Elle est juste différée dans le temps et reste hors du champ d'analyse des prévisionnistes. Sur la base d'une surface totale des terres émergées de la planète de 149,4 millions de km² et d'un Clarke (teneur moyenne globale) en cuivre de l'écorce continentale terrestre de 60 ppm, on peut calculer que la quantité ultime du cuivre contenue dans le premier kilomètre d'épaisseur de l'écorce terrestre des terres émergées serait de 24 200 Gt (milliards de tonnes). Si l'on devait poursuivre sans discontinuer avec une croissance de la consommation en cuivre de 2,85 % par an, c'est cette quantité de cuivre qu'il aura fallu extraire de terre en l'an 2389 ! Ce n'est là qu'une vue de l'esprit, car il sera évidemment impossible de traiter l'intégralité du premier kilomètre de la croûte terrestre pour en extraire jusqu'au dernier atome le cuivre qui y est contenu. Plus raisonnablement, l'USGS estime à environ 3 Gt les ressources ultimes récupérables en cuivre, soit environ cinq fois ce qui a déjà été extrait depuis l'Antiquité. La poursuite d'une croissance de la demande à 2,85 % par an conduirait à épuiser la totalité de ces ressources en 2076. Une croissance indéfinie reste matériellement impossible dans un monde fini, comme le soulignent les rapports Meadows. Simplement, les analystes et les décideurs d'aujourd'hui ne cherchent que rarement à se projeter à un horizon de trois siècles.

(13) Grosse (2010) concluait son étude par : « En conclusion, une politique de développement durable ne peut pas compter en premier sur le recyclage, même si celui-ci en est une composante importante. Une telle politique devra, en premier lieu, viser la réduction de la consommation de chaque matière première non renouvelable de telle sorte que sa croissance annuelle reste en-deçà de 1 %. Et, dans tous les cas, pour être efficace comme deuxième composante d'une telle politique, le recyclage devra être développé à des taux de récupération bien supérieurs à ceux observés aujourd'hui. » Il pourra être objecté à François Grosse que 1 % de croissance ne constitue pas une limite miracle en dessous de laquelle la consommation de matières premières non renouvelables deviendrait soutenable sur la durée. En effet, une croissance de 1 % reste une croissance exponentielle, simplement son temps de doublement est de 70 ans, au lieu de 35 ans pour une croissance à 2 %, ce qui laisse un peu plus de répit. Et avec une croissance de 1 %, le calcul du temps de décalage d'une même production primaire nécessaire (avec 80 % de recyclage par rapport à ce qui serait en l'absence de recyclage) donne 130 ans, avec un temps de séjour (dans les produits) de 10 ans ; dans le cas du cuivre (l'exemple retenu ici), le décalage dans le temps serait de 85 ans, avec un temps de séjour de 35 ans. Mais cela ne change rien au raisonnement global : une croissance de 1 % par an de la consommation d'une matière première non renouvelable n'est pas durable non plus.

N'approvisionner l'économie matérielle qu'au moyen du recyclage conduira obligatoirement à la décroissance matérielle. C'est mathématiquement incontournable.

Pourtant, jusqu'à aujourd'hui, tous les pouvoirs politiques continuent à appeler de leurs vœux la croissance, y compris la croissance matérielle (par exemple, par une relance de la construction de logements), qu'ils considèrent comme la condition indispensable à l'amélioration de la situation de l'emploi. Le raisonnement ci-dessus démontre que, si l'on veut de la croissance, il faut obligatoirement poursuivre l'exploitation des ressources minérales primaires.

Bibliographie

Ad-hoc Working Group of the European Commission, *Critical raw materials for the EU*, Report of the Ad-hoc Working Group on defining critical raw materials, 2010, 53 p., 5 annexes and 2 appended compendiums: http://ec.europa.eu/enterprise/policies/raw-materials/files/docs/report-b_en.pdf

Ad-hoc Working Group of the European Commission, Report on Critical raw materials for the E, 2014, 41 p., 4 annexes and 2 appended compendiums: http://ec.europa.eu/enterprise/policies/raw-materials/files/docs/crm-report-on-critical-raw-materials_en.pdf

McKINSEY & Co./Ellen MACARTHUR Foundation, *Towards the circular economy (Vers une économie circulaire)*, 2012, 92 p. : www.thecirculareconomy.org

GRAEDEL (T.E.) & al., *Metal stocks in society*, scientific synthesis. Global Metal Flows working group of the International Panel on Sustainable Resource Management, Programme des Nations unies pour l'environnement (PNUE/UNEP), 2010, 44 p., 7 figures, 8 app. : www.unep.org/resourcepanel/Portals/24102/PDFs/Metalstocksinsociety.pdf

GRAEDEL (T.E.) & al., *Recycling rates of metals*, a status report, Global Metal Flows working group of the International Panel on Sustainable Resource Management, Programme des Nations unies pour l'environnement (PNUE/UNEP), 2011, 48 p., 4 figures, 2 app. : www.unep.org/resourcepanel/Portals/24102/PDFs/Metals_Recycling_Rates_110412-1.pdf

GROSSE (F.), « De l'économie circulaire à l'économie de la fonctionnalité : vertus et limites du recyclage », *Futuribles*, n°365, juillet-août 2010.

GROSSE (F.), "Is recycling part of the solution? The role of recycling in an expanding society and a world of finite resources", *S.A.P.I.E.N.S.*, vol. 3, n°1, 2010: <http://sapiens.revues.org>

MEADOWS (D.) & al., *The limits to growth, the 30 years update* (traduction en français de 2012), Éditions Rue de l'Échiquier, 2004.

MONIER (V) & al., *Étude du potentiel de recyclage de certains métaux rares*, Bio Intelligence Service pour le compte de l'ADEME, Synthèse (13 p.), Partie 1 (222 p.) et Partie 2 (153 p.), 2010 : <http://www2.ademe.fr/servlet/getDoc?sort=-1&cid=96&m=3&id=73279&ref=&nocache=yes&p1=111>

SCHMITZ (C.J.), *World non-ferrous metal production and prices, 1700-1976*, Frank Cass and Company Ltd, Gainsborough Rd, London, E11 1 RS, UK, 1979, 430 p.

TERCERO ESPINOZA (L.A.), "The contribution of recycling to the supply of metals and minerals", *Polinares Working Paper*, n°20, European Commission, March 2012, 9 p. : www.polinares.eu/docs/d2-1/polinares_wp2_chapter8.pdf

TERCERO ESPINOZA (L.A.), "How could the EU's methodology for defining critical raw materials be enhanced?", Fraunhofer ISI presentation to the EU-US workshop on mineral raw materials flows & data, Brussels, 12-13 September 2012 : http://ec.europa.eu/enterprise/policies/raw-materials/files/docs/eu_us_defining_critical_raw_materials_en.pdf

Sites Internet

World Steel Association : www.worldsteel.org

International Copper Study Group : www.icsg.org

International Lead and Zinc Study Group : www.ilzsg.org

USGS mineral commodities : minerals.usgs.gov

Mineralinfo/AS3M : www.mineralinfo.fr

Le Kiosque de Bercy : www.lekiosque.finances.gouv.fr

Australian Government – Department of Industry and Science, Office of the Chief Economist : www.industry.gov.au/Office-of-the-Chief-Economist/Pages/default.aspx