

ANALYSE DU RECYCLAGE MATIERE PAR LA METHODE DE L'EMPREINTE ENERGETIQUE

N. JAMALI-ZGHAL, K. DEUTZ, B. LACARRIERE, *O. Le CORRE

DEPT SYST. ENERG. ET ENV., ECOLE DES MINES, Nantes, France

* lecorre@mines-nantes.fr

Résumé - Le recyclage matière est *a priori* considéré comme éco-favorable par rapport à l'exploitation de minerais provenant de mines, par nature en quantité finie et donc s'épuisant. Néanmoins, une vision holistique du recyclage requiert l'analyse de l'ensemble des ressources mobilisées pour effectuer cette opération. De plus, en suivant le déplacement/cheminement de la matière dans le temps, il devient alors nécessaire de connaître l'ensemble de l'historique de la matière considérée. Les auteurs établissent une équation théorique décrivant l'évolution à temps discret de l'énergie d'un produit : le pas d'échantillonnage est le temps du cycle. L'équation peut se réduire à une suite géométrique de raison, la fraction à recycler, sous certaines hypothèses. L'aluminium est ensuite proposé comme exemple d'application.

1. INTRODUCTION

Dans la littérature, différents modes d'analyses quantifiant l'impact sur l'environnement existent : analyse du cycle de vie (multicritères), empreinte énergétique (monocritère), etc... L'empreinte énergétique a été conçue pour permettre des comparaisons, notamment entre ressources énergétiques (renouvelable versus fossile), inaccessibles à partir des principes de la thermodynamique. Comme le chemin temporel des ressources mobilisées est le fondement de cette analyse, il paraît intéressant d'aborder le recyclage par cette approche.

Dans sa thèse, Buranakarn [1] propose une évaluation énergétique des matériaux utilisés dans la construction de bâtiments. Par exemple, il calcule une empreinte énergétique spécifique (aussi désignée par transformité) pour l'aluminium brut de $1.27 \text{ E} + 10 \text{ seJ/g}$ et pour l'aluminium recyclé de $1.29 \text{ E} + 10 \text{ seJ/g}$. Cette augmentation de transformité, de 1.6%, demeure gênante car elle signifie que, d'un point de vue énergétique, il est préférable de recourir au minerai extrait plutôt qu'au recyclage. Pour «corriger» cet effet, Ulgiati et al. [2] propose d'affecter à la matière recyclée uniquement la part liée au recyclage, i.e. en annulant la part de transformité antérieure portée par la matière. Cette proposition ramène alors la transformité de l'aluminium recyclé à sa collecte, son tri, son transport, le personnel utilisé pour cette opération. Ainsi évaluée, la transformité de l'aluminium recyclé a pour valeur $1.97 \text{ E} + 8 \text{ seJ/g}$. En repartant des travaux de Buranakarn, Amponsah [3] ne suit pas la proposition de Ulgiati et al. [2] et considère

que ce n'est pas le mode d'évaluation de la transformité qu'il faut revoir mais plutôt les ratios de comparaison (par exemple Energy Yield Ratio, EYR, Environmental Loading Ratio, ELR, ou Sustainability Index, SI, voir Lagerberg [4]). D'une part, il propose de considérer la part d'énergie mobilisée pour le recyclage comme analogue à celle des ressources renouvelables sans pour autant revoir le calcul de la transformité. Par conséquent, il s'agit de redéfinir les ratios d'interprétation des résultats. D'autre part, l'approche de Buranakarn masquait un autre écueil : si la transformité d'un produit recyclé augmente, alors elle doit augmenter à chaque recyclage. Or, Buranakarn donne une seule valeur pour la transformité d'un produit recyclé. On remarque que la proposition de Ulgiati et al. élimine aussi cette difficulté. Amponsah ne considère alors plus le recyclage comme « statique » mais une description à temps discret ayant pour période d'échantillonnage le temps de recyclage et suit la matière, voir figure 1. Pour ce faire, il déploie l'historique de la matière, voir figure 2.

Amponsah exprime la transformité (énergie spécifique) d'un matériau recyclé sous la forme :

$$em(t) = q(t)ec(t) + ei(t)(1 - q(t)) + q(t)em(t - 1) \quad (1)$$

Avec ei l'énergie spécifique totale sans recyclage, ec l'énergie spécifique totale liée à l'activité du recyclage, em l'énergie spécifique du minerai transformé et q la fraction à recycler.

Parmi les hypothèses, aucune perte de matière n'a été considérée. Lors de la soutenance de thèse

de Amponsah, le Prof. Brown, Université de Floride, directeur de thèse de Buranakarn, s'interroge sur la prise en compte de pertes de matière.

L'objectif de cet article est d'intégrer la prise en compte des pertes de matière dans les travaux de Amponsah.

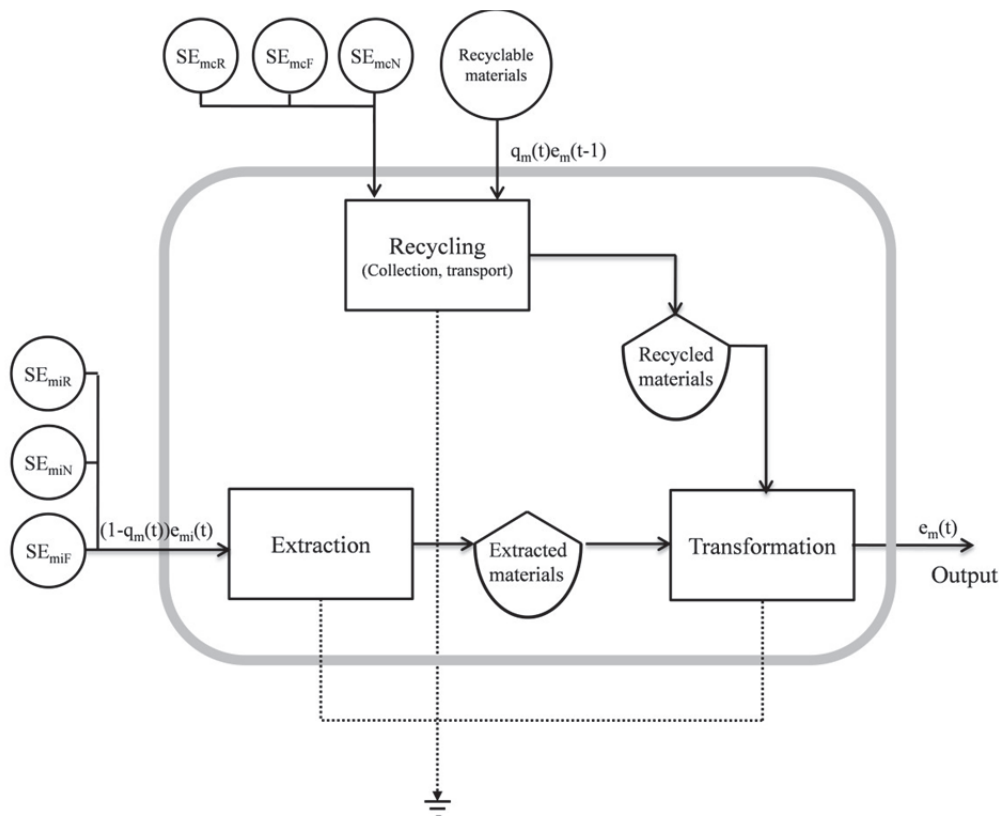


Fig. 1. Représentation énergétique du recyclage.

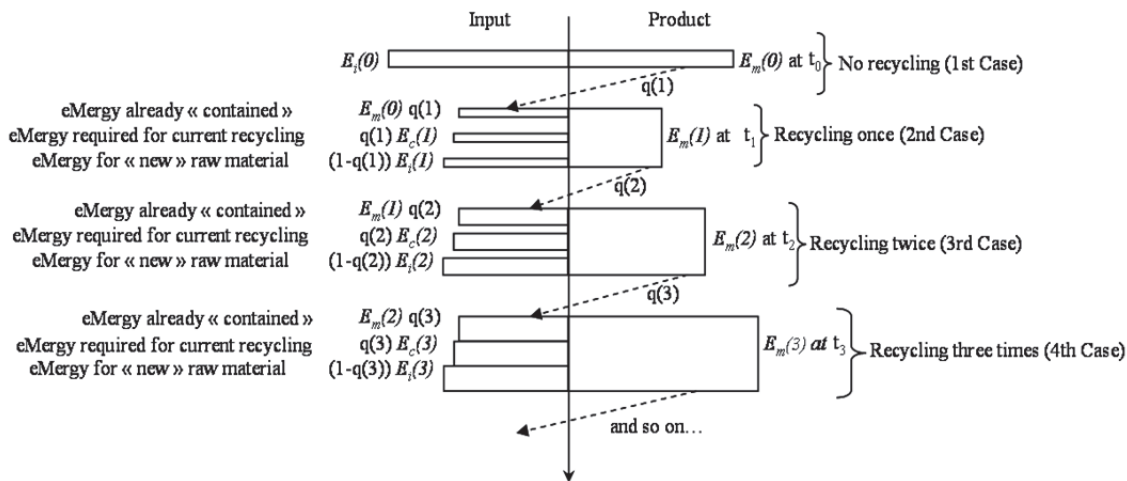


Fig. 2. Parcours de la matière recyclée.

2. MÉTHODOLOGIE

Afin d'introduire les pertes de matière que ce soit au niveau du recyclage ou à celui de la transformation, il faut d'abord effectuer un bilan de masse. En notant, la perte spécifique de matière ϵ , on peut écrire génériquement l'énergie spécifique portée par la matière en sortie d'une conversion, notée e_s :

$$e_s m_s = e_e m_e \tag{2}$$

$$e_s m_e (1 - \epsilon) = e_e m_e \tag{3}$$

$$e_s = e_e \frac{1}{1 - \epsilon} \tag{4}$$

avec e_e ayant pour énergie spécifique celle en sortie de la transformation au recyclage précédent, i.e. $e_m(t - 1)$.

L'équation (4) indique que plus la perte est importante, plus l'énergie spécifique de la matière en sortie est grande. Ceci provient de l'application de la première règle de calcul de l'énergie, voir Odum [5], ie $E_s = E_e$ l'énergie se conserve, autrement dit la perte de matière est traitée comme un sous produit de la conversion, un peu analogue à un « prix à payer à la nature ».

L'énergie spécifique d'un minerai après transformation est constituée d'une partie brute provenant de la mine, d'une fraction recyclée et de biens et services afférents.

$$em(t) = (1 - q(t) + \varepsilon_r(t) + \varepsilon_t(t))e_i(t) + q(t)em(t-1) + q(t)SE_r(t) \quad (5)$$

Avec $q(t)$ la fraction massique recyclée, e_i l'énergie spécifique totale provenant de la mine (somme de l'énergie du matériau, celle des biens et services associés à l'extraction de la mine, désignée par initiale), em l'énergie du minerai transformé et SE_r l'énergie spécifique totale associée aux biens et services nécessaires pour le recyclage.

Pour comprendre cette équation à temps discret, il faut redéployer le temps :

$$em(0) = (1 + \varepsilon_t(0)) e_i(0)$$

Rem: A $t = 0$, il n'y a pas de recyclage et seulement une perte au niveau de la transformation.

$$em(1) = (1 - q(1) + \varepsilon_r(1) + \varepsilon_t(1)) e_i(1) + q(1) em(0) + q(1) SE_r(1)$$

$$em(1) = (1 - q(1) + \varepsilon_r(1) + \varepsilon_t(1)) e_i(1) + q(1) (1 + \varepsilon_t(0)) e_i(0) + q(1) SE_r(1)$$

Supposons pour simplifier que la fraction et les pertes et l'énergie spécifique totale initiale soient indépendantes du temps, on obtient alors :

$$em(1) = (1 - q + \varepsilon_r + \varepsilon_t) e_i + q(1 + \varepsilon_t) e_i + q SE_r$$

Le premier terme est l'énergie spécifique totale initiale : quel que soit le chemin de la matière, elle a nécessaire porté cette énergie. Le second terme tient compte des pertes existantes soit au niveau du recyclage soit à celui de la transformation. Le dernier terme tient compte de l'énergie mobilisée nécessaire pour le recyclage.

$$em(2) = (1 - q(2) + \varepsilon_r(2) + \varepsilon_t(2)) e_i(2) + q(2) em(1) + q(2) SE_r(2)$$

Avec l'hypothèse d'invariance temporelle décrite précédemment, on obtient:

$$em(2) = (1 - q + \varepsilon_r + \varepsilon_t) e_i + q em(1) + q SE_r$$

En introduisant l'énergie spécifique de la matière après le premier recyclage, on a:

$$em(2) = (1 - q + \varepsilon_r + \varepsilon_t) e_i + q ((1 + \varepsilon_t) e_i + (\varepsilon_r + q \varepsilon_t) e_i + q SE_r) + q SE_r$$

$$em(2) = (1 + \varepsilon_t) e_i + (\varepsilon_r + q \varepsilon_t) e_i + q(\varepsilon_r + q \varepsilon_t) e_i + q^2 SE_r + q SE_r$$

$$em(2) = (1 + \varepsilon_t) e_i + (\varepsilon_r + q \varepsilon_t) (1 + q) e_i + q(1 + q) SE_r$$

$$em(2) = (1 + \varepsilon_t) e_i + (1 + q) [(\varepsilon_r + q \varepsilon_t) e_i + q SE_r]$$

Le premier terme reste constant. Le second terme fait apparaître le début d'une suite géométrique de premier terme $[(\varepsilon_r + q \varepsilon_t) e_i + q SE_r]$ de raison la fraction à recycler q . Pour alléger la notation, en supposant l'invariance temporelle, le troisième recyclage donne:

$$em(3) = (1 - q + \varepsilon_r + \varepsilon_t) e_i + q em(2) + q SE_r$$

$$em(3) = (1 - q + \varepsilon_r + \varepsilon_t) e_i + q [(1 + \varepsilon_t) e_i + (1 + q) [(\varepsilon_r + q \varepsilon_t) e_i + q SE_r]] + q SE_r$$

On obtient donc :

$$em(3) = (1 + \varepsilon_t) e_i + (1 + q + q^2) [(\varepsilon_r + q \varepsilon_t) e_i + q SE_r]$$

Rem : En considérant les pertes comme nulles, on a l'énergie spécifique du troisième recyclage sans perte, notée em^0 :

$$em^0(3) = e_i + q(1 + q + q^2) SE_r$$

Cette équation est formulée dans la thèse de Amponsah (2011), page 104, eq 3-25.

L'introduction des pertes introduit une correction dans le premier terme $(1 + \varepsilon_t) e_i$, ceci pour que le bilan masse soit respecté: il n'y a pas d'accumulation. Pour produire un kilogramme de matériau, il faut ajouter les pertes liées à la transformation en entrée. Le second terme est plus complexe: l'accumulation est représentée par la suite géométrique de premier terme $[(\varepsilon_r + q \varepsilon_t) e_i + q SE_r]$ et de raison q . La première partie du premier terme $(\varepsilon_r + q \varepsilon_t) e_i$ s'interprète comme la conséquence des pertes de masse. Si on considère une quantité de matière au recyclage N , elle a été "amputée" de toutes les pertes précédentes, son énergie est donc liée à l'énergie spécifique de la mine. Le second terme est lié à l'énergie introduite pour effectuer le recyclage.

On obtient l'énergie spécifique pour un recyclage N dans l'hypothèse d'invariance temporelle:

$$em(N) = (1 + \varepsilon_t) e_i + \frac{q^N - 1}{q - 1} [(\varepsilon_r + q \varepsilon_t) e_i + q SE_r] \quad (6)$$

En rappelant l'équation générique formulée par Amponsah (2011), p106, eq 3-28

$$em^o(N) = e_i + \frac{q^N - 1}{q - 1} [q SE_r]$$

3. APPLICATION À L'ALUMINIUM

Le tableau 1 est repris de la thèse de Buranakarn [1]. Une table émergétique se lit, globalement, de gauche à droite pour les entrées et de droite à gauche pour les résultats. Pour constituer cette table, il faut dénombrer les entrées pour le process considéré, à savoir pour l'aluminium sans recyclage, le minerai, l'électricité et les biens et services (reporté dans le terme générique Labour), puis on quantifie chaque ressource (dans la troisième colonne du tableau). L'énergie spécifique associée à l'entrée considérée est généralement issue de base de données (le site web [www. http://emergydatabase.org/](http://emergydatabase.org/) est

partagé, mis à jour, par la communauté scientifique). Le produit de la quantité par l'énergie spécifique donne l'énergie par ressource considéré. La somme des énergies donne l'énergie totale du produit. Connaissant la quantité de produit créée, l'énergie spécifique du produit (final) peut alors être calculée. Pour l'aluminium sans recyclage, il a été retenu 3 entrées. Buranakarn obtient une valeur de $1.27 E + 10$ seJ/g. On notera que la perte de matière apparaît déjà à ce niveau: $4.17 E + 11$ g de minerai mais seulement $4.00 E + 11$ g de produit fini. En suivant la même méthodologie pour le recyclage, des entrées additionnelles apparaissent liées à la collecte, au transport etc... On remarque que la somme des trois premières lignes redonne la même quantité de matière que dans le cas précédent : ce tableau indique l'absence de perte de matières lors du recyclage. La fraction recyclée est prise à 30% (la quantité recyclée, deuxième du tableau, rapportée à la quantité totale).

Table 1

Results of emergy evaluation of conventional aluminium production and recycling of used aluminium cans

Note item	Unit/year	Input resource	Solar emergy per unit (sej/unit)	Emergy (sej/year)
Conventional aluminium sheet production				
Primary aluminium (ingot)	g	4.17 E + 11	1.17 E + 10	4.88 E + 21
Electricity	J	1.08 E + 15	1.74 E + 05	1.88 E + 20
Labour	\$	2.09 E + 07	1.15 E + 12	2.40 E + 19
Annual yield	g	4.00 E + 11	1.27 E + 10	5.08 E + 21
Recycling process (first recycling), cf Buranakarn				
Used aluminium can	g	2.29 E + 11	1.17 E + 10	2.68 E + 21
Primary aluminium (ingot)	g	1.25 E + 11	1.17 E + 10	1.46 E + 21
Aluminium scrap	g	6.25 E + 10	1.17 E + 10	7.31 E + 20
Used Al. can collection	g	2.29 E + 11	2.51 E + 08	5.5 E + 19
Used Al. can separation	g	2.29 E + 11	8.24 E + 06	1.89 E + 18
Electricity	J	1.08 E + 15	1.74 E + 05	1.88 E + 20
Transport (truck)	ton-mile	2.82 E + 07	9.65 E + 11	2.2 E + 19
Labour	\$	2.90 E + 07	1.15 E + 12	3.34 E + 19
Annual yield	g	4.00 E + 11	1.29 E + 10	5.16 E + 21

L'augmentation d'énergie spécifique due au premier recyclage est donc de l'ordre de 1.6%, en tenant compte de la perte de matière. Il s'agit de l'application de l'équation précédente :

$$em(1) = (1 + \varepsilon_t) e_i + (\varepsilon_r + q \varepsilon_t) e_i + q SE_r$$

avec $\varepsilon_r = 0$, $\varepsilon_t = 1.6\%$, $q = 30\%$, SE_r correspond à la ligne 4-5-7 et une partie de la ligne 8 (la différence entre $2.09 E + 07$ et $2.29 E + 07$), soit la valeur de $1.40 E + 09$ seJ/g/an; le terme $[(1 + \varepsilon_t) e_i]$ correspond à la transformité sans recyclage, $1.27 E +$

$+ 10$ seJ/g/an, donc em_i a pour valeur $1.25 E + + 10$ seJ/g/an. La correction amenée par le terme $(\varepsilon_r + q \varepsilon_t) e_i$ représente une quantité de l'ordre de $0.1 E + 10$ seJ/g/an. La valeur de la transformité après un recyclage est donc de $1.30 E + 10$ seJ/g/an. Le comportement asymptotique est atteint dès le second recyclage et donne la valeur $1.31 E + + 10$ seJ/g/an.

La correction introduite n'est pas très significative mais tient au jeu de paramètres. Il est possible de prendre comme référence l'énergie initiale:

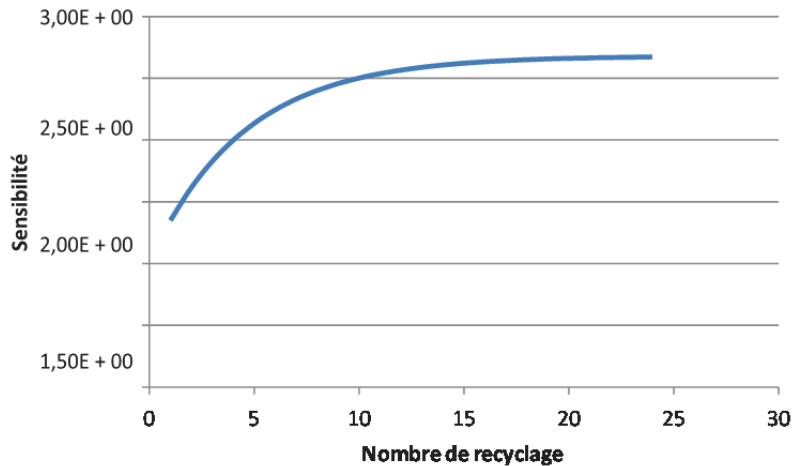


Fig. 3. Effet de la correction en fonction du nombre de recyclages sur un exemple.

$$em^*(N) = (1 + \varepsilon_t) + \frac{q^N - 1}{q - 1} \left[(\varepsilon_r + q \varepsilon_i) + q \frac{SE_r}{e_i} \right] \quad (7)$$

Le ratio $\frac{SE_r}{e_i}$ peut devenir important dès lors que l'énergie de recyclage mobilise des ressources significatives. Prenons l'exemple d'un recyclage consommant 15% de ressource, un taux de recyclage de 80%, des pertes de recyclage de 20% avec la même perte de matière liée à la transformation de 1.6%. Dans ce cas, le terme correctif peut atteindre 250%, voir la figure 3.

4. CONCLUSION

Dans cet article, l'intégration du recyclage par la méthode de l'empreinte émergétique a été retracée. En partant des travaux de Buranakarn, Amponsah a développé le chemin de la matière recyclée. Néanmoins, il n'avait pas explicitement tenu compte des pertes de matières. Dans cet article, ces pertes sont introduites et un terme correctif a donc été formulé. L'application numérique sur les données de Buranakarn ne donne pas une correction importante (moins de 1%) mais cela tient plus aux choix des paramètres. A titre indicatif, un exemple montre que le terme correctif peut atteindre 250% par rapport à Buranakarn et 60% par rapport à Amponsah.

Le recyclage amène une perte de qualité de la matière, assimilable à une perte d'exergie. Les prochains travaux porteront sur cet aspect. Comment introduire ce type de pertes dans l'analyse émergétique.

Nomenclature

E : énergie totale (seJ/an)
 e : énergie spécifique (seJ/unit)
 q : fraction à recycler
 t : temps
 SE : source d'énergie (seJ)
 ε : perte de matière

Indice

i : initiale m : minerais r : recyclé e : entrée
 s : sortie
 t : transformation

RÉFÉRENCES

- [1] V. Buranakarn, *Evaluation of recycling and reuse of building materials using emergy evaluation method*. PhD dissertation, department of Architecture, University of florida, Gainesville, FL, 1998.
- [2] S. Ulgiati, M. Raugei and S. Bargigli, *Dotting the i's and crossing the T's of emergy synthesis: materials flows, information and memory aspects and performance indicators*, Proceedings from the Third Biennial Emergy Evaluation Research Conference, Gainesville, FL, 2004.
- [3] N. Amponsah, *Contribution à la théorie de l'énergie: application au recyclage*, Thèse Ecole Doctorale SPIGA, Nantes, 23/09/2011.
- [4] C. Lagerber, *Emergy analysis of the resource use in greenhouse crop production and of the resource basis of the Swedish economy*. Doctorat, Swedish Universitu of Agricultural Sciences, 1999.
- [5] H.T. Odum, *Environmental accouting: emergy and environmental decision making*, John Wiley and Sons, New York, 1996.