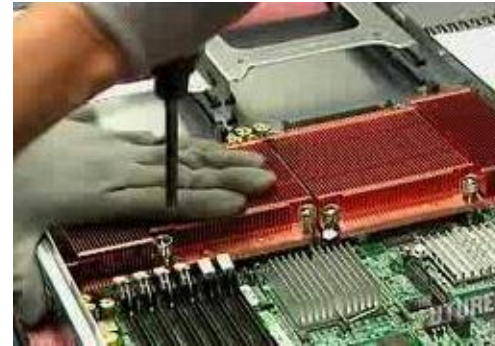
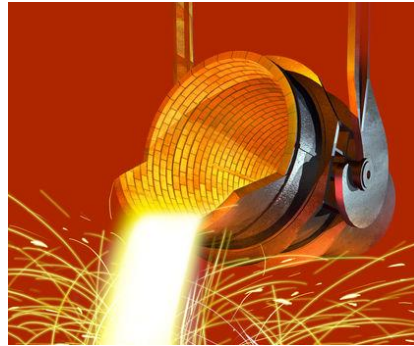




Les déterminants du taux de recyclage : nouveaux éclairages sur les déchets électroniques et électriques

Florian Fizaine*

Séminaire COMES : les prix des métaux – 28/05/2019

*Laboratoire IREGE, Université de Savoie Mont Blanc

Email: florian.fizaine@gmail.com, Website: <https://sites.google.com/site/florianfizaine/>

I. Contexte

Augmentation rapide de l'énergie pour le numérique (9%/year) ;

⇒ 50% de l'énergie pour la production des matériaux (Shift Project, 2018)

Le numérique requiert de larges quantités et variétés de métaux (Bihouix, 2015)

Métaux primaires intensifs en énergie (Fizaine and Court, 2015)

Toxicité et dégâts environnementaux associés à l'extraction des métaux (UNEP, 2013)

Déchets électroniques et électriques (WEEE) : 44 Mt en 2016 (Baldé et al. 2017)

Souhait de passer d'une économie linéaire à économie circulaire

Recyclage des métaux est théoriquement prometteur :

- Economie d'énergie/GES

- Déchets évités

- Sauvegarde de l'environnement

- Economie d'espace

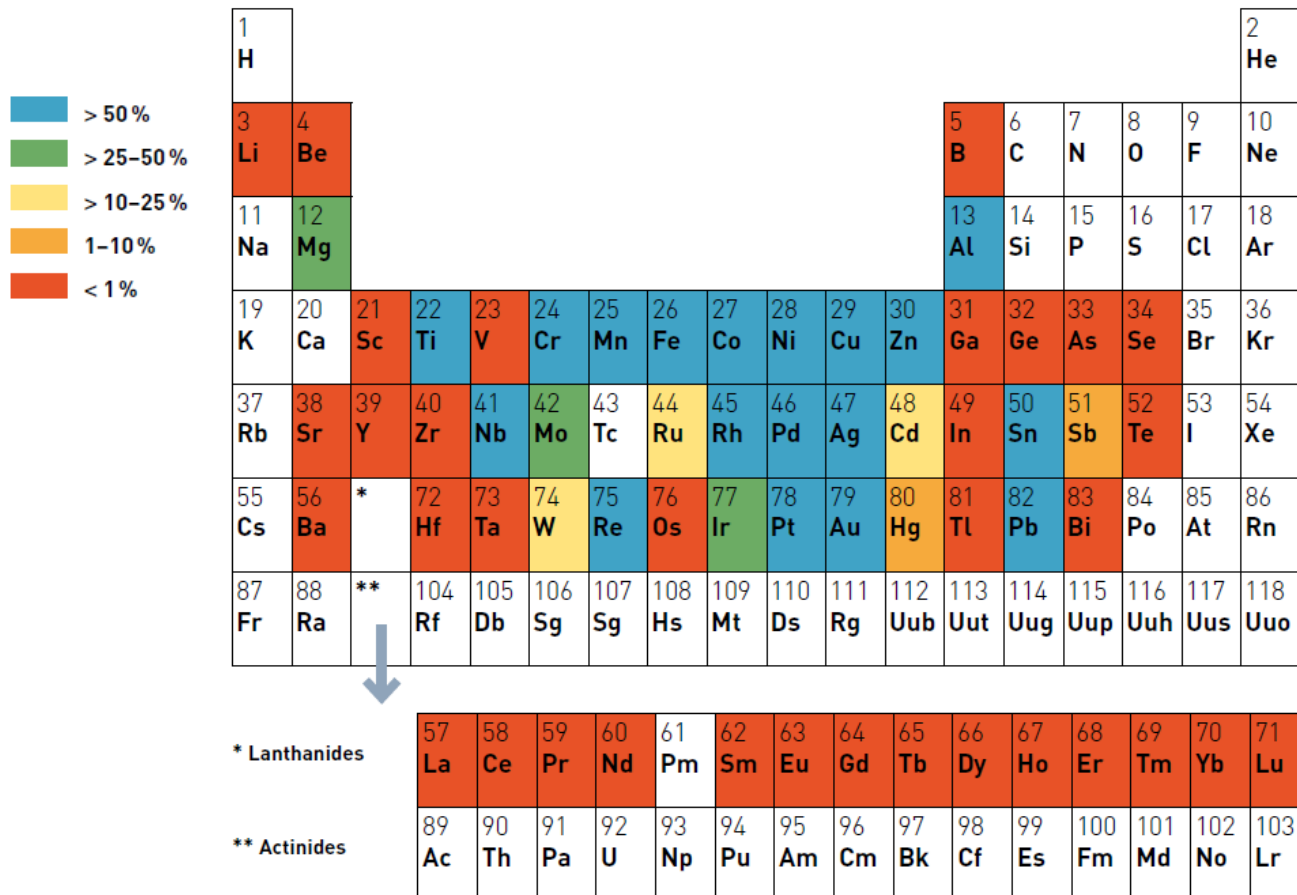
- Hausse indépendance géopolitique

- ...



I. Contexte

...Mais empiriquement très décevant...



II. Etudes antérieures

La littérature sur le recyclage est vaste...

...et implique différentes approches

Trois grands corpus

(1) *Etudes économétriques de panel utilisant des données socio-économiques (plus de 30)*

- Effet positif du revenu, du niveau d'éducation, de l'âge et taille de ménage sur taux de recyclage
- Controverse sur l'effet de la densité démographique et dépenses en sensibilisation
- Effet positif de la collecte à domicile et de déchetterie proche (effet d'éviction entre les deux)
- Effet positif de la tarification des déchets (poids et volume)

(2) *Modèles à équations simultanées centrés sur des industries particulières (7)*

- Seulement pour le cuivre et l'aluminium
- Faible élasticité prix des flux secondaires de métaux (0.2-0.3)

(3) *Etudes techniques sur les déchets (2)*

- Pas de recyclage quand métaux plus dilués dans les produits que dans les mines

III. Objectifs de l'étude

Principales limites à corriger

- Littérature(1) : Mélange de différents matériaux, pas d'étude de l'effet prix
- Littérature(2): Résultats uniquement sur cuivre et aluminium (bien recyclés), sur flux
- Littérature(3) : Pas de modélisation, uniquement description visuelle monovariante
- La plupart des études prospectives n'introduisent pas le recyclage ou de façon exogène et arbitraire

Ce qui est fait

- Article A explore les déterminants de taux de recyclage en fin de vie des métaux
- **Article B analyse le taux d'efficacité du recyclage des métaux dans les cartes imprimées d'ordinateurs**
- Article C discute principales contraintes qualitatives liées à l'atteinte de recyclage élevé pour les métaux

Principales contributions

- Propose de quantifier l'effet des principaux déterminants du taux de recyclage (sous différentes formes)
- Prend en compte tous les métaux (en particulier les métaux mineurs dans les WEEE)
- Analyse centrée sur les recycleurs (industriels plutôt que ménages)
- Etude de la variabilité entre éléments plutôt que monographie

IV. Méthodologie

Données

A propos du taux de recyclage...

Plusieurs définitions (UNEP, 2011)

- Taux de collecte (Old scrap collection rate)
- **Taux de recyclabilité/efficacité (Recycling efficiency rate)**
- Taux de recyclage des éléments en fin de vie (End of life recycling rate)
- Recycling content (contenu recyclé)

Variable dépendante recycling efficiency rate pour les métaux dans cartes électroniques (ordinateur) – Europe

Prix des métaux en \$/kg + Prix 5 ans auparavant

Concentration des métaux dans cartes électroniques

Concentration moyenne des mines et abondance dans la croûte terrestre

Consommation énergétique unitaire en GJ/t

IV. Méthodologie

Specifications, modèles et méthodologie

$$Recycling\ rate_i = c + \beta_1 price_i + \beta_2 Concentration\ p_i + \beta_3 \frac{Concentration\ p_i}{Concentration\ m_i} \quad (1)$$

$$Recycling\ rate_i = c + \beta_1 Embodied\ Value + \beta_2 \ln \left(\frac{concentration\ p_i}{concentration\ m_i} \right) \quad (2)$$

$$Recycling\ rate_i = c + \beta_1 price_i + \beta_3 \log \left(\frac{Concentration\ p_i}{Concentration\ m_i} \right) \quad (3)$$

- Endogénéité et non linéarité (OLS – IV OLS – GLM – FRAMER – left censored Tobit)
- Echantillon réduit (n=30 ; Analyse de sensibilité)

V. Résultats

Principaux résultats

Reproduction des données par la spécification 3 selon trois modèles : R^2 : 50%-70%

Effets significatifs des variables

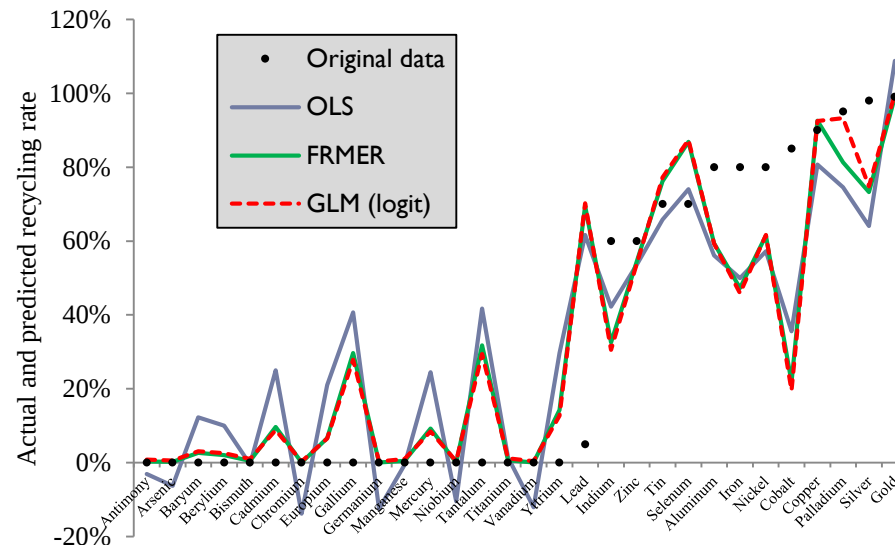


Figure 2 Predictions of specification (3) according to different models.

V. Résultats

Discussion

A propos de l'effet prix

- Très faible effet du prix des métaux sur le taux de recyclage- +1000\$ => +1.94% (point)
- Estimation maximum- +1 unité de log des prix (au prix moyen X3) => +7.9% (point)
- Cohérent avec littérature sur les flux secondaires
- Cohérence entre article A et B - Prix X10 => 7 à 79% de chance d'être hautement recyclé (RR>50%)
- Internaliser les externalités (GES) ne devrait pas conduire à l'éco-circulaire (100\$/t CO2 => +1-3% hausse de prix)

A propos de l'éco-conception et des politiques centrées sur les matériaux

Taux de recyclage très élastique au taux de concentration (PMC) - +1 point PMC (%) => +2.52% (point)

Eco-conception ? Attention aux effets antagonistes entre efficacité matérielle et recyclage

A propos de la compétition entre l'extraction et le recyclage

Une unité de plus pour le ratio de concentration => +6% (point)

L'épuisement minier face à une stabilité des concentration dans les produits => accroissement recyclage

VI. Recommandations

Recommandations

- Effet prix faible – éviter politiques centrées sur taxes seules (pour le recyclage)
- Eco-conception et mesures techniques semblent plus efficaces

Limites

- Manque de données- Peu d'observations et peu de variables disponibles
- Ici hypothèse de recyclage mono-matériaux alors que co-recyclage plus réaliste (limite données)
- Coupe transversale (pas de dynamique) – Passage nécessaire au panel
- Contraintes qualitatives non prises en compte (Fizaine, 2019)

Réglementation des substances (REACH), dispersion des concentrations, incertitude sur les flux, coûts liés aux changements,...

Travaux futurs

- Besoin de données interdisciplinaires en panel pour aller plus loin
- Besoin d'analyser spécifiquement le lien entre l'efficacité matérielle et le recyclage (3 R strategy)

Merci de votre attention

Questions ?



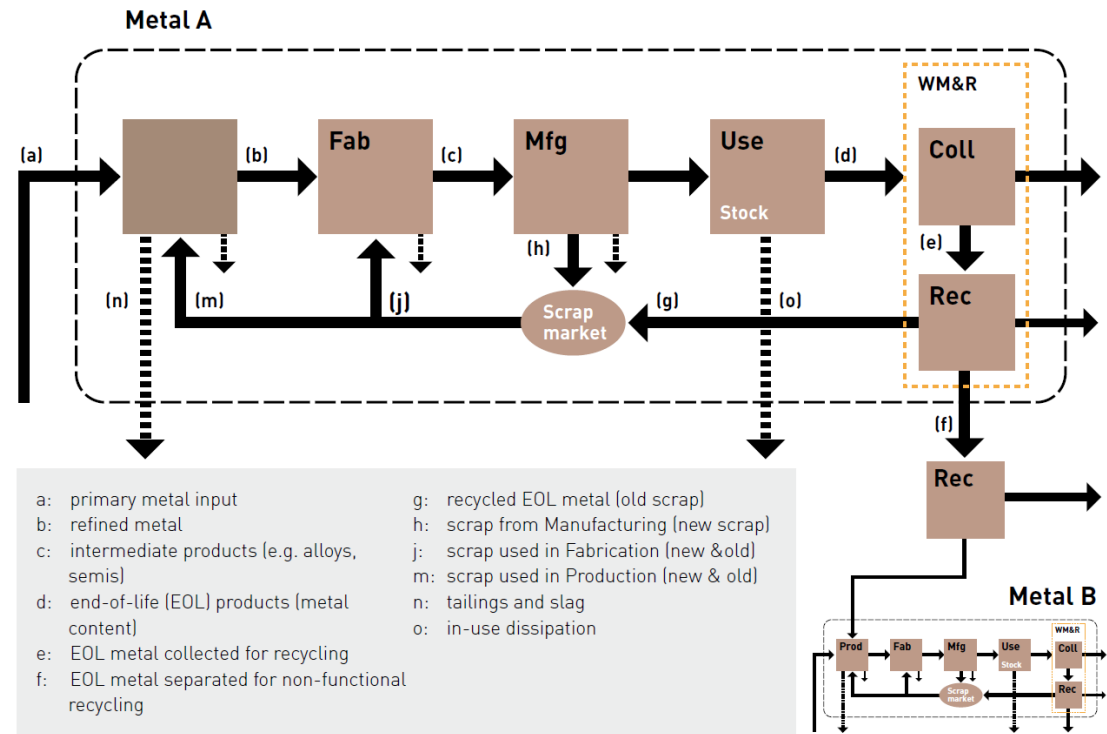
IV. Methodology

Data

About recycling rate...

Several definitions (UNEP, 2011)

- End of life recycling rate (g/d)
- Old scrap collection rate (e/d)
- Recycling efficiency rate (g/e)
- Recycling content ($j+m/a+j+m$)



Source : UNEP (2011)

IV. Methodology

Models and issues with estimations

Small sample size (30)

- Low statistical power (hard to detect small effect)
- Inflate estimates

Collinearity

- Few variables introduced in the model
- VIF is always below 2

Non linearity

- OLS for fractional dependent variable hardly debated (non linear effect and impossible predicted outcomes)
- Generalized Linear Model (GLM : Baum, 2008 ; Papke and Wooldridge, 1996).
- Binomial family – logit link
- Use of robust variance estimator recommended (Baum, 2008 ; Papke and Wooldridge, 1996)

IV. Methodology

Models and issues with estimations

Endogeneity

- Suspected endogeneity between Recycling rate and Metal price
- Use of Fractional Response Model with Endogenous Regressor - FRAMER (Wooldridge, 2011)
- Similar framework than GLM but allow the treatment of one endogenous variable

Also use of traditional two stage Instrumental variable estimation for illustration

Instruments for metal price :

- Average grade of metal in continental crust – natural abundance of elements (ppm)
- Unitary Energy consumption (GJ/t) or 5 years lead prices

First stage - $F = 120/789$ $R^2 = 0.92-0.98$ – Crag Donald Statistic well above Stock-Yogo critical values

Sargan test and Basman χ^2 (cannot reject H_0 – $p\text{-value} > 0.25$)- instruments uncorrelated to error term

Anderson canon. corr. LM statistic – (underidentification test H_0 rejected $\Rightarrow H_1$: identified)

IV. Methodology

Main results

OLS - Recycling rate (%)	(1)	(2)	(3)
Intercept	0.1646268 (0.06642)**	0.1560699 (0.06899)**	0.577273 (0.0670)***
Price	0.000023 (0.00001)***	0.000017 (0.00001)**	0.000013 (0.00001)**
ConcentrationP	2.934317 (1.29229)**	3.306493 (1.29228)**	-
RCR	0.0570336 (0.021819)**	-	-
Threshold	-	0.36863 (0.15341)**	-
Ln(RCR)	-	-	0.087194 (0.0140)***
F	7.73***	7.20***	25.84***
R ²	0.4714	0.4537	0.6568
VIF	[1.01-1.06]	[1.02-1.12]	[1.05]
JB	6.43**	2.07	0.81
White heteroscedasticity test	1.78	0.65	1.77

Table 1 Estimate of specifications 1-3 with OLS

IV. Methodology

Main results

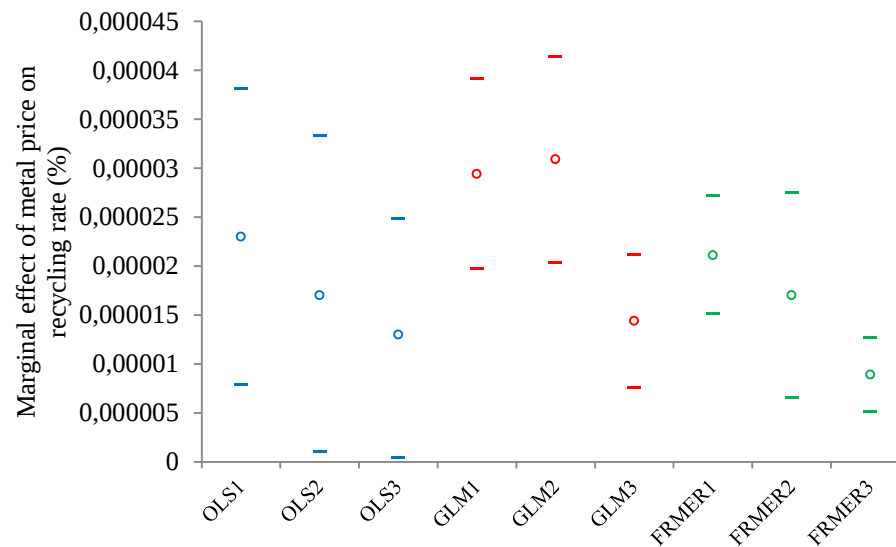
GLM & FRMER - Recycling rate (%)	GLM(1)	GLM(2)	GLM(3)	FRMER(1)	FRMER(2)	FRMER(3)
Intercept	-1.826929 (0.4606745)***	-1.845957 (0.5039149)***	0.5137347 (0.4513746)	-1.005963 (0.252363)***	-0.99643 (.2662858)***	0.3150084 (0.2411082)
Price	0.0002185 (0.0000343)***	0.0002248 (0.0000397)***	0.0001433 (0.0000299)***	0.0000814 (0.0000119)***	0.000063 (0.000017)***	0.0000491 (0.00001)***
ConcentrationP	14.69676 (3.639253)***	16.31619 (4.46999)***	-	8.437343 (2.00898)***	9.215483 (2.259796)***	
RCR	0.5288516 (0.2664065)**	-	-	0.2318354 (0.1014585)**	-	
Threshold	-	2.068012 (0.924391)**	-	-	1.03647 (0.5026551)**	
Ln(RCR)	-	-	0.7603299 (0.1641071)***	-	-	0.4303107 (0.0821208)***
Wald chi2	40.51***	32.84***	43.56***	53.37***	42.93***	67.58***
R ²	0.5388	0.5042	0.7054	0.5206	0.4790	0.7064
Wald test of exogeneity	-	-	-	5.53**	6.94***	8.65***

Table 2 Main results associated with specifications 1 to 3. Note: Generalized Linear Models (GLM), Fractional Response model with endogenous regressors (FRMER). Energy consumption per unit of metal (GJ/t) and average grade of metal in crustal crust is used as instrument for metal price in FRMER. Note that exogeneity of price is rejected at 5% and 1% of risk

IV. Methodology

Main results

Marginal effect of price (\$/kg) on recycling rate (%)



IV. Methodology

Main results

Marginal effects of other variables

Variable		OLS1	OLS2	GLM1	GLM2	FRMER1	FRMER2
ConcentrationP Av.mean (2.52)	Mean	2.9343	3.3065	1.9777	2.2392	2.1911	2.4942
	Upper bound (95%)	5.5907	5.9628	2.6842	3.0398	2.9103	3.3367
	Lower bound (95%)	0.2780	0.6502	1.2712	1.4386	1.4719	1.6517
		OLS2	GLM2	FRMER2			
Threshold Av.mean (0.31)	Mean	0.3686	0.2838	0.2805			
	Upper bound (95%)	0.6840	0.4520	0.5008			
	Lower bound (95%)	0.0533	0.1156	0.0602			
		OLS3	GLM3	FRMER3			
ln(RCR) Av.mean (0.08)	Mean	0.0872	0.0765	0.0781			
	Upper bound (95%)	0.1159	0.0878	0.0896			
	Lower bound (95%)	0.0585	0.0651	0.0665			
		OLS1	GLM1	FRMER1			
RCR Av.mean (0.063)	Mean (0.063)	0.0570	0.0712	0.0602			
	Upper bound (95%)	0.1019	0.0070	0.1077			
	Lower bound (95%)	0.0122	0.1353	0.0128			

Table 3 Average marginal effect of different variable on recycling rate for different models.

IV. Methodology

Main results - appendixes

Robustness analysis	OLS - Recycling rate (%)	(1)	(1')	(1'')
Intercept		0.1646268 (0.06642)**	0.686629 (0.170334)***	0.684212 (0.135858)***
Price		0.000023 (0.00001)***	-	-
ln(Price)		-	0.078853 (0.021525)***	0.035633 (0.023799)
ConcentrationP		2.934317 (1.29229)**	-	-
Ln(ConcentrationP)		-	0.075673 (0.020497)***	0.028281 (0.024365)
RCR		0.0570336 (0.021819)**	0.032890 (0.022386)	-
Ln(RCR)		-		0.072373 (0.021908)***
F		7.73***	9.25***	14.82***
R ²		0.4714	0.5163	0.6310
JB		6.43**	0.73	2.02
White heteroscedasticity test		1.78	1.86	0.67

Table 4 Robustness analysis with metal price in logarithm. Note: GLM estimations give similar results.

IV. Methodology

Main results - appendixes

Robustness analysis

Recycling rate (%) - OLS	(1)	(1.2)	(1.3)	(1.4)	(1.5)
Intercept	0.1646268 (0.06642)**	0.686629 (0.170334)***	0.684212 (0.135858)***	0.279579 (0.071993)***	0.198651 (0.068954)***
Price	0.000023 (0.00001)***	-	-	0.000021 (0.000001)**	-
Ln(Price)	-	0.078853 (0.021525)***	0.035633 (0.023799)	-	-
ConcentrationP	2.934317 (1.29229)**	-	-	-	-
Ln(ConcentrationP)	-	0.075673 (0.020497)***	0.028281 (0.024365)	-	-
Value					0.056337 (0.014388)***
RCR	0.0570336 (0.021819)**	0.032890 (0.022386)	-	-	-
Ln(RCR)	-		0.072373 (0.021908)***	-	-
F	7.73***	9.25***	14.82***	5.50**	15.33***
R ²	0.4714	0.5163	0.6310	0.1642	0.3538
JB	6.43**	0.73	2.02	4.55	5.12*
White test	1.78	1.86	0.67	0.80	0.84

1.Énergie et métaux

Progrès technique et minimum thermodynamique pour la consommation d'énergie des métaux primaires

Marge de manœuvre pour réduire consommation énergétique

Mais on ne descendra pas en deçà des valeurs théoriques thermodynamiques

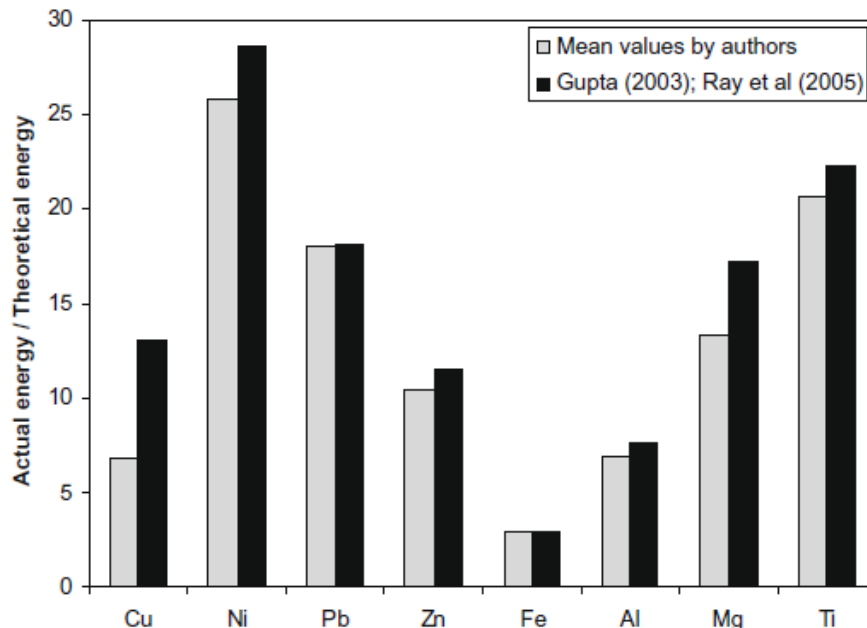
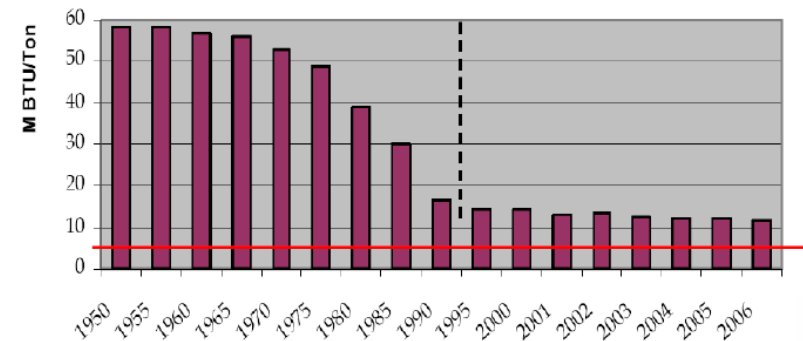
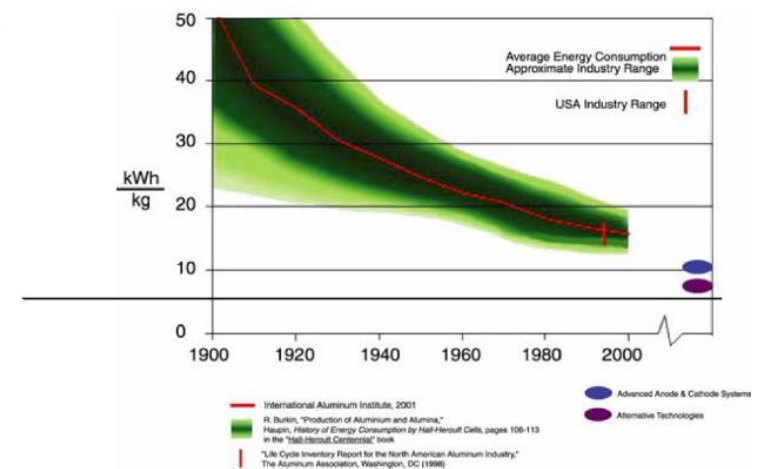


Fig. 4. Ratio of actual to theoretical energy consumption for the extraction of various metals.

Source : Schéma de Norgate and Johanshahi (2010, 2011)



Source : World Steel Association



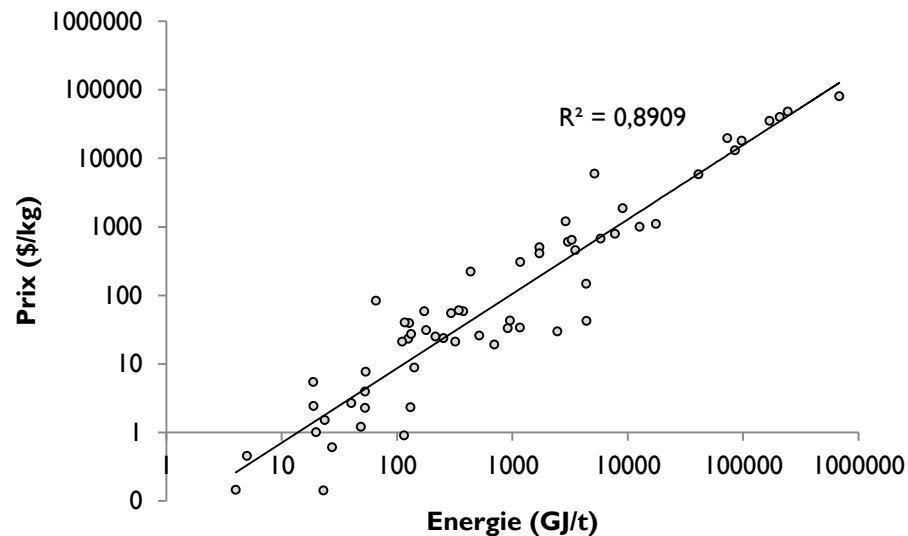
Source : US DOE (2007)

1.Énergie et métaux

Constats = prix des métaux et énergie

Energie directe : l^{ier} poste de coûts pour les métaux (Energy Information Administration, 2011)

Conséquence : relation directe et forte entre prix des métaux et énergie



Source : Fizaine (2018)