



## **Épuisement des métaux et énergie nette dans une perspective de transition énergétique**

*Friday Lunch Meetings 11/04/2014*

Florian FIZAINE\* et Victor COURT\*\*

\*LEDi - Laboratoire d'Économie de Dijon - UMR 6307 - Université de Bourgogne, Email : [florian.fizaine@gmail.com](mailto:florian.fizaine@gmail.com)

\*\*EconomiX - UMR 7235 - Université Paris Ouest, Nanterre - La Défense, Email : [victorcourt@free.fr](mailto:victorcourt@free.fr)

# Plan de la présentation

---

## Contexte

- I. Un secteur des métaux appelant toujours plus d'énergie
- II. Méthodologie : l'énergie et l'EROI comme unité de mesure
- III. Evaluation de l'impact de l'épuisement des métaux : une application aux énergies renouvelables

## Conclusion



# Contexte

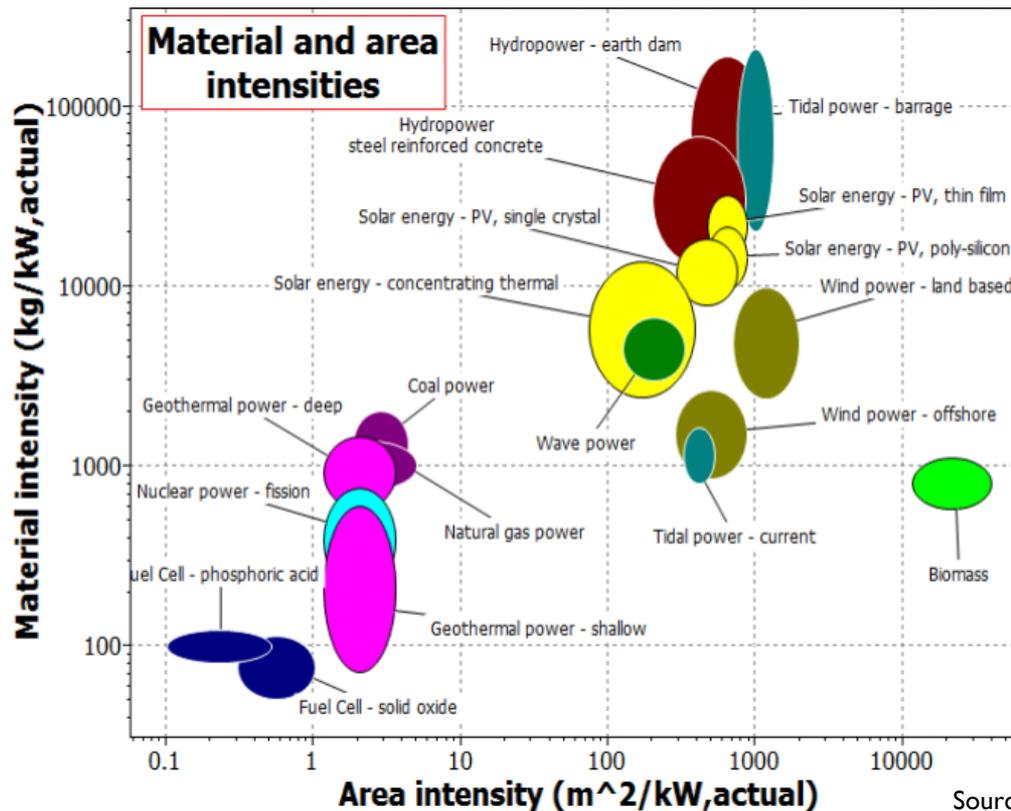
---

- ❑ Stern et Kander (Energy Journal, 2012) mais aussi Ayres et Voudouris (Energy Policy, 2014) ont montré que la croissance économique dépend de trois facteurs de production : travail, capital et énergie. Les preuves empiriques convergent vers des facteurs partiellement substituables voire complémentaires plutôt que parfaitement substituables.  
=> Hausse du PIB requiert une hausse de l'énergie
- ❑ Dans le même temps, la lutte contre le réchauffement climatique impose de briser le lien entre hausse de l'énergie consommée et émissions de gaz à effet de serre.
- ❑ La principale solution avancée consiste à mobiliser au mieux l'efficacité énergétique et à basculer vers des énergies décarbonées.



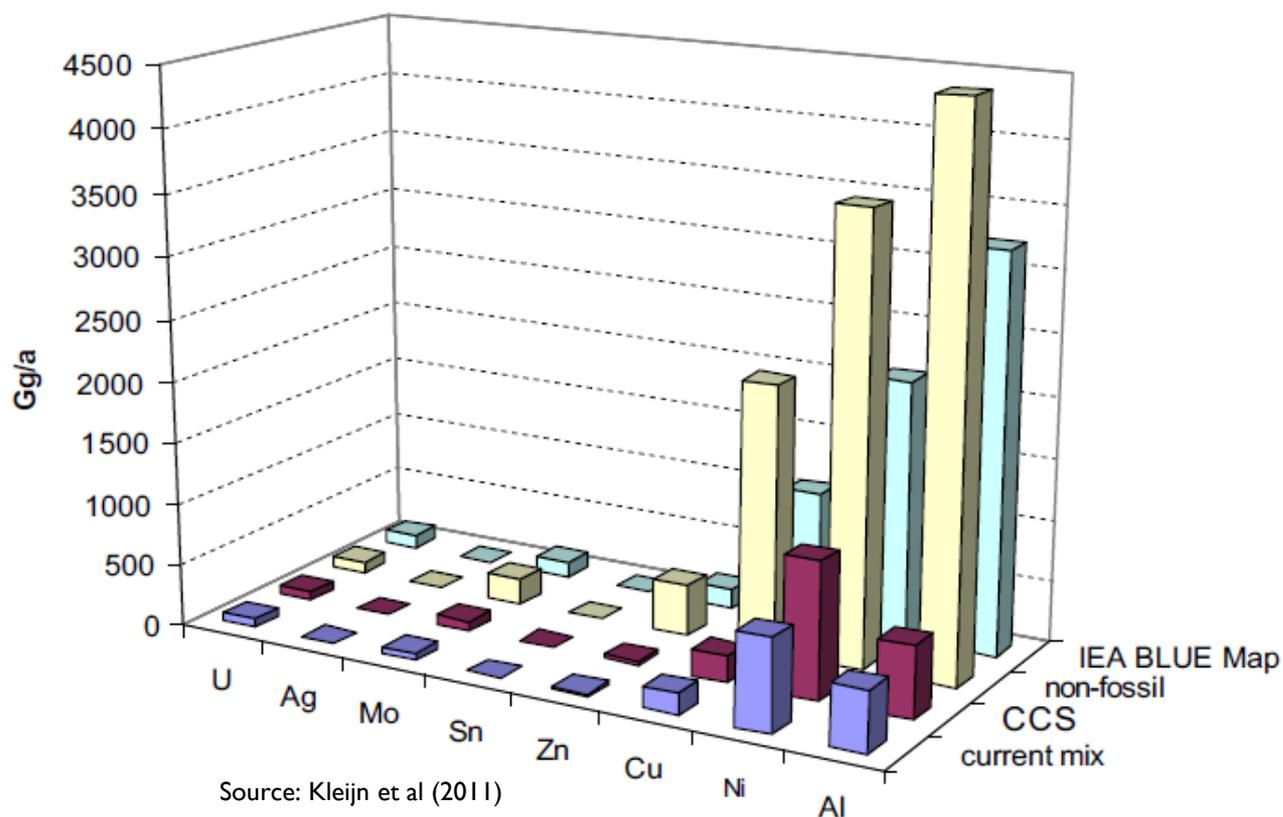
# Contexte

□ En parallèle, des études ont mis en lumière la plus grande intensité matérielle des technologies renouvelables comparées aux moyens de productions électriques reposant sur les énergies fossiles.



# Contexte

- En parallèle, des études ont mis en lumière la plus grande intensité matérielle des technologies renouvelables comparées aux moyens de productions électriques reposant sur les énergies fossiles.



# Contexte

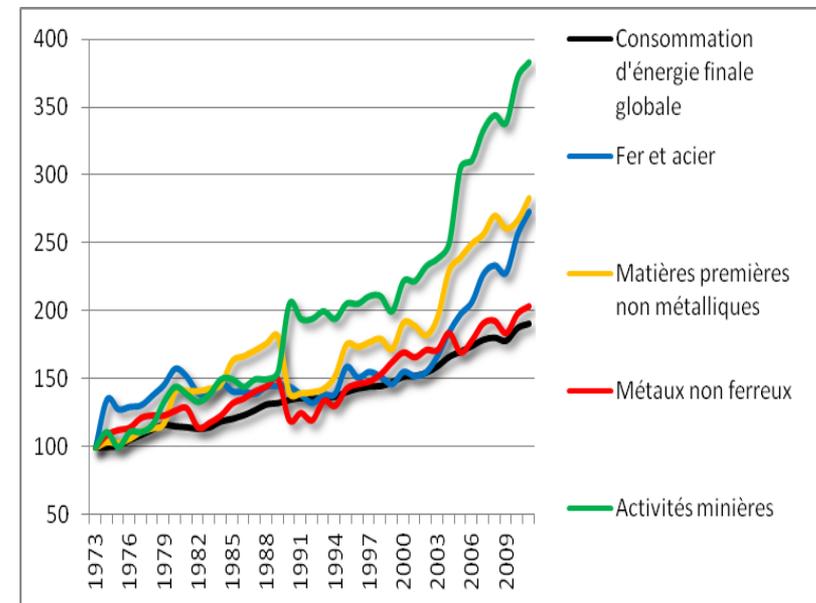
---

- ❑ Nécessite d'approfondir la compréhension de la connexion entre énergie et métaux.
- ❑ Peu de recherches ont porté sur l'analyse de la liaison dynamique entre le secteur des métaux et le secteur énergétique (Harmsen et al. (2013)) ainsi que le coût de très long terme de l'épuisement des métaux (Steen et Borg (2002)).
- ❑ Il existe potentiellement une dynamique de rétroaction positive comme évoquée par Bihouix et De Guillebon (2010) mais non mesurée jusqu'à présent.
- ❑ L'impact de l'épuisement des métaux a probablement un coût énergétique qu'il convient de prendre en compte pour déterminer le surplus énergétique dégagé par nos énergies décarbonnées.



# I. Un secteur des métaux appelant toujours plus d'énergie

- Une liaison très forte unit les métaux et l'énergie.
- Nos calculs sur 25 métaux nous amènent à la conclusion qu'environ **10% de l'énergie primaire mondiale est consacrée à l'extraction et la production des métaux.**
- A l'inverse, nous ne disposons pas de chiffres nous permettant d'établir la quantité de métaux appelée par le secteur énergétique. Mais certains auteurs estiment que 5 à 10% de la production de fer est à destination du secteur de l'énergie.
- Pour saisir la dynamique entre ces deux secteurs, nous nous basons sur les données sectorielles fournies par l'IEA depuis 1973.

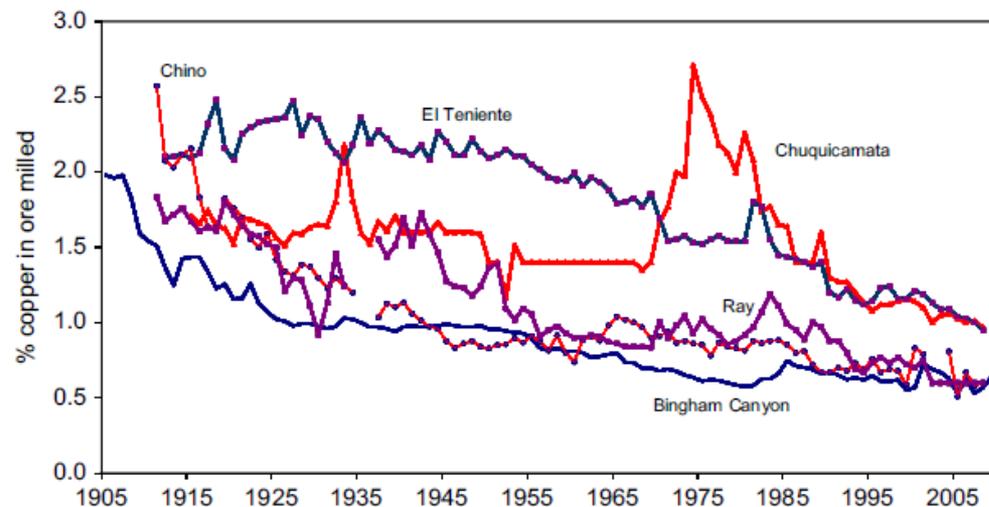


Evolution de la consommation énergétique en base 100=1973, Source : Auteurs

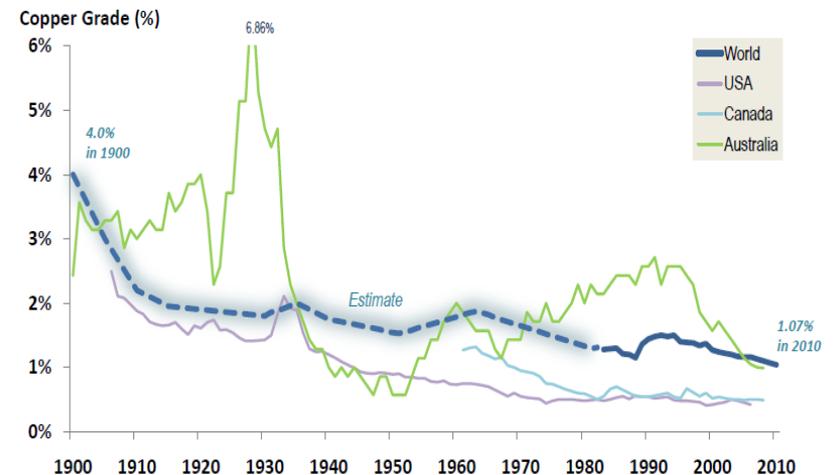


# I. Un secteur des métaux appelant toujours plus d'énergie

- ❑ Cette hausse plus rapide de l'énergie requise par le secteur de l'extraction minière ne peut pas s'expliquer par un unique effet volume car cet effet existe aussi dans d'autres secteurs. Il y a donc aussi un effet qualitatif.
- ❑ Cet effet qualitatif est visible si on l'on observe la teneur moyenne des minerais à l'échelle d'un gisement (Crowson, 2012), d'un pays (Mudd, 2010) ou du monde (Crowson, 2012 ; Schodde, 2010). **Cette teneur n'a de cesse de diminuer** et constitue l'une des conséquences les plus manifestes de l'épuisement.



Source : Crowson (2012)



Source : Schodde (2010)

## II. Méthodologie : l'énergie et l'EROI comme unité de mesure

---

Il existe principalement deux approches pour mesurer l'épuisement : **l'approche monétaire** de l'école néoclassique et **l'approche énergétique** de l'école biophysique.

Les prix de marché des énergies souffrent d'un certain nombre d'inconvénients (Hall et al., 2009) :

- ❑ Les prix sont influencés par des variables et des conditions actuelles (géopolitiques, politiques économiques, monétaires, taux de change...) indépendantes du niveau d'épuisement.
- ❑ Ils n'intègrent pas les externalités et incorporent la plupart du temps des biais dus aux subventions.
- ❑ Leur extrême volatilité en font des indicateurs de très faible qualité pour anticiper l'avenir.
- ❑ S'ajoute aussi l'ensemble des problèmes de mesures temporelles et spatiales de la monnaie (choix du déflateur, biais divers...).

C'est pourquoi nous optons pour **une approche énergétique de la valeur.**

---



## II. Méthodologie : l'énergie et l'EROI comme unité de mesure

---

**L'Energy Return On Investment (EROI)** est un indicateur pertinent de l'approche biophysique :

Energy in :  $\xrightarrow{\hspace{10em}}$   $EROI = \frac{E_{out}}{E_{in}}$   $\xleftarrow{\hspace{10em}}$  Energy out :  
Quantité d'énergie directe et Quantité d'énergie  
indirecte incorporée en Joules produite en Joules

### Comment évolue l'EROI des différentes sources d'énergie ?

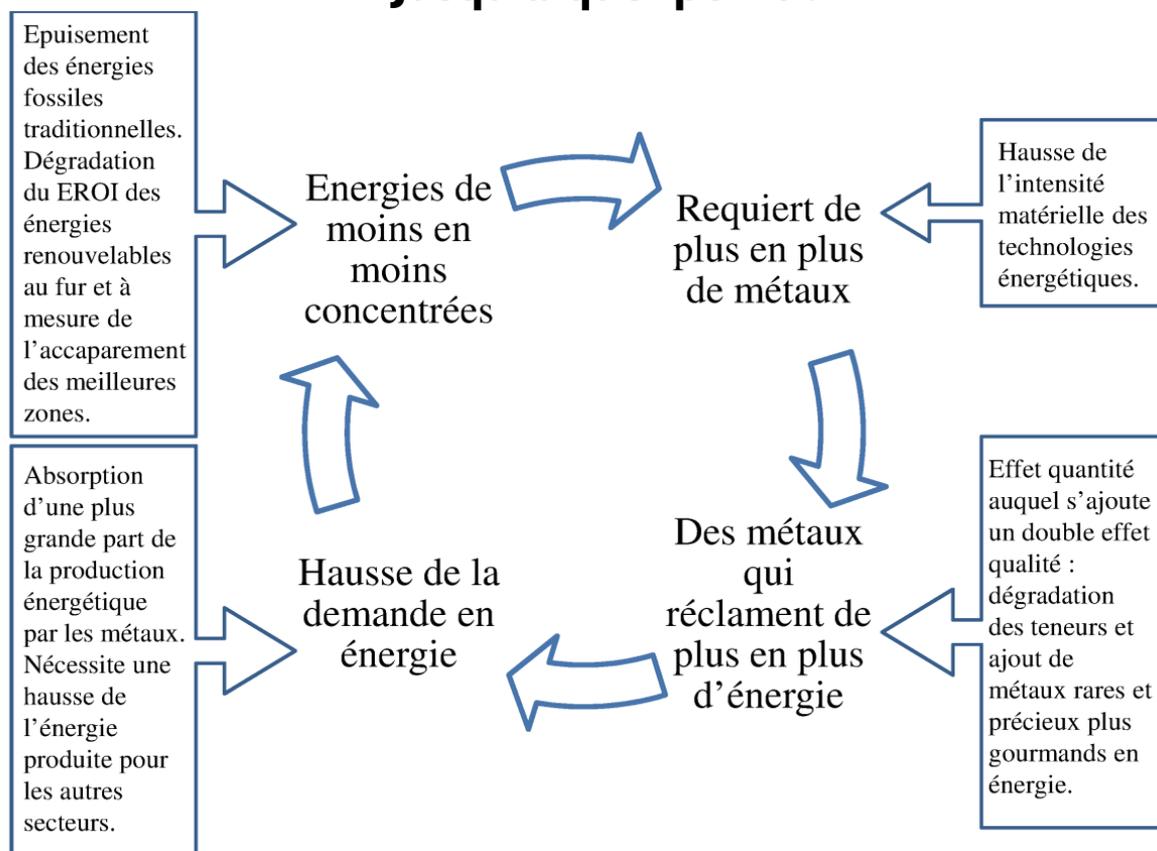
- ❑ Plusieurs auteurs ont montré que l'EROI se dégrade sans cesse pour les énergies carbonnées au fur et à mesure que nous les épuisons (Hall et al., 2014).
- ❑ EROI du pétrole américain a connu un maximum à 22,5:1 dans les années 50 pour aujourd'hui avoisiner les 10:1. Les sables bitumeux du Canada (pétrole non conventionnel) détiennent un EROI autour de 4-6:1.
- ❑ Les renouvelables possèdent des EROI très divers (de 1,5 à environ 35) mais il est fort plausible que ces derniers se dégradent également du fait de divers facteurs parmi lesquels on trouve l'épuisement des métaux.



## II. Méthodologie : l'énergie et l'EROI comme unité de mesure

**En effet sous l'impact de l'épuisement, les métaux consomment toujours plus d'énergie par tonne donc la quantité d'énergie en input va augmenter faisant décroître l'EROI.**

**Jusqu'à quel point ?**



# III. Evaluation de l'impact de l'épuisement des métaux : une application aux énergies renouvelables

---

Première approche : mesurer l'impact de l'épuisement du cuivre à 2050 sur l'EROI de différentes énergies renouvelables.

- 1<sup>ère</sup> étape : Mesurer la relation existante entre la production cumulée du cuivre et la teneur moyenne des gisements mondiaux ainsi qu'entre la teneur d'un gisement et sa consommation énergétique unitaire.
  
- 2<sup>ième</sup> étape : Faire des scénarios sur la production cumulée d'ici à 2050 fondés sur différentes hypothèses (population, PIB mondial, intensité en cuivre du PIB, recyclage).
  
- 3<sup>ième</sup> étape : En déduire l'évolution possible de la teneur moyenne donc de la consommation énergétique unitaire moyenne du cuivre.
  
- 4<sup>ième</sup> étape : Intégrer cette hausse du coût énergétique unitaire dans l'EROI de différentes énergies renouvelables.

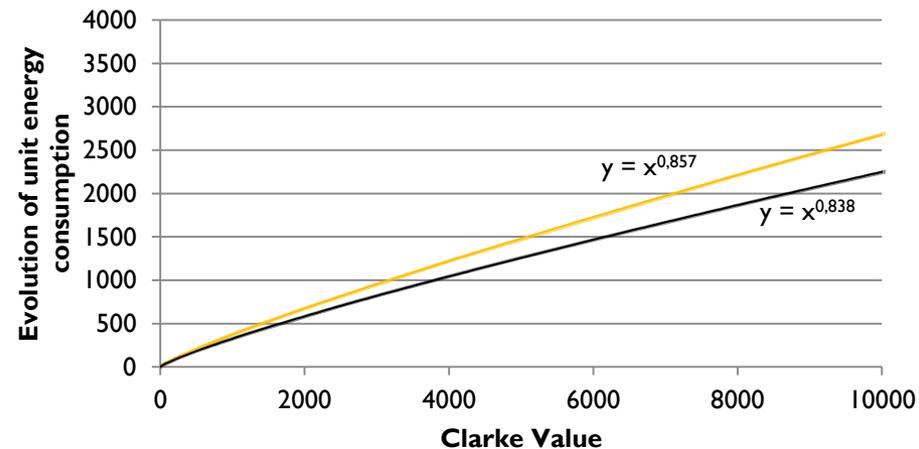
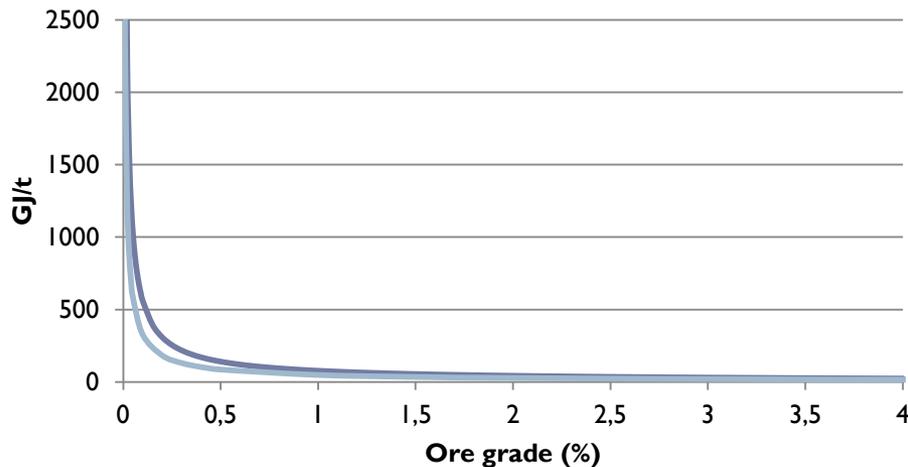




# III. Evaluation de l'impact de l'épuisement des métaux : une application aux énergies renouvelables

Nécessite une seconde approche différente car nous ne connaissons pas l'évolution des teneurs de tous les métaux.

Pour cela nous passons par **l'estimation de la Clarke Value** pour différents métaux et **sa relation vis-à-vis de la hausse de la consommation énergétique**. Cette valeur exprime le rapport entre la concentration moyenne d'exploitation économique des gisements d'un métal et sa teneur moyenne dans la croûte terrestre. Plus ce chiffre est élevé, plus l'épuisement du métal nous expose au risque d'une forte hausse de la consommation énergétique unitaire.

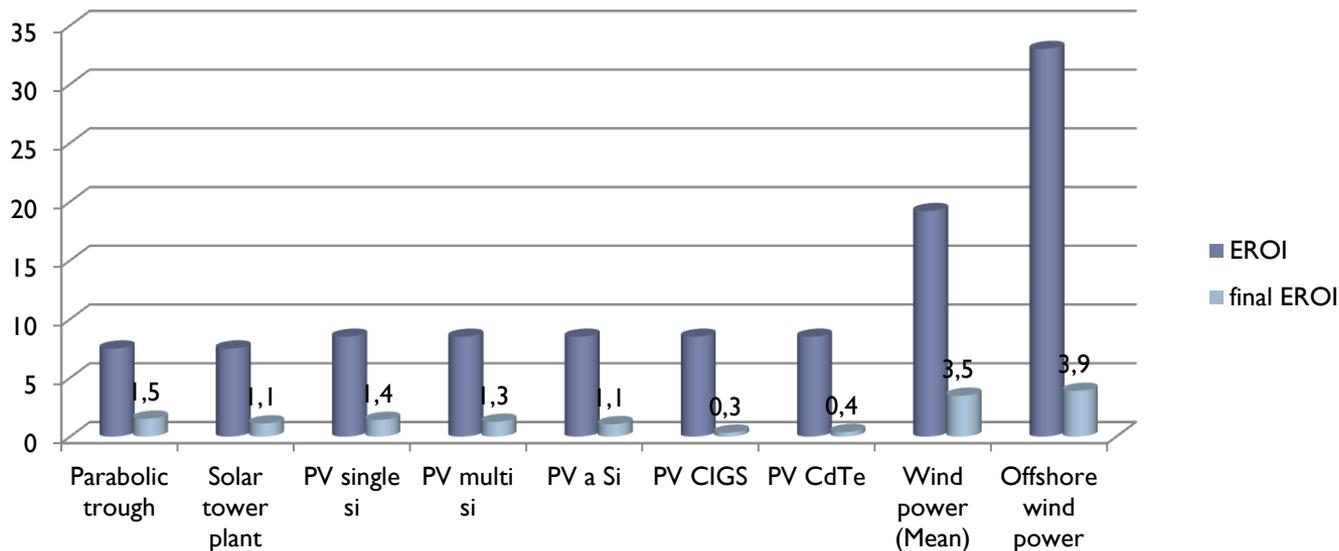


— Calibrated on data of Norgate and Jahanshahi (2010)  
— Calibrated on 39 metals



# III. Evaluation de l'impact de l'épuisement des métaux : une application aux énergies renouvelables

- En connaissant les différentes intensités en métaux de chaque technologie, nous pouvons en déduire la hausse de l'énergie requise en input une fois tous les métaux parvenus à leur concentration moyenne dans la croûte terrestre.
- Les résultats sont assez radicaux car **les technologies renouvelables ne dégagent alors quasiment plus aucun surplus énergétique (<1) ou au mieux de très faibles surplus (<4).**



# III. Evaluation de l'impact de l'épuisement des métaux : une application aux énergies renouvelables

---

Nos scénarios sont optimistes sur plusieurs points :

- ❑ **La barrière minéralogique de Skinner.** Rien n'assure que la relation entre teneur et consommation énergétique d'extraction soit continue.
- ❑ **Les gisements à venir** prendront probablement des formes beaucoup **plus réfractaires**, contiendront **plus d'impuretés**, seront **plus profonds** et nécessiteront un broyage plus fin (UNEP, 2013).
- ❑ **On ne considère pas ici les autres impacts environnementaux** liés à l'épuisement des métaux (hausse des déchets, augmentation de la surface, besoin en eau, émission de gaz à effet de serre...).
- ❑ Notre analyse **n'inclut pas non plus l'ensemble des besoins énergétiques des matériaux** (métaux et non métaux) **nécessaire au fonctionnement de l'infrastructure** entourant le système énergétique isolé (stockage, transmission, distribution, utilisation de l'énergie).

D'un autre coté nous **pouvons atténuer cet impact grâce** :

- ❑ **Au recyclage.**
- ❑ **A la dématérialisation.**
- ❑ A une **réduction de la consommation unitaire énergétique par métal** sous l'effet de l'efficacité énergétique.
- ❑ **A la substitution technique de métaux géologiquement rares par des métaux communs.**
- ❑ **A la coproduction.**



# Conclusion

---

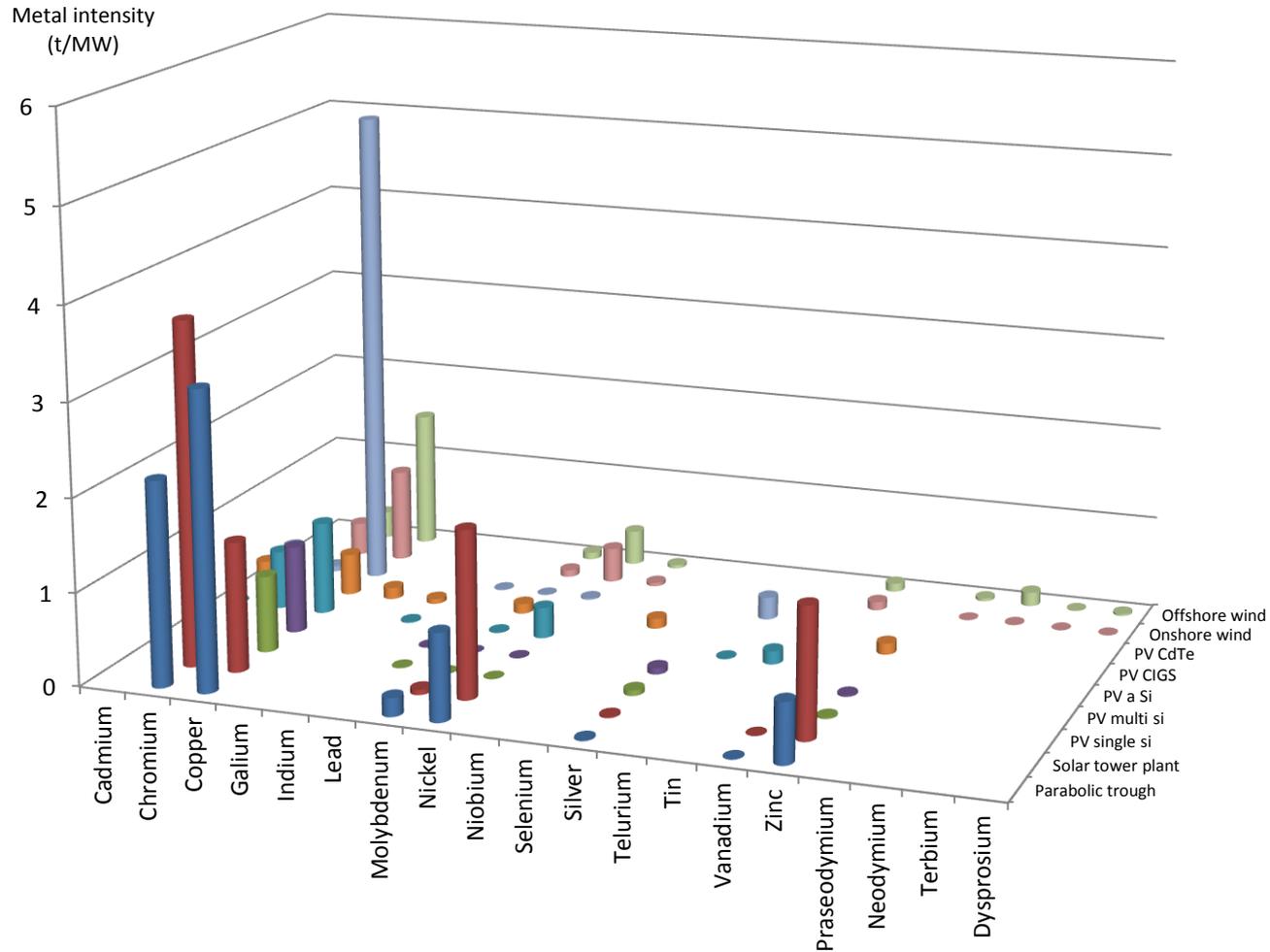
- ❑ Nos travaux montrent l'intérêt de porter notre attention sur **l'épuisement qualitatif** des ressources naturelles plus que sur l'épuisement quantitatif.
- ❑ Ils soulignent aussi l'importance d'étudier des **problématiques intersectorielles à une échelle très large**. Des raisonnements issus d'études très sophistiquées mais intra-sectorielles débouchent souvent sur des solutions reportant le problème vers un autre secteur.
- ❑ Nous montrons également que la transition énergétique telle qu'opérée aujourd'hui ne constitue absolument pas une condition suffisante de soutenabilité de nos sociétés car les technologies renouvelables actuelles dégagent un surplus énergétique trop faible pour pouvoir incorporer des métaux à la teneur de la croûte terrestre.
- ❑ **Une telle transition vers les « renouvelables » pourrait donc résulter en un transfert de la problématique de l'épuisement des énergies fossiles vers les stocks épuisables de métaux.**
- ❑ Une solution plutôt confortable peut consister à mobiliser au mieux les leviers d'atténuations évoqués précédemment. Une seconde voie, au contraire, peut s'interroger sur la poursuite de la croissance du PIB et sur les liaisons réelles existantes entre croissance du PIB, richesses et bien être.



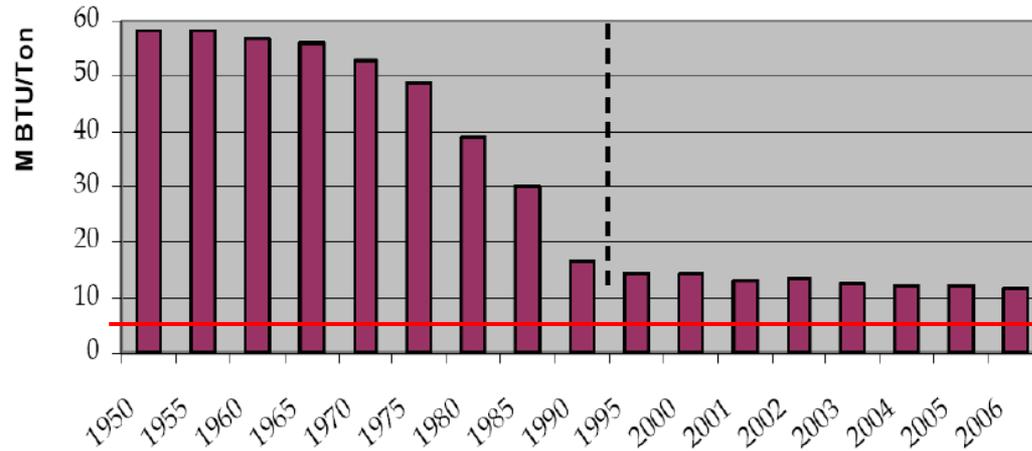
Merci de votre attention.  
Questions?



# Annexes



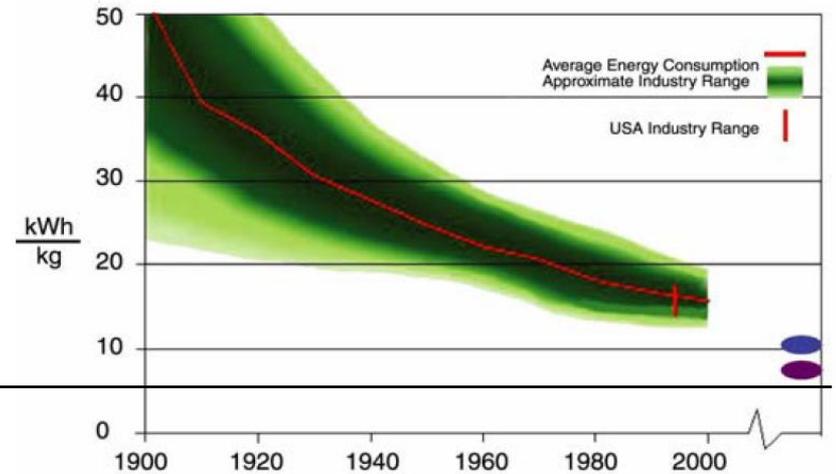
# Annexes



Source : World Steel Association

Minimum énergétique théorique  
5,37 M BTU/tonne

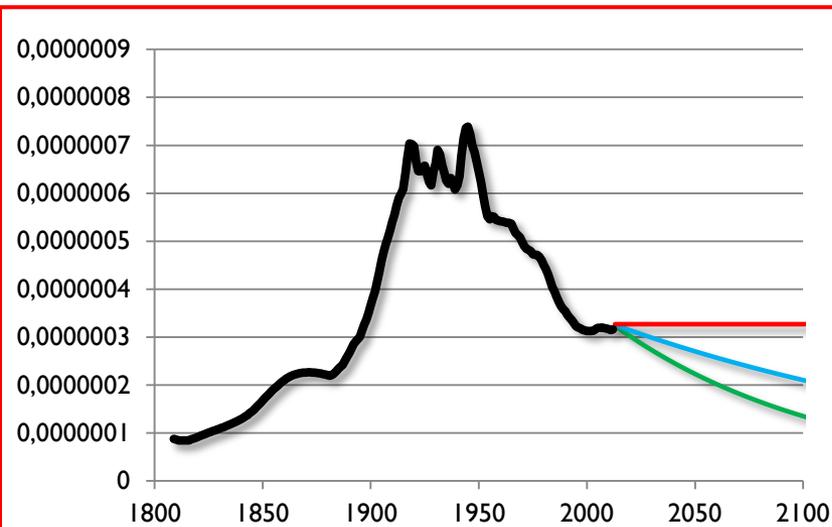
Minimum énergétique théorique  
5,99 kWh/kg



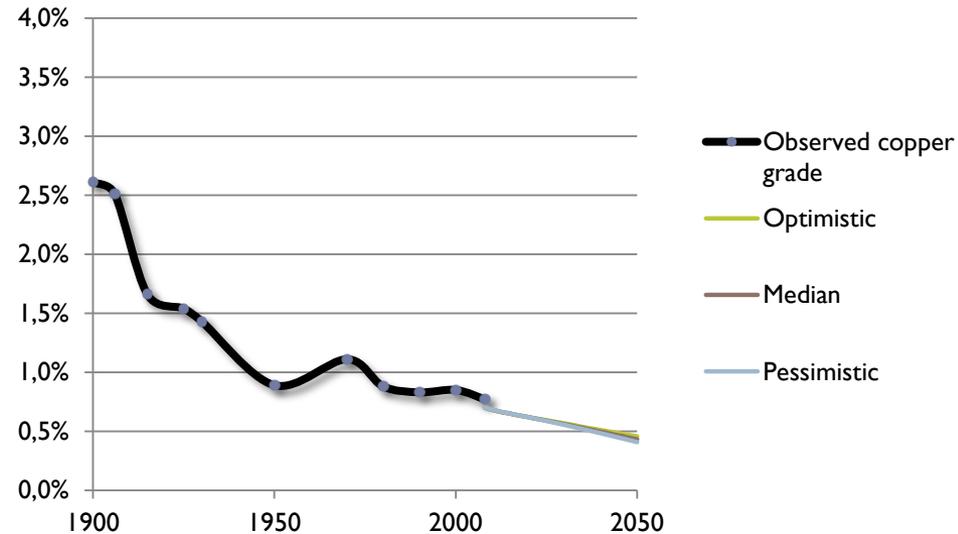
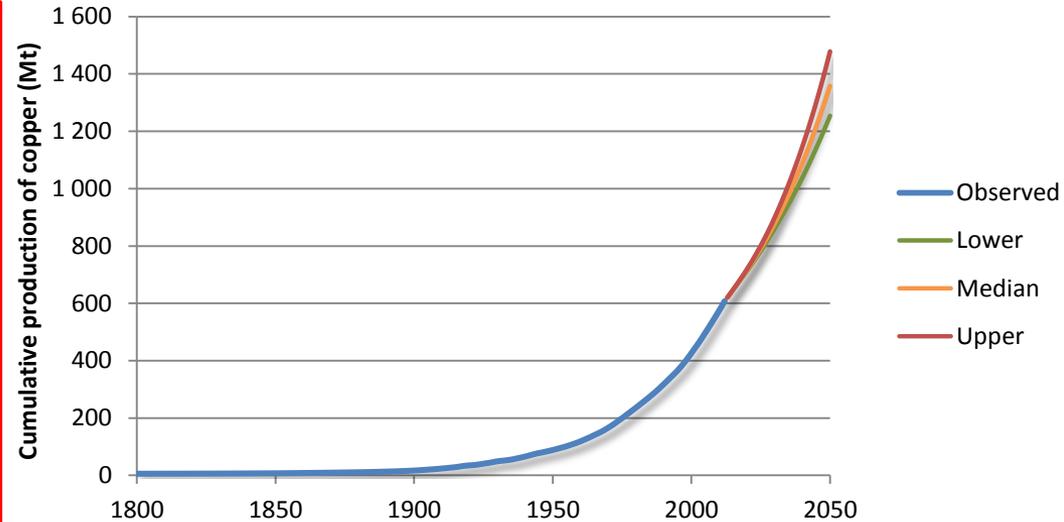
- International Aluminum Institute, 2001
- █ R. Burkin, "Production of Aluminum and Alumina," Haupin, *History of Energy Consumption by Hall-Heroult Cells*, pages 106-113 in the "Hall-Heroult Centennial" book
- █ "Life Cycle Inventory Report for the North American Aluminum Industry," The Aluminum Association, Washington, DC (1998)
- Advanced Anode & Cathode Systems
- Alternative Technologies

Source : US DOE (2007)

# Annexes



Scénario pessimiste = pas de progrès technique  
 Scénario médian = progrès technique moyen  
 Scénario optimiste = forte dématérialisation sous l'effet de rareté et de politiques publiques actives



# Annexes

Relation entre le EROI et le prix de marché de l'énergie

