

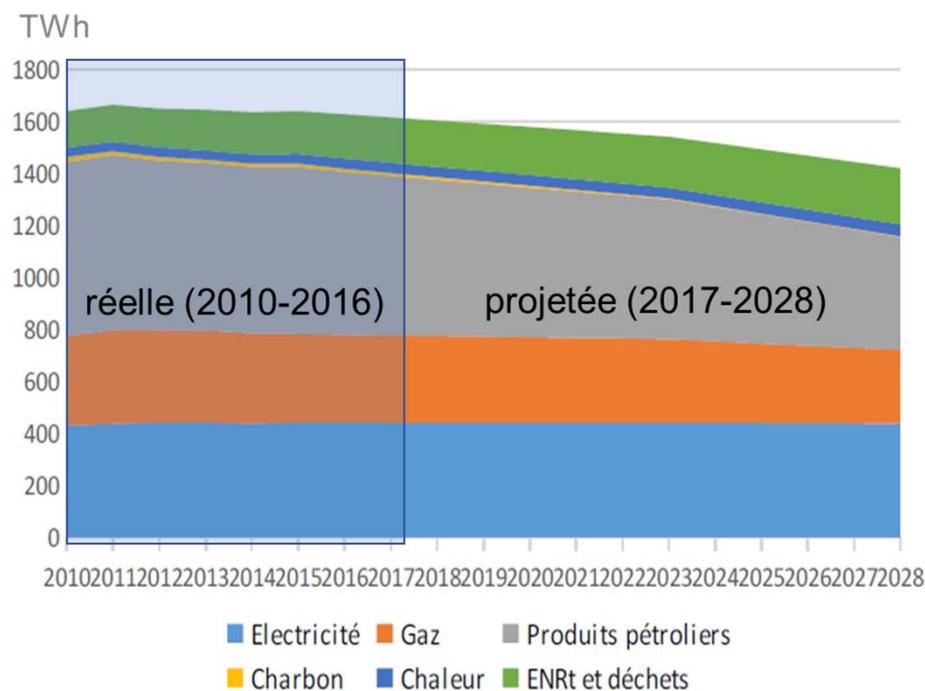
# ECLAIRER LE NEXUS ENERGIE-MATIÈRES PREMIÈRES POUR LA TRANSITION ÉNERGÉTIQUE EN FRANCE

Jacques Villeneuve  
18 juin 2019

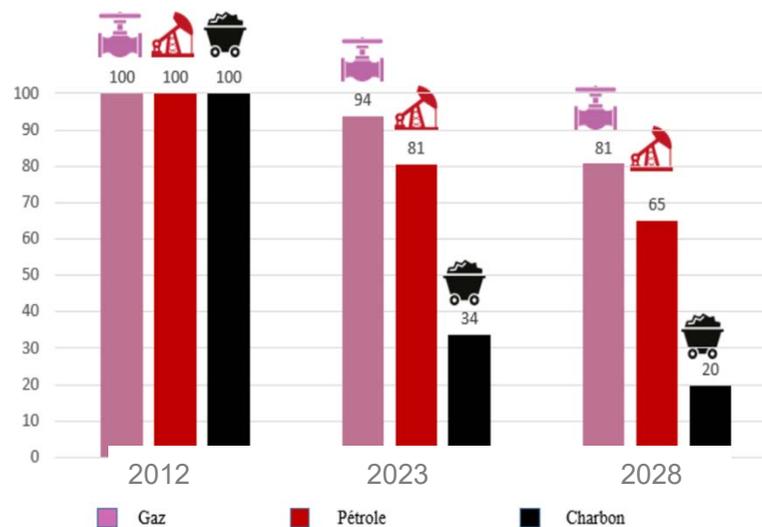


## Contexte

- La loi de transition énergétique (août 2015) fixe des objectifs pour la France
  - ➔ Réduction des consommations énergétiques et des émissions GES
  - ➔ Réduction de la part de nucléaire et des énergies fossiles
  - ➔ Développement des énergies renouvelables



Evolution de la consommation énergétique par vecteur



Réduction de la consommation primaire d'énergie fossile par vecteur énergétique

# Contexte

## PPE

### Consommation finale d'énergie :

- - 7% en 2023 et - 14% en 2028 /t 2012

### Consommation primaire des énergies fossiles :

- - 20% en 2023 et - 35% en 2028 /t 2012

### Émissions de gaz à effet de serre issues de la combustion d'énergie :

- -14% en 2023 et -30% en 2028 /t 2016

### Consommation de chaleur renouvelable :

- +25% en 2023 et entre +40 et +60% en 2028 /t 2016

### Production de gaz renouvelables :

- Production de biogaz injecté en 2028 de 35 à 55 fois la production de 2017

### Capacités de production d'électricité renouvelables installées :

- +50% en 2023, doublement en 2028/t 2017

### Capacités de production d'électricité nucléaire :

- 4 à 6 réacteurs fermés d'ici 2028, 14 réacteurs fermés d'ici 2035 (date d'atteinte d'une part de 50 % d'électricité nucléaire dans le mix électrique)

## Effets concrets en 2023

- ❑ 2,5 millions de logements rénovés (rénovations performantes ou très performantes)
- ❑ Remplacement de 10 000 chauffages charbon (la moitié de ceux restants) et 1 million de chaudières fioul (sur un parc restant de 3,5 millions) par des moyens de production de chaleur renouvelable ou des chaudières au gaz à très haute performance énergétique
- ❑ 9,5 millions de logements chauffés au bois avec un appareil efficace
- ❑ 1,2 millions de voitures particulières électriques en circulation (électriques et hybrides rechargeables) et plus de 100 000 points de recharge publics
- ❑ 20 000 camions au gaz en circulation
- ❑ Toutes les centrales électriques fonctionnant exclusivement au charbon arrêtées
- ❑ 2 réacteurs nucléaires arrêtés (Fessenheim)
- ❑ 65 000 à 100 000 sites photovoltaïques en autoconsommation

# Ordres de grandeur

## PV

- Environ 1 MWc par hectare
- Facteur de charge +/- 15% (\*)
- Environ 8 ha/MW eq
  - 5200 ha (52 km<sup>2</sup>, la moitié de Paris) pour remplacer un réacteur nucléaire de 1 GW fonctionnant à 75%(\*)

## Eolien

-  Environ 100 t d'acier par MW
-  Facteur de charge +/- 22% (\*)
  -  Environ 1700 éoliennes de 2 MW pour remplacer un réacteur nucléaire de 1 GW fonctionnant à 75%, soit 340000 t d'acier, 50 fois l'acier de la tour Eiffel
  -  L'IM acier d'une centrale nucléaire est de 30 à 60 t/MW, soit 30000 à 60000 t d'acier pour 1 GW

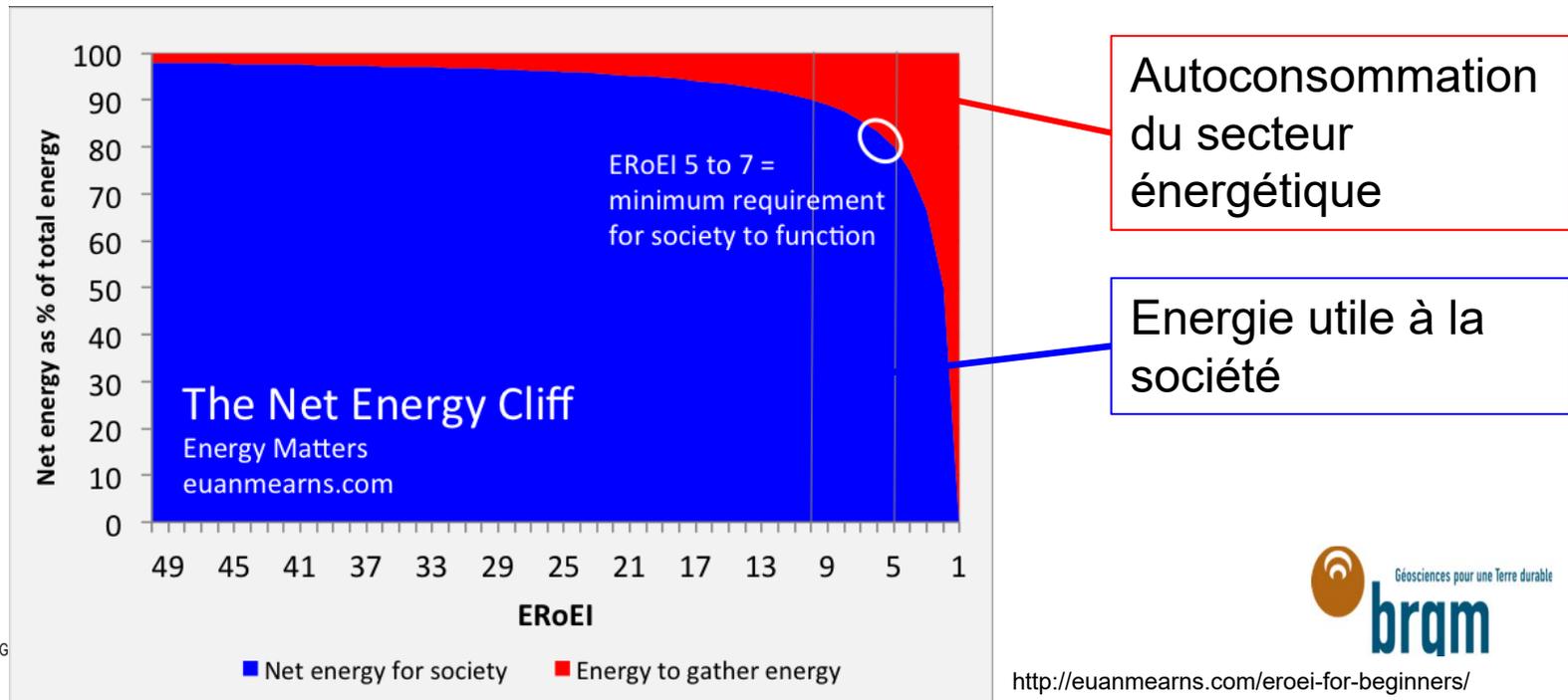
 Question : les énergies renouvelables sont-elles plus consommatrices en matières premières minérales et métalliques que les technologies du mix énergétique actuel ?

## SURFER : impacts « matières » de la TE

- Evaluation des besoins directs et indirects au cours du temps
  - ➔ Quelle consommation des matières premières pour la TE ?
  - ➔ Quels besoins en énergie, eau et sols ?
  - ➔ Quelle évolution de ces consommations avec l'évolution du mix énergétique français et mondial ?
- Faisabilité de la TE
  - ➔ Que représentent ces besoins dans la consommation nationale ?
  - ➔ Comment interagit le contexte mondial (transition énergétique globale) ?
- Quels impacts ?
  - ➔ Combien, où, quand ?
  - ➔ Bilan ? Passage d'une dépendance des énergies fossiles à une dépendance des métaux ? À quel terme ?

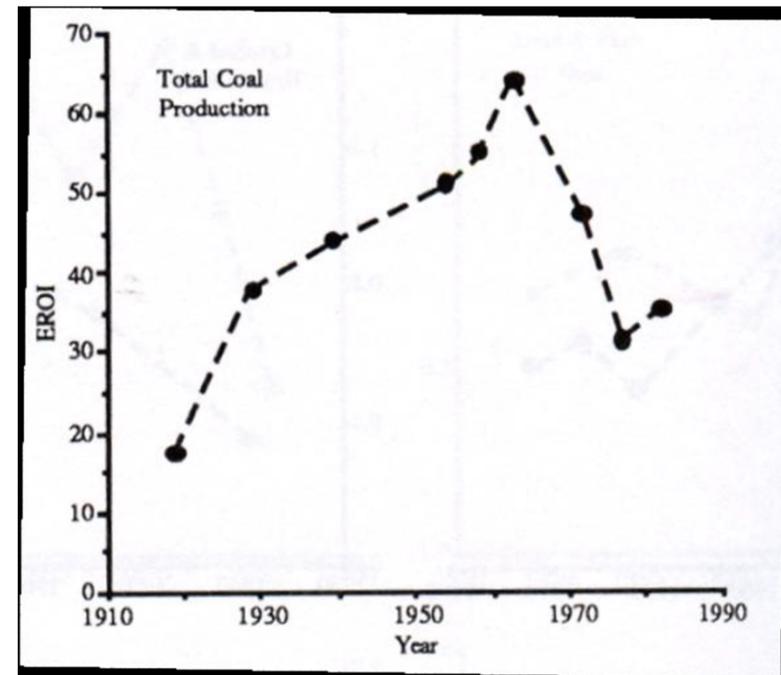
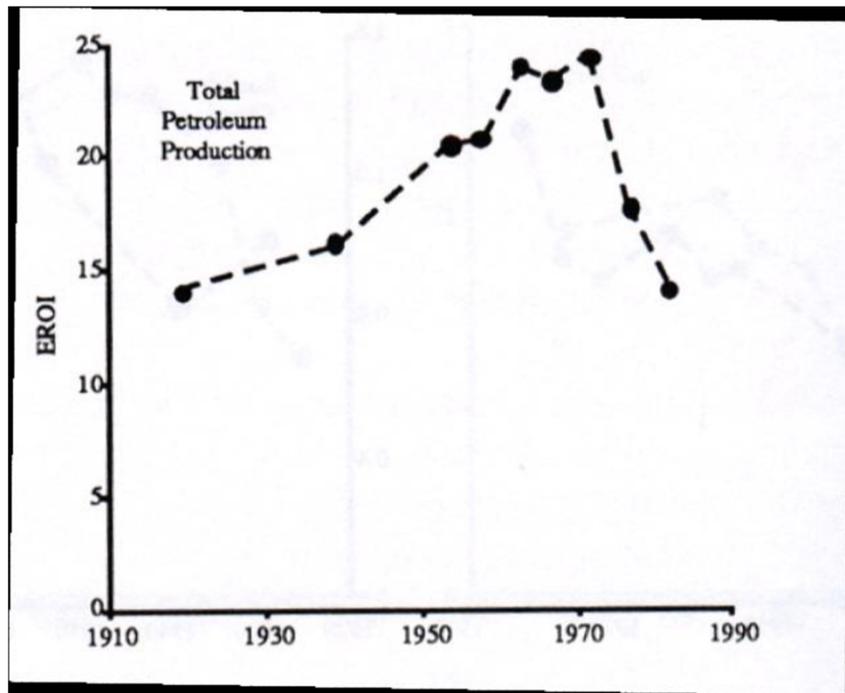
# Pour produire de l'énergie, il faut de l'énergie

- Concept d'EROI (Energy return on [energy] invested) :
  - $E_{out}$  : énergie produite,
  - $E_{in}$  : énergie investie pour cette production
  - $EROI = E_{out}/E_{in}$
- Energie nette relative
  - $(E_{out}-E_{in})/E_{out} = 1 - 1/EROI$

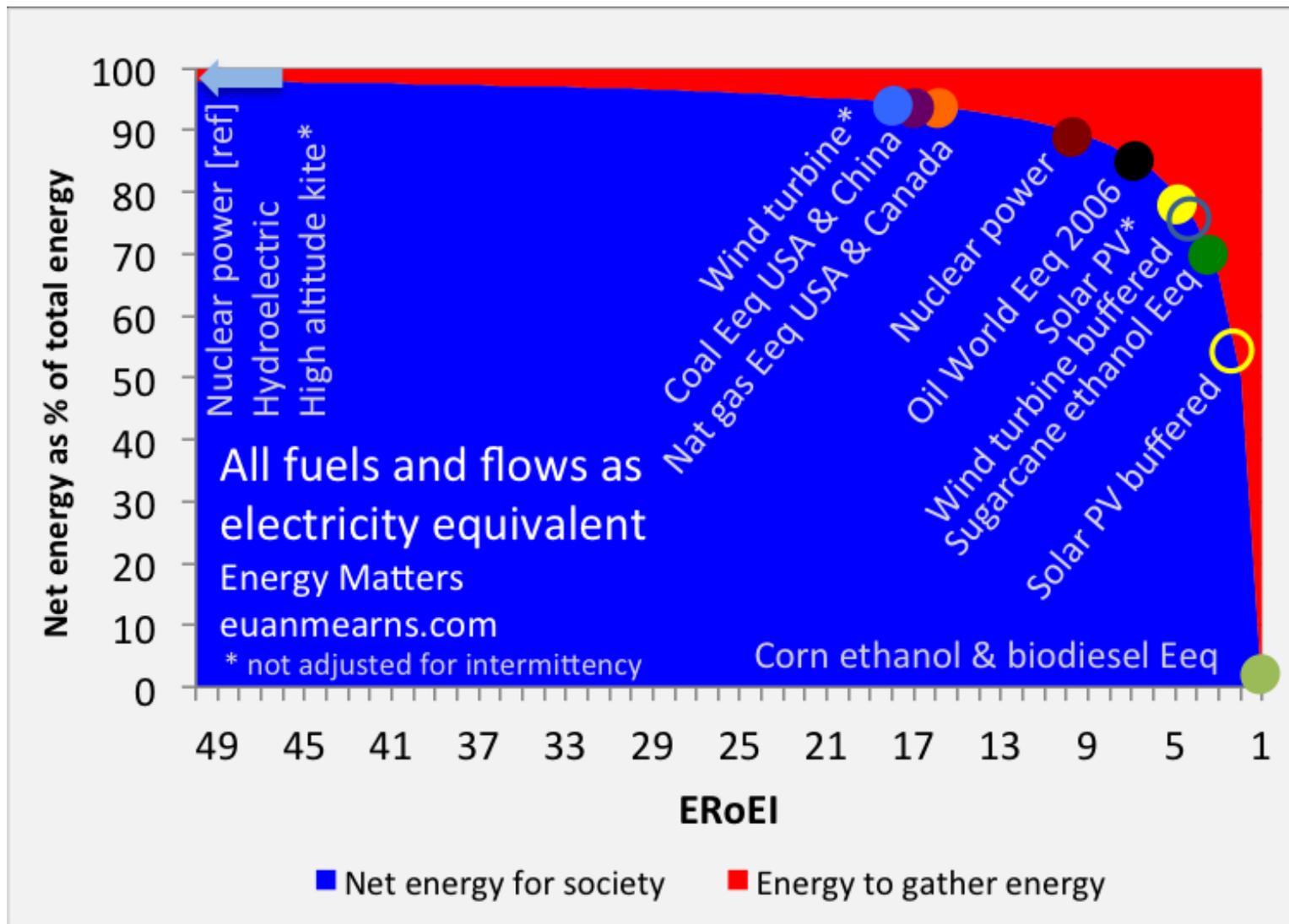


# L'EROI varie dans le temps et dans l'espace

- Disponibilité de gisements
- Technologies

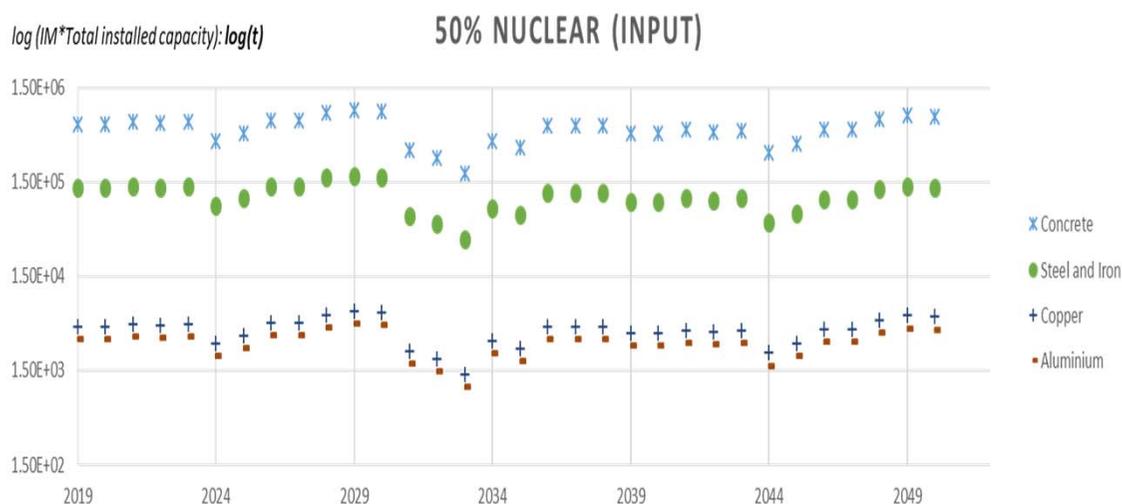


# Energie nette de la production d'énergie selon les technologies



# Pour produire de l'énergie, il faut des métaux

- Intensité matière de diverses technologies de production d'énergie (kg/MW)
- La demande totale en métaux pour la transition énergétique est fonction de la vitesse de déploiement des technologies (scénarios)



	Wind turbine with gearbox	Wind turbine with direct drive	PV cristalline-Si module	PV CIGS	PV CdTe	Concent. Solar Power	Geothermal energy
Ag			20	10	10	16	
Al	1000	400	10 000	100	100	740	
Au							
B	0,8						
Cd				1	95		
Ce/La							
Co							
Cr	850					2 200	64 405
Cu	2 000	2 500	2 500	20		3 200	3 604
Dy	4	15					
Fe	100 000	100 000					600 000
Ga				5			
Gd/Sm/Tb	0.8	3					
In				35	15		
Li							
Mg				54			
Mn	55	50				2000	4325
Mo	125	125				200	7209
Nd	50	200					
Ni	600	500				940	120 155
Pb							
Pr	4						
Pt/Pd							
Se				40			
Si			5 000				
Sn			500	6	21		
Ta							64
Te					95		
Ti						25	1 634
V							
Zn	5500	5500		30			

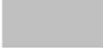
Elmer Rietveld, Hettie Boonman, Toon van Harmelen, Mara Hauck, Ton Bastein, GLOBAL ENERGY TRANSITION AND METAL DEMAND, TNO, 2018

bte

Matières premières pour l'énergie

1																	2	0						
H																	He	0						
3	4																	5	6	7	8	9	10	0
Li	Be																	B	C	N	O	F	Ne	0
11	12																	13	14	15	16	17	18	0
Na	Mg																	Al	Si	P	S	Cl	Ar	0
19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36	0						
K	Ca	Sc	Ti	V	Cr	Mn	Fe	Co	Ni	Cu	Zn	Ga	Ge	As	Se	Br	Kr	0						
37	38	39	40	41	42	43	44	45	46	47	48	49	50	51	52	53	54	0						
Rb	Sr	Y	Zr	Nb	Mo	Tc	Ru	Rh	Pd	Ag	Cd	In	Sn	Sb	Te	I	Xe	0						
55	56	71	72	73	74	75	76	77	78	79	80	81	82	83	84	85	86	0						
Cs	Ba	Lu	Hf	Ta	W	Re	Os	Ir	Pt	Au	Hg	Tl	Pb	Bi	Po	At	Rn	0						
87	88	103	104	105	106	107	108	109	110	111	112	113	114	115	116		118	0						
Fr	Ra	Lr	Rf	Db	Sg	Bh	Hs	Mt	Ds	Rg	Uub	Uut	Uuq	Uup	Uuh		Uuo	0						

Lanthanides	57	58	59	60	61	62	63	64	65	66	67	68	69	80
Terres Rares'	La	Ce	Pr	Nd	Pm	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Hm	Er	Tm	Yb
Actinides	89	90	91	92	93	94	95	96	97	98	99	100	101	102
	Ac	Th	Pa	U	Np	Pu	Am	Cm	Bk	Cf	Es	Fm	Md	No

	Stockage de l'énergie		Production et transport de l'électricité		Eclairage
	Connectique		Industrie électrique nucléaire		
	Economies d'énergie		Photovoltaïque		
	Catalyse (piles à combustible)		Aimants permanents		

# Pour produire des métaux, il faut de l'énergie

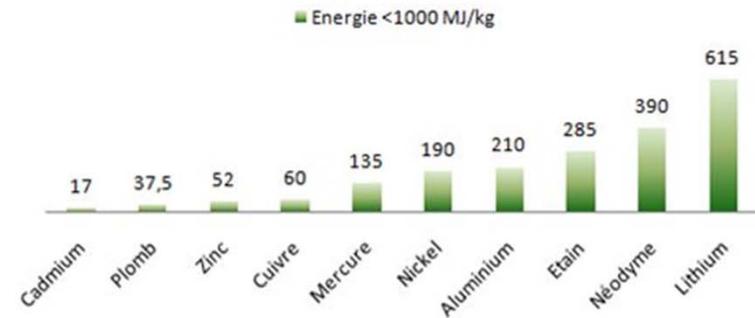
Metal	Process	Total energy (MJ/kg)
Iron/steel	BF/BOF <sup>2</sup>	22
Aluminium	Electrolytic <sup>3</sup>	211
Copper	Pyromet <sup>4</sup>	33
	Hydromet <sup>5</sup>	64
Lead	BF <sup>6</sup>	20
	ISF <sup>7</sup>	32
Zinc	Electrolytic <sup>8</sup>	48
	ISF	36
Nickel	Pyromet <sup>9</sup>	114
	Hydromet <sup>10</sup>	194

† E Norgate and W J Rankin, The role of metals in sustainable development, CSIRO Minerals, 2007

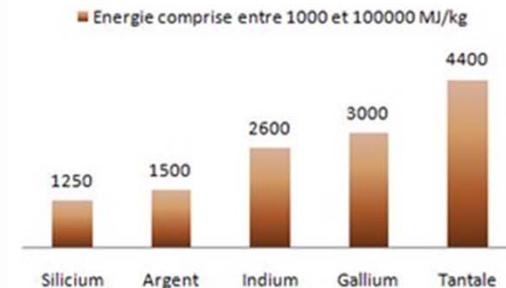
Material Costs	GJ/tonne
Aluminum	241.2
	100.2
	272.2
	11.7 <sup>b</sup> –140
Steel	32.4
	9.43 <sup>c</sup> –25.2 <sup>d</sup>
Copper	200.2
	93.7
	104.4
	51.7–179.7
	0.08–255.7
Cement	5.5
Iron Ore	0.34–2.9
Stone	0.021–0.057
Limestone	0.034
Lead	1.4–31.1
Zinc	76
Phosphate	0.083–0.349

David J. Murphy, Charles A.S. Hall, Michael Dale and Cutler Cleveland, Order from Chaos: A Preliminary Protocol for Determining the EROI of Fuels (2011): Sustainability 2011, 3, 1888-1907; doi:10.3390/su3101888

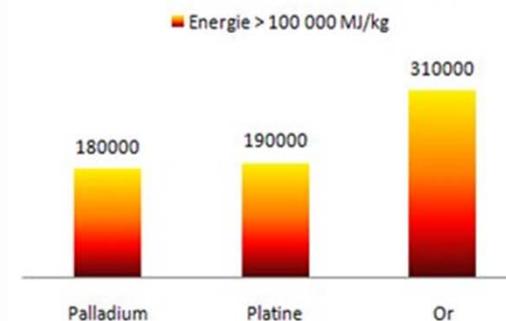
## Énergie nécessaire à la production de métal vierge



## Énergie nécessaire à la production de métal vierge



## Énergie nécessaire à la production de métal vierge

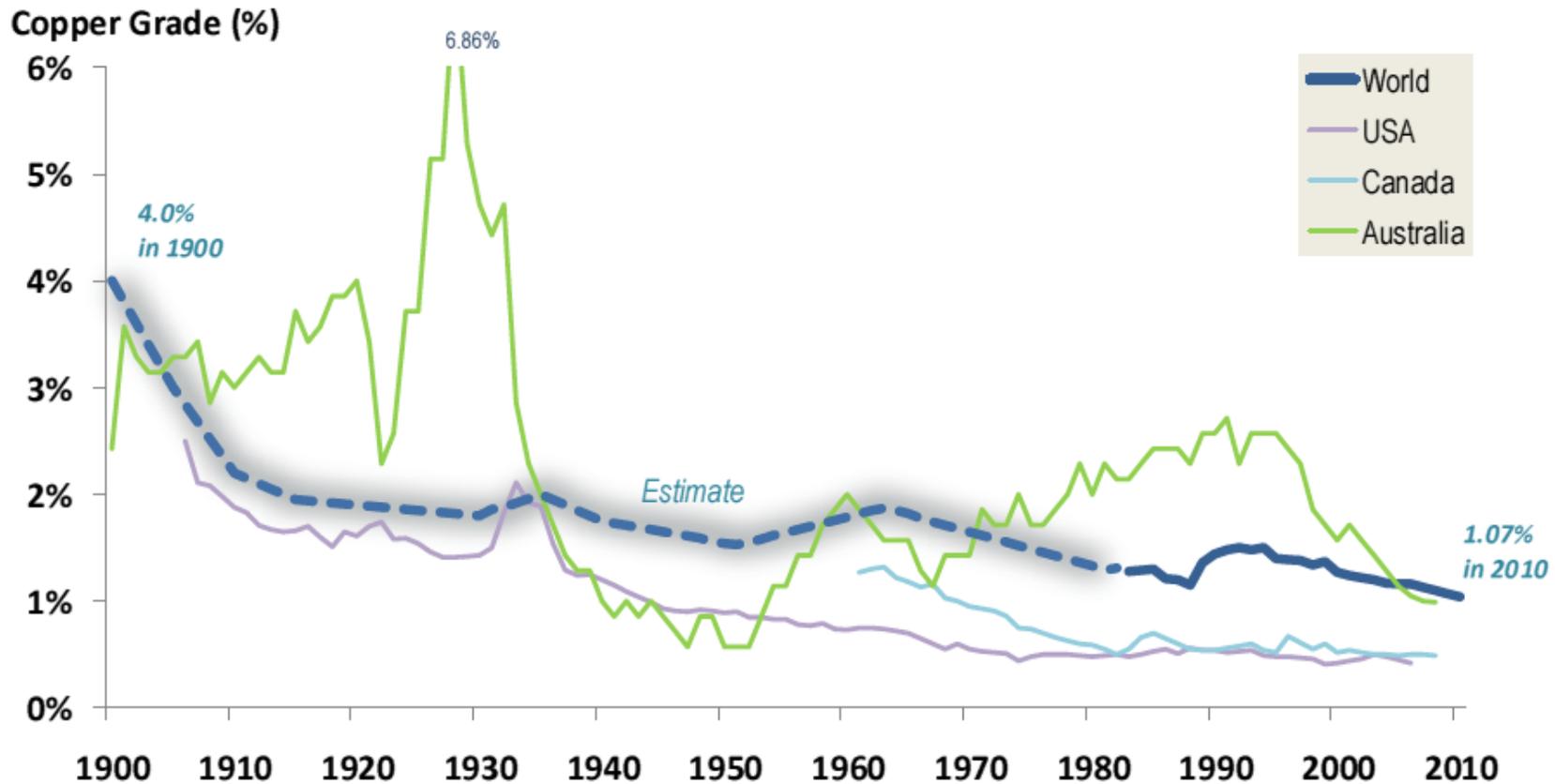


<https://ecoinfo.cnrs.fr/2014/09/03/2-lenergie-des-metaux/>

# On exploite en premier les gisements les plus rentables

## Ore grades mined have declined over time

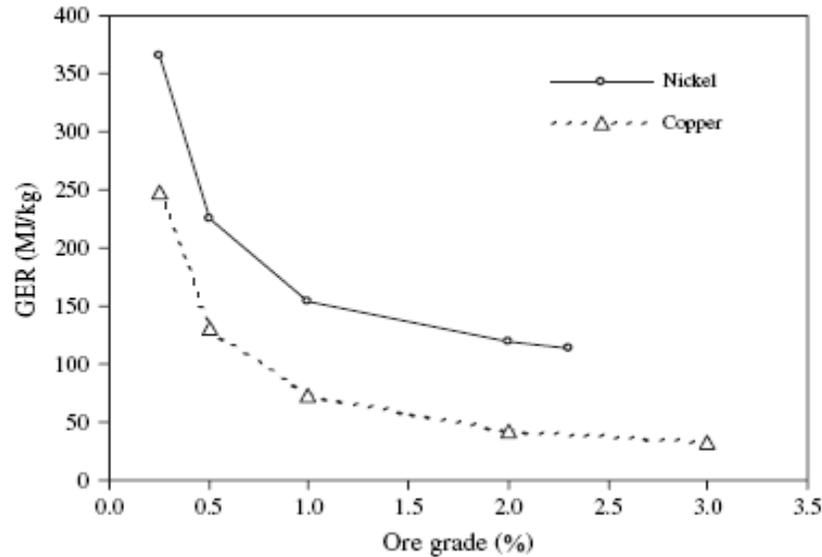
Copper ore grade for World and selected countries: 1900-2008



Sources: USGS, Mudd (2009)  
Brook Hunt, UBS

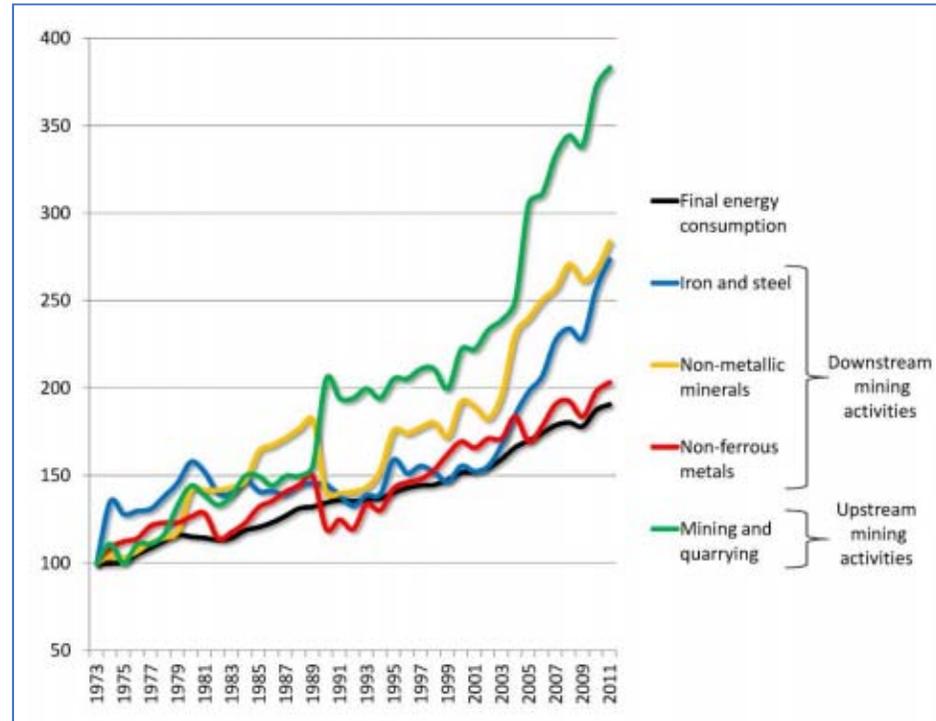
Note: Rise in ore grade in Australia from 1972 onwards is due to startup of the high-grade Olympic Dam mine

# Pour produire des métaux, il faut (de plus en plus) d'énergie



Energy consumption for copper and nickel production vs. ore grade

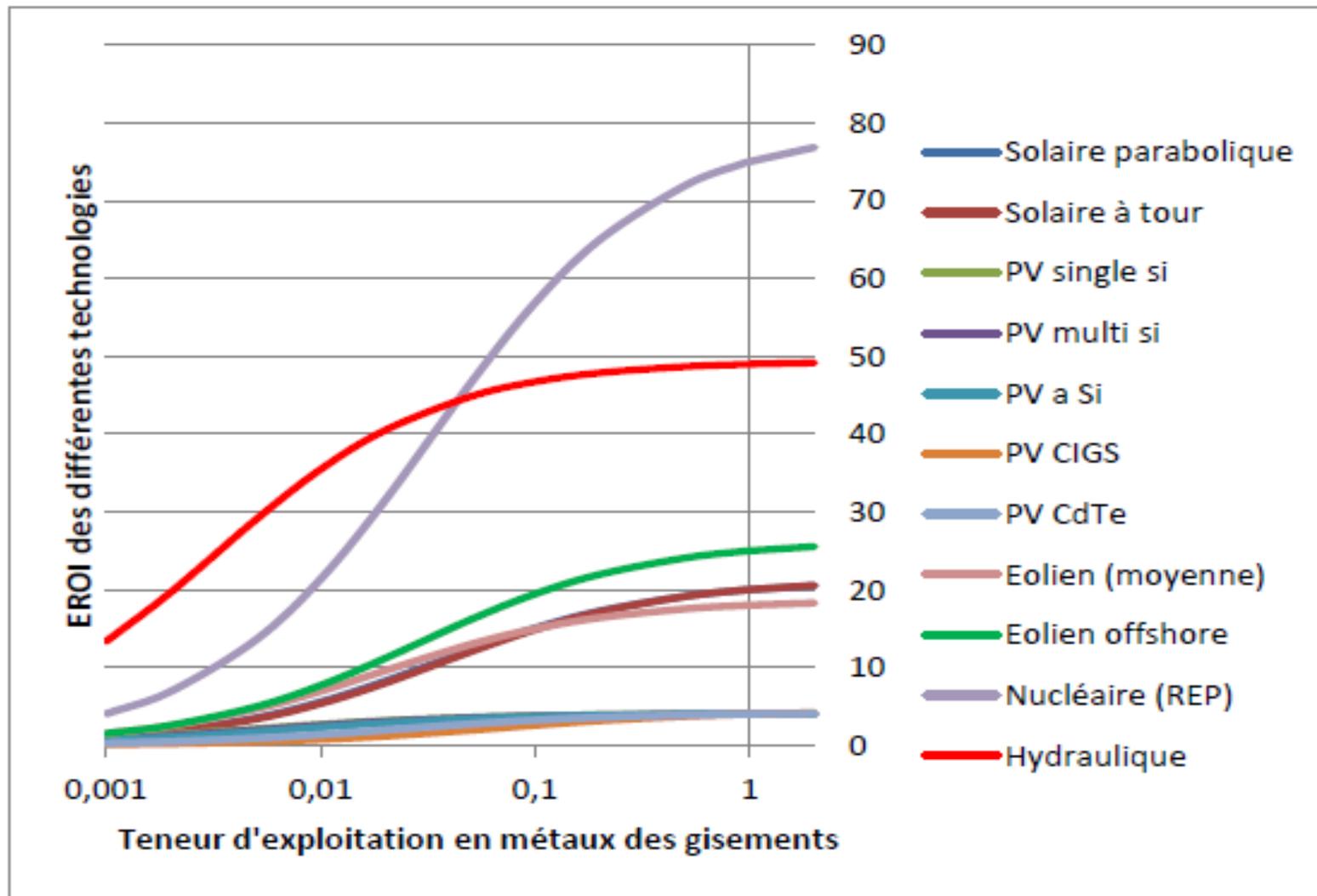
T.E. Norgate et al. / Journal of Cleaner Production 15 (2007) 838-848



Final energy consumption of different sectors and the global economy

Florian Fizaine, Victor Court. Renewable electricity producing technologies and metal depletion: A sensitivity analysis using the EROI. Ecological Economics, Elsevier, 2015, 110, pp.106-118. [ff10.1016/j.ecolecon.2014.12.001](https://doi.org/10.1016/j.ecolecon.2014.12.001) hal-01170989

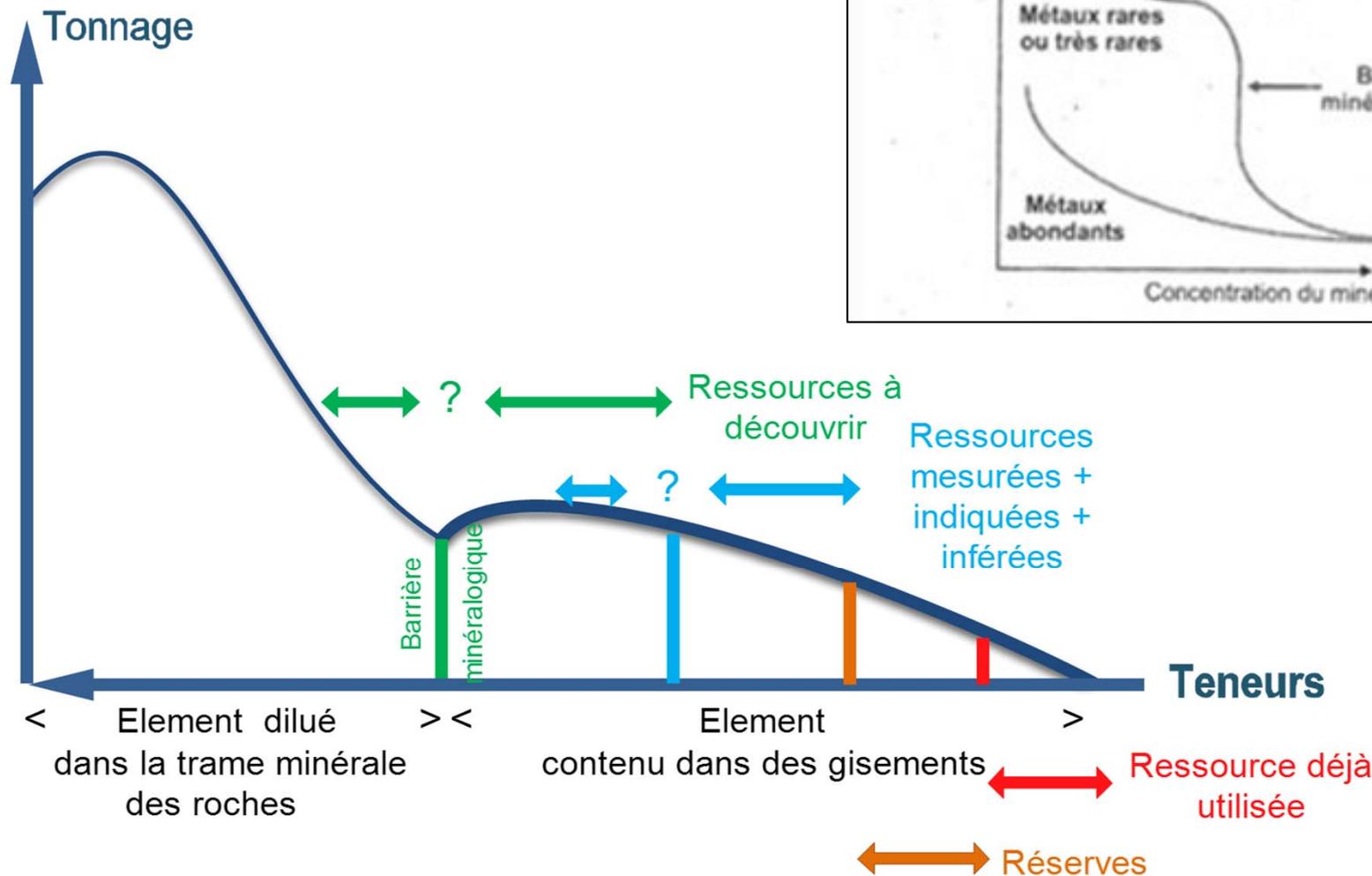
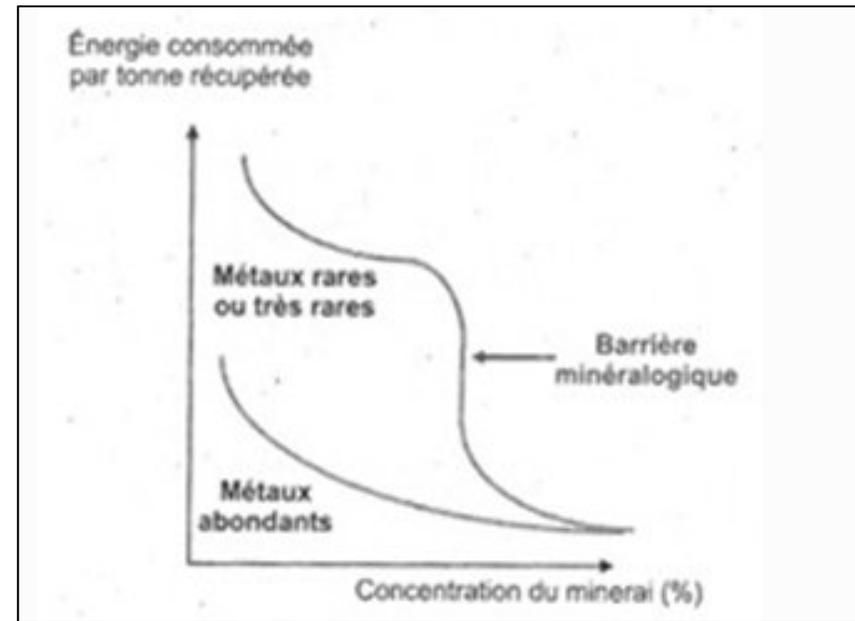
# L'énergie utilisée pour la production des métaux à partir de gisements plus pauvres dégrade l'EROI



Florian Fizaine. Analyses de la disponibilité économique des métaux rares dans le cadre de la transition énergétique. Economies and finances. Université de Bourgogne, 2014. French. <NNT : 2014DIJOE004>. <tel-01127141>

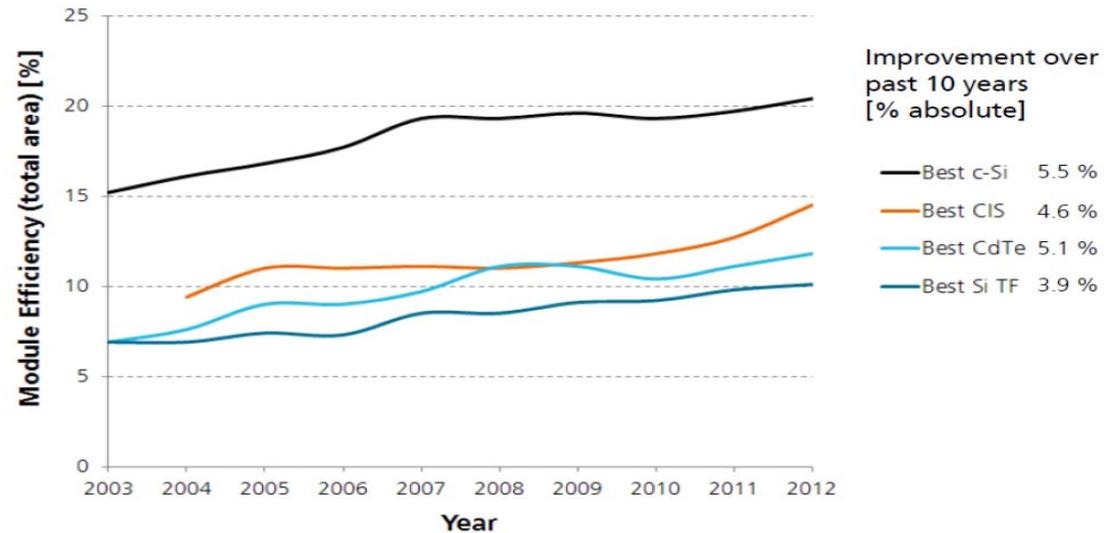
# Des limites (énergétiques) prévisibles pour la production des métaux rares ?

- La barrière minéralogique de Skinner...



# Questions d'évolutions et d'incertitudes

## ● Efficacité énergétique



Data: Photon 2/2003-2009, Photon Profi 2/2010-2/2012. Graph: Willeke Fraunhofer ISE 2013

## ● Efficacité matière

LIGHTWEIGHT MATERIAL	MASS REDUCTION
Magnesium	30-70%
Carbon fiber composites	50-70%
Aluminum and Al matrix composites	30-60%
Titanium	40-55%
Glass fiber composites	25-35%
Advanced high strength steel	15-25%
High strength steel	10-28%

<https://www.energy.gov/eere/vehicles/lightweight-materials-cars-and-trucks>

# Conclusion

- Nexus énergie-métaux
  - Métaux pour énergie
  - Énergie pour métaux
- La transition énergétique impose le déploiement de nombreuses technologies
  - ... donc la production de métaux,
  - ... qui dégrade les gisements en métaux,
  - ... qui augmente les besoins en énergie,
  - ... et donc dégrade les gisements d'énergie.
- ... ce qui va bien dans le sens d'une diminution de la consommation d'énergie...

Merci de votre  
attention

