

Modélisation dynamique matières premières – énergie pour un développement mondial bas carbone

Olivier Vidal, CNRS, Isterre
olivier.vidal@univ-grenoble-alpes.fr

CFE2019

SURFER



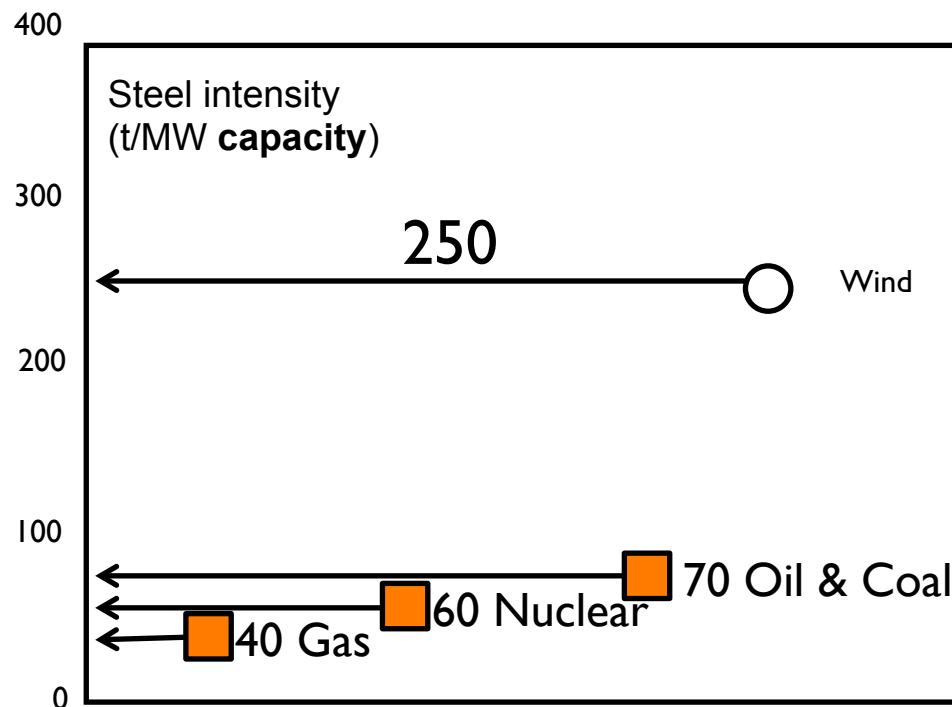
Institut des Sciences de la Terre

La réduction des émissions de GES est un enjeu majeur du siècle

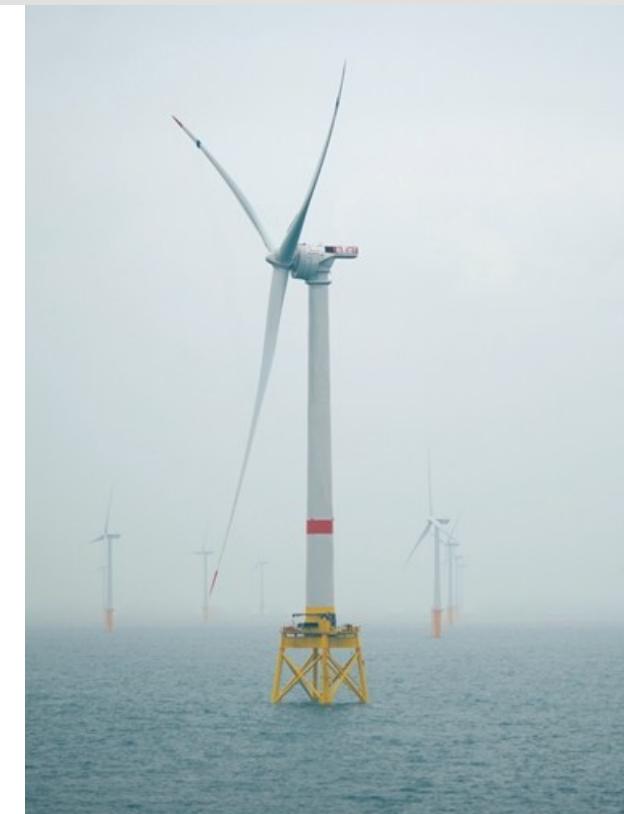
Modifier l'infrastructure mondiale de production, stockage, distribution et utilisation de l'énergie en 30 ans, avec *une intégration forte des renouvelables*

Passage de stocks d'énergie fossile concentrée à des flux d'énergie renouvelable intermittente et diluée

Les énergies renouvelables sont abondantes mais diluées => grosses infrastructures de captage



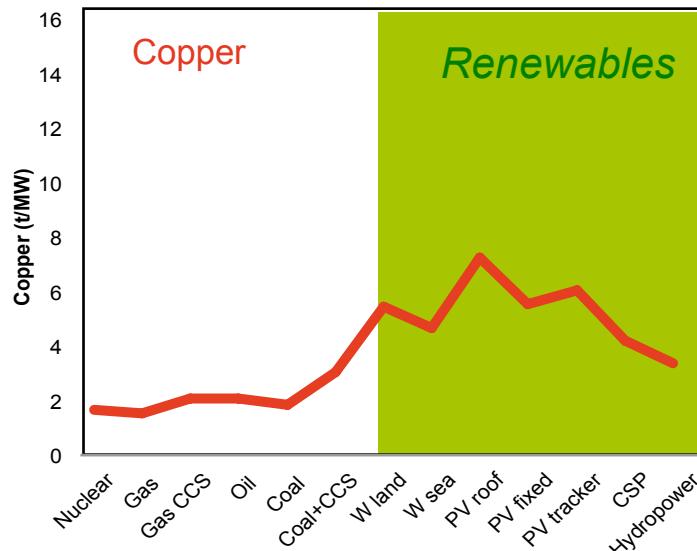
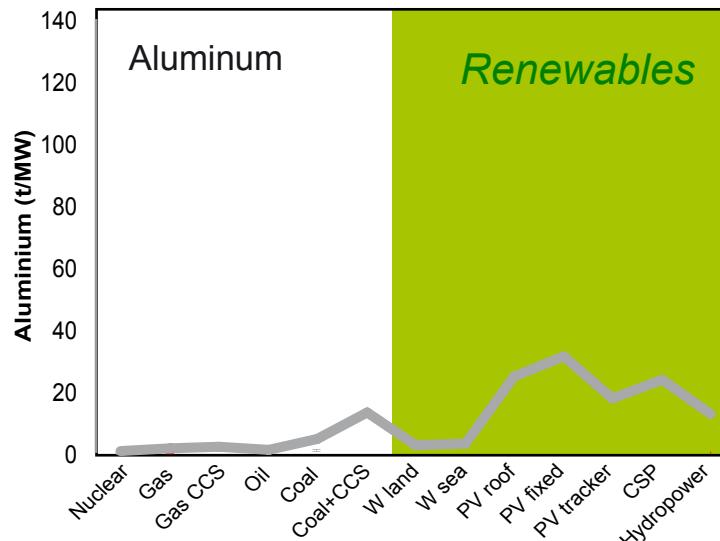
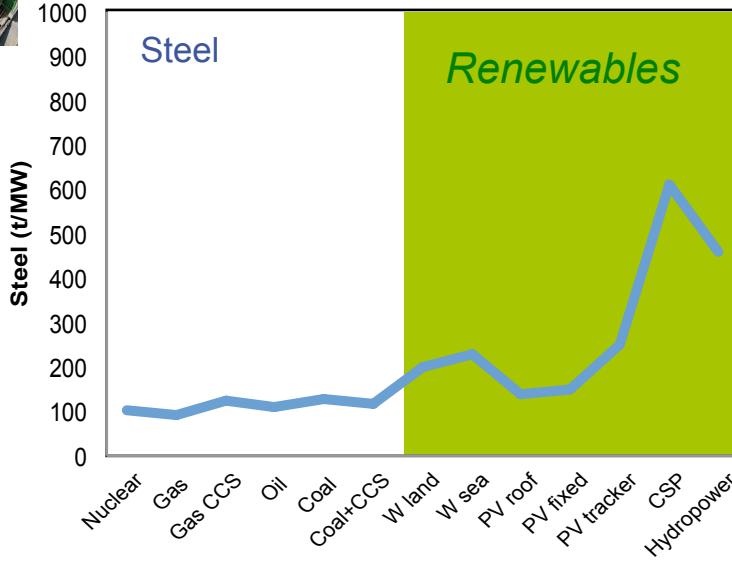
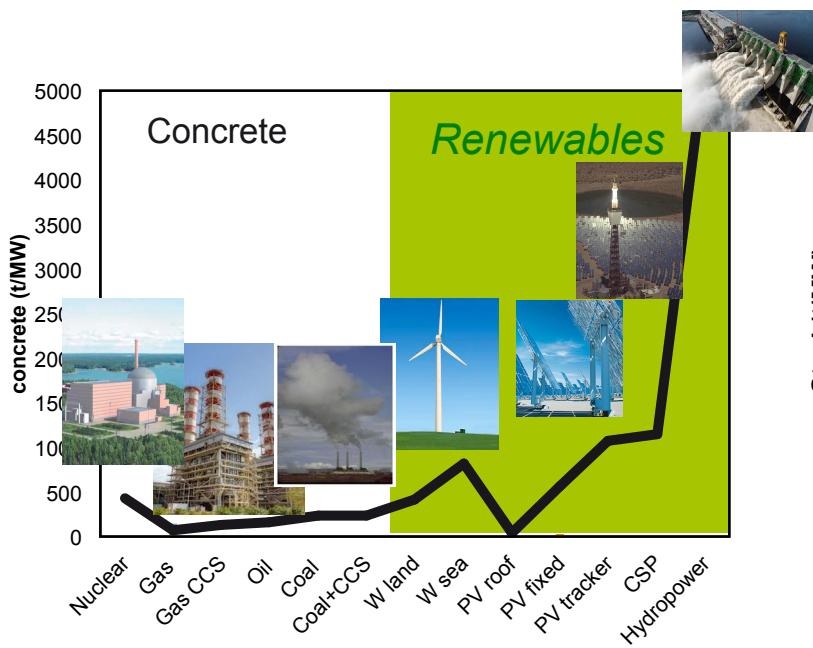
6 Mw, > 150 m, 1500 t steel
Permanent magnet \approx 0.3 t REE
(Nd, Dy, Sm, Gd, or Pr)



700 éoliennes pour produire la même énergie annuelle (Wh) qu'une centrale de 1300 MW

Intensité matière de la production d'électricité (t/Mw)

Vidal et al., 2013, 2018



La transition vers un monde bas-carbone nécessite des matières premières

- Combien ? (scenario & technology dependent)
- Sont-elles disponibles ?
- *Impacts environnementaux de leur production ?*

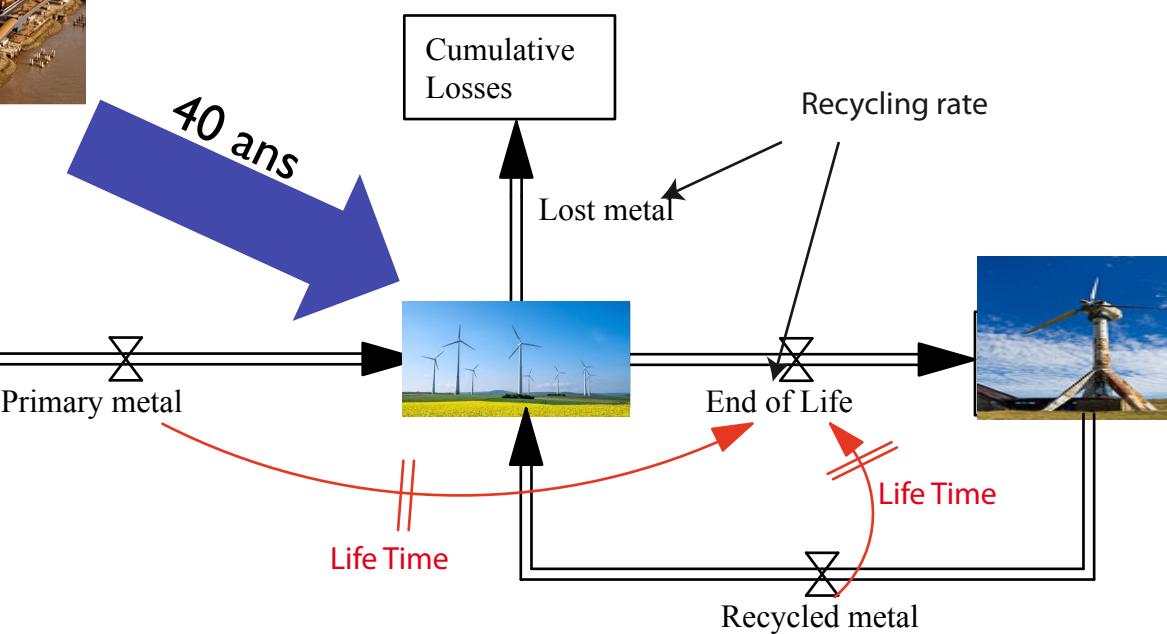
Modélisation dynamique

Estimation des besoins pour l'énergie: un problème de flux & stock

∫ flux primaire > stock dans l'infrastructure

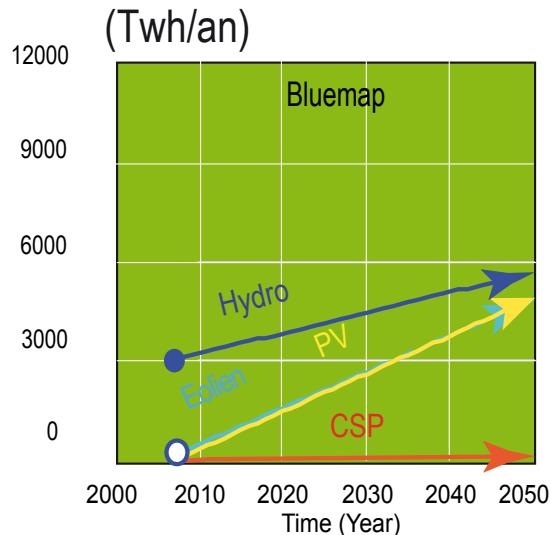


Matière, énergie, CO₂, eau, etc



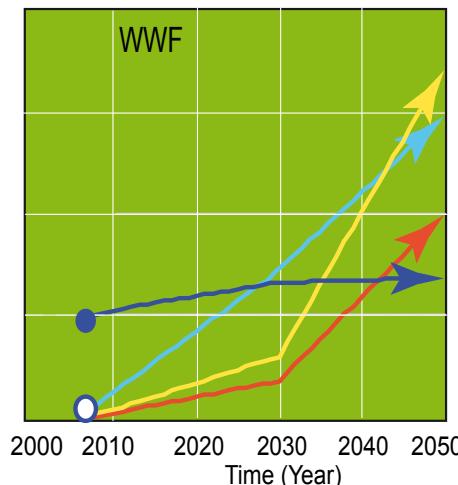
Diversité

Blue Map IEA (2010)
36 PWeh, 42% renewables
450 EJ consommés 2050



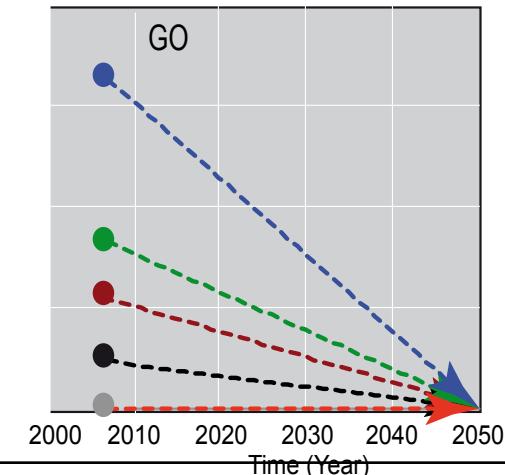
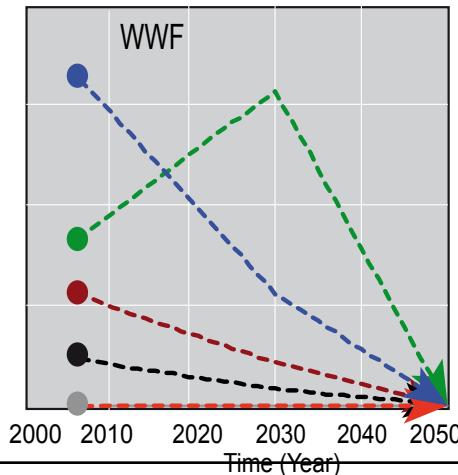
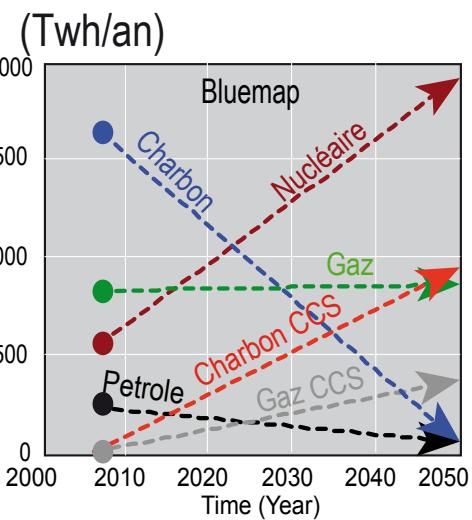
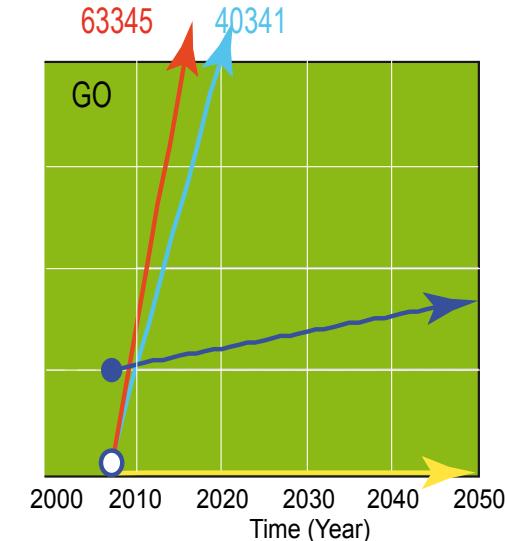
Sobriété tout renouvelable

Ecofys-WWF (2012)
29 PWeh, 100% renewable
300 EJ consommés

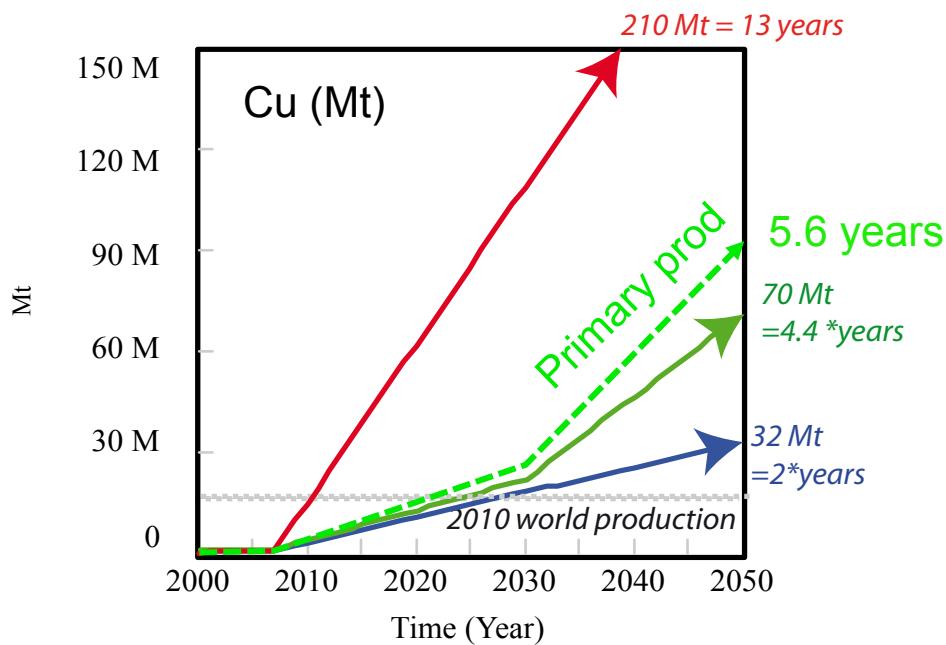


Tout électrique renouvelable

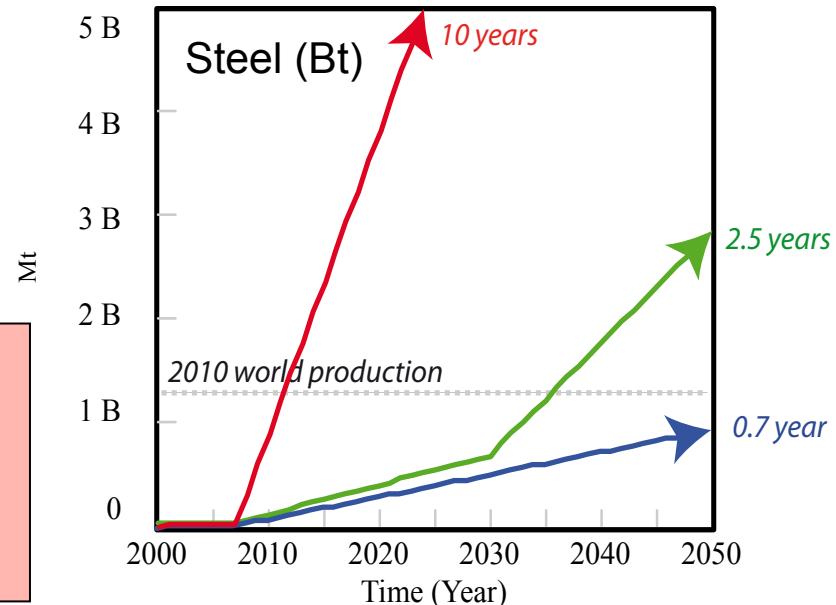
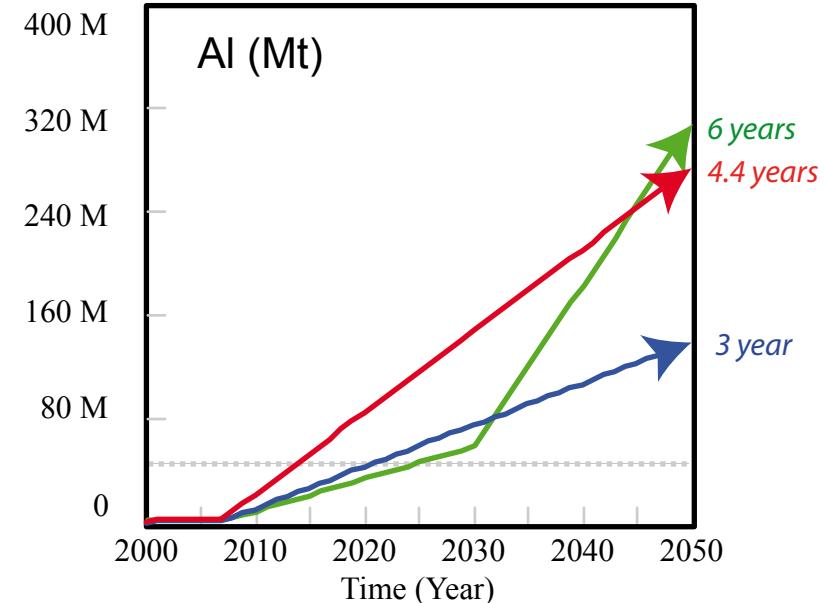
Garcia-Olivares (2013)
109 PWeh, 100% renewable
only electricity

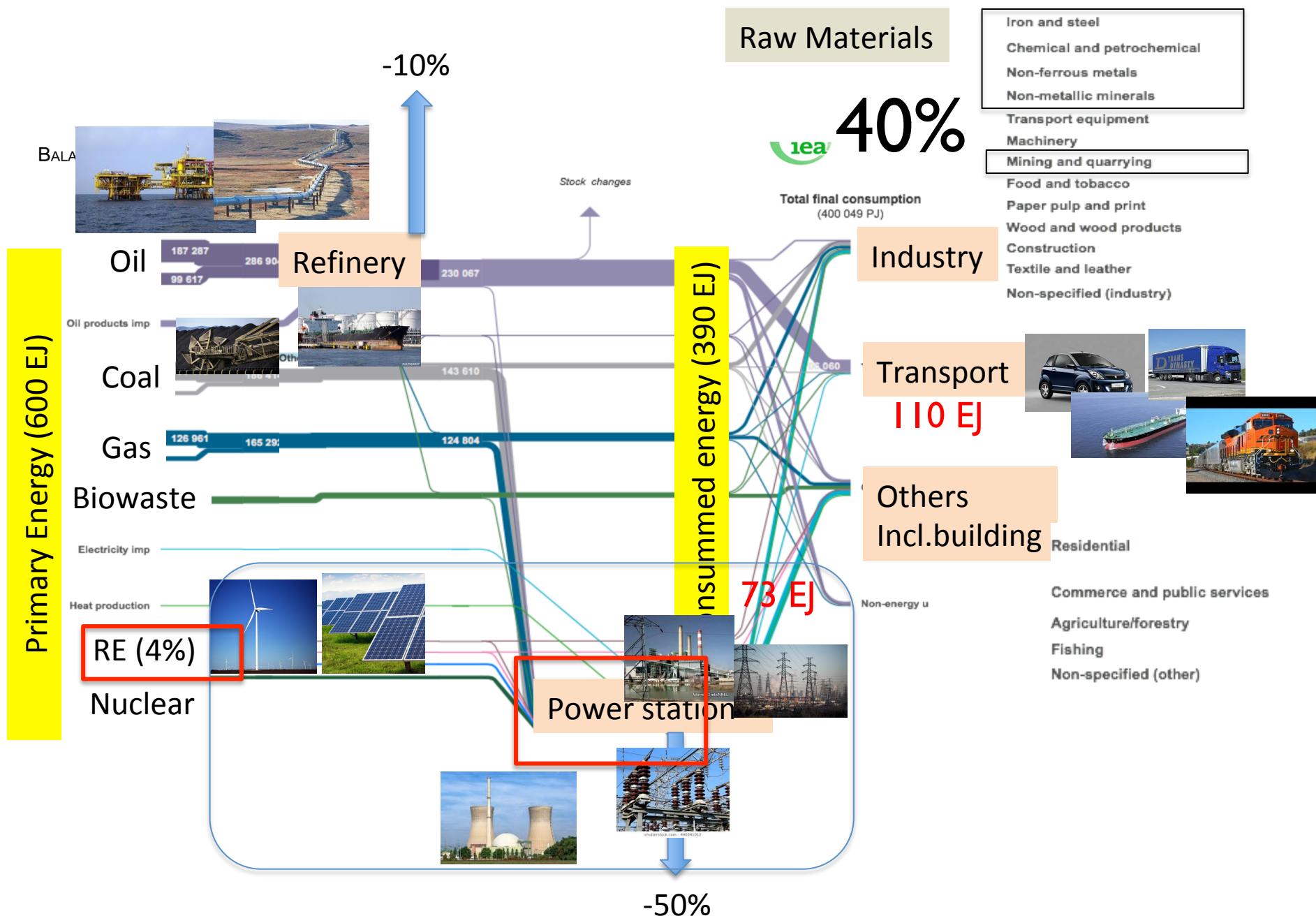


Quantité cumulée dans l'infrastructure de génération d'électricité



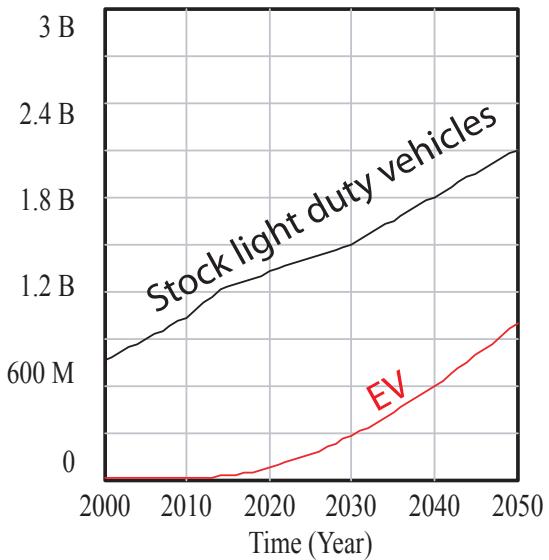
En 2050, la quantité **cumulée** d'acier, Al, Cu pour l'infrastructure de production d'électricité correspond à 3-10 années de production mondiale actuelle





Secteur du transport

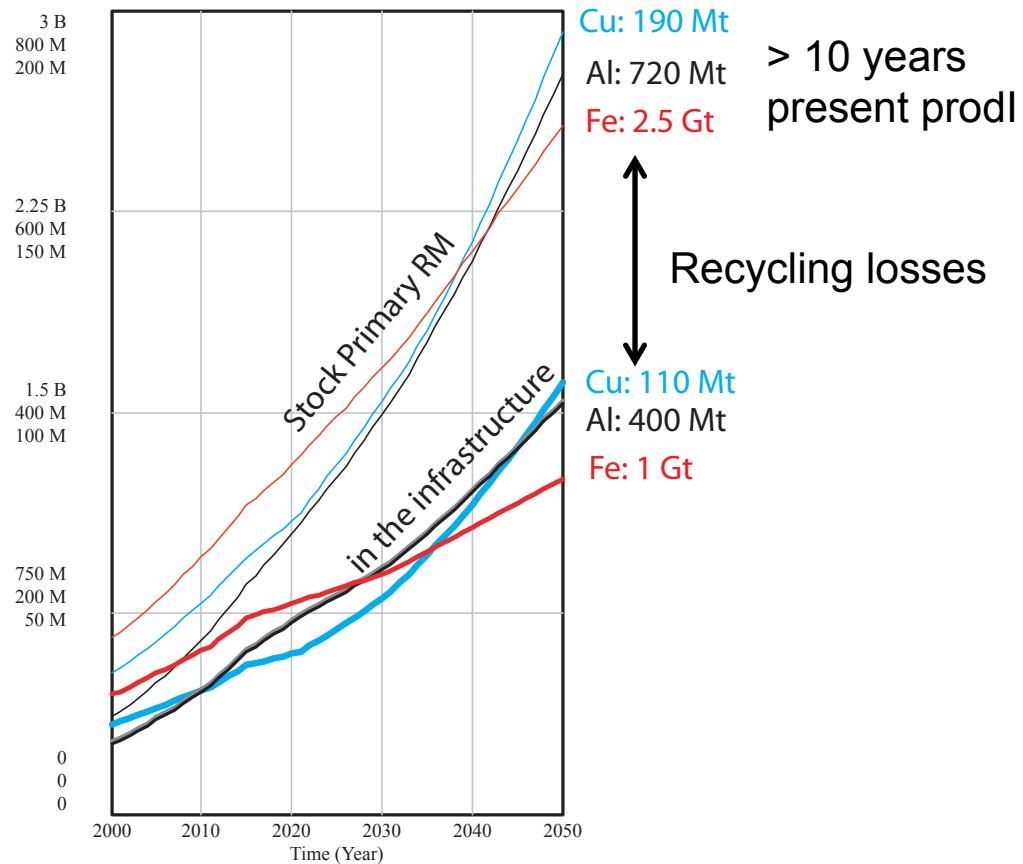
60% EV vendus en 2050



Durée de vie = 15 yr

Thermique: 30 kg Cu/véhicule

EV : 80 kg Cu/véhicule



> 10 years
present prod!

Le total...

150 à 300 Mt de Cu pour l'électricité et le transport = 7 à 15 années de production (2015)

90 Mt Cu
production



3 Mt Cu



storage

5 Mt Cu



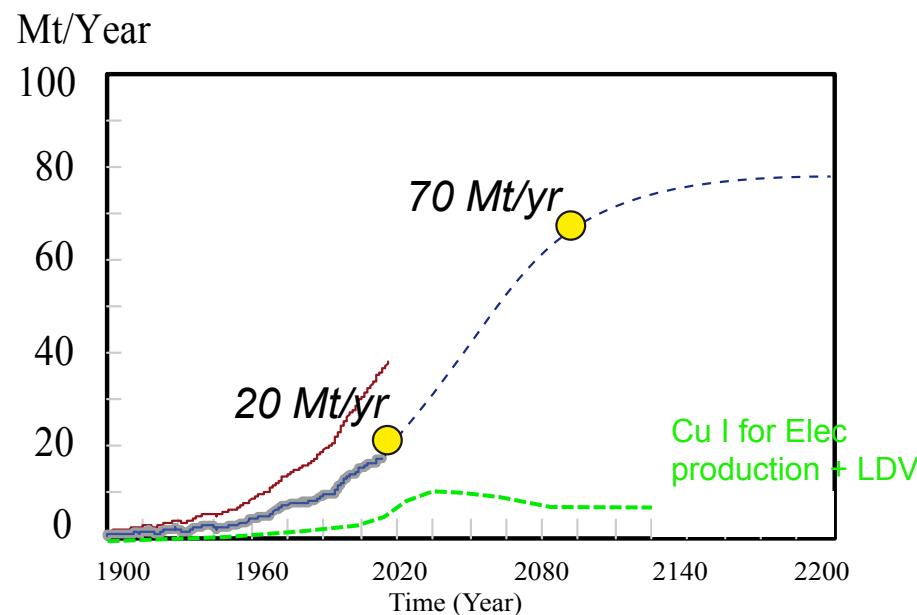
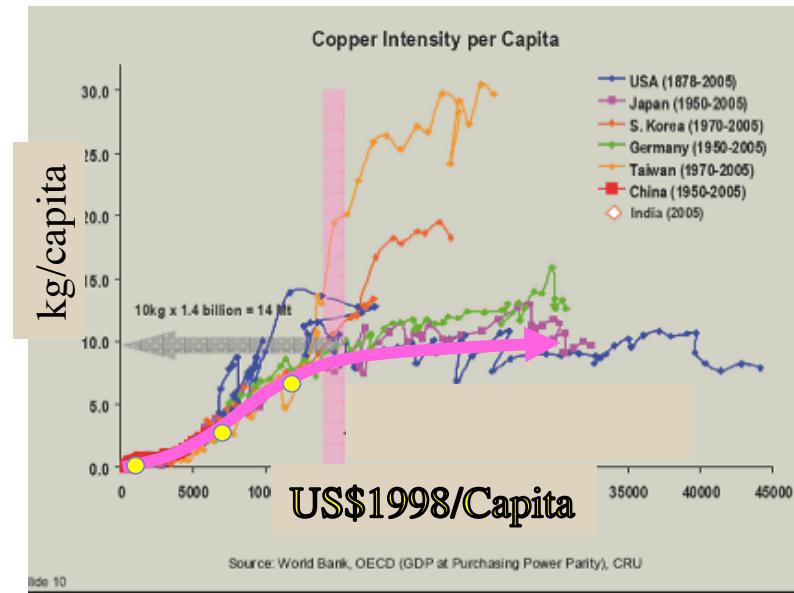
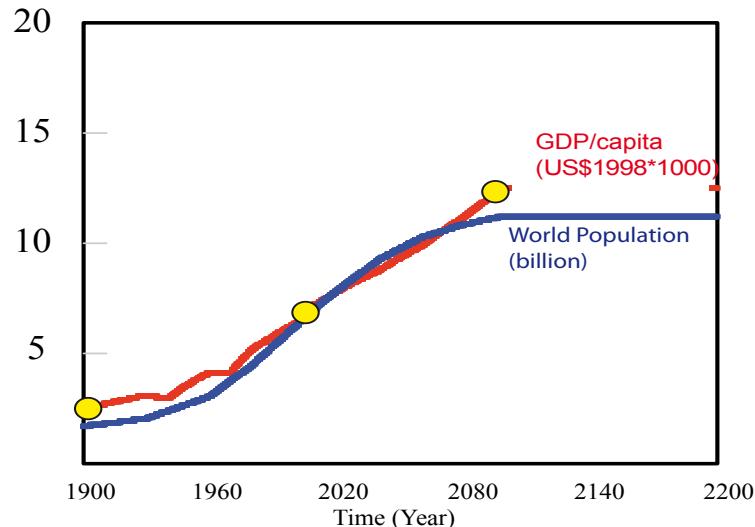
Transport &
distribution

>100 Mt Cu

Use

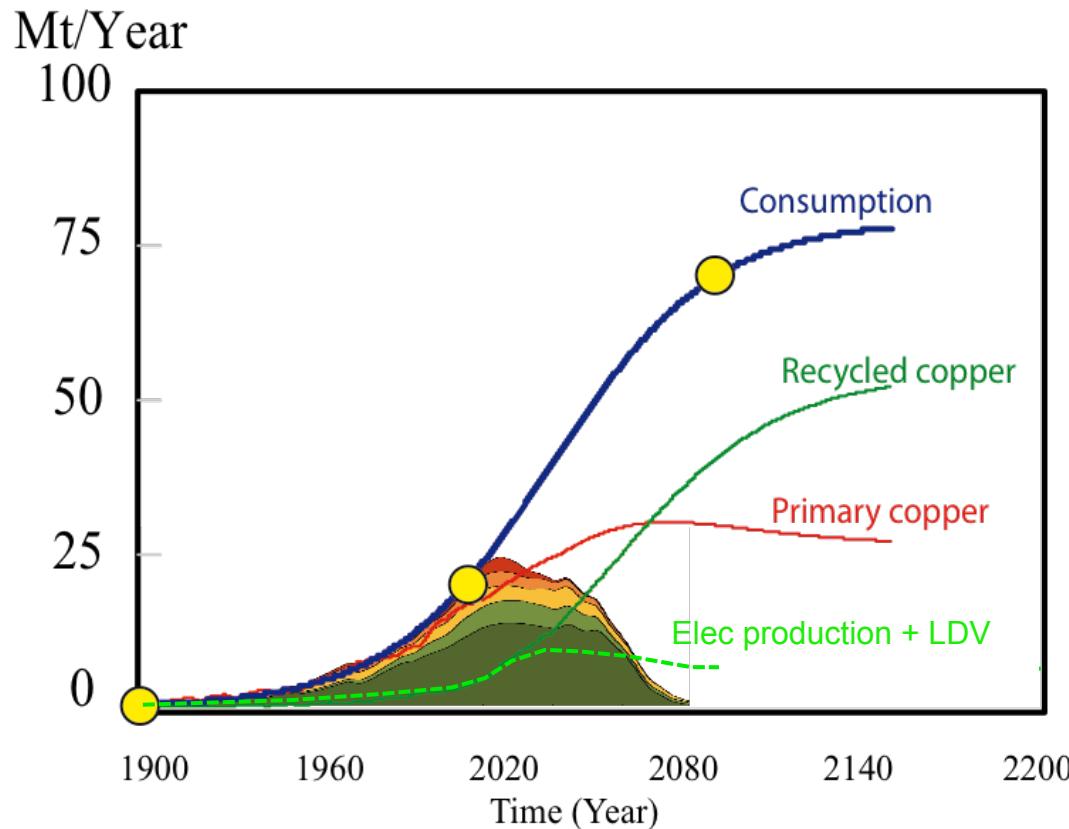


Estimation de la demande globale en Cu



Peut-on le faire ?

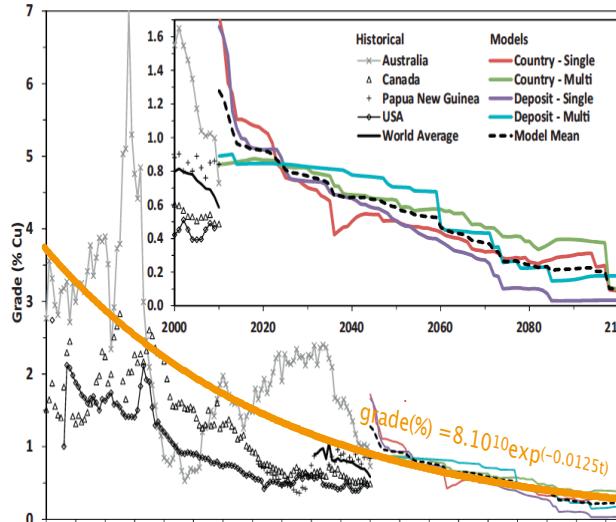
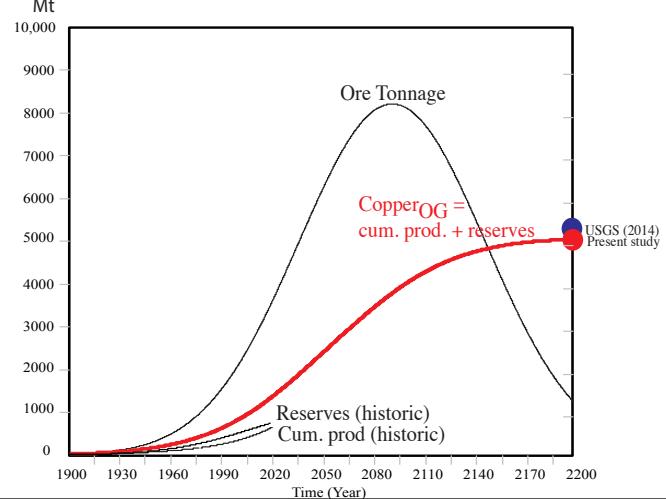
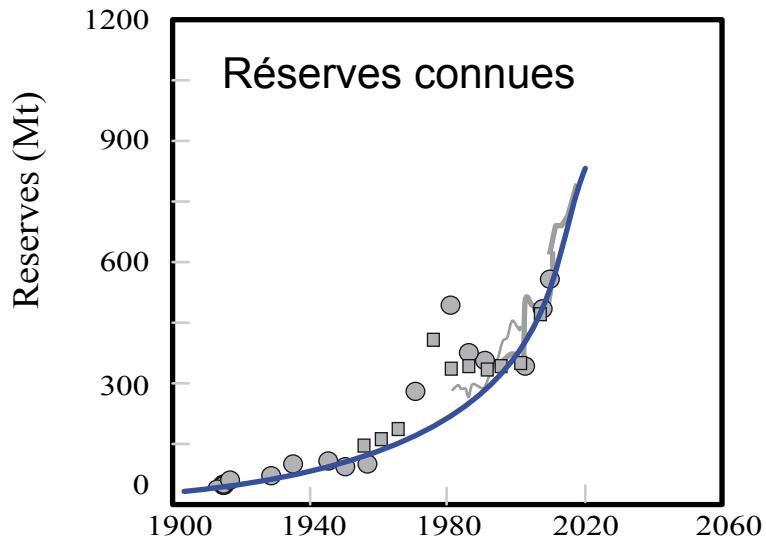
- Le cuivre recyclé devient la source majeure dans 50 ans
- Cu pour production électricité + voitures = 25-35% demande primaire totale
- Peut-on le faire ? « Non ! » d'après Northey et al. (2014)



Old scrap recycling:
 $CR \cdot RR = 0.3 \rightarrow 0.75$
2015 2100
Average Life time
Cu = 20 years

Pourtant, les réserves croissent avec le temps

Nouvelles découvertes et baisse de concentration des gisements exploités

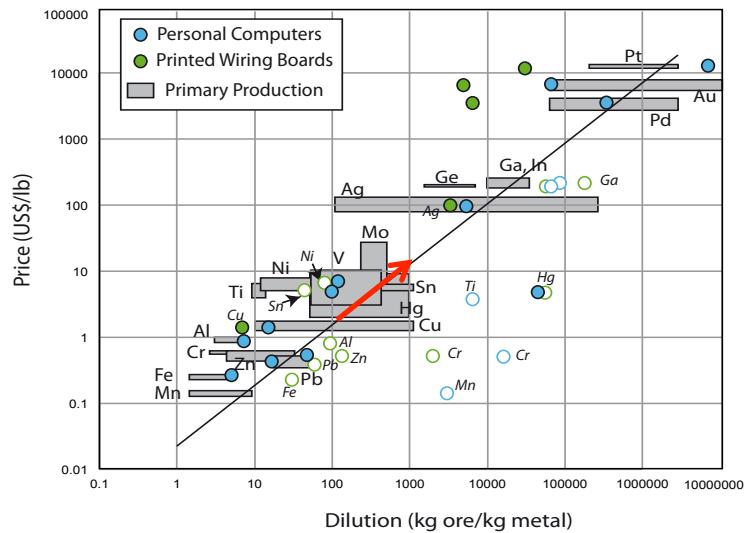


Mudd (2013)

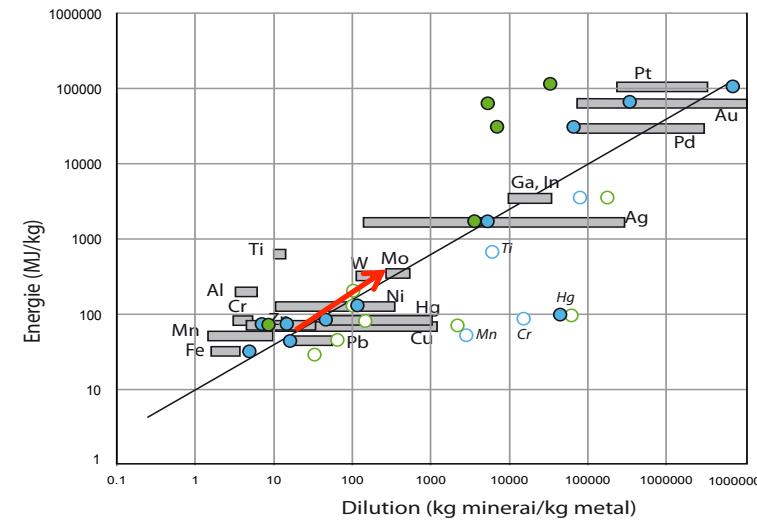
Où est le problème ?

L'énergie et le coût d'extraction augmentent à techno constante

$$\text{Prix} = a \cdot (I/C_{\text{metal}})^u$$



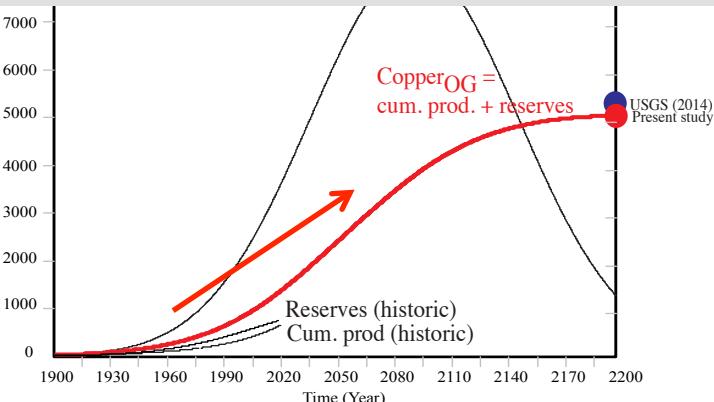
$$\text{Energie} = b \cdot (I/C_{\text{metal}})^v$$



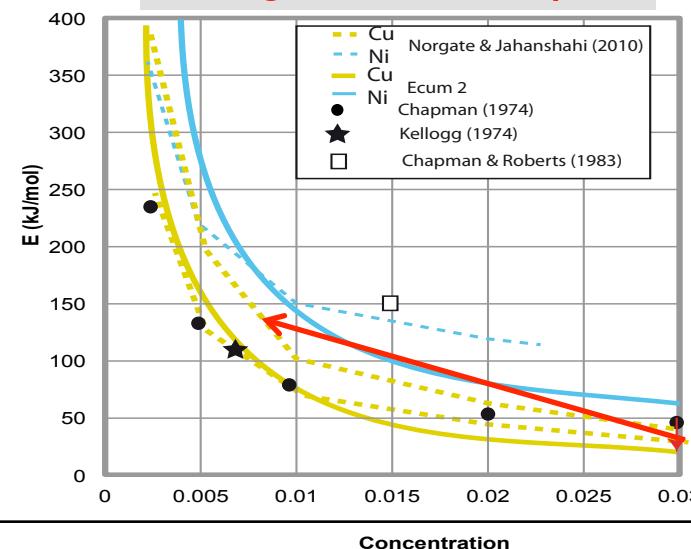
Mt

Concentration/10, Réserves x 100

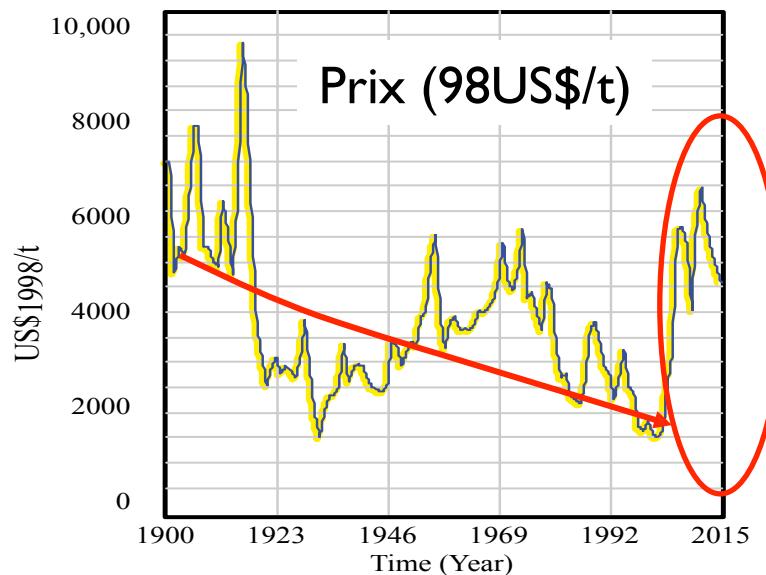
Prix x 10



Energie , coût et prix

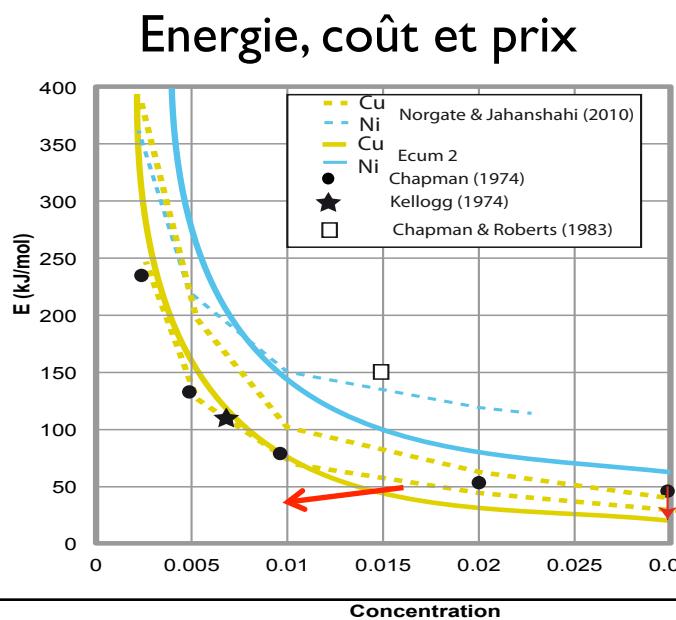


Energie et coût d'extraction baissent avec l'amélioration technologique



Concentration/10, Réserves x 100
Prix x 10

Amélioration techno



Amélioration technologique- effet de prix

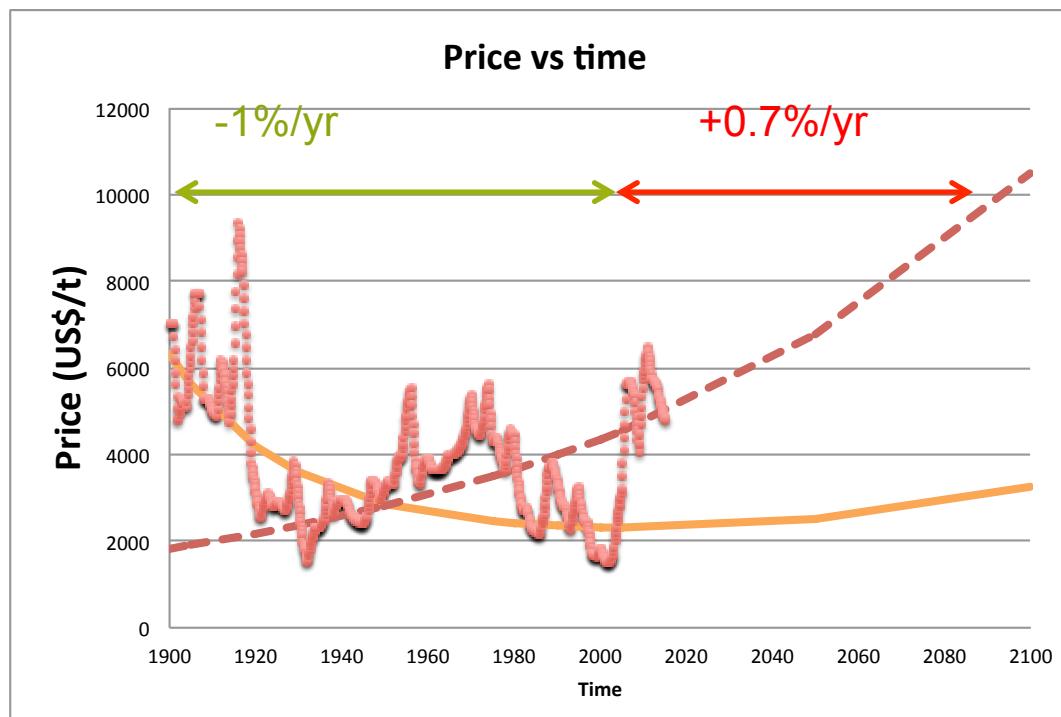
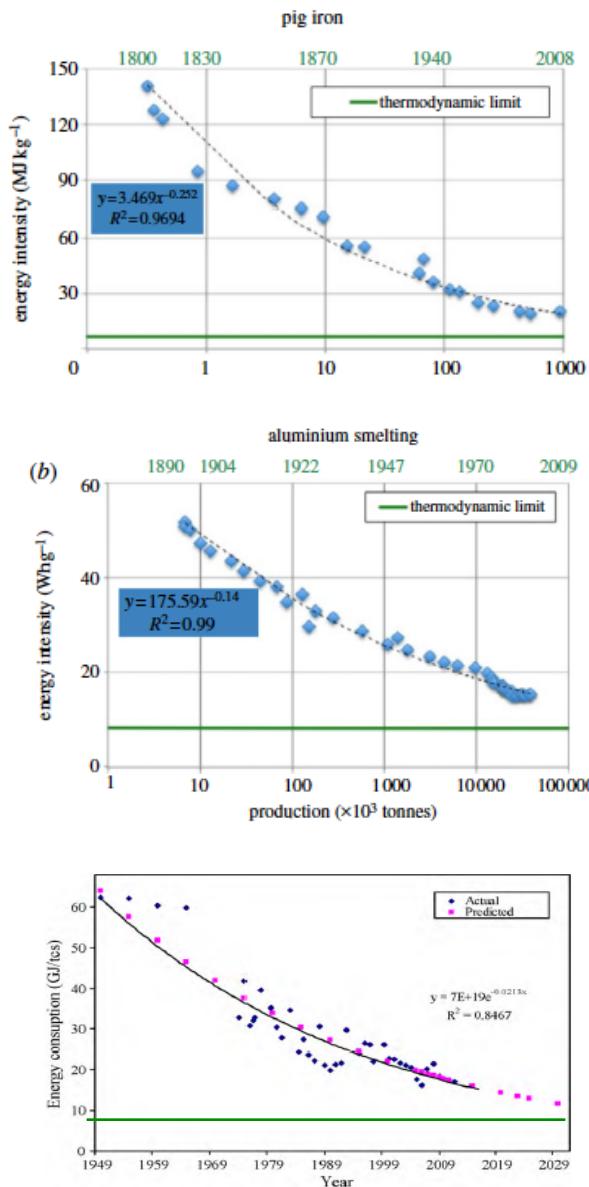
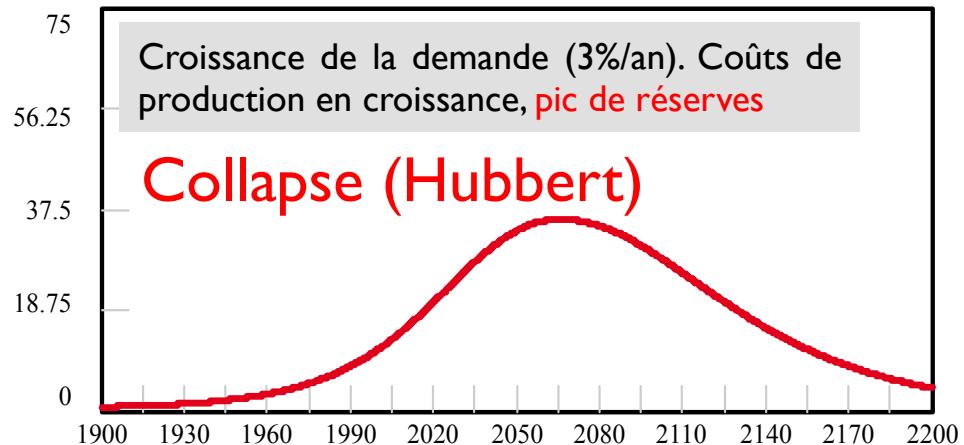


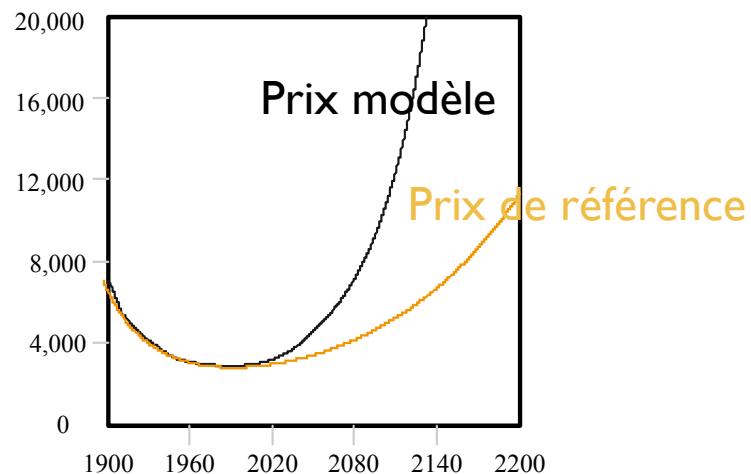
Fig. 5. Actual and projected specific energy consumption in the steel industry (world average).

Model dynamique de production

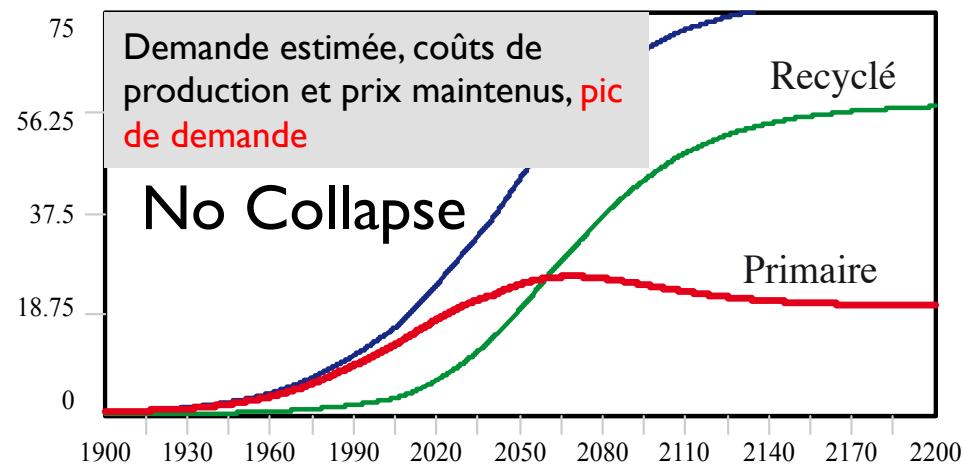
Mt/an



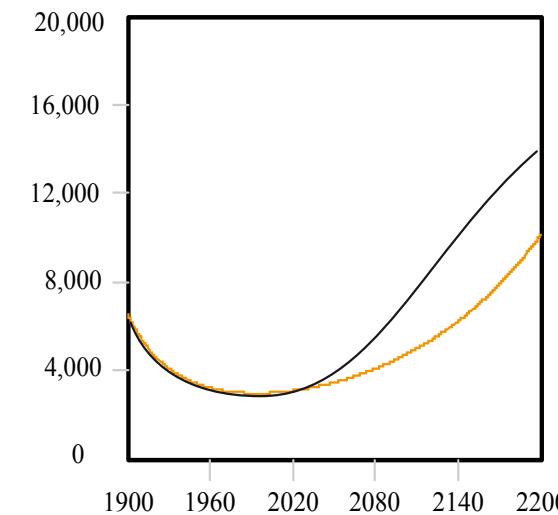
US\$₁₉₉₈/t



Mt/an



US\$₁₉₉₈/t



Conclusions

- La consommation en matières premières va augmenter jusqu'au moins le milieu du siècle. Les besoins en métaux pour la transition seront significatifs (10-30% pour métaux de base, difficile à quantifier pour les autres)
- La saturation en métaux de base serait atteinte dans la seconde moitié du siècle et le recyclage deviendrait la source majeure... si l'on possède les EOL
- Il existe des couplages **dynamiques** entre énergie grise, ressources minérales, prix et amélioration techno. Les tendances passées ne seront pas forcément valables dans le futur
- La modélisation doit intégrer tous ces aspects sur TOUTE la chaîne de l'énergie, pas seulement la production d'électricité
- La modélisation doit aussi intégrer le coût futur des impacts

Thank you for your attention !

