

Les enjeux matière et énergie dans un monde en transition

- Evolutions démographique, technologique, économique
- Hausse des prix récente uniquement conjoncturelle ? ou signal long-terme indiquant une difficulté systémique d'approvisionnement ?

=> modèles dynamiques

Matières "structurelles" – ciment, acier & alliages, Al, Cu > 1Mt/an

Consommation acier

Steel Consumption by Nation
(million of tonnes)



China - 623.9

USA - 89.1

India - 67.8
Japan - 64.1

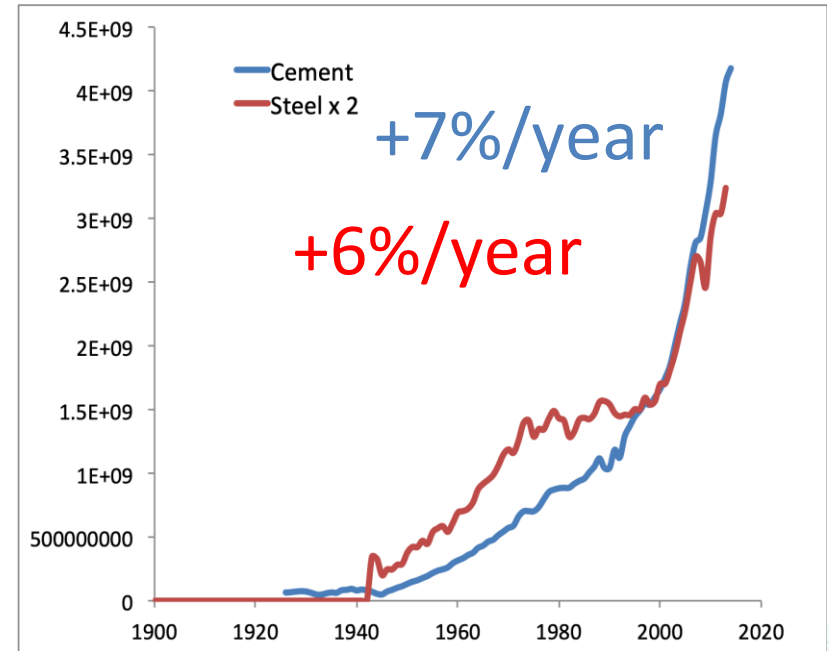
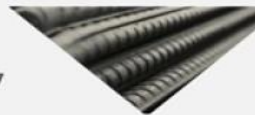
South Korea - 56.4

Russia - 40.5
Germany - 39.4

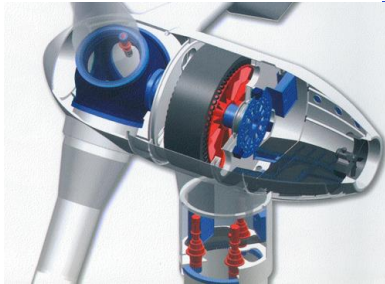
Turkey - 26.9
Italy - 26.7
Brazil - 25
Iran - 19.2

Mexico - 18
Canada - 14.2
France - 13.6
Spain - 13.1
Poland - 11
UK - 9.1
Egypt - 7.3
Australia/NZ - 7
Ukraine - 6.5

South Africa - 5.3
Argentina - 5.3
Belgium - 4.6
Sweden - 3.9
Austria - 3.9
Netherlands - 3.7
Romania - 3.3
Venezuela - 2.6



Métaux "technologiques" (< 0.5 Mt/an)



Ga, In, Se
Si, Ag

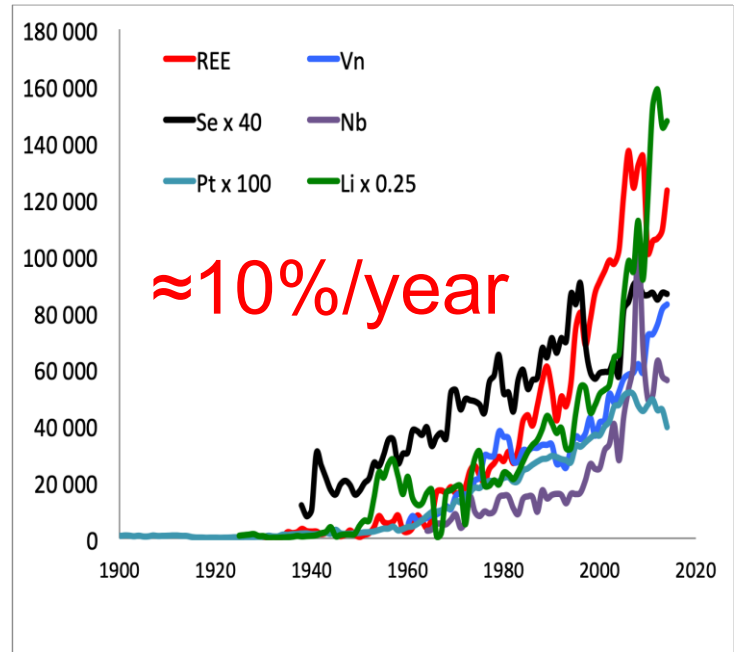
Nd, Dy, Pr, Tb



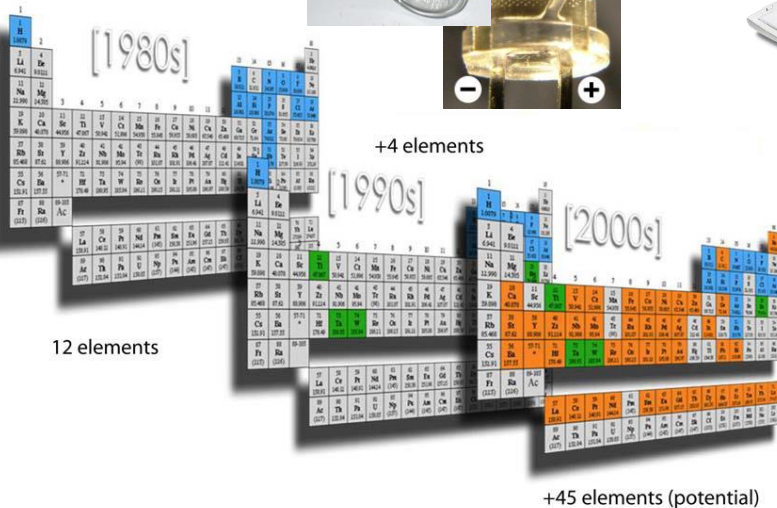
Li, Co, Graph



Co, Ga,
In, Nb,
Ta, W,
PGE, REE,
Bi, Li, Ag, Au

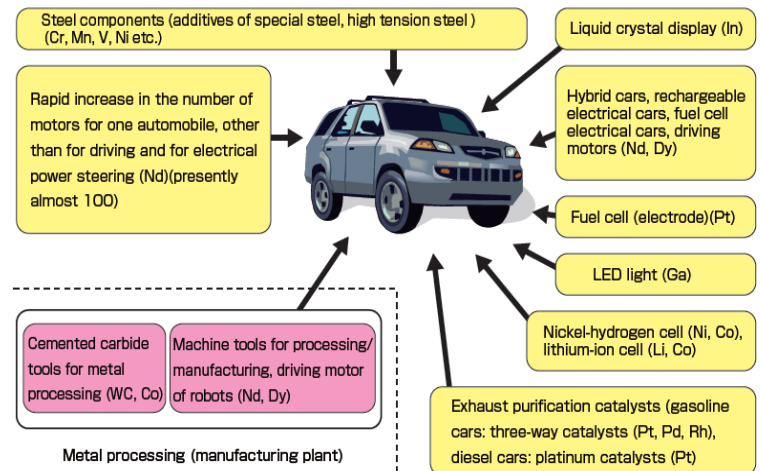


+4 elements



12 elements

+45 elements (potential)



une demande qui augmente dans un contexte de transition

Métaux : les besoins colossaux de la transition énergétique

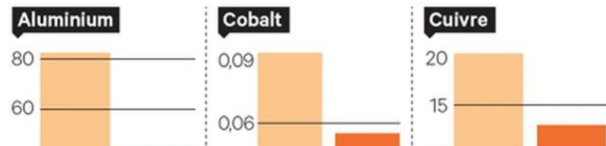
Les technologies requises pour limiter le réchauffement du climat feront grimper la demande de ressources naturelles. C'est, selon la Banque mondiale, un risque majeur pour l'environnement.

[Lire plus tard](#) | 07 | [Twitter](#) | [Facebook](#) | [LinkedIn](#) | [Commenter](#)

Aperçu de la demande de métaux engendrée par la transition énergétique à l'horizon 2050

En millions de tonnes selon les scénarios.

Réchauffement de 2° de 4°

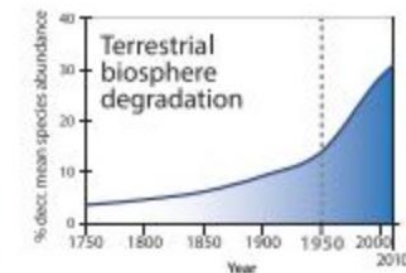
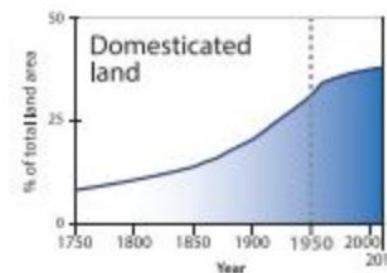
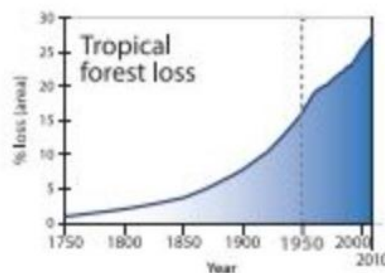
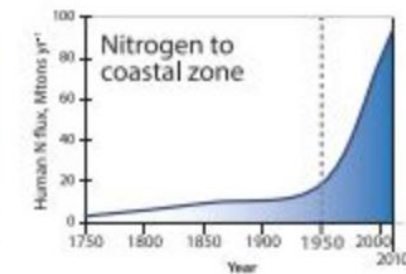
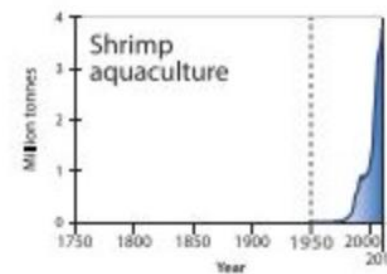
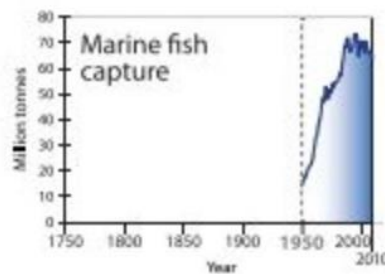
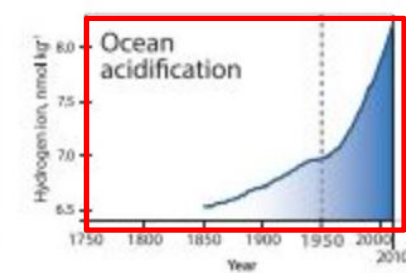
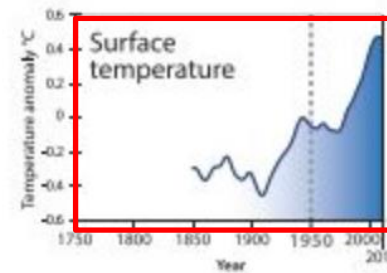
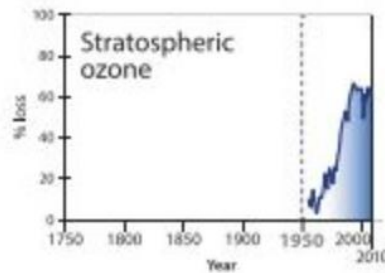
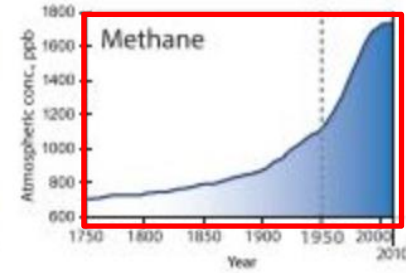
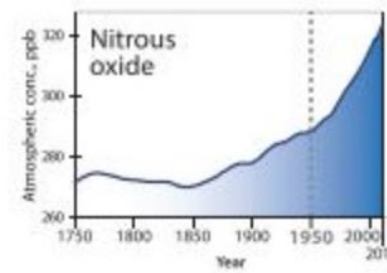
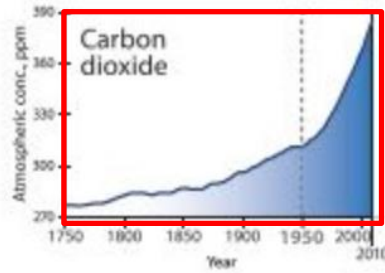


Le boom des batteries va entraîner une ruée sur les métaux critiques

Dans un monde 100 % véhicule électrique, la demande de lithium serait multipliée par trente, celle de cobalt par vingt. Pour y répondre, les mines manquent.

[Lire plus tard](#) | 09 | [Twitter](#) | [Facebook](#) | [LinkedIn](#) | [Commenter](#)

Des impacts environnementaux inquiétants



Production de matières premières minérales

- 35% de la consommation industrielle mondiale d'énergie
- 45% des émissions de CO₂ de l'industrie

Evolution future ?

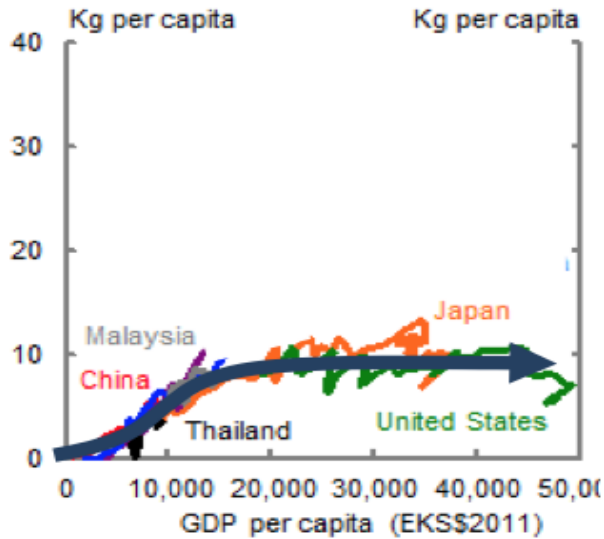
Estimation de la *demande* en ressources et énergie, des capacités de *production* primaire (+ recyclage pour métaux), de la substitution pour chaque ressource dans chaque technologie, par pays

...dans un *système dynamique*: monde en évolution et transition, mondialisé, avec de forts contrastes entre les pays

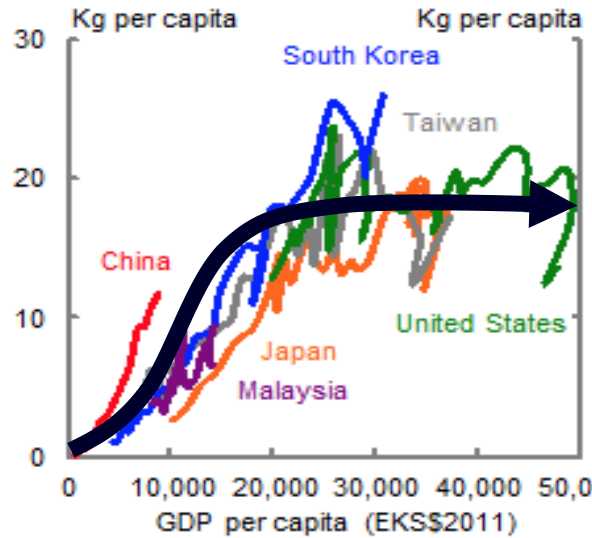
La demande

Le premier moteur de la consommation est l'augmentation de la population et du PIB

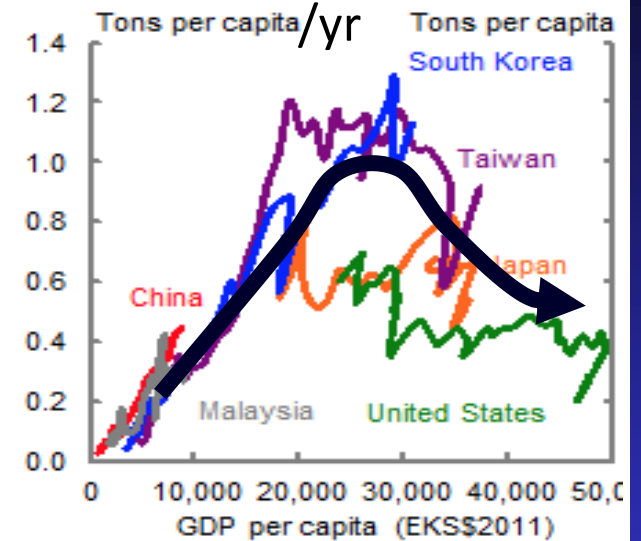
Copper



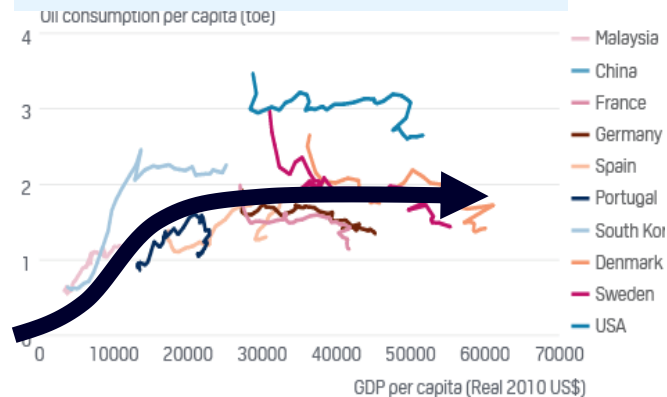
Aluminum



Steel

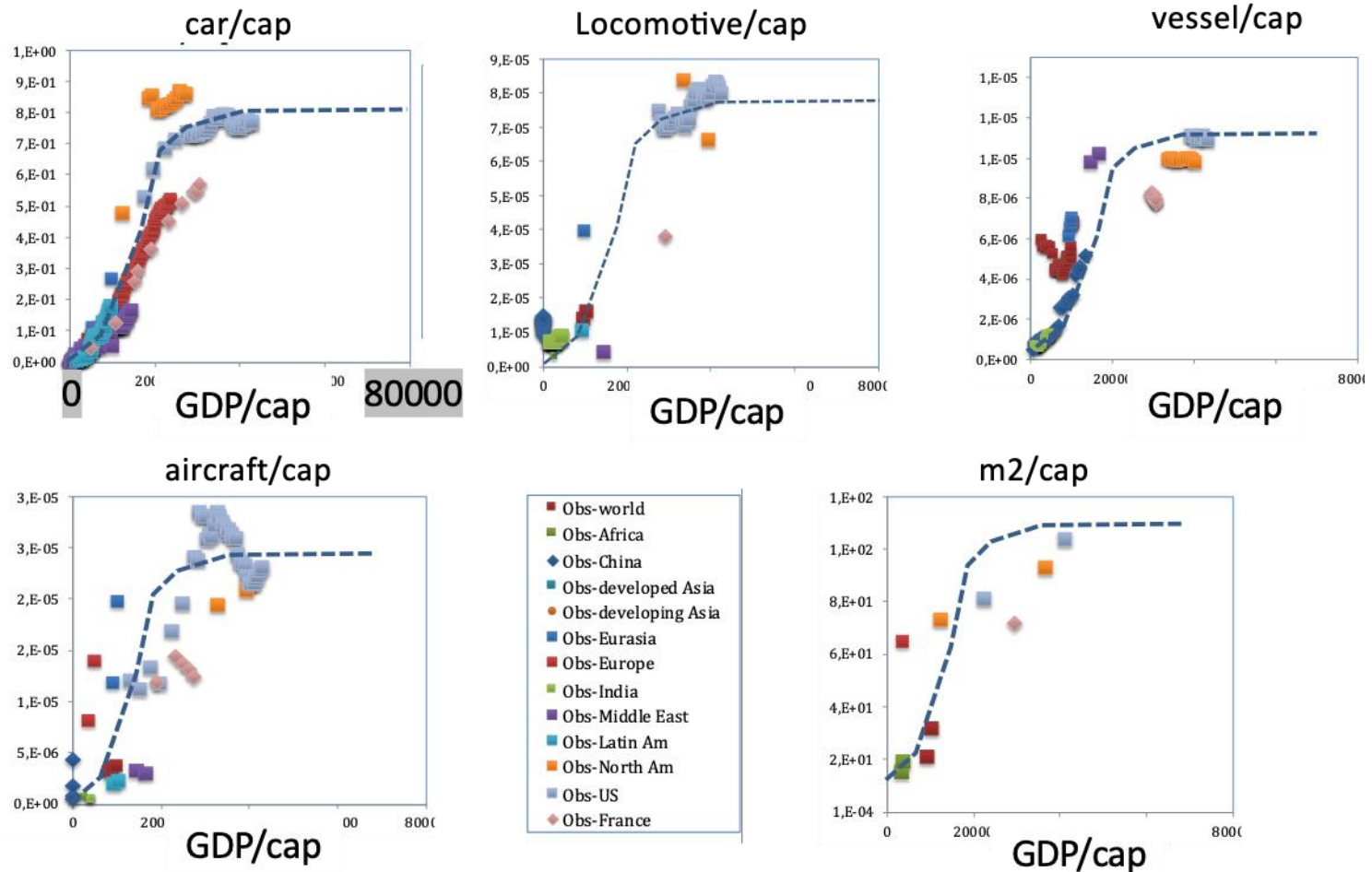


Oil



Source: BP Statistical Review of World Energy (June 2016), Oxford Economics, Platts

Le développement de Infrastructure/hab est proportionnelle au PIB/hab



Il existe des fonctions logistiques « uniques »

Evolution *tendancielle* de l'infrastructure - FRANCE

Population & PIB



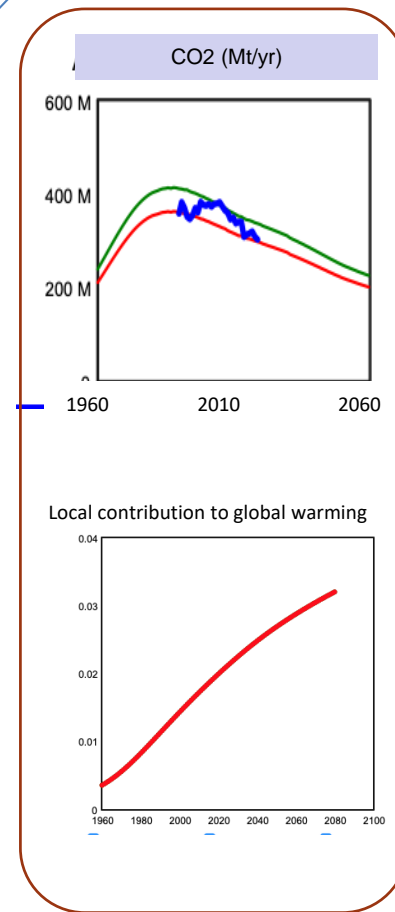
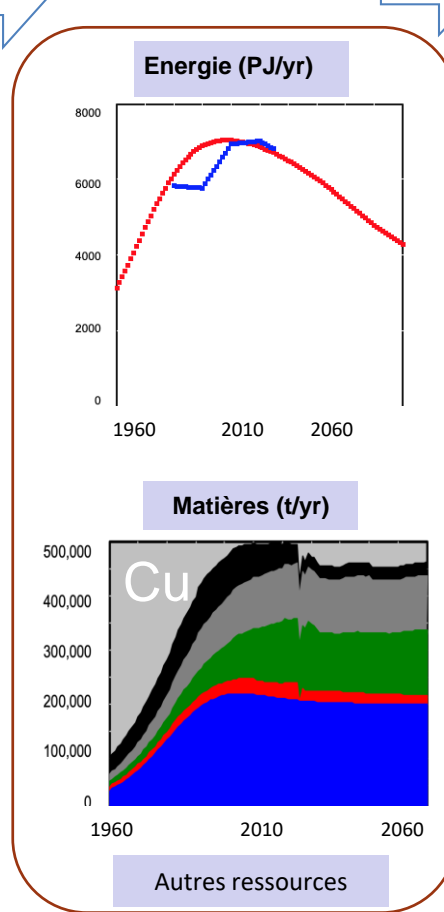
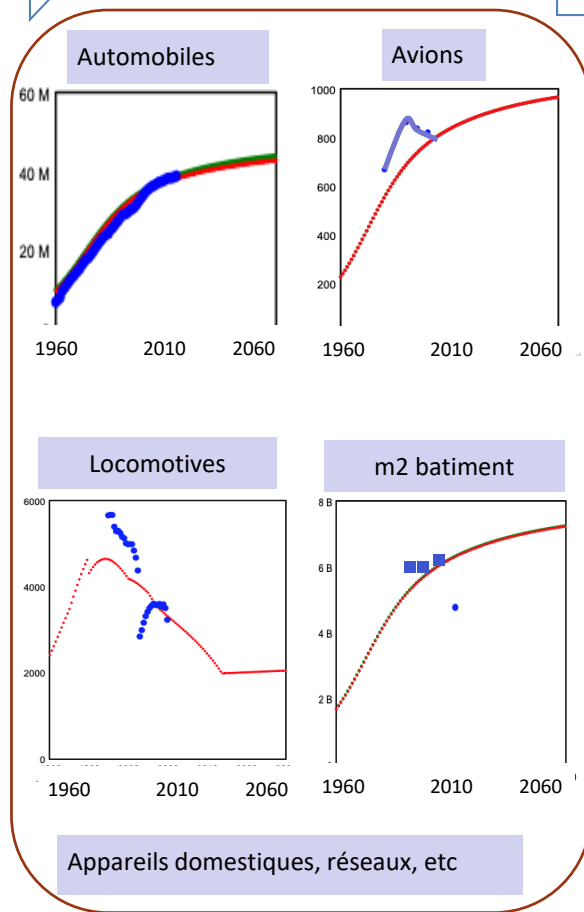
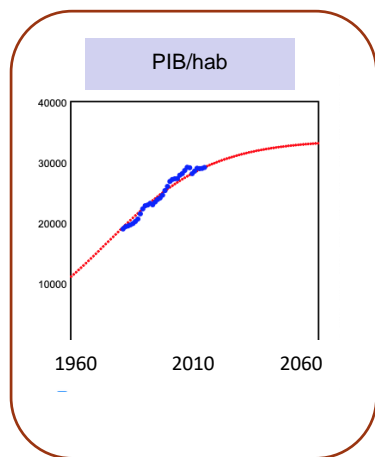
Infrastructure



Ressources

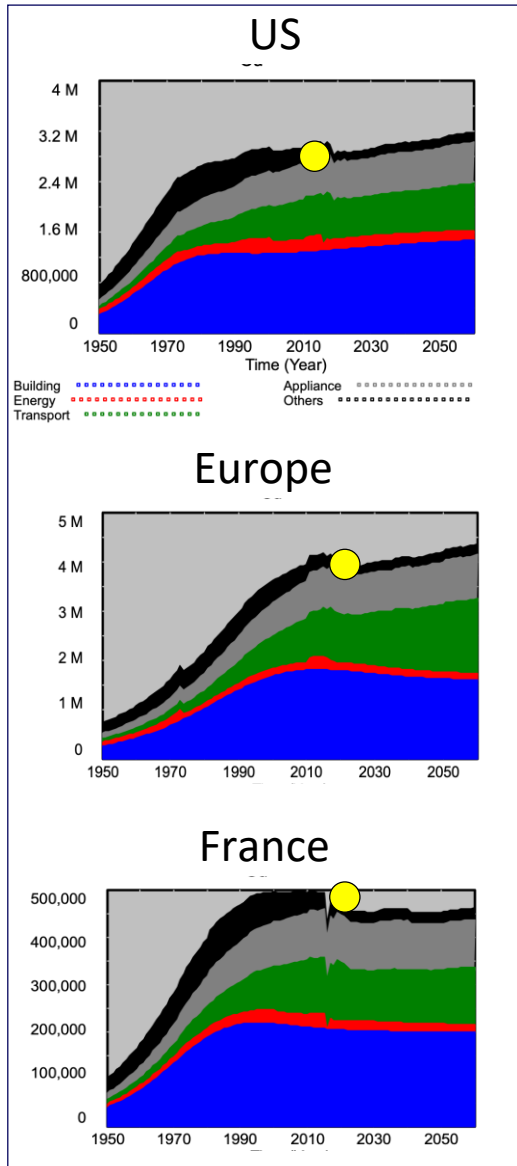


Impacts

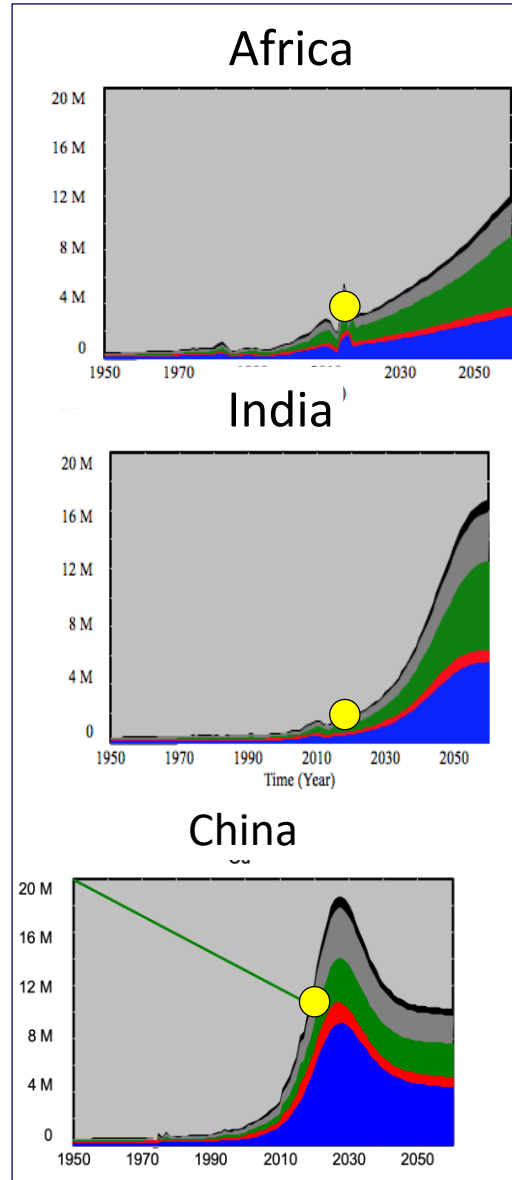


l'évolution *tendancielle* mondiale de consommation en cuivre

Developed countries



Developing economies

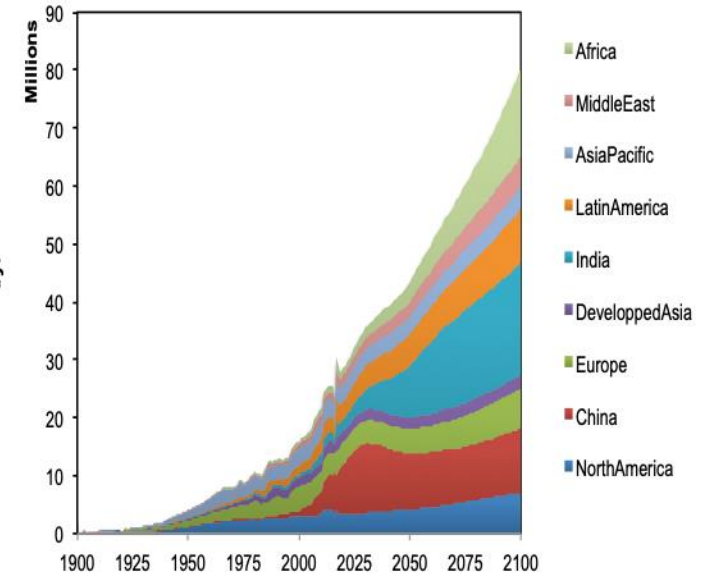


+

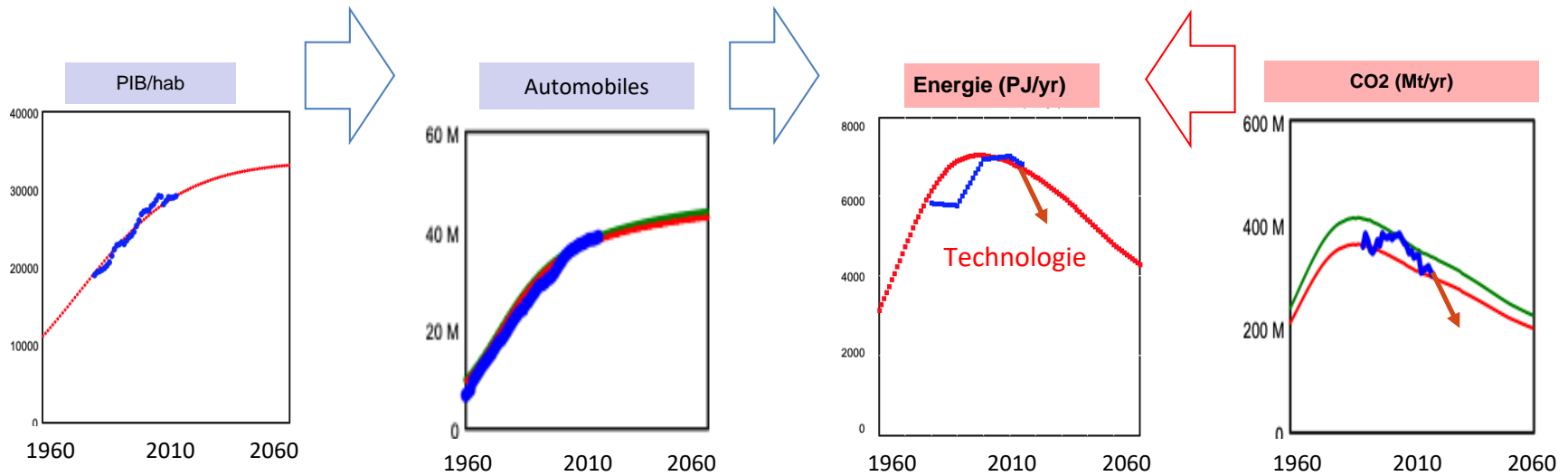
=

t/yr

World copper



Pour s'écarter des évolutions tendanciennes => technologies « de rupture »



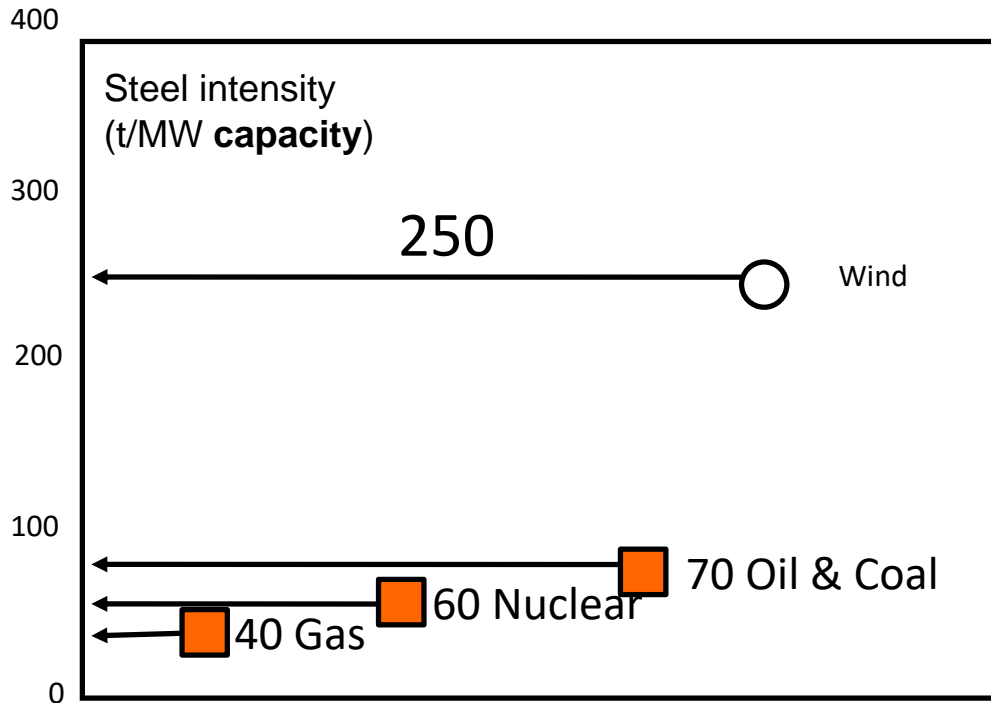
Nouveaux besoins en ressources, impacts et prix

La transition énergétique au niveau mondial

Les accords de Paris : 30% de renouvelables et atteinte de la neutralité carbone dans la seconde moitié du siècle. Cela implique :

- de remplacer en 40 ans l'infrastructure de production, distribution, stockage et d'utilisation de l'énergie fossile
- de remplacer une énergie de stock et de haute qualité par des flux d'énergies renouvelables, intermittentes et diluées

Les énergies renouvelables sont diluées => de grandes infrastructures sont nécessaires

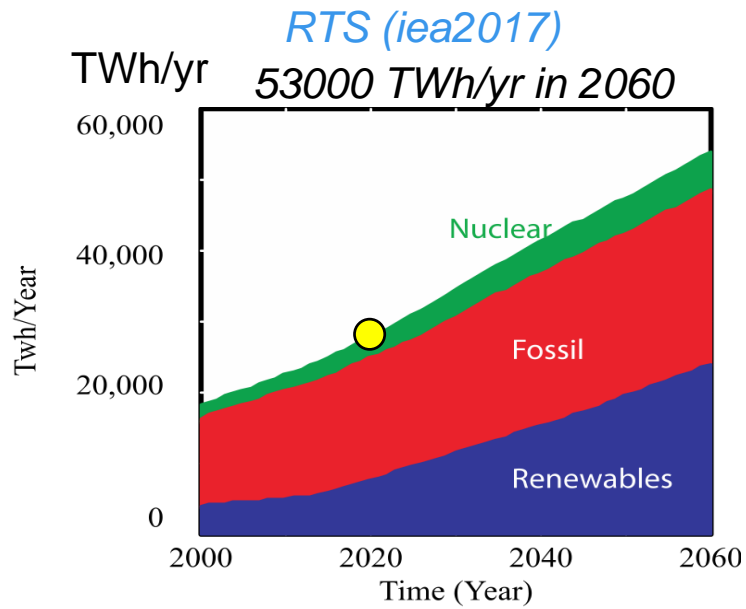


Intensités matière des EnR (t/MWh) = 5 à 10 x centrales classiques

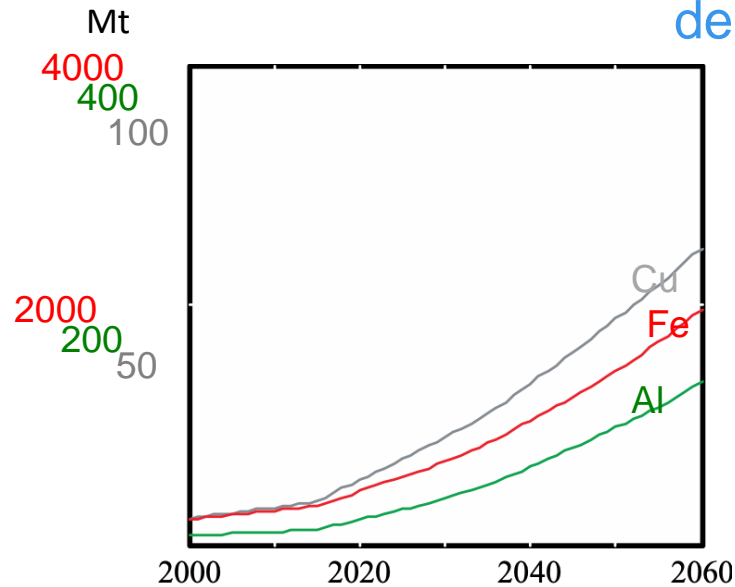
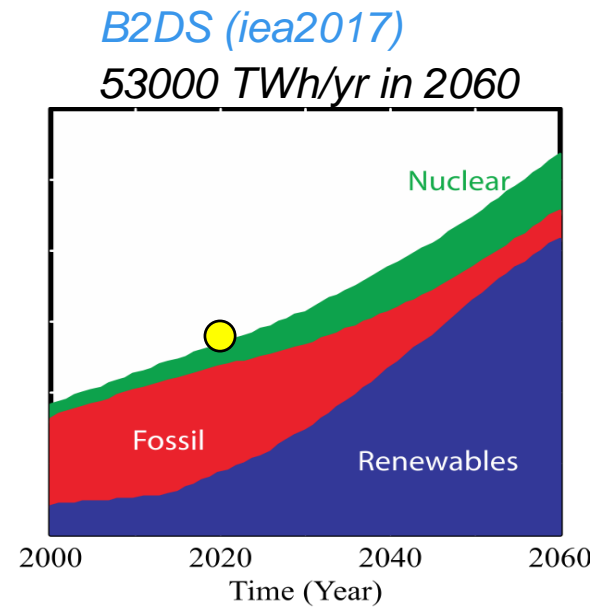
6 Mw, > 150 m, 1500 t steel
3t permanent magnet, 0.5t REE



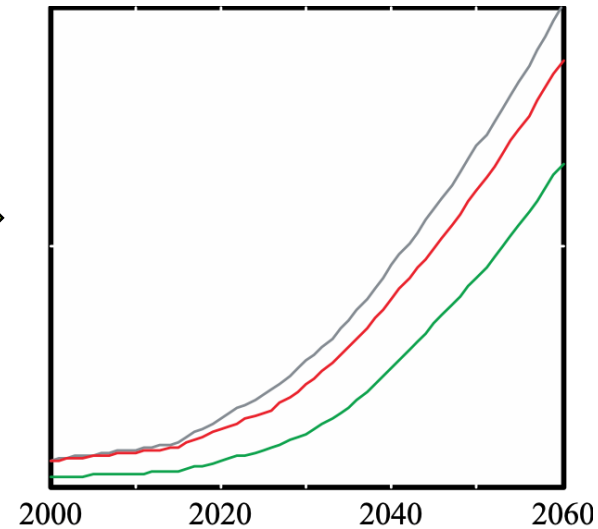
Exemple: la production d'électricité



↑
PIB &
population
↓

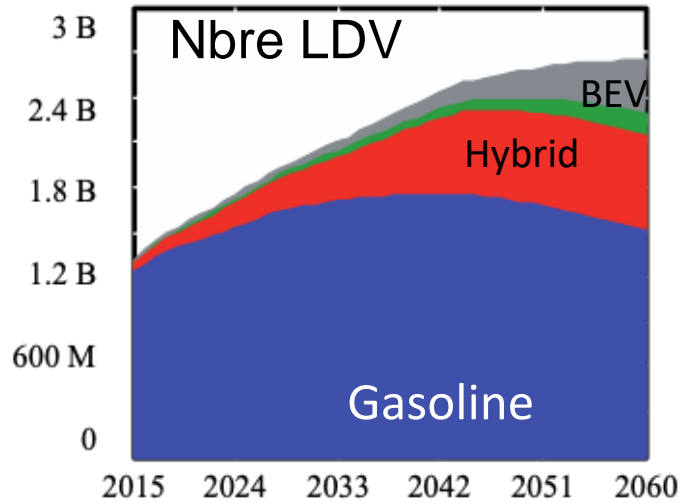


X 2

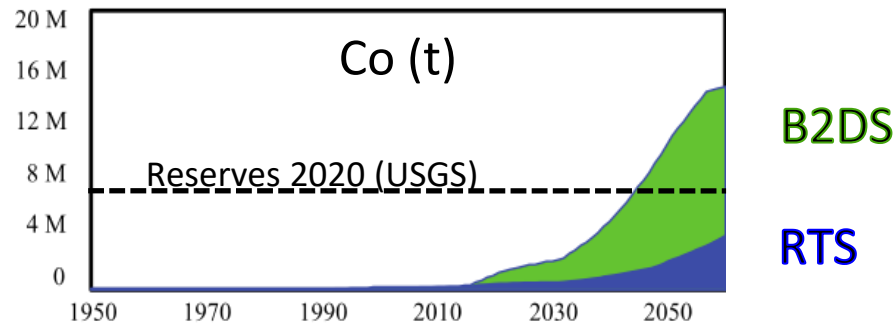
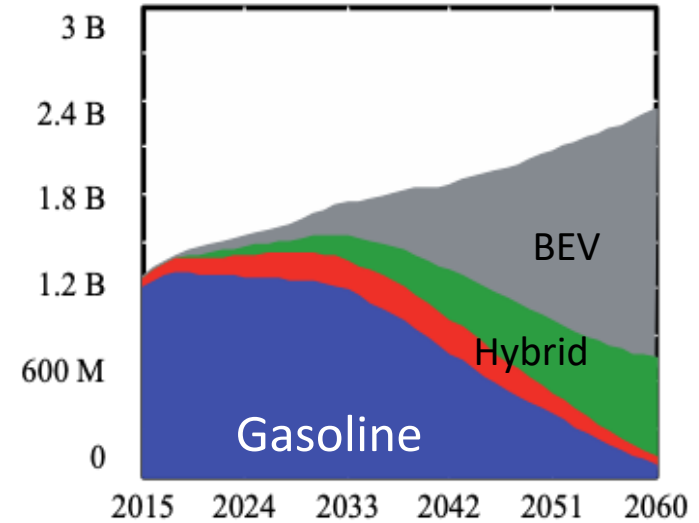


Transport routier – cobalt des batteries Li-ion

RTS (iea2017)

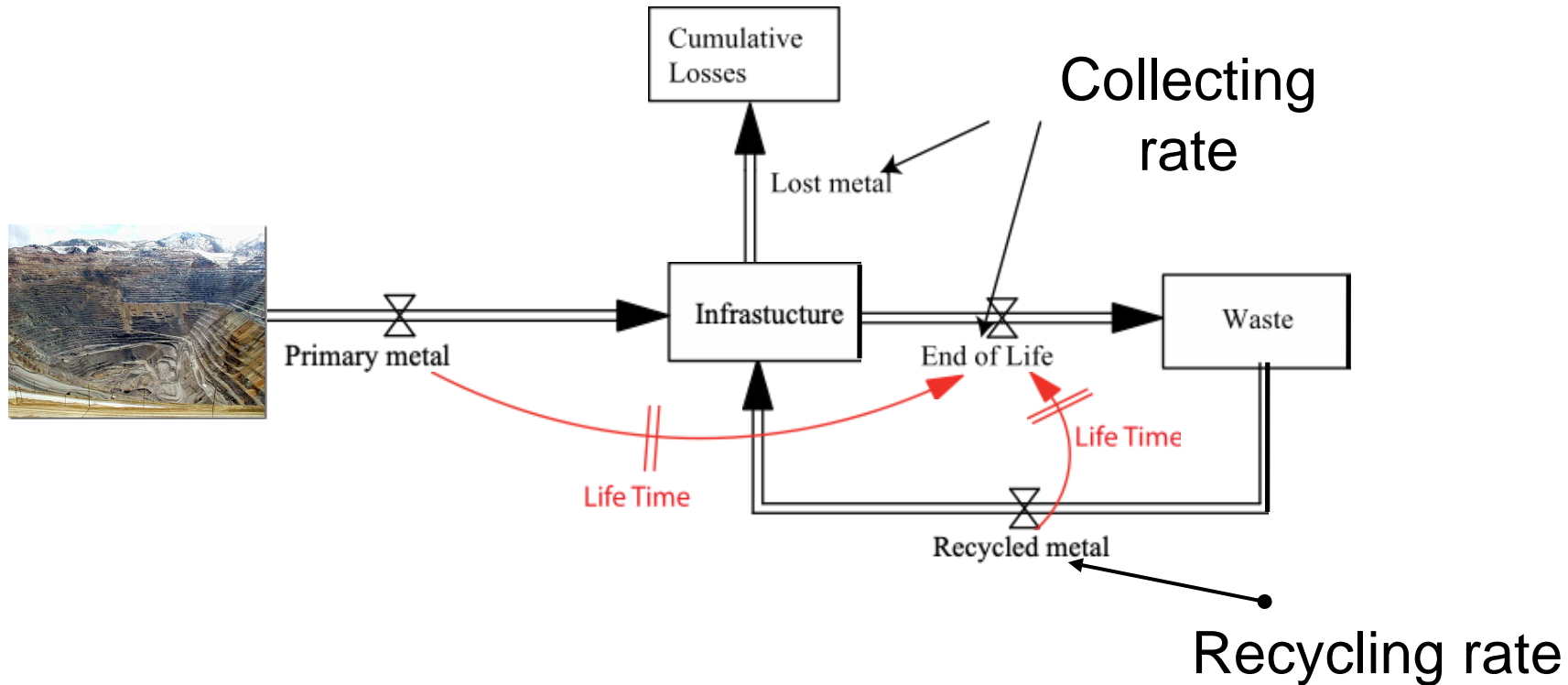


B2DS (iea2017)



Comment estimer la quantité de ressource primaire vs recyclée à produire ?

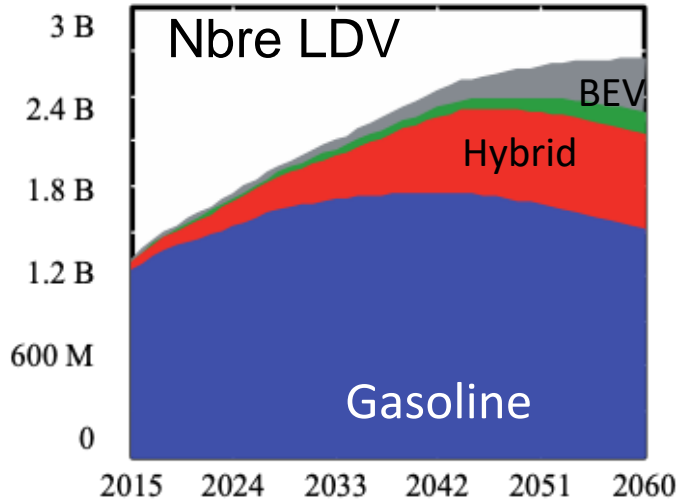
Un problème de stock & flux...



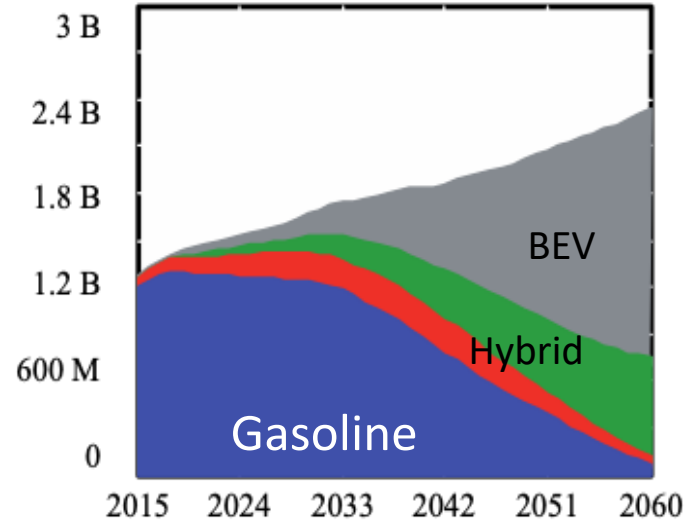
- \int primary production $>$ stock in infrastructure
- les flux de recyclage dépendent de la consommation totale

∫ primary production > stock in infrastructure

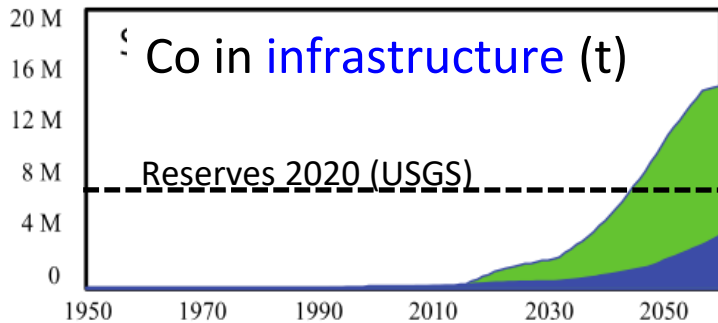
RTS (iea2017)



B2DS (iea2017)

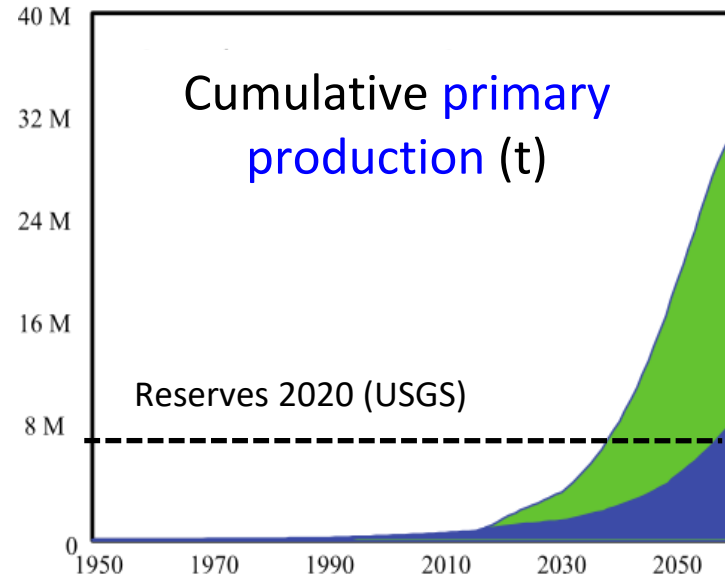


RR = 0.3 => 0.5 in 2050
 Lifetime Battery = 10 years



B2DS

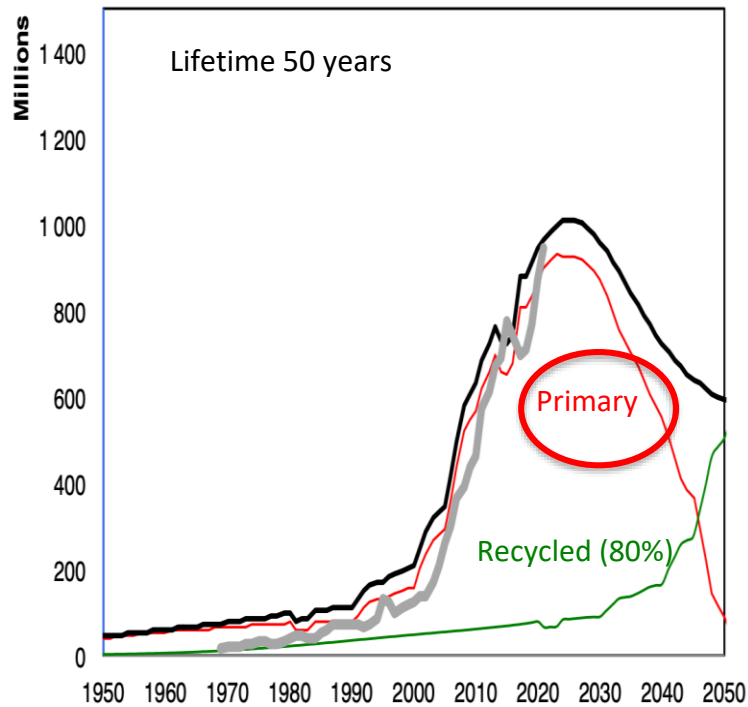
RTS



les flux de recyclage dépendent de la consommation totale

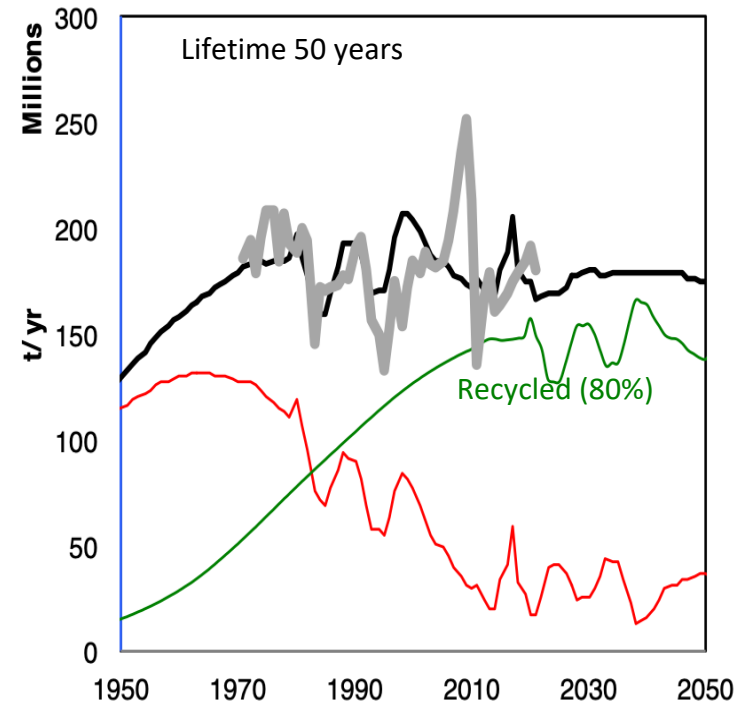
... situation variable entre pays riches et en développement

China



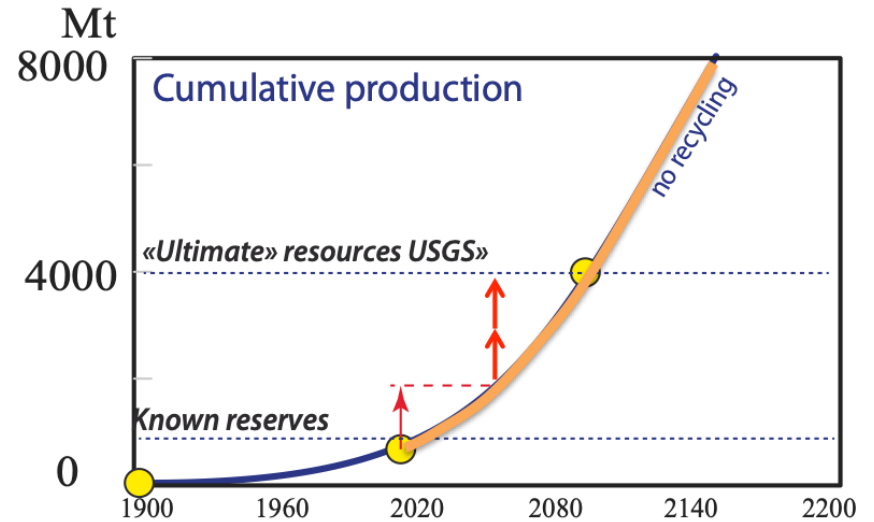
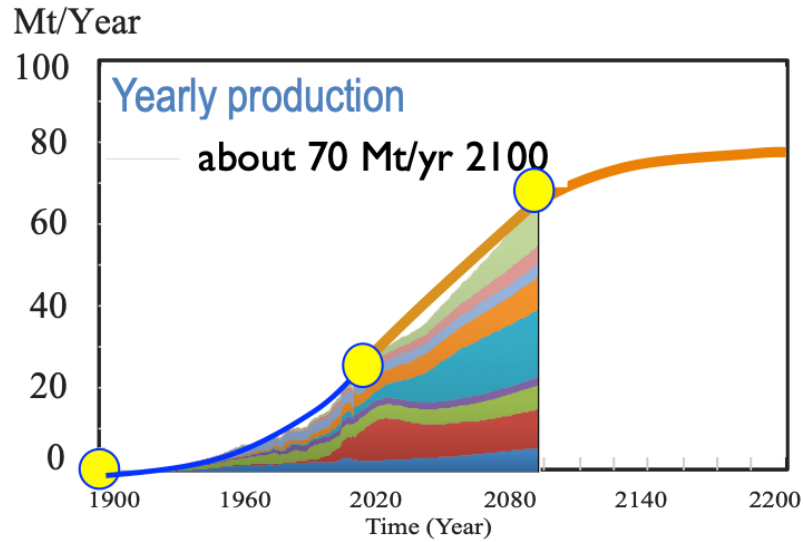
Acier

Europe



Quelles capacités de production ? =
quelle disponibilité, et à quel prix ?

Demande future en cuivre = f(PIB, population) pour un scénario BAU



Quantité cumulée (Cu)

44 en 30 ans

130 en 80 ans

272 en 180 ans



Kennecott Copper Mine (Utah) $3.2 \times 1.2 \times 1.2 \text{ km}^3$.



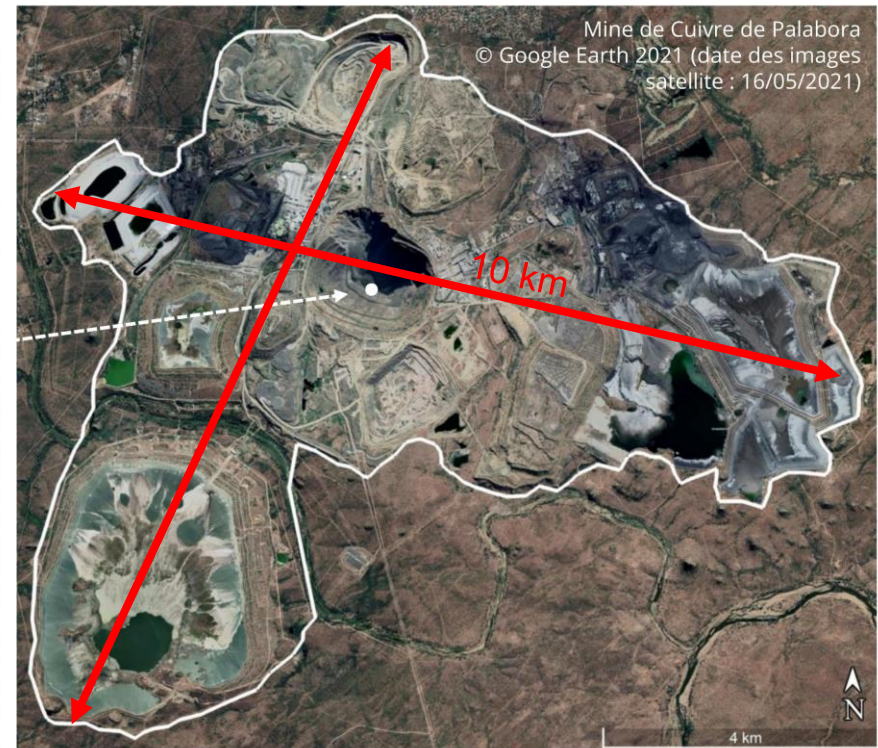
1000 tCu (Chile)

to fill a lake in 30 years

(recycling)

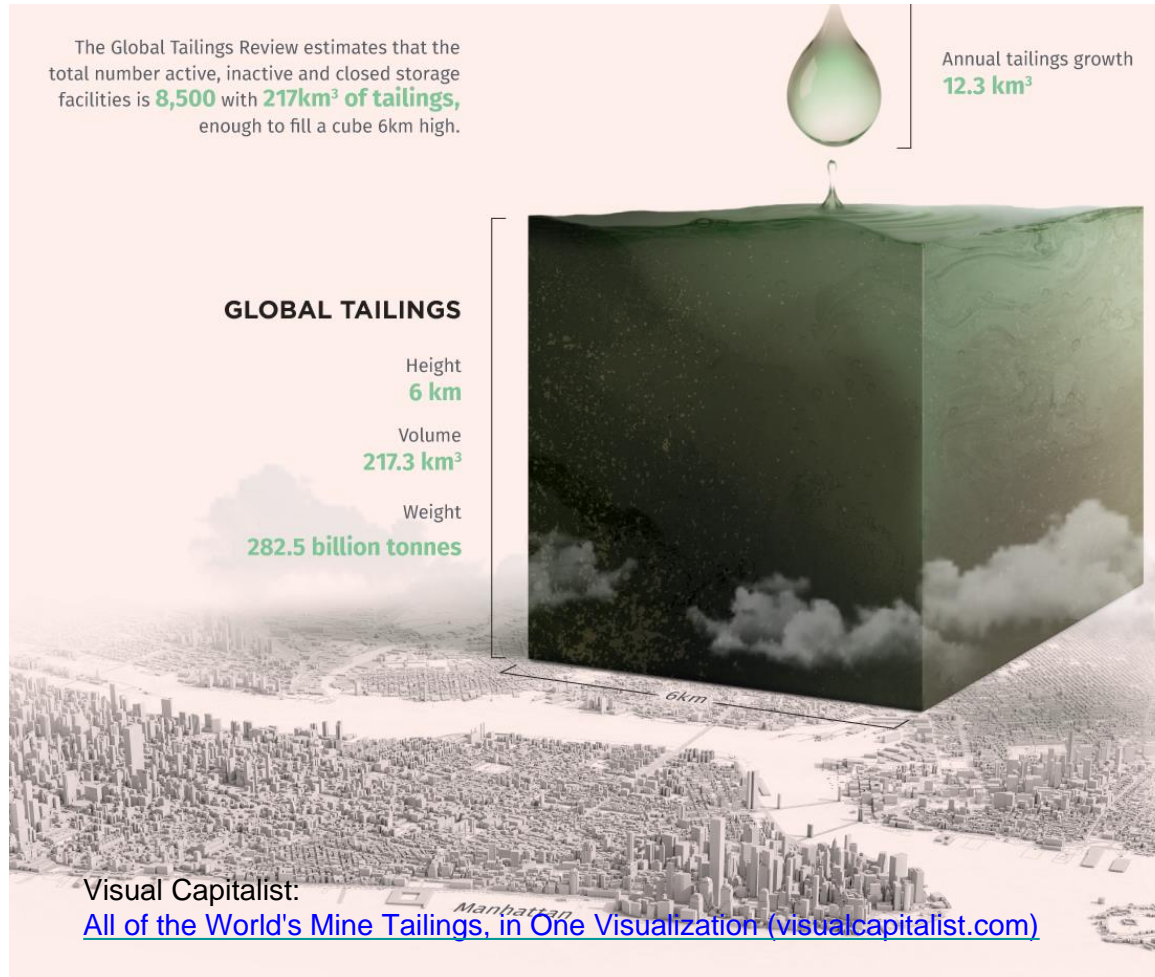
Hormis l'accès à la ressource, limite = les impacts environnementaux

Palabora (afrique du sud) => 4 millions de t de cuivre en 40 ans (16% de la consommation mondiale 2020)



Systext 2021 – Controverses minières Volet 1

Volume de déchets miniers



Limite 1: Les impacts environnementaux => opposition sociale

The Guardian: 30/03/2017

El Salvador makes history as first nation to impose blanket ban on metal mining

PRESS RELEASE: Colombians threatened with death for opposition to mega-mining project as defenders visit UK

Ecuador's rising opposition to mining may thwart exploration boom – by Cecilia Jamasmie (Mining.com – January 6, 2019)

January 7, 2019 in Canadian Media Resource Articles, Copper, Gold and Silver, Latin America Mining, Mining Conflict and Opposition

The Chilean government is taking on a U.S. mining company in a spat that could rattle the electric-car industry.

Financial Time: 17/02/2019

Australian coal industry jolted as 'climate change' ruling blocks mine

Penhalonga and Tsvingwe Community Opposition to Destructive Mining Impacts

PNG government rethinking China mining deal after opposition

Mining Technology: 17/01/2017

While in Africa, formerly considered one of the continent's brightest mining prospects, investment in Tanzania's mining industry has slowed due to a crackdown on firms by the government as it attempts to reap greater benefits from the sector.

Limite 2: Epuisement des réserves (peak oil, peak metals) ?

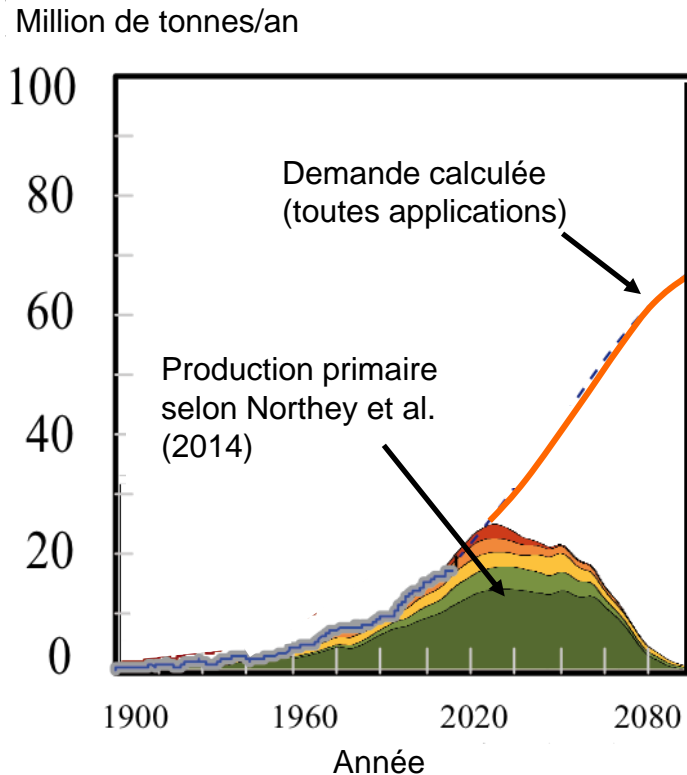
2014

1924

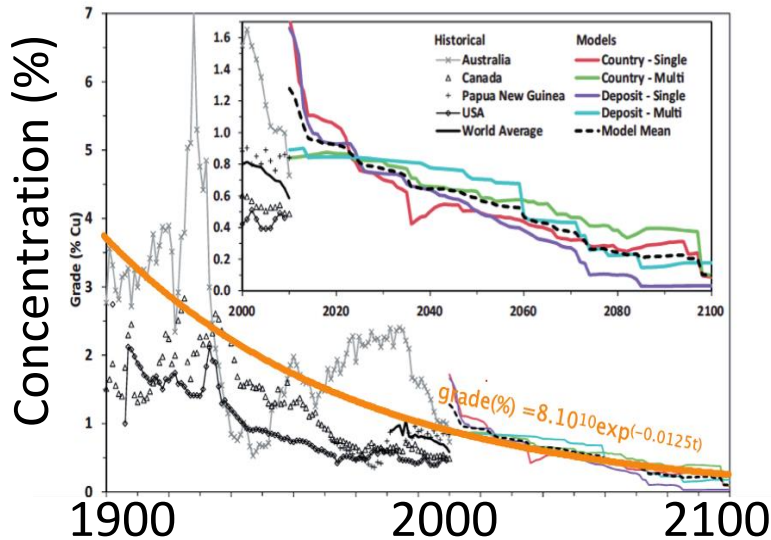
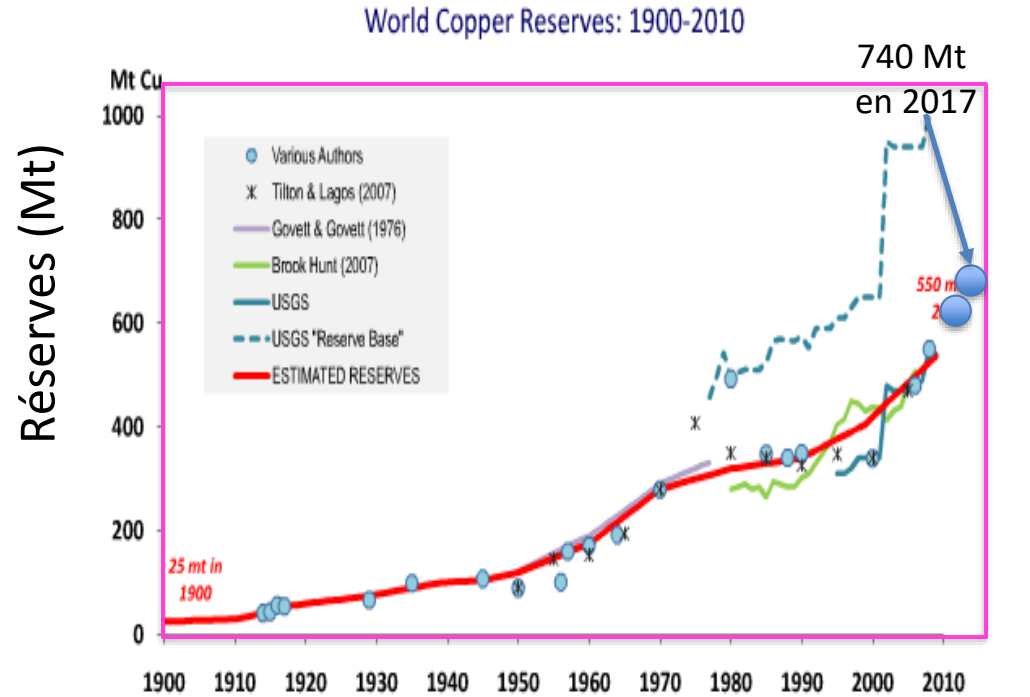
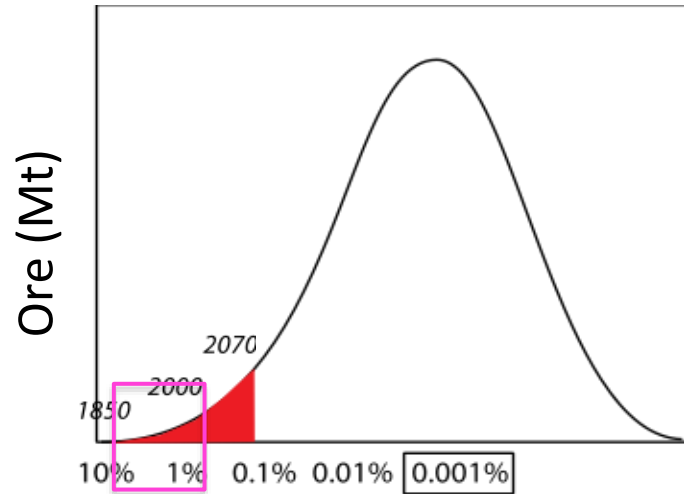
Copper and Electricity to Vanish in Twenty Years?

LAST WEEK we reprinted part of an address made by Ira B. Joralemon before the Commonwealth Club of California, in which he stated that "the age of electricity and of copper will be short. At the intense rate of production that must come, the copper supply of the world will last hardly a score of years. . . . Our civilization based on electrical power will dwindle and die." We are rather surprised that a geologist of Mr. Joralemon's standing cannot use his imagination a little more than this, but no doubt he was painting the picture as black as possible so that copper miners would wake up to the fact that they are rapidly wasting a valuable natural resource with little or no profit to themselves. Known deposits of copper ores of a present commercial grade are limited, as Mr. Joralemon says, and it might be possible that in twenty years electrical requirements will have milked most of them dry. But metallurgical methods will advance; likewise prices, we hope; so that it will pay to mine lower grade deposits of which there is a tremendous tonnage available, and also deeper deposits such as our friends in Michigan have. And we can hardly believe that all the copper resources of the world are known. Twenty years ago, for example, who would have classed such deposits as those at Chuquicamata and Bingham Canyon as important factors, even with the price of copper somewhat higher than it is now?

As to the electrical industry, we can hardly believe that all our electricity will go back into the clouds where Franklin found it, just because copper is scarce. Maybe copper won't be required at all for transmission purposes; we may just use the ether.



En réalité, les réserves de tous les métaux n'ont cessé d'augmenter depuis 1900...

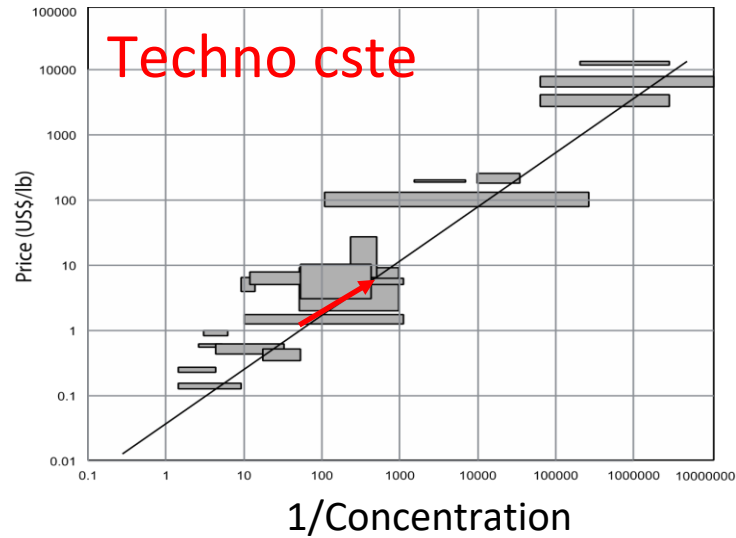


OUI MAIS...
les coûts énergétiques et économiques ?

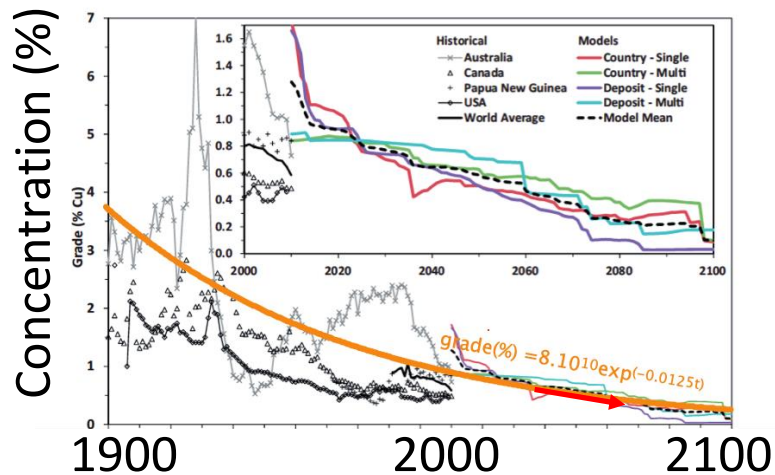
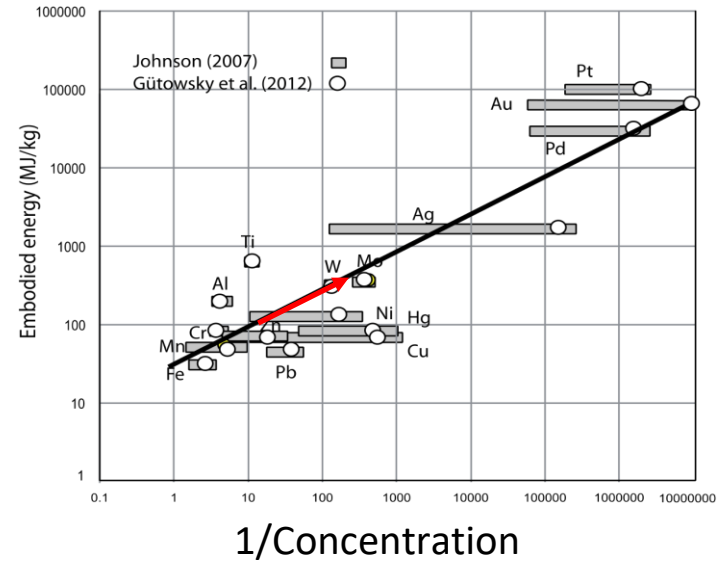
Sources: Various
MinEx Consulting March 2010

Limite 2 : Les couts énergétiques et économiques ?

$$\text{Prix} = a \cdot (1/C_{\text{metal}})^u$$

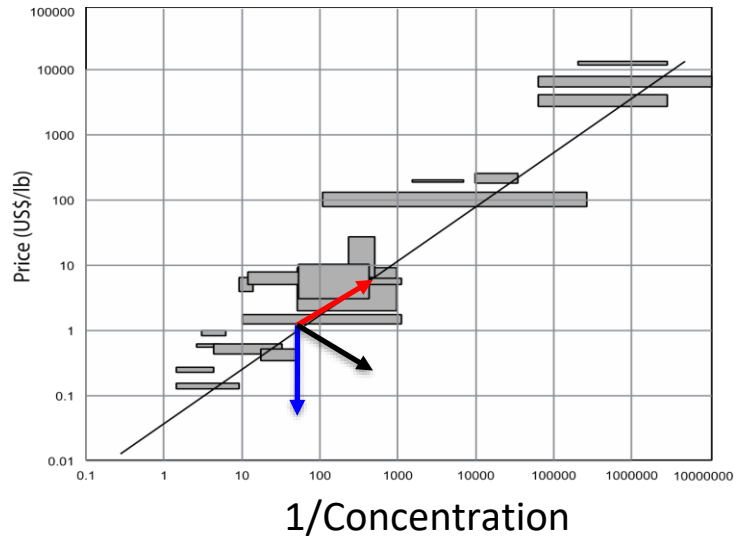


$$\text{Energie} = b \cdot (1/C_{\text{metal}})^v$$

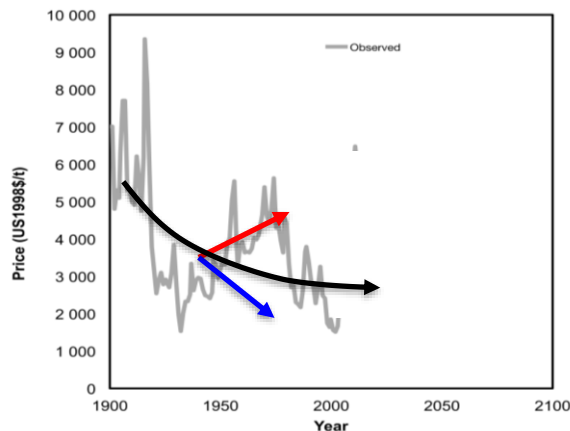
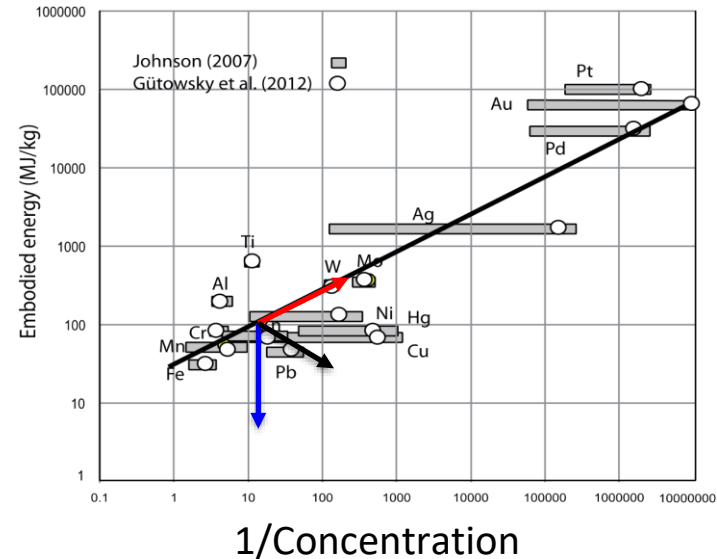


Limite 2 : Les couts énergétiques et économiques

$$\text{Prix} = a.(1/C_{\text{metal}})^u$$



$$\text{Energie} = b.(1/C_{\text{metal}})^v$$



Le prix a baissé jusqu'au début des années 2000 car l'amélioration technologique a compensé la baisse de qualité...

Limite 2: Les limites thermodynamiques

$$E = \eta \cdot \left(\Delta G_f^\circ + \frac{0.2}{\bar{C}} \right)$$

1/efficacité ↓
↑ Métallurgie ↑ Broyage

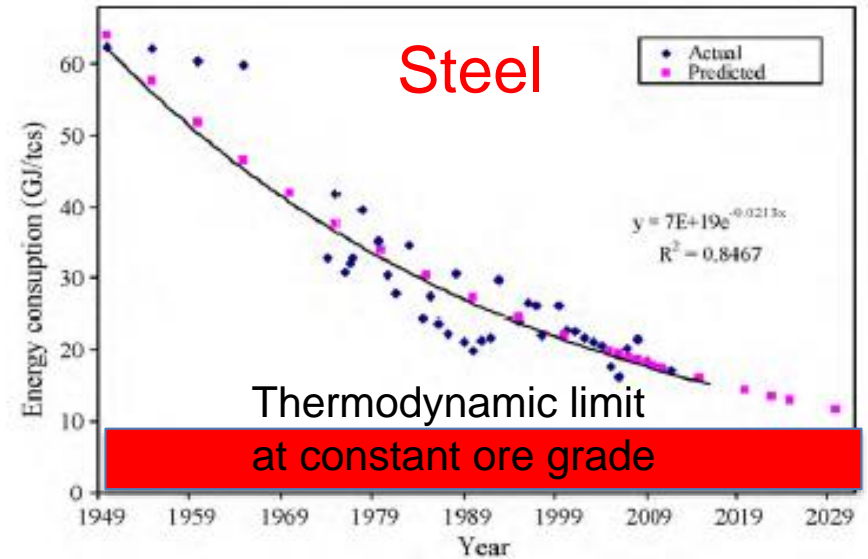


Fig. 5. Actual and projected specific energy consumption in the steel industry (world average).

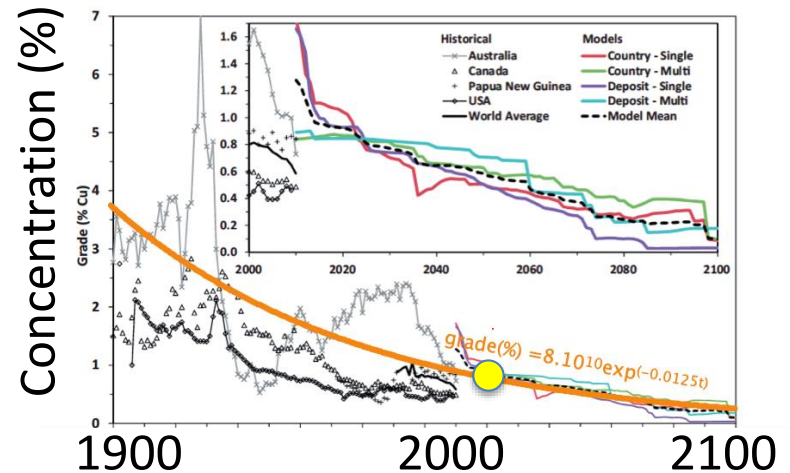
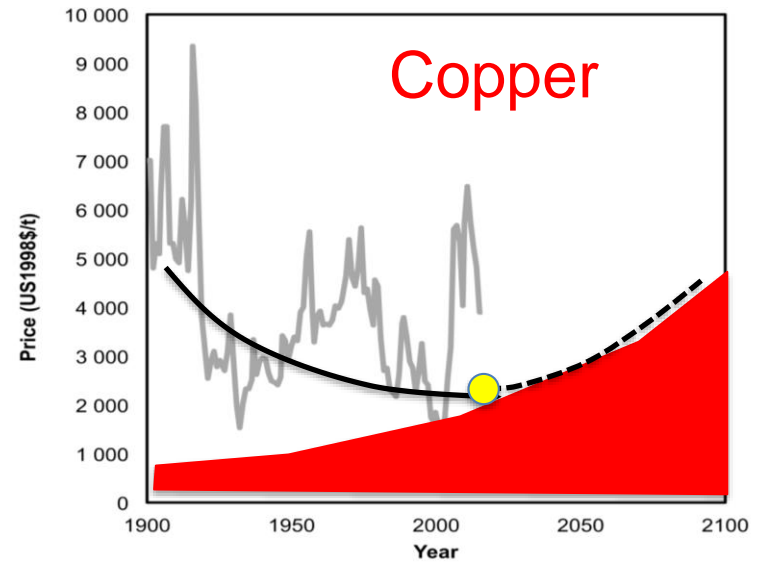
Le potentiel d'amélioration technologique est contraint par une **limite thermodynamique**

Limite 2: Les limites thermodynamiques

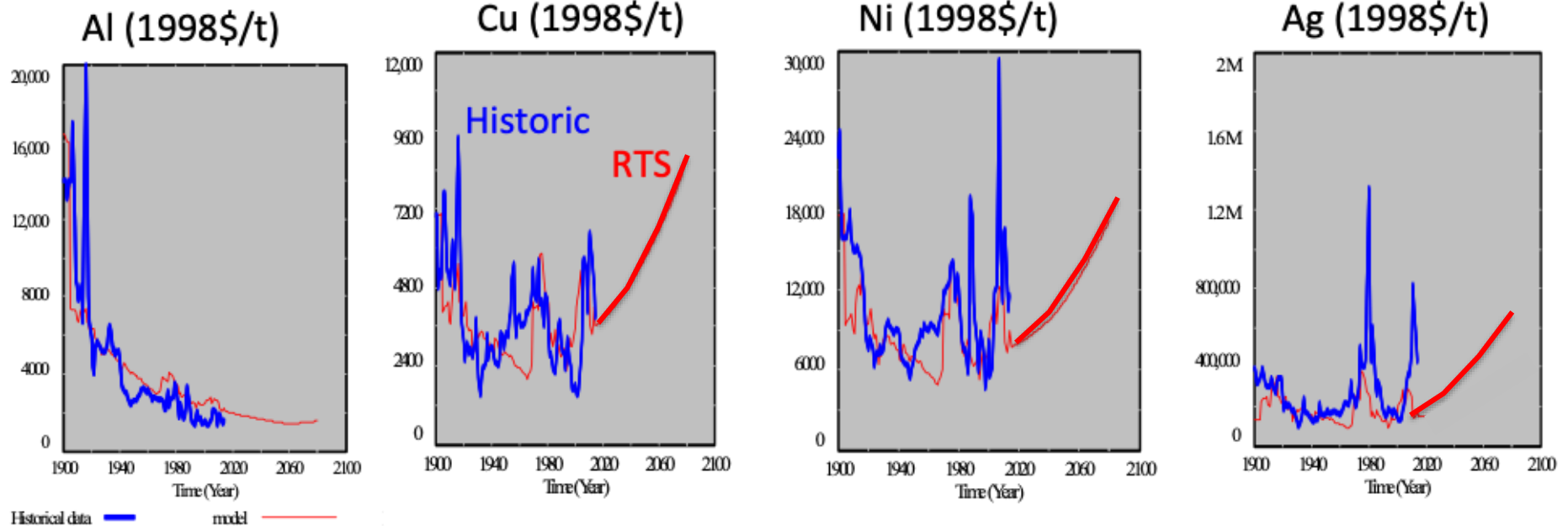
1/efficacité
↓
$$E = \eta \cdot \left(\Delta G_f^\circ + \frac{0.2}{\bar{C}} \right)$$

↑
Broyage

L'amélioration technologique est limitée par une **limite thermodynamique**

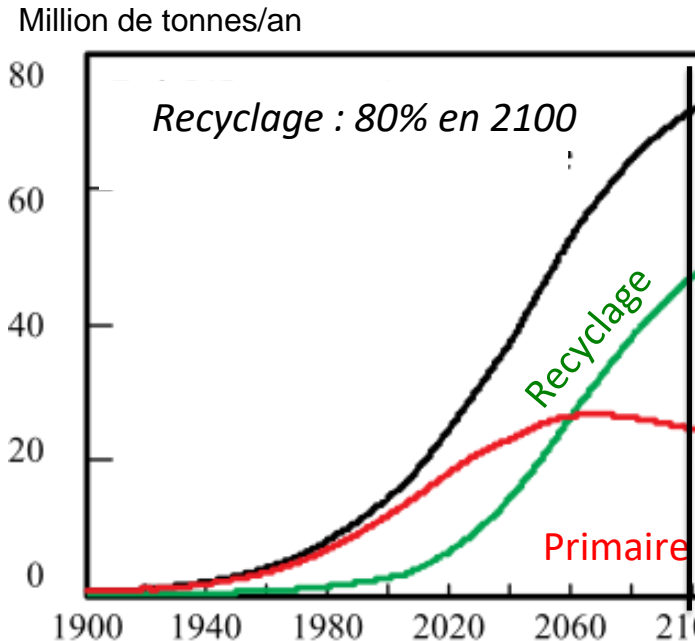


Les couts énergétiques et économiques



La disponibilité future est fonction du prix que l'on sera prêts à payer, des impacts que l'on est prêt à accepter... et du prix de l'énergie

Et le recyclage ?



Il faut doubler le taux de recyclage d'ici 2100

Avantage: le recyclage est 80% moins énergivore que la production primaire

OUI MAIS...

- 1) Difficulté à séparer les métaux d'alliage => coût pour une pureté désirée vs coût production primaire ?
- 2) Le recyclage est une économie de flux qui dépend du type de produits en fin de vie disponibles

News ▾

Industry Tools ▾

Media ▾

Magazine ▾

Events ▾

Subscribe ▾

**EXPERT SOLUTIONS FOR
YOUR RECYCLING NEEDS**

VAN DYK®
recycling solutions
[Learn More ▶](#)

Solvay Opens Rare Earth Metals Recycling Plants in France

European chemical company invests \$19.5 million in two facilities.

October 3, 2012
Recycling Today Staff



Electronics

Legislation & Regulations

Metallics

Additional Commodities

Solvay Group, a chemical group headquartered in Brussels, has officially opened two rare earth metals recycling plants in France. The two plants are designed to allow the company to diversify its supply of rare earth metals and preserve resources.

Solvay says it has developed a process to recover rare earth metals from end-of-life products, such as light bulbs, batteries and magnets.

Research into and development of the process began in 2007 and took two years, followed by two years of industrialization studies and site selection, according to the company. The investment was officially approved in 2011.

Solvay says it focused initially on low-energy light bulbs because the recovery channels already existed. The light bulbs have an ample amount of six different rare earths—lanthanum, cerium, terbium, yttrium, europium and gadolinium—which Solvay is in position to recycle while preserving 100 percent of their

Hua adds, "The launch of these units illustrates our tangible contribution as a chemical manufacturer to sustainable development."

2016: Solvay Ferme ses usines de recyclage

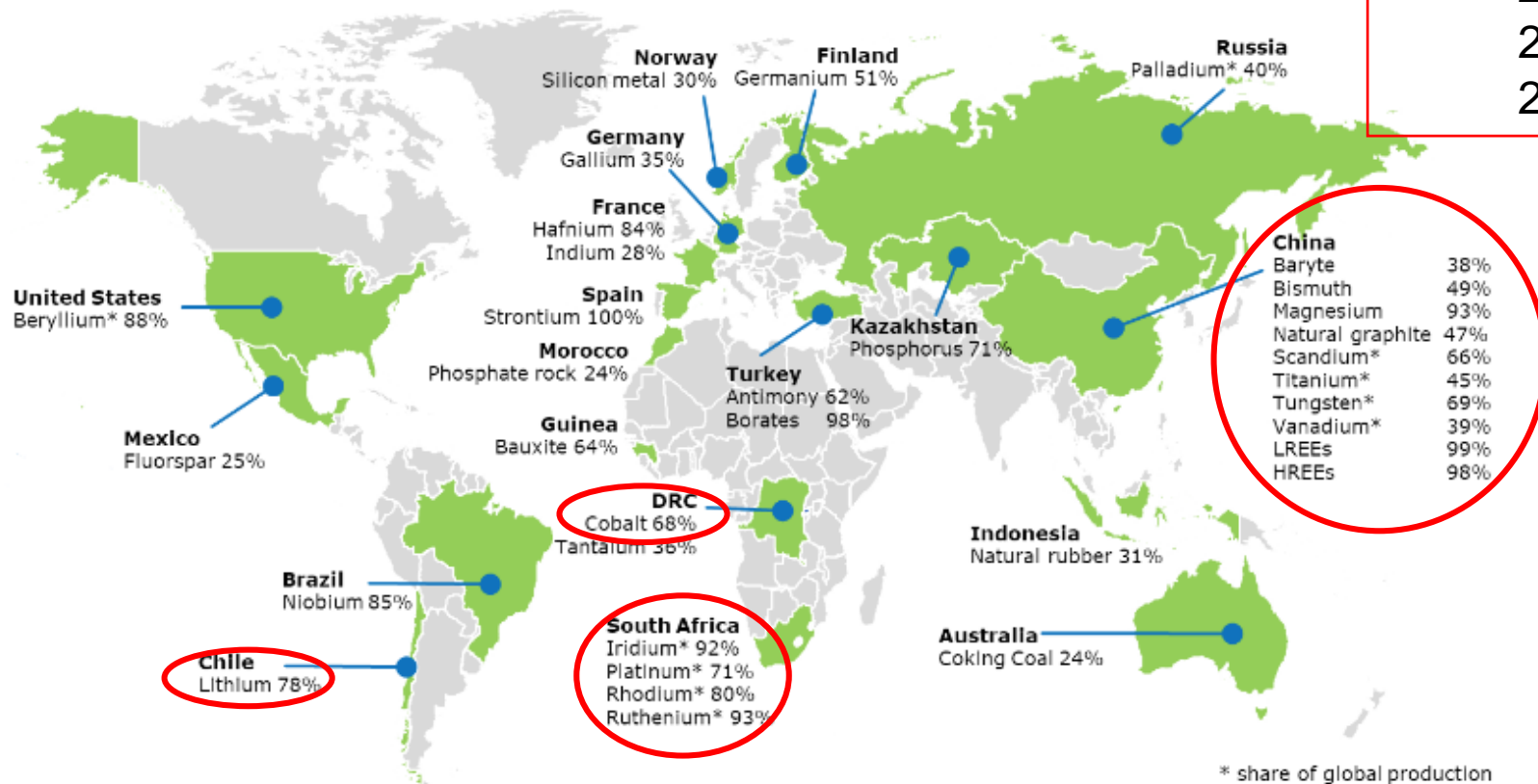
-> Le coût de production est trop élevé au prix des REE en 2015

-> arrivée des LED

Contrainte 3: géopolitique

L'Europe consomme 20% des métaux produits mondialement, elle en produit environ 3%

Figure E: Countries accounting for largest share of EU sourcing of CRMs



Nbre de CRM Europe
2011: 14
2014: 20
2017: 27
2020: 30

Contrainte 3: géopolitique

Le poids de la Chine existe aussi sur les métaux de base...

En 2018, La Chine a produit en moyenne 45% de l'aluminium, plomb, acier, cuivre, nickel, zinc et étain raffinés mondialement.

L'Europe et les US ont consommé 14% and 8% de ces métaux raffinés, leur production domestique étant inférieure.

Cette position dominante de la Chine sur les métaux de base lui donne un pouvoir très important de contrôle des prix et de l'approvisionnement.

Perger (2022) Regional shifts in production and trade in the metal markets: a comparison of China, the EU, and the US. Mineral Economics (2022) 35:627–640

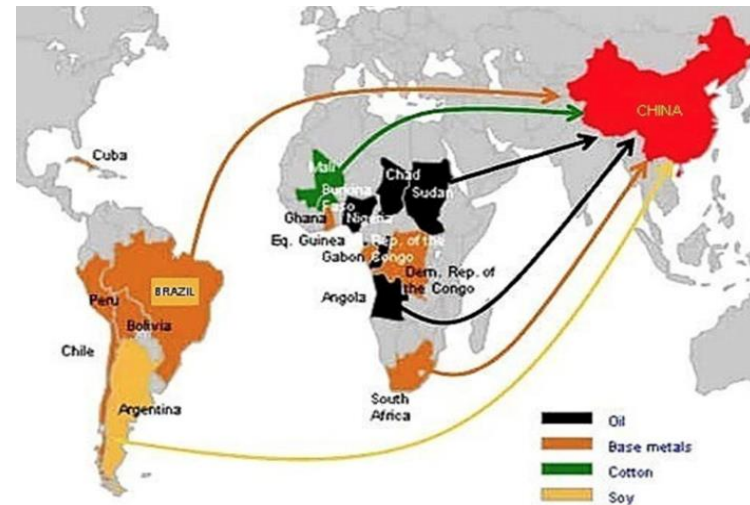
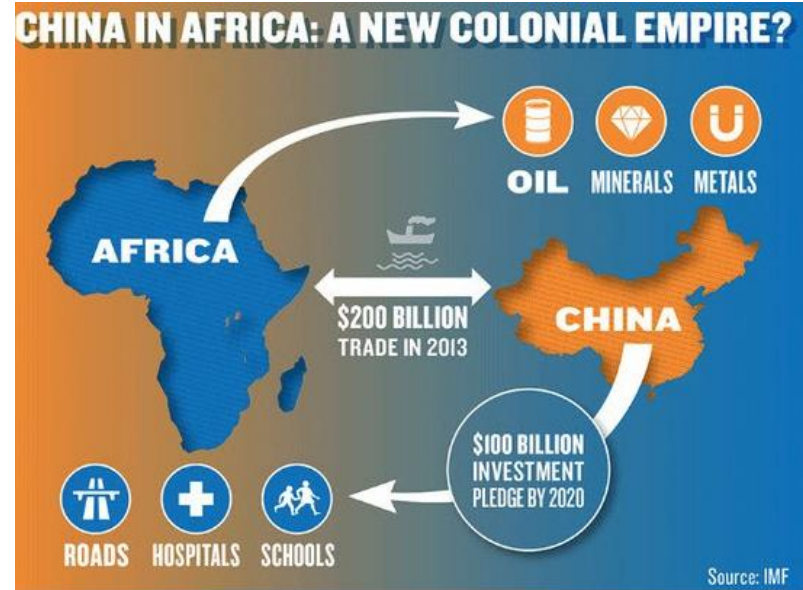
Contrainte 3: géopolitique

La Chine va aussi chercher ailleurs ses matières premières...

Selected Chinese Infrastructure Projects in Africa



Source: Various; THE BEIJING AXIS Analysis



Conclusion

- Les ressources minérales sont aussi centrales que l'énergie. *La minimisation de l'utilisation et la maximisation du recyclage sont CRUCIALES*
- La demande et l'approvisionnement dépendent des scénarios technologiques et économiques + dimensions géologique, géopolitique, environnementale et "sociale". *Pas de chemin unique, le futur sera différent du passé*
- L'absence de pénurie n'est pas un signe d'abondance, c'est un signe de progrès technologique qui masque la dégradation des ressources. *Que se passe-t'il quand la limite thermodynamique est atteinte ? Peut-on envisager de nouvelles ressources « non conventionnelles » ?*
- La modélisation dynamique est cruciale pour comprendre la mécanique, *anticiper les difficultés, la vulnérabilité et le risque, et s'adapter au changement*

Conclusion

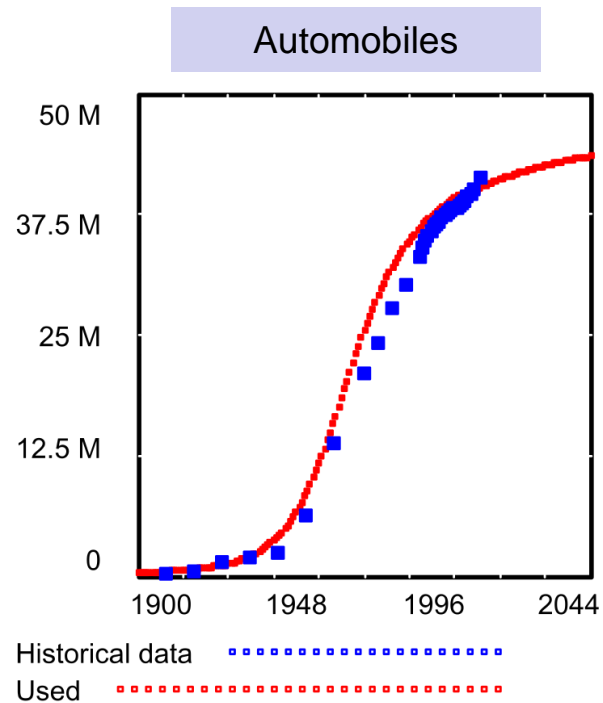
Le développement de nouveaux matériaux, alliages et technologies

- Permet d'améliorer les efficacités, les performances et la durabilité
- Est sur le principe en phase avec la transition énergétique

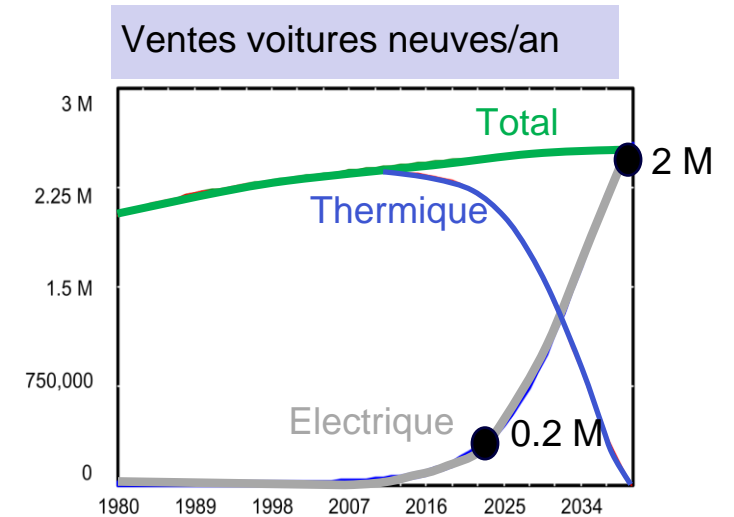
mais nous sommes gagnants uniquement si

- Pas d'effet rebond
- Pas de création de nouveaux besoins et impacts
- Le potentiel de recyclage est assuré à domicile

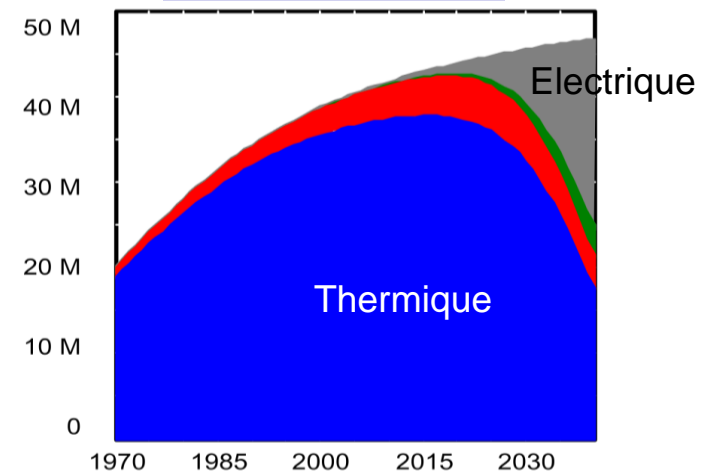
Exemple: le parc automobile - France



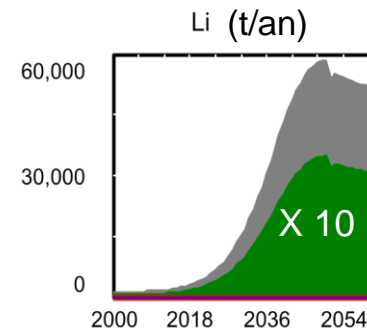
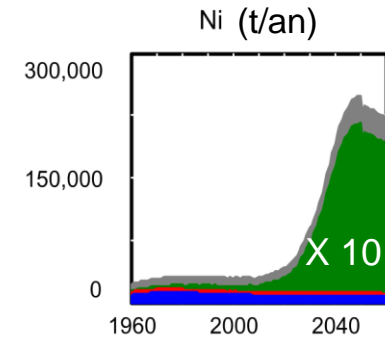
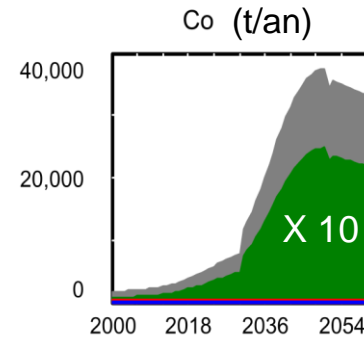
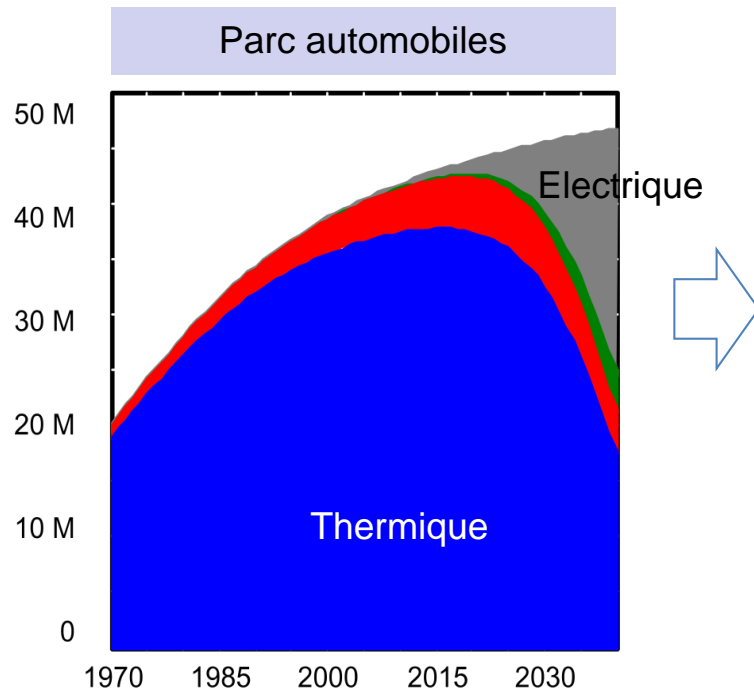
→
durée de vie
= 15 ans



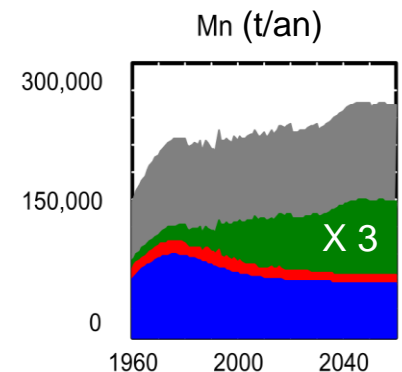
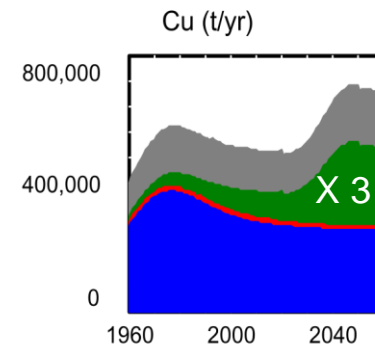
↓
Parc automobiles



Besoins matières pour les VE (technos actuelles, 50 kWh) - France



Autres
Transport
Energie
Batiment



Attention: les technos évoluent !