



Institut des Sciences
de la Terre

Matières premières et énergie

Dynamic Modeling of Energy and Mater
Demand and Supply

15/02/2022

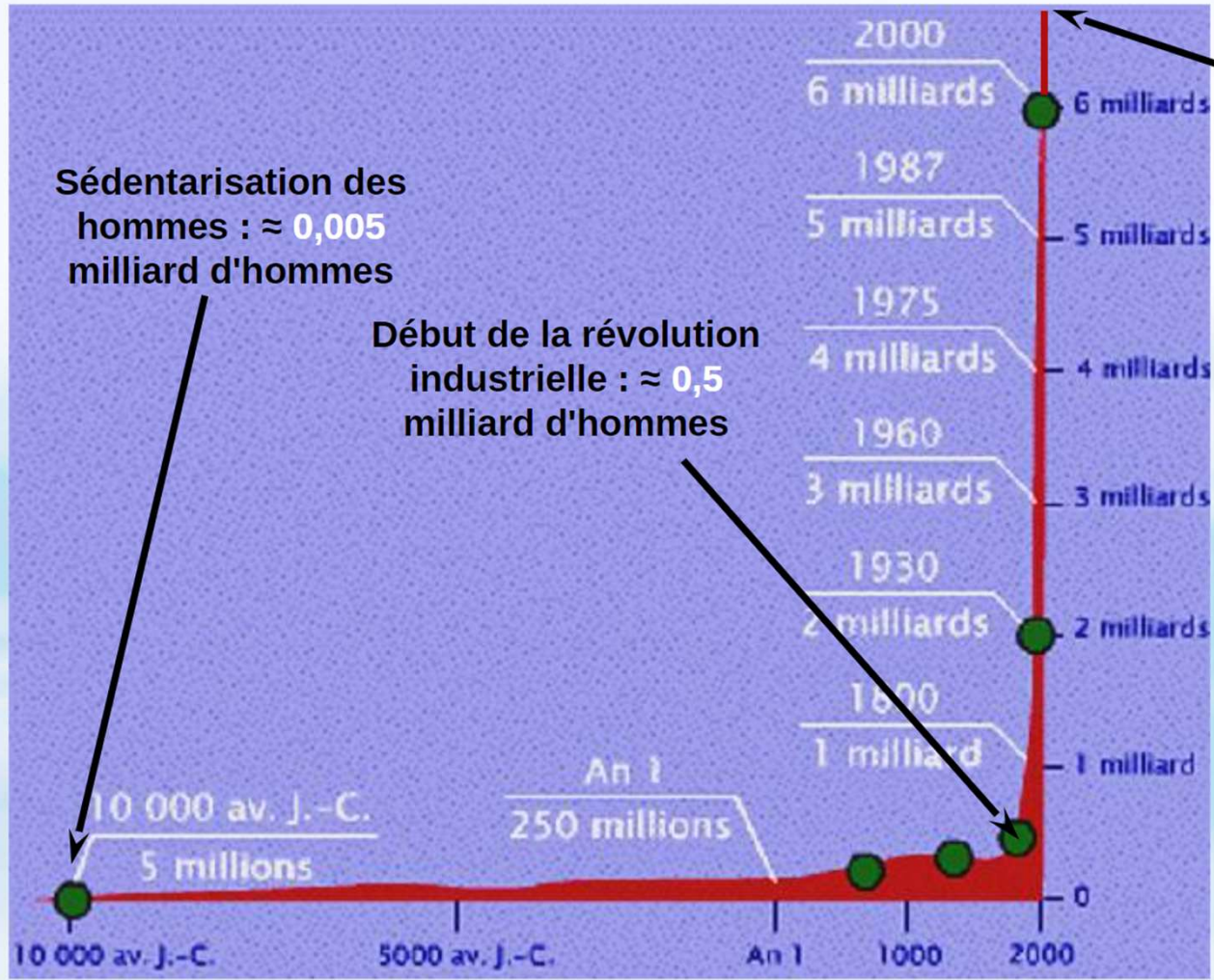
Baptiste Andrieu
Baptiste.andrieu@theshiftproject.org



Sommaire

- **Contexte global – consommation matières premières**
- **Transition énergétique – hausse de la demande**
- **Terminaux numériques – hausse de la demande**
- **Limites thermodynamiques à l'extraction**
- **Besoin de modélisation**
- **Impacts et risques**

- **Contexte global – consommation matières premières**
- **Transition énergétique – hausse de la demande**
- **Terminaux numériques – hausse de la demande**
- **Limites thermodynamiques à l'extraction**
- **Besoin de modélisation**
- **Impacts et risques**



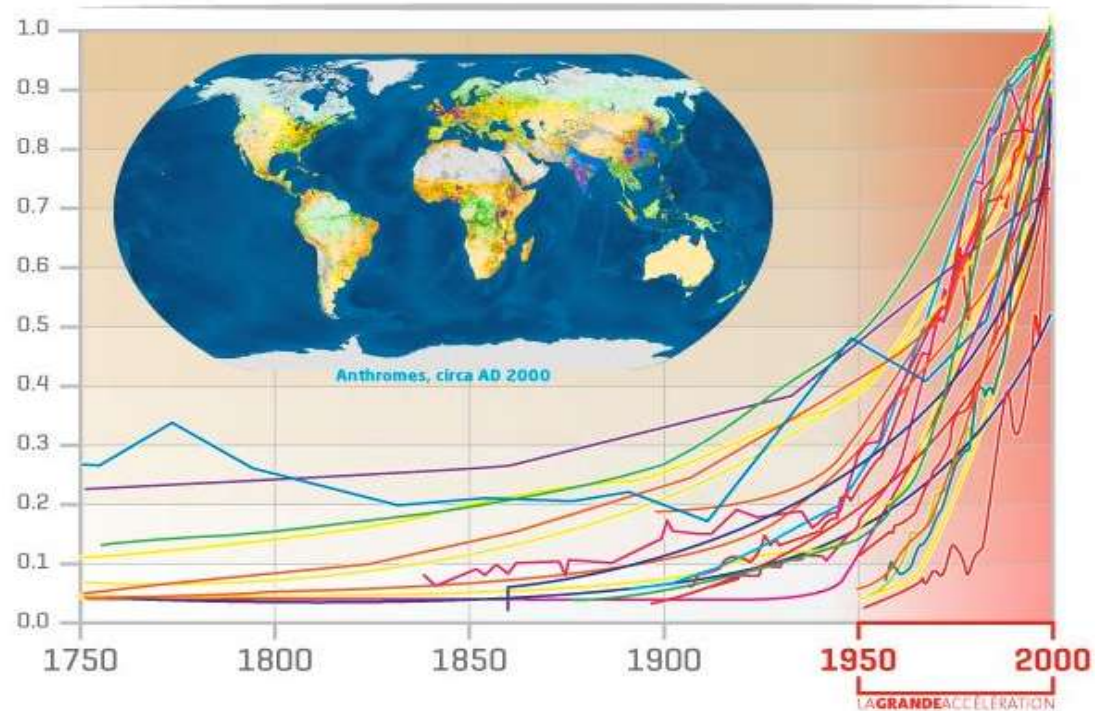
2018 > 7 milliards d'hommes... and rising

Évolution démographique depuis le néolithique (découverte de l'agriculture). Source : Musée de l'Homme

Source : Jancovici

L'Anthropocène

Vingt-quatre indicateurs ; un graphique



LES INDICATEURS:

1. Population mondiale
2. Total du PIB réel
3. Investissements directs à l'étranger
4. Concentration du CO₂ atmosphérique
5. Concentration du N₂O atmosphérique
6. Concentration du CH₄ atmosphérique
7. Appauvrissement de l'ozone atmosphérique
8. Températures surfaciques de l'hémisphère Nord
9. Grandes inondations
10. Construction des barrages de rivières
11. Utilisation de l'eau
12. Consommation de fertilisants
13. Population urbaine
14. Consommation de papier
15. Nombre de restaurant McDonald
16. Nombre des pêcheries exploitées
17. Structures des zones côtières
18. Biogéochimie des zones côtières
19. Véhicules motorisés
20. Nombre de téléphones
21. Tourisme international
22. Disparition des forêts tropicales et prairies
23. Terres domestiquées
24. Nombre d'espèces éteintes

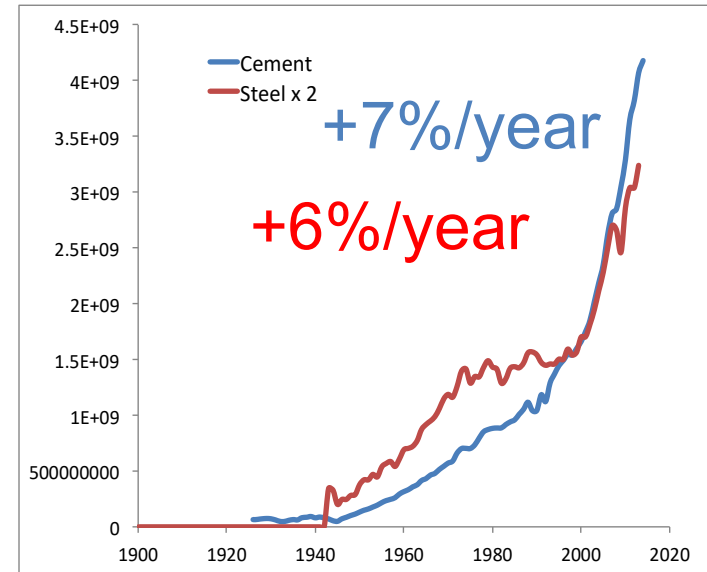
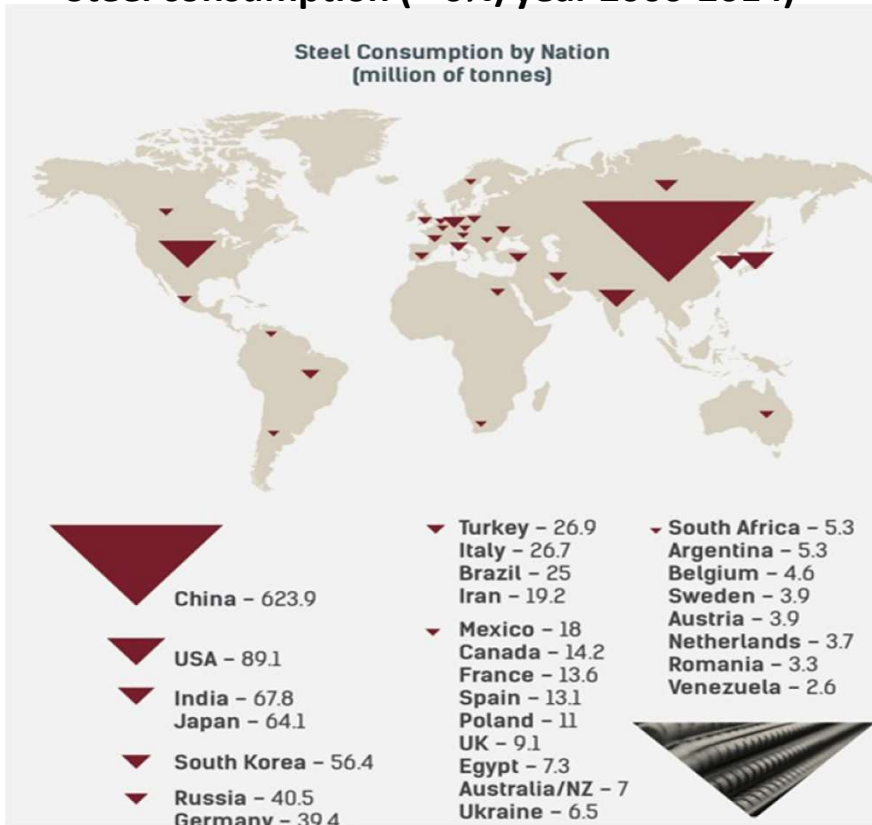
Steffen
et al. (2015)



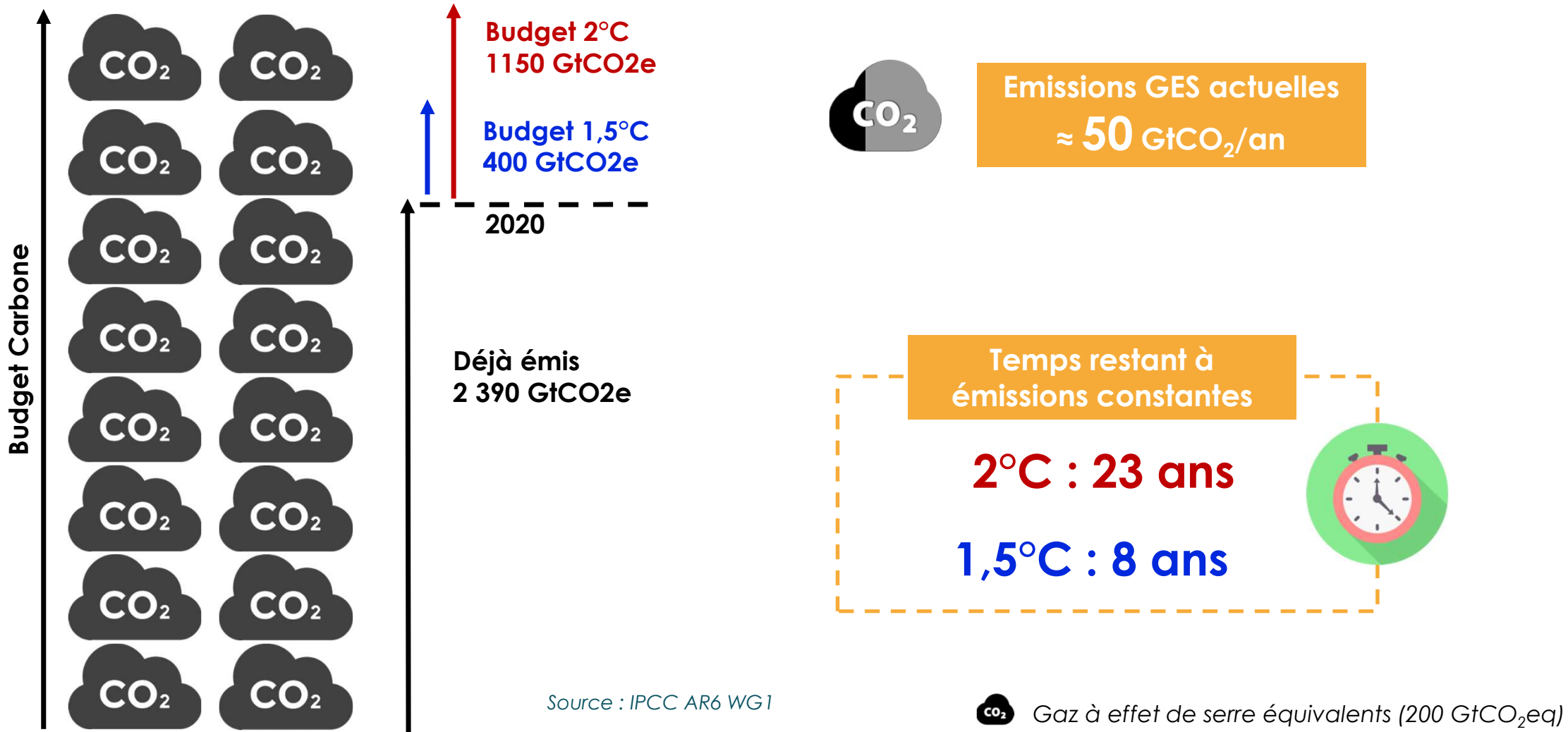
Structural raw materials – concrete, steel, Al, Cu

$(1.06)^{12\text{years}} = 2$

Steel consumption (+ 6%/year 2000-2014)



Le budget carbone mondial



Notre dépendance aux énergies fossiles



159 litres
50 par 80 cm

100 millions
barils/jour

80 000 km de
haut

Terre-Lune en 5
jours :
384 400 km



L'homme produit avec machine, ou la machine produit avec hommes ?



= 100 W pour les jambes, 10 W pour les bras



= 60 kW \approx **600** paires de jambes



= 100 kW \approx **10.000** paires de bras



= 400 kW \approx **4.000** paires de jambes



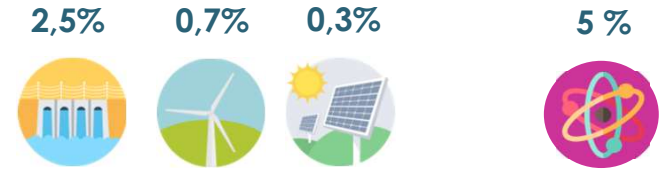
= 100 MW \approx **1.000.000** paires de jambes...



= 100 MW \approx **10.000.000** paires de bras !

Source : Jancovici

Consommation mondiale d'énergie

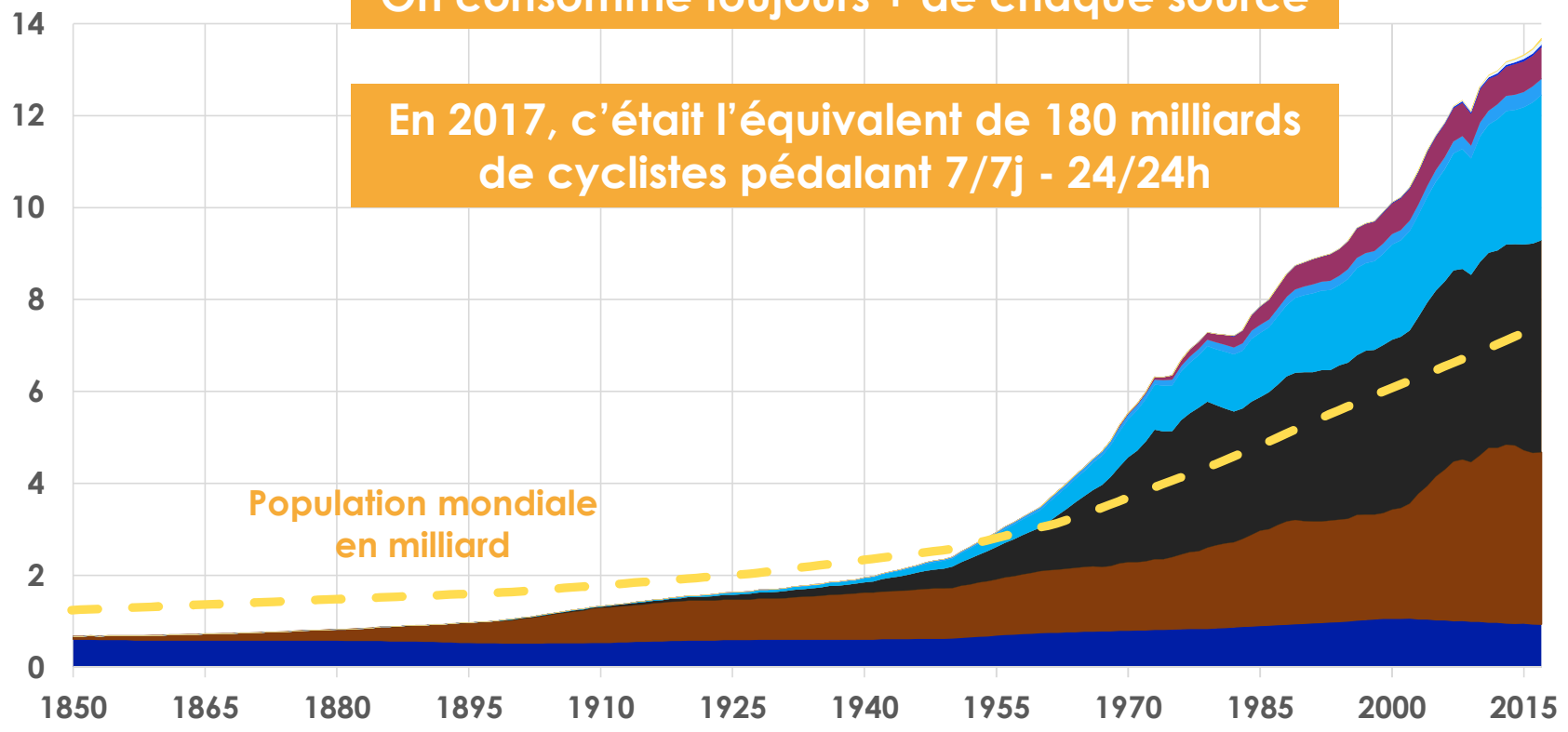


Le monde repose sur les énergies fossiles

On consomme toujours + de chaque source

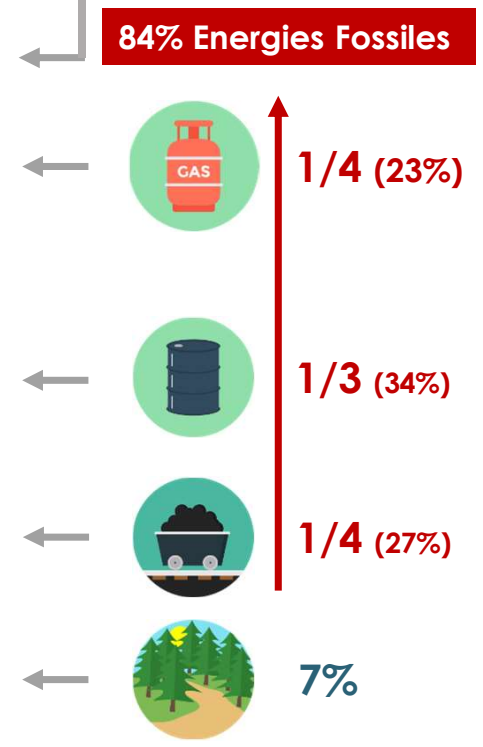
En 2017, c'était l'équivalent de 180 milliards de cyclistes pédalant 7/7j - 24/24h

Milliards de tonnes équivalent Pétrole - Gtep



Population mondiale en milliard

Evolution de la consommation l'énergie primaire dans le monde (Gtep)



Vaclav Smil (2017). *Energy Transitions: Global and National Perspectives.* & BP *Statistical Review of World Energy : 2017*

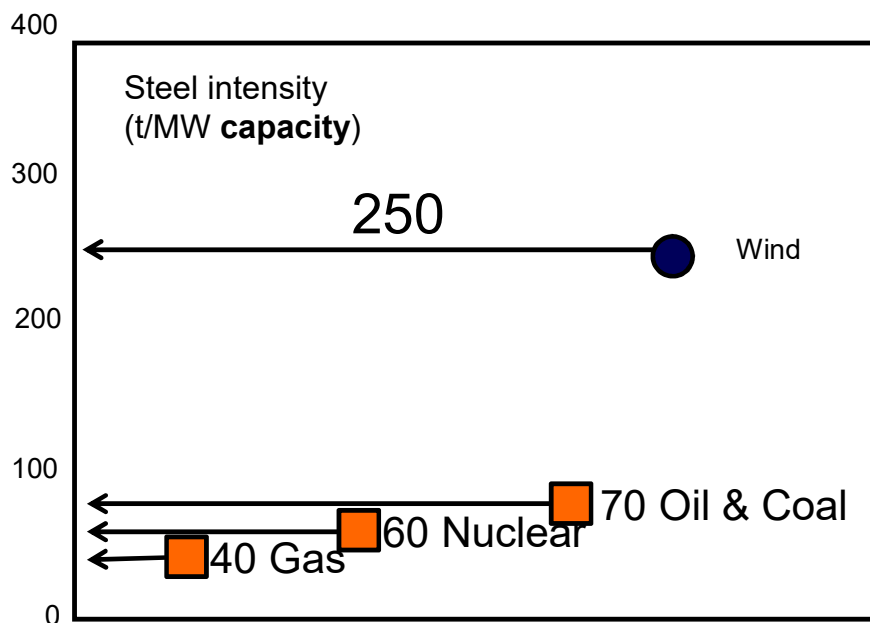
- **Contexte global – consommation matières premières**
- **Transition énergétique – hausse de la demande**
- **Terminaux numériques – hausse de la demande**
- **Limites thermodynamiques à l'extraction**
- **Besoin de modélisation**
- **Impacts et risques**





Renewable energies are diluted => large infrastructures are required

6 Mw, > 150 m, 1500 t steel
3t permanent magnet, 0.5t REE
(Nd, Dy, Sm, Gd, or Pr)



700 wind turbines to produce the same annual energy (Wh) as a 1300 MW nuclear power plant



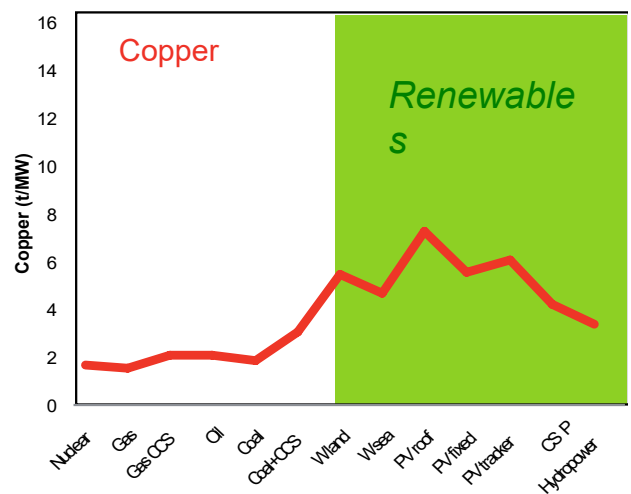
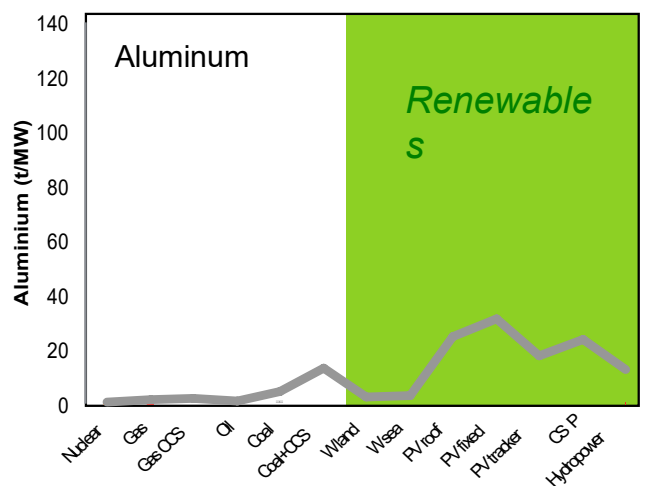
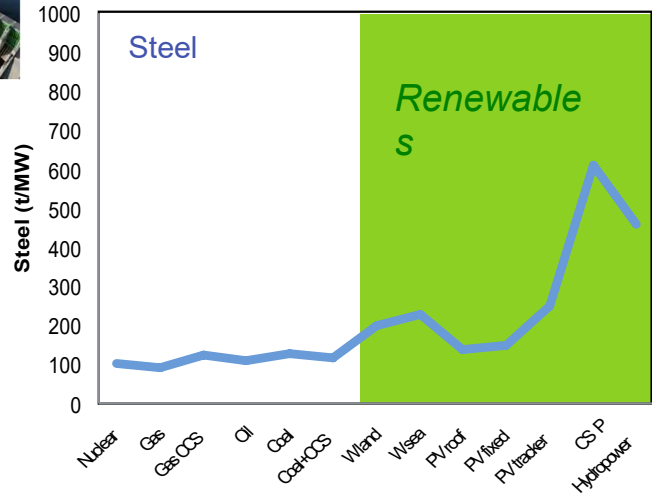
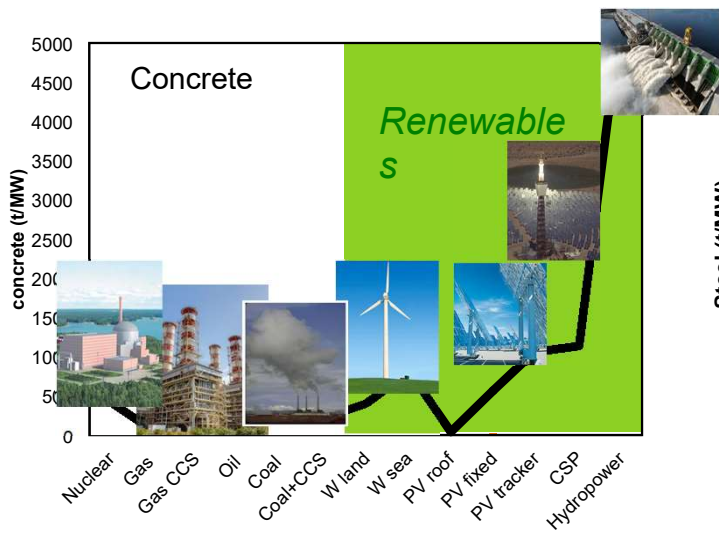
Renewable energies are diluted => large infrastructures are required

6 Mw, > 150 m, 1500 t steel
3t permanent magnet, 0.5t REE
(Nd, Dy, Sm, Gd, or Pr)

700 wind turbines to produce the
same annual energy (Wh) as a
1300 MW nuclear power plant



Material intensity of electricity-generation facilities (t/Mw)



- Contexte global – consommation matières premières
- Transition énergétique – hausse de la demande
- **Terminaux numériques – hausse de la demande**
- Limites thermodynamiques à l'extraction
- Besoin de modélisation
- Impacts et risques

DALLE TACTILE + VITRE

In Indium	Sn Etain	Si Silicium	Al Aluminium	K Potassium
--------------	-------------	----------------	-----------------	----------------

ÉCRAN

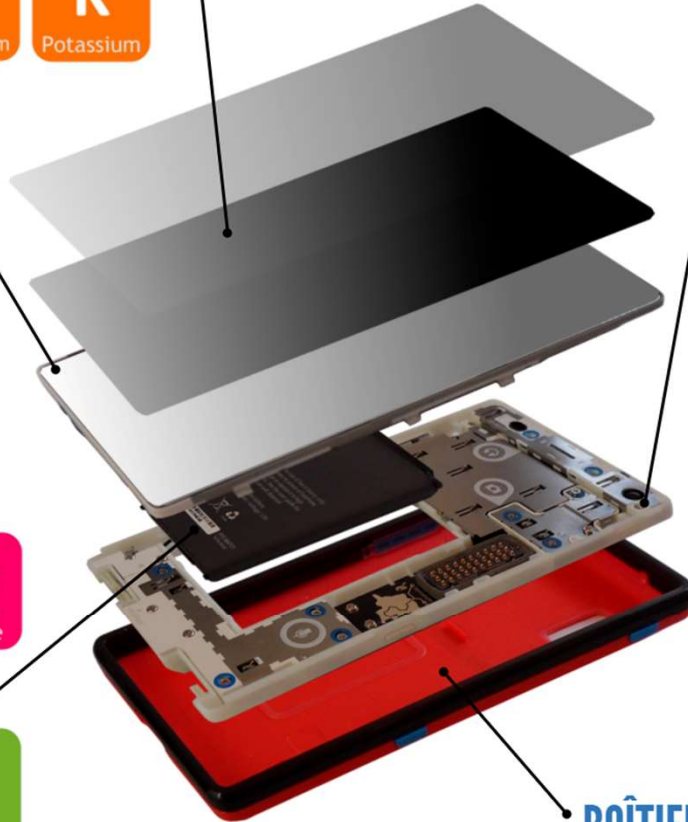
Eu Europium	Tb Terbium	Y Yttrium	
Gd Gadolinium	Ce Cérium	Tm Thulium	
La Lanthane	B Bore	Ba Baryum	
S Soufre	Mg Magnésium	Mo Molybdène	Hg Mercure

BATTERIE

Li Lithium	Co Cobalt	C Carbone	F Fluor
Mn Manganèse	V Vanadium	P Phosphore	Al Aluminium



← RETOUR



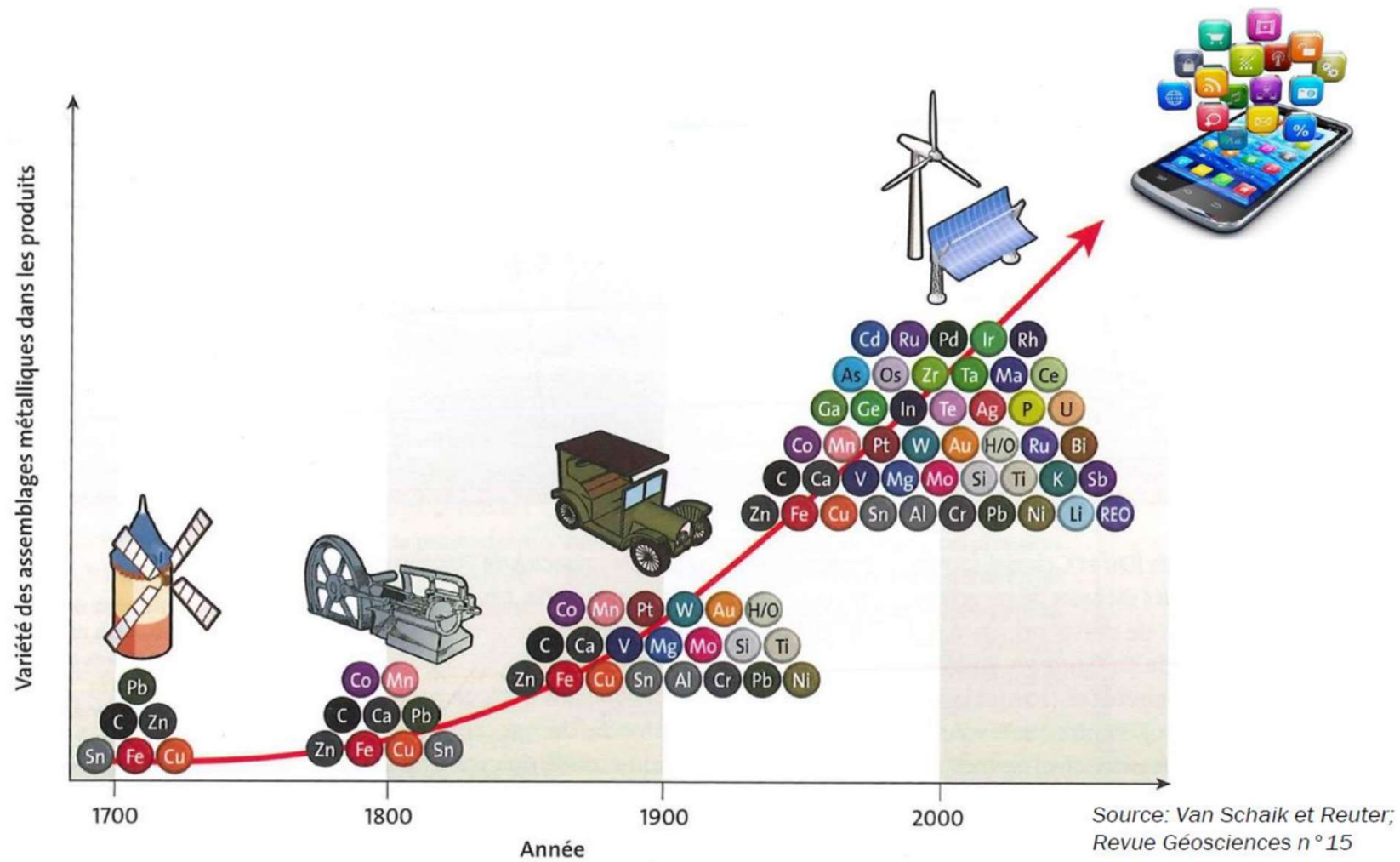
CARTE ET COMPOSANTS

Ni Nickel	Pb Plomb	Sn Etain	Bi Bismuth
Au Or	Ag Argent	W Tungstène	Pt Platine
Rh Rhodium	Be Béryllium	Cu Cuivre	P Phosphore
As Arsenic	Ga Gallium	Ge Germanium	Si Silicium
Zr Zirconium	Ru Ruthénium	Nd Néodyme	Fe Fer
B Bore	Sm Samarium	Co Cobalt	Pr Praséodyme
Cl Chlore	Dy Dysprosium	Ta Tantale	
	Nb Niobium	Pd Palladium	

BOÎTIER

Mg Magnésium	C Carbone	Sb Antimoine	Br Brome	Ni Nickel	Zn Zinc
-----------------	--------------	-----------------	-------------	--------------	------------





Source : Van Schaik et Reuter, revue Géosciences, n° 15

High Tech metals (< 0.1 Mt/an)



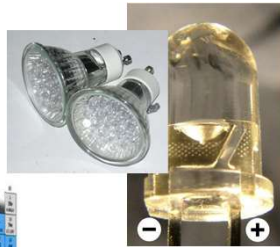
B, Nd, Dy



Ga, In, Se



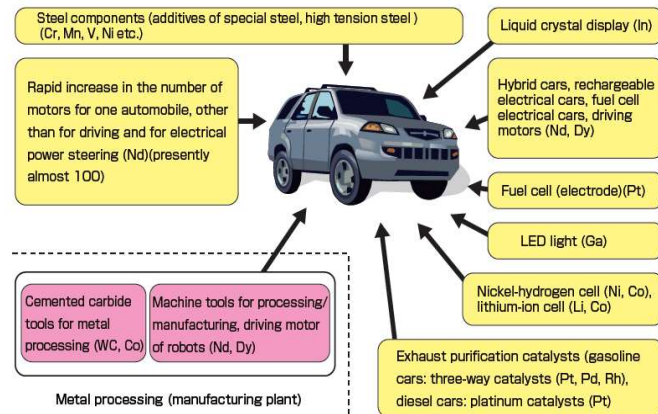
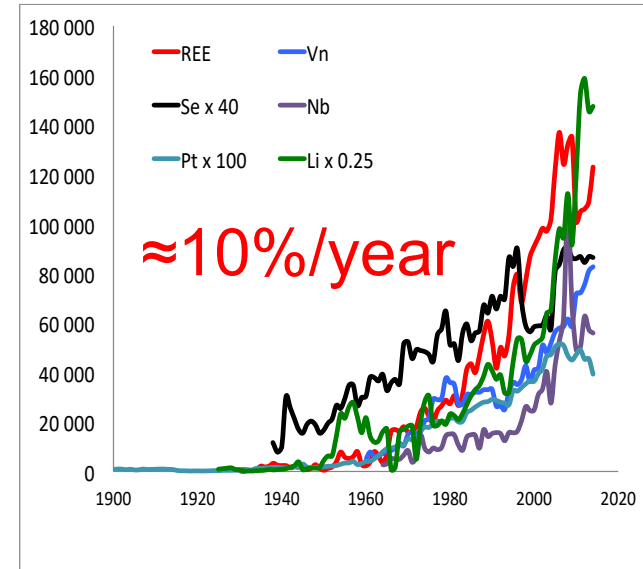
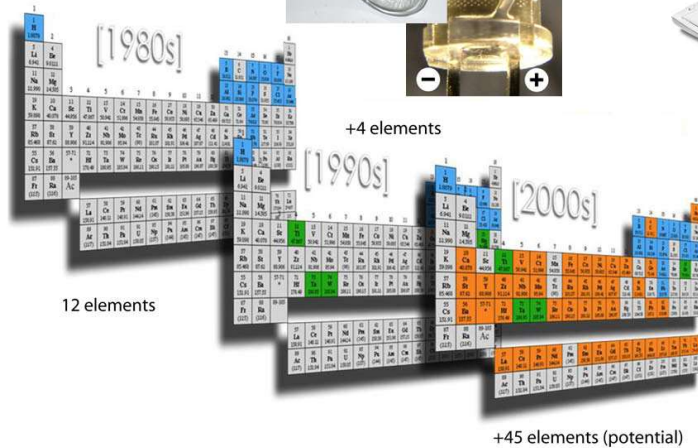
Li, Mn, Co, Graph



+4 elements

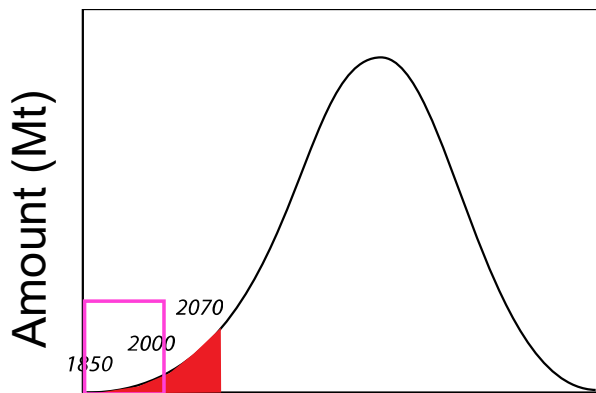
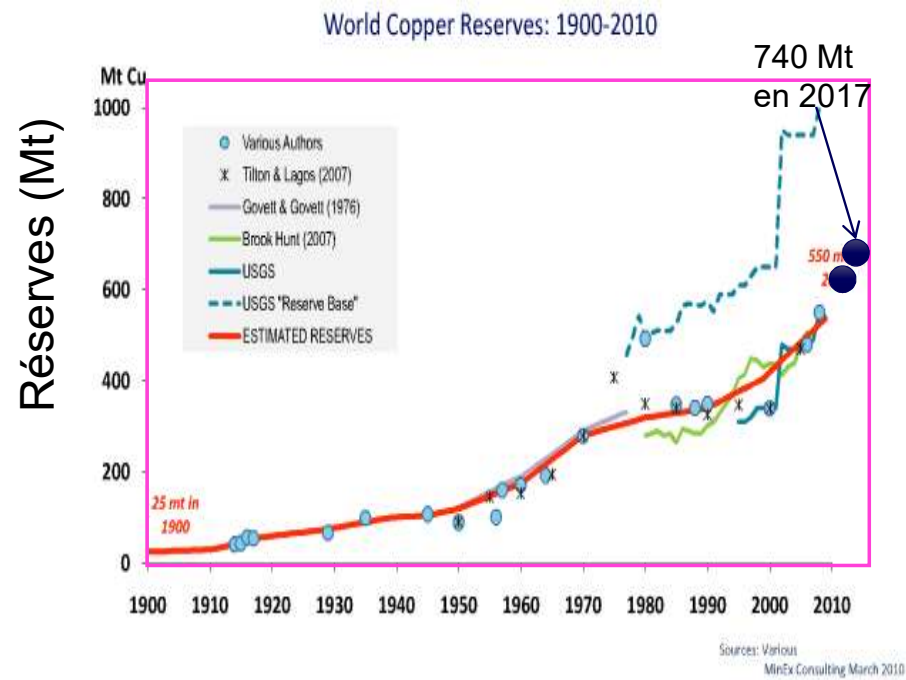
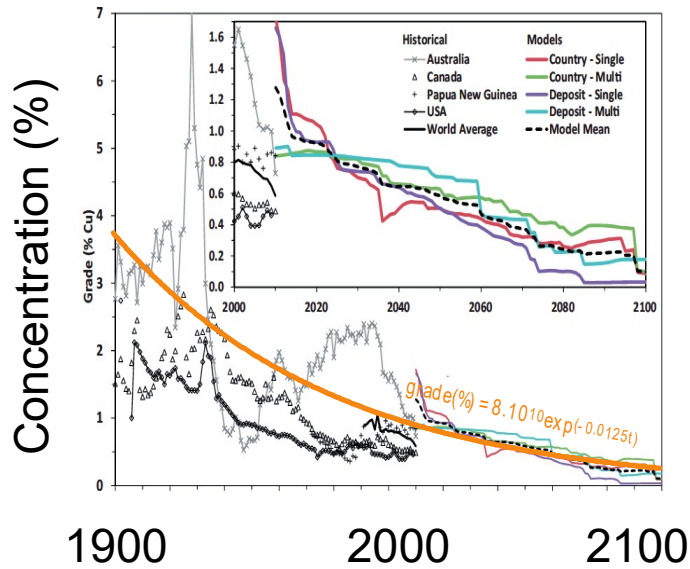


Co, Ga, In, Nb, Ta, W, PGE, REE, Cu, Ni, Pb, Bi, Li, Ag, Au



- **Contexte global – consommation matières premières**
- **Transition énergétique – hausse de la demande**
- **Terminaux numériques – hausse de la demande**
- **Limites thermodynamiques à l'extraction**
- **Besoin de modélisation**
- **Impacts et risques**

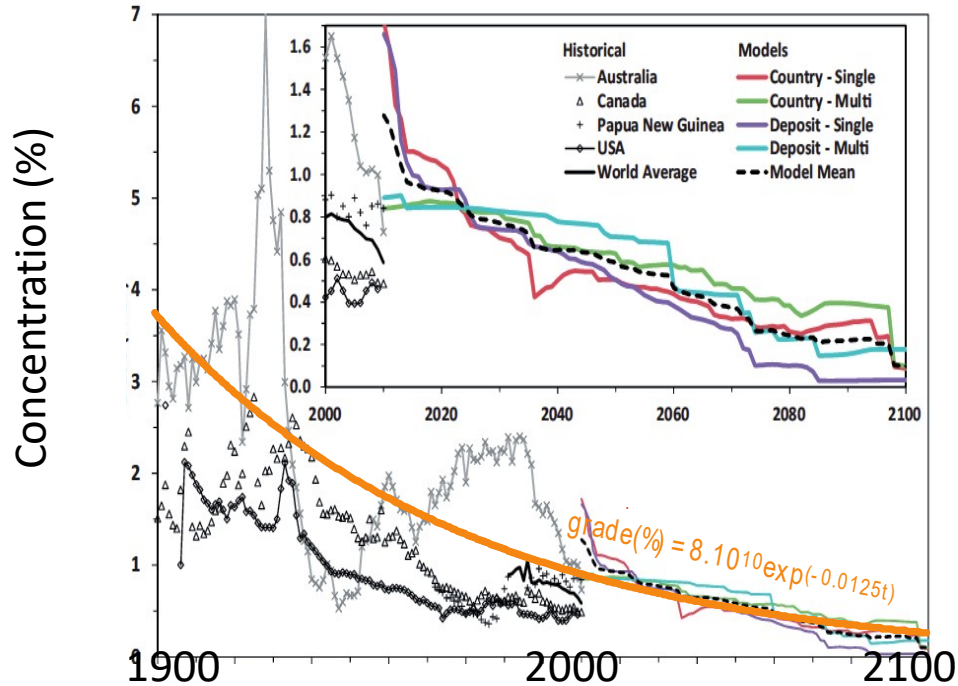
Cu reserves have been growing because the average ore grade of exploited deposits has been decreasing



So what ? where is the problem



Concentration (t)



$$\bar{E}_{TL} = \Delta G_f^{\circ} i + E_{si} + \left(\frac{0.2}{C}\right)$$

Métallurgie (énergie libre de formation, Gibbs) \nearrow
 Séparation (entropie de mélange) \nearrow
 Broyage \nwarrow

Extraire et broyer la roche
 Séparer le minéral de la roche broyée
 Extraire le métal du minerai

A haute concentration, c'est le terme "metallurgy" qui domine

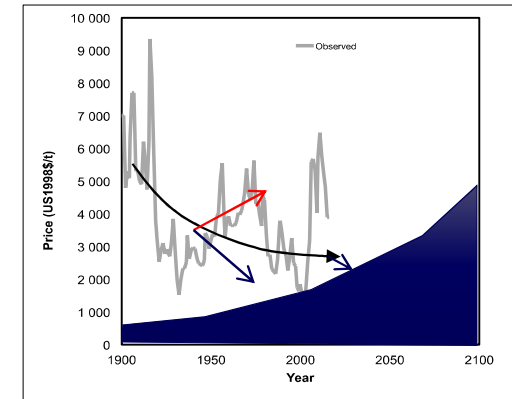
Incohérence des scénarios ?

Il y a-t-il assez de matières premières pour la transition ?

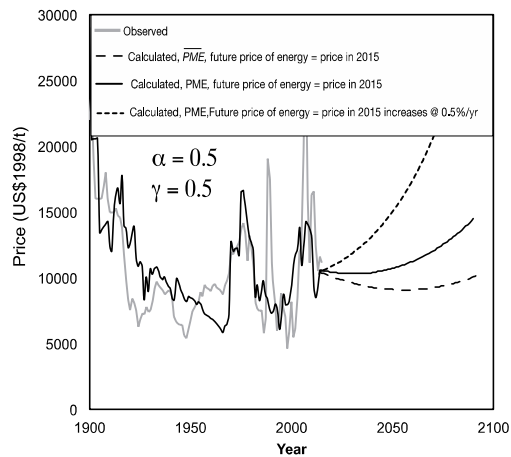
Ca dépend, vous payez combien ?

$$\bar{E}_{TL} = \Delta G_f^\circ i + Esi + \left(\frac{0.2}{C}\right)$$

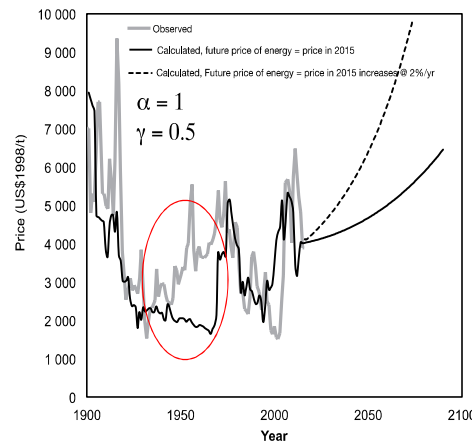
Metallurgy (Gibb's free energy of formation) Separation (mixing entropy) Comminution



Ni



Cu



Pt

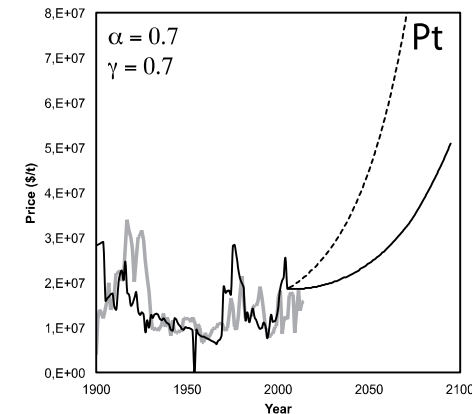
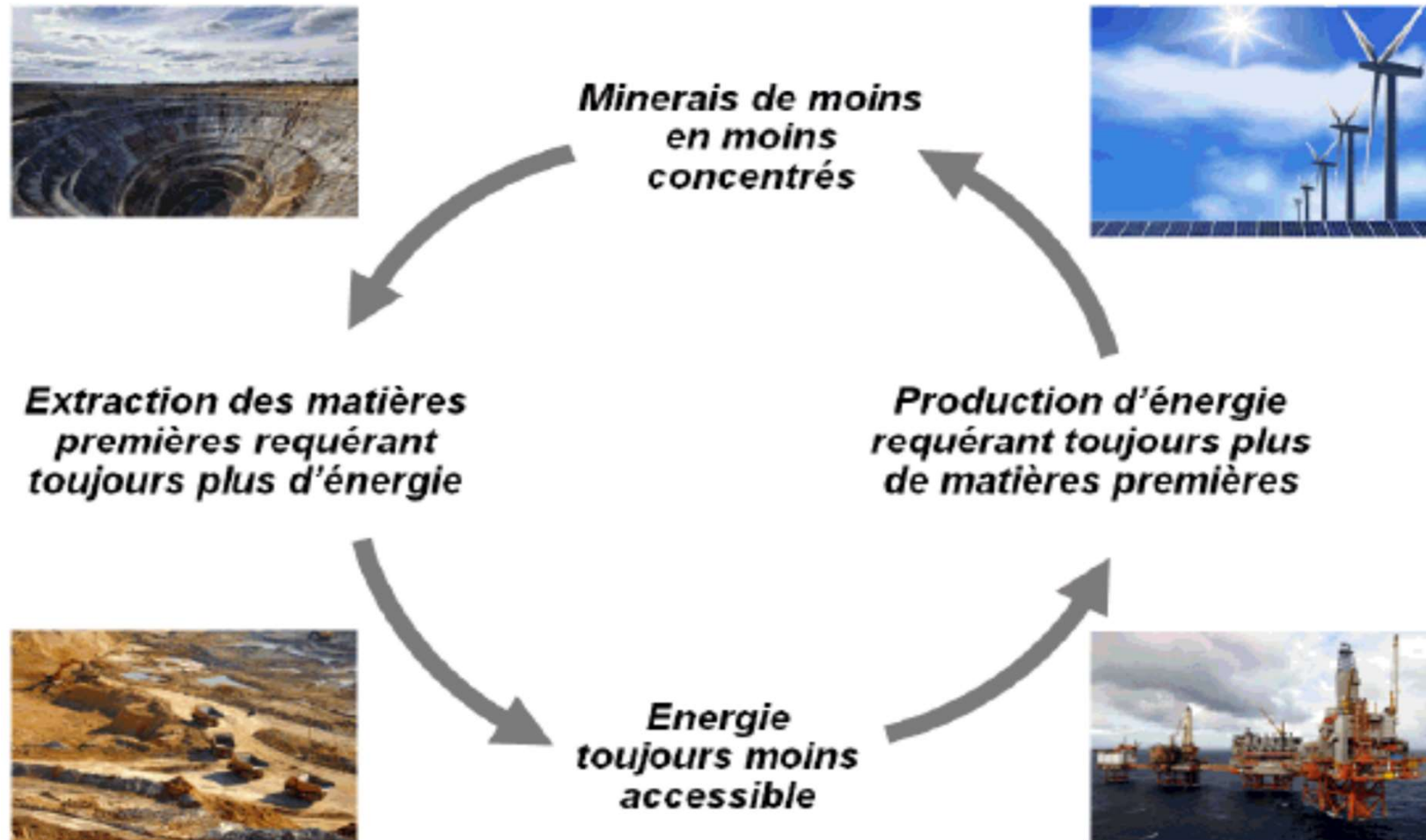


Figure 4 – Cercle vicieux de l'énergie et des métaux



Source : Philippe Bihouix et Benoît de Guillebon, *ibid.*

The transition towards low-carbon energy requires large amounts of mineral resources

- How much primary metal ? (scenario and technology dependent)
- Is it available ?
- What are the environmental impacts of their production ?

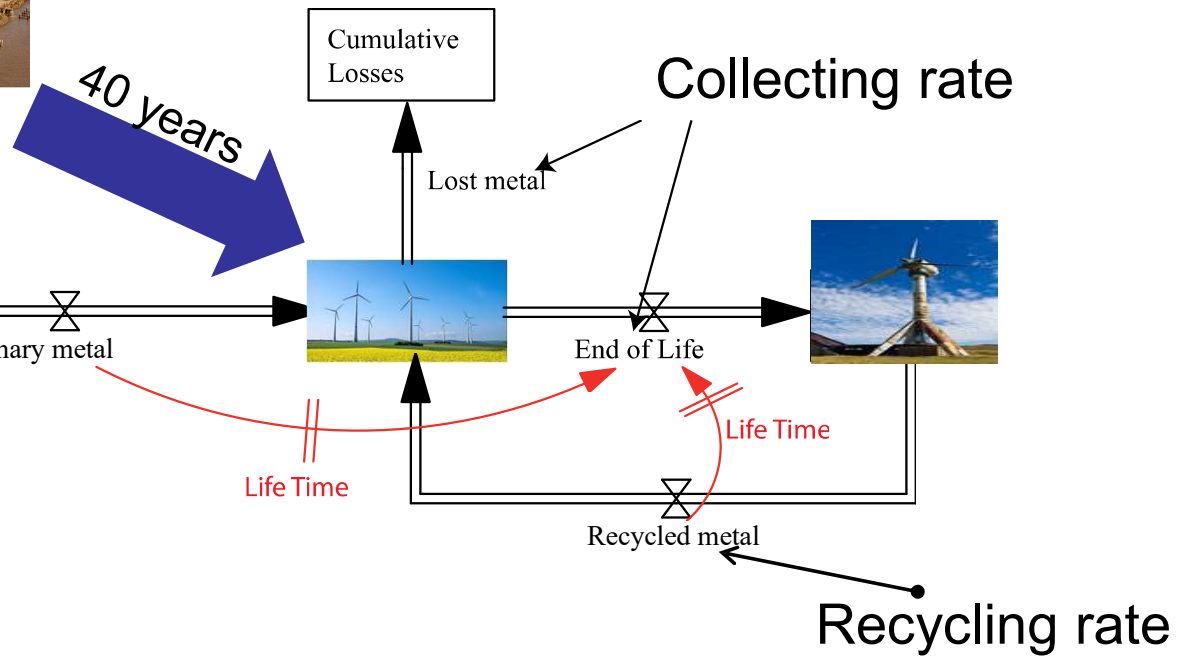
Dynamic modeling

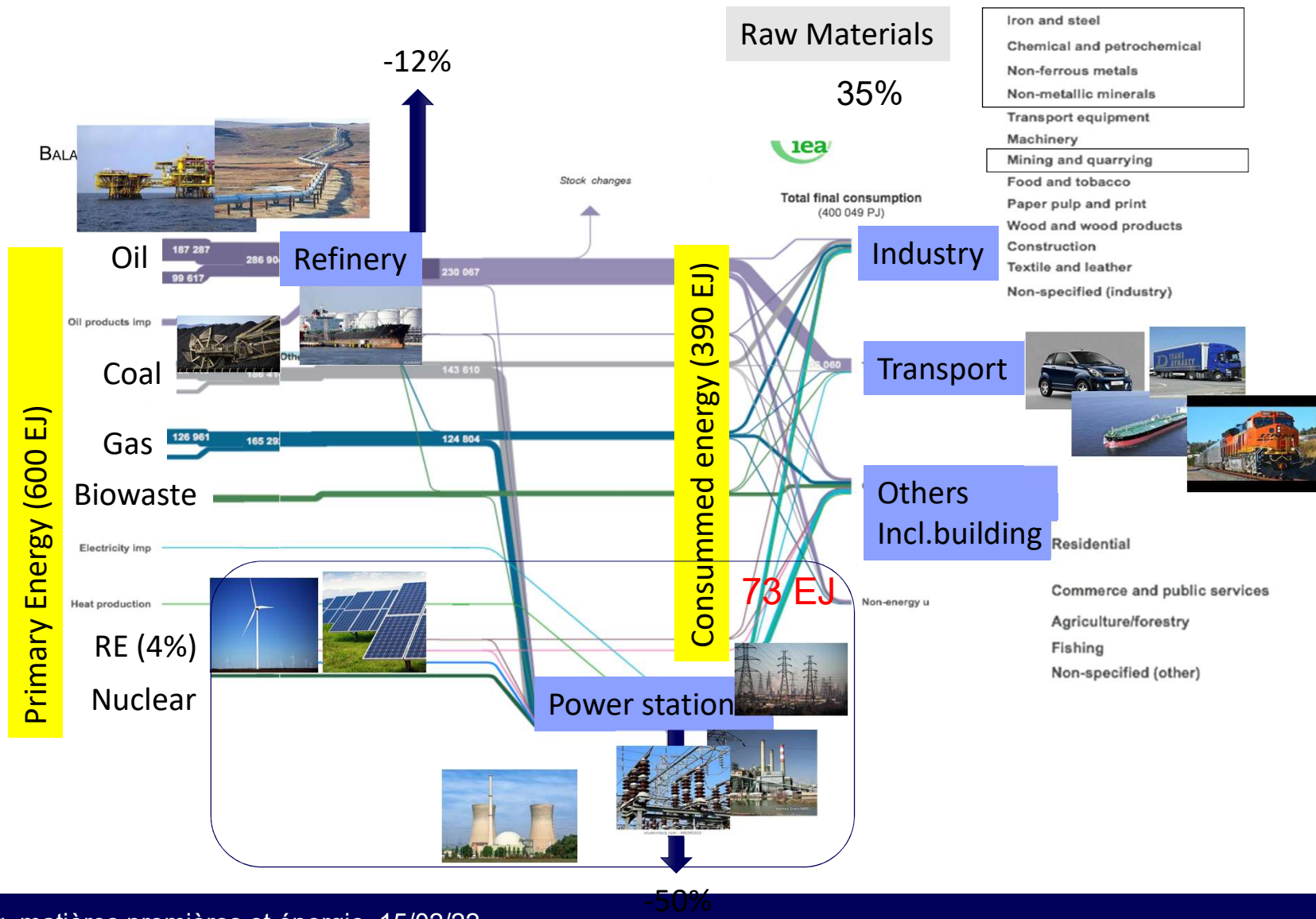


- **Contexte global – consommation matières premières**
- **Transition énergétique – hausse de la demande**
- **Terminaux numériques – hausse de la demande**
- **Limites thermodynamiques à l'extraction**
- **Besoin de modélisation**
- **Impacts et risques**

Raw Materials and energy requirements: a stock and flow problem...

∫ primary production > stock in infrastructure

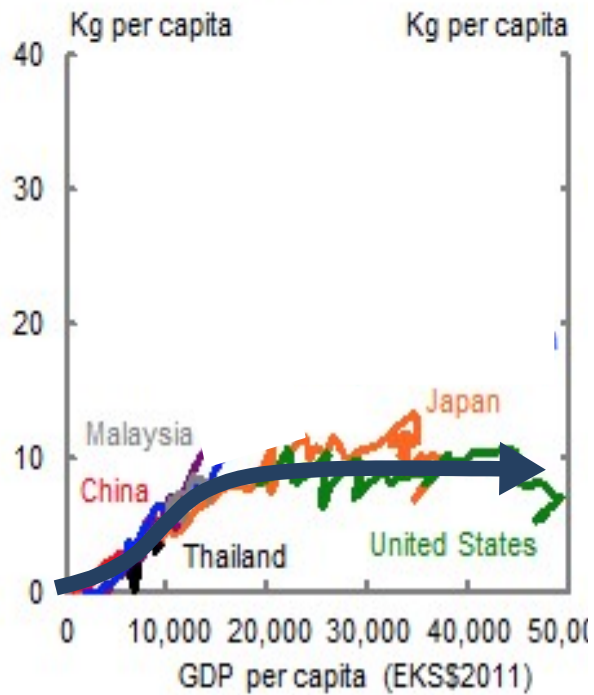




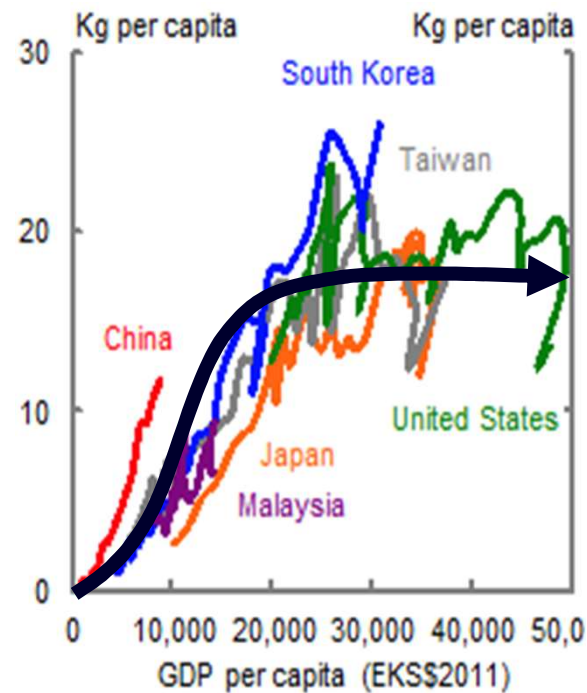
Consommation de matières premières par habitant

Des courbes logistiques

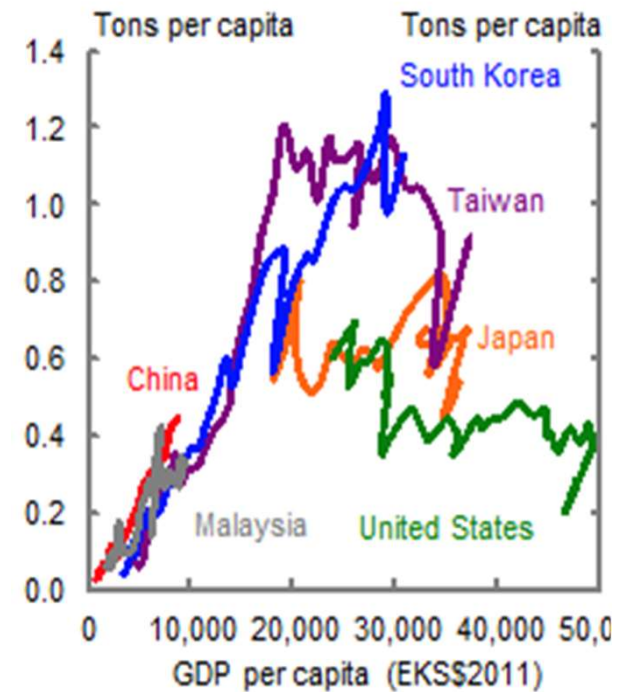
Copper



Aluminium



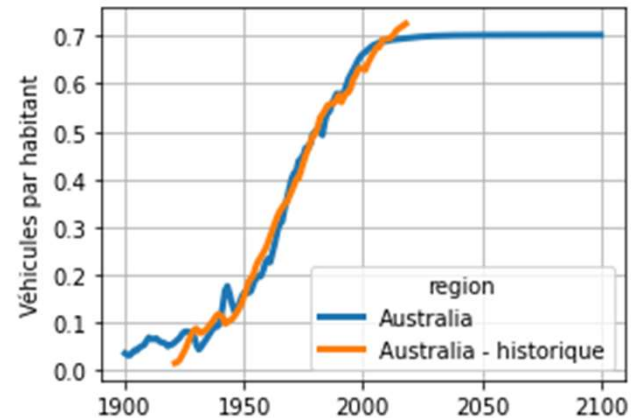
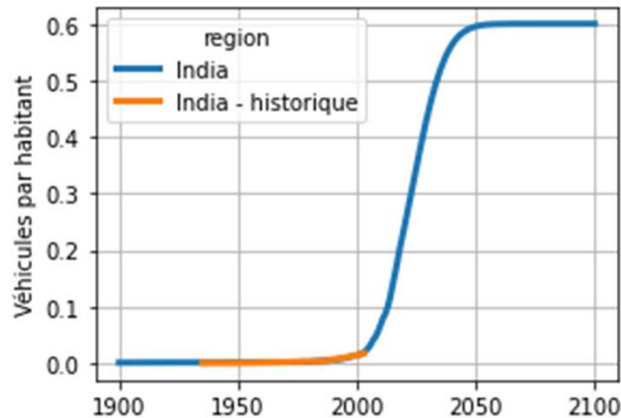
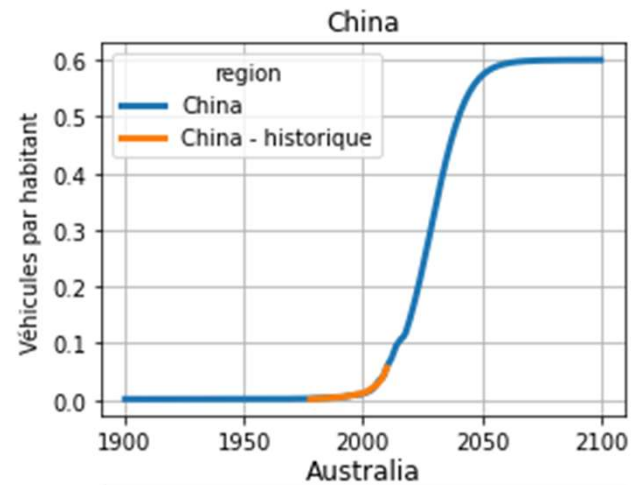
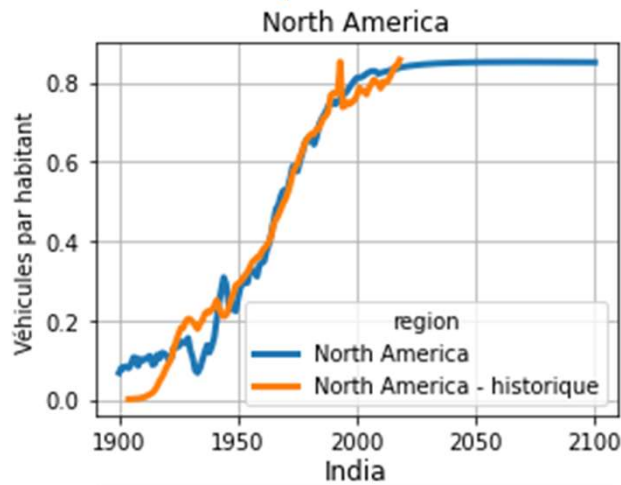
Steel



Modéliser la demande :

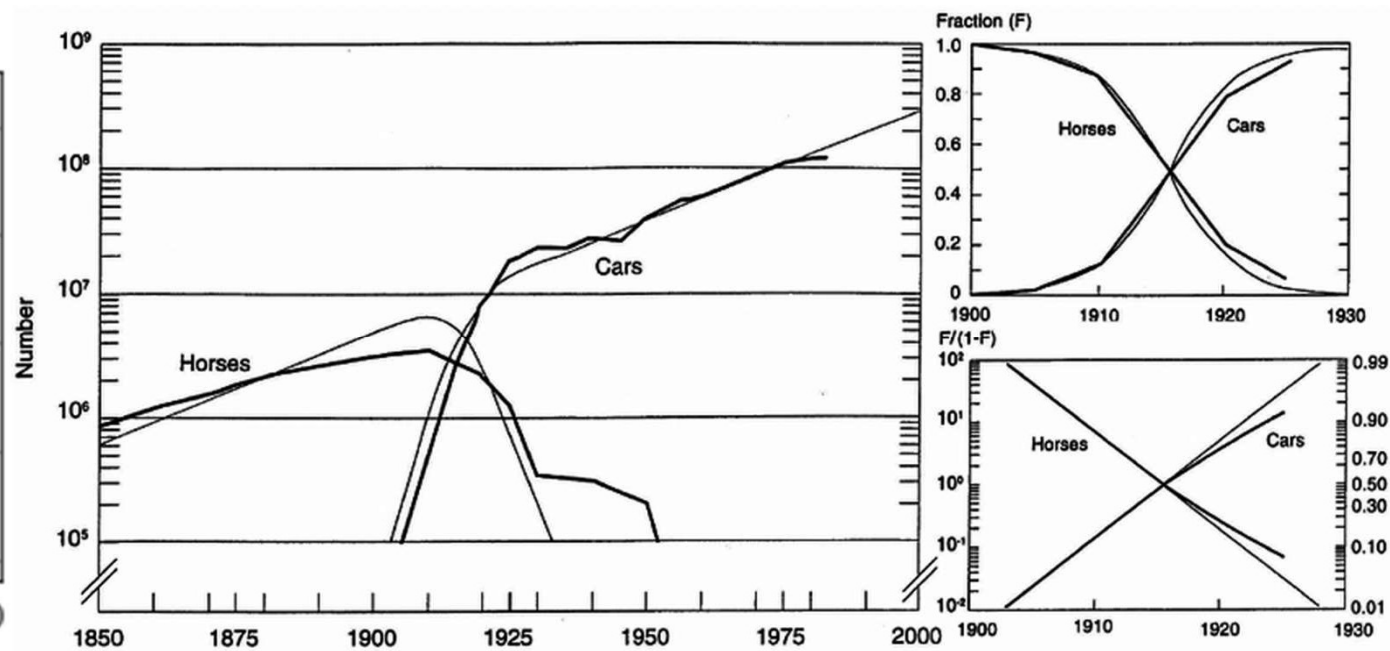
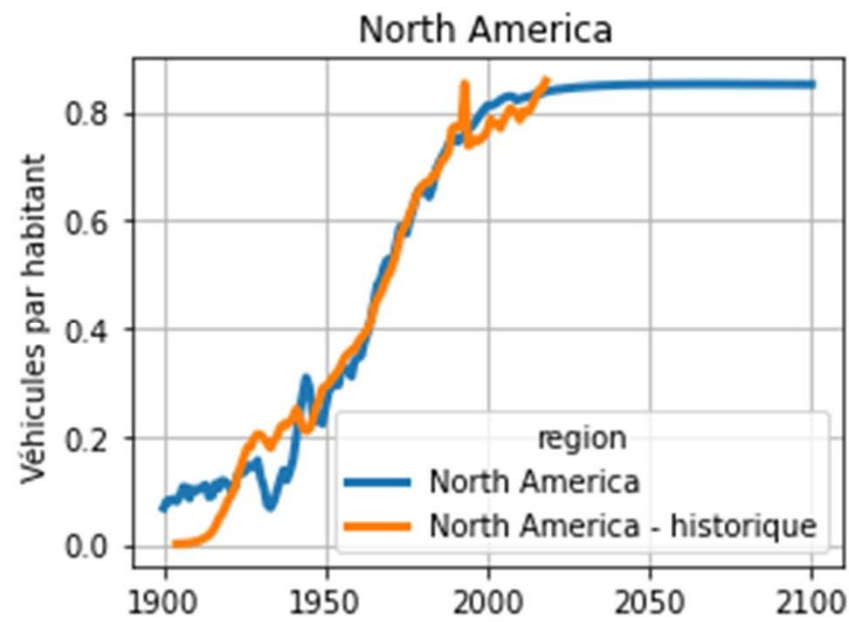
On ne peut pas conduire deux voitures à la fois

(Même quand on est Américain)



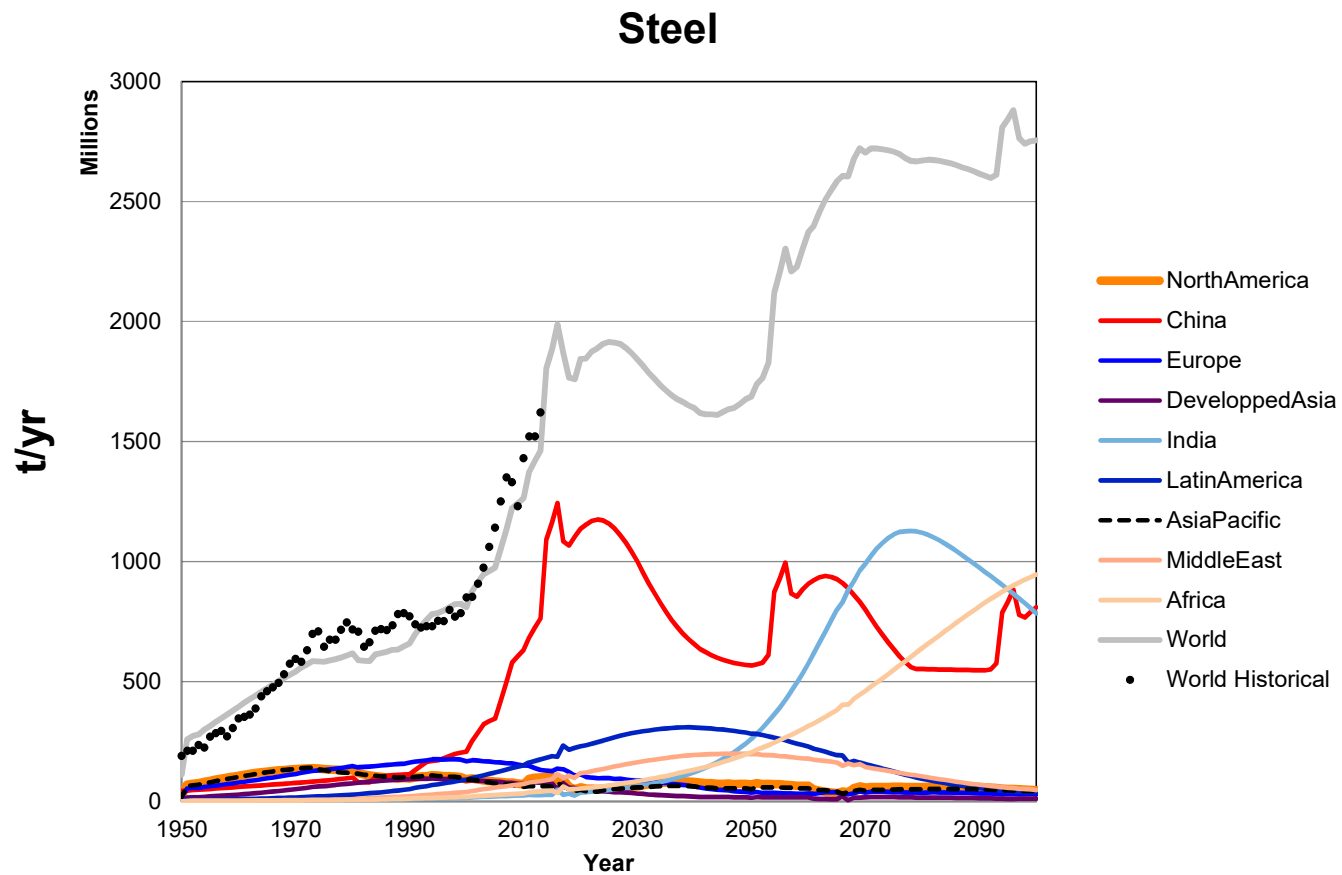
Modéliser des taux de pénétration

Remplacement des chevaux par les voitures

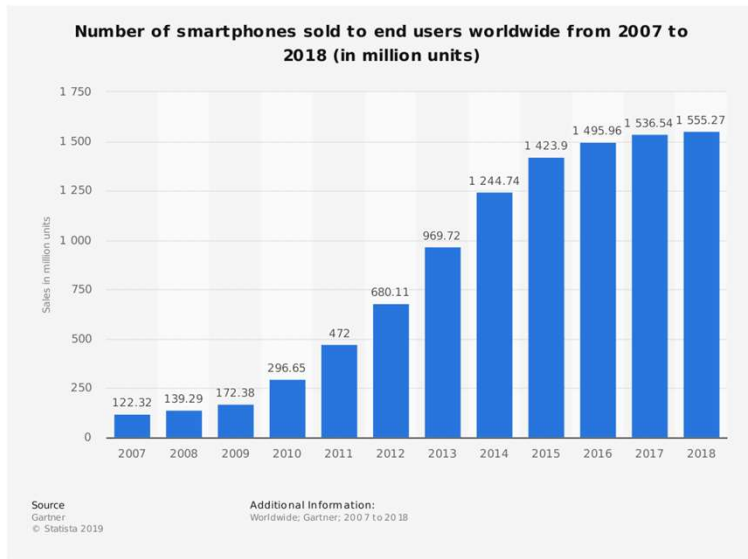


Somme des régions

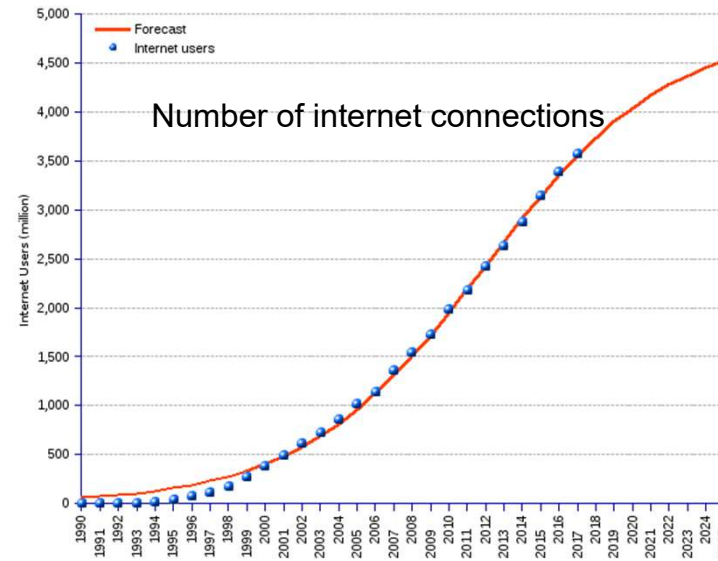
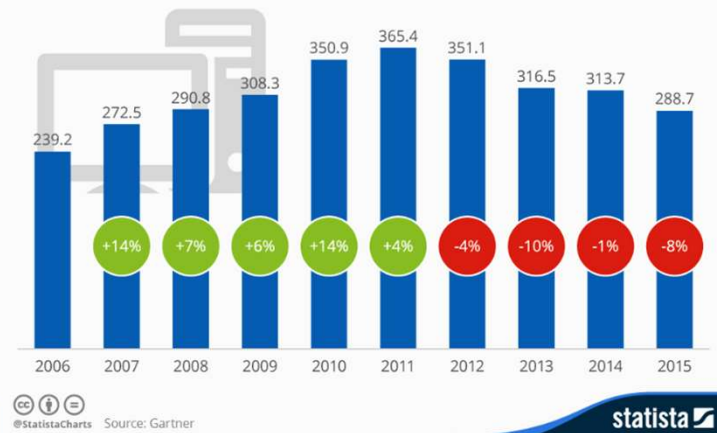
La régionalisation est indispensable



Situation comparable... mais différente du numérique



Global PC Sales Fall to Eight-Year Low
Worldwide PC shipments from 2006 to 2015 (in million units)

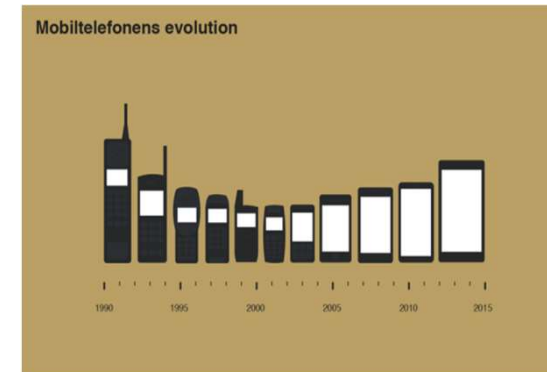


ITU (*International Telecommunications Union*)

Egalement une croissance exponentielle suivie d'une saturation
MAIS quasiment indépendante du PIB/hab



L'évolution techno. est très rapide => grosse difficulté à évaluer la demande future



Voici le Zanco tiny t1, le plus petit téléphone portable du monde

[Partager 0](#) [Twostar](#) [G+ Partager](#) [in Partager](#)



© Zanco | Le tiny t1, "le plus petit téléphone mobile au monde"

Texte par Louise WESSBECHER

Dernière modification : 28/12/2017

Le Zanco tiny t1, mobile de 4 cm de haut auto-proclamé plus petit téléphone du monde, a explosé sa levée de fonds sur Kickstarter et devrait être





Source :
<https://www.blogdumoderateur.com/chiffres-internet/>

Table 3.1: Average annual growth rate of EEE per group of countries, by Purchasing Power Parity

Purchasing Power Parity range (USD/inh. in 2016)	Average growth rate per year
Highest PPP > 34000	1.6%
High PPP 34000 - 15280	5.2%
Mid PPP 15280 - 6740	13%
Low PPP 6740 - 1700	23%
Lowest PPP < 1700	15%

Monde

Source :
<https://globalewaste.org/wp-content/uploads/2018/10/Global-E-waste-Monitor-2017.pdf>



Durée d'utilisation

Table 40. Typical product lifetime of personal computers and peripheral products for their first life.

Category	Typical life time (this study)
Desktop	6
Integrated desktop	6
Workstation	7
Thin client	5
Integrated thin client	5
Notebook	5
Tablet/Slate	3
Portable all-in-one	5
Small scale servers	6
External graphics adapters	5
Docking Stations	5
Peripheral products	6
Power supply units, internal & external	6

It was decided in this study that the typical lifetime shown in Table 40 will be used for this review study, since this study is based strictly on the design features of the products. This decision reduces the sources of data variation which cannot be included in this assessment due to lack of data for the whole EU.

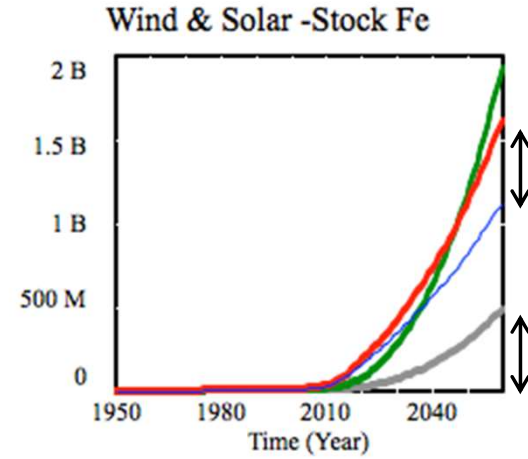
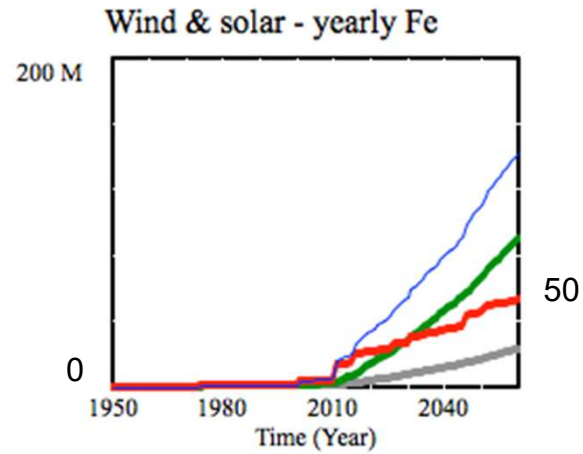
Source : « Preparatory study on the Review of Regulation 617/2013 (Lot 3)Computers and Computer Servers”, fev 2017



Flux (Mt/yr)

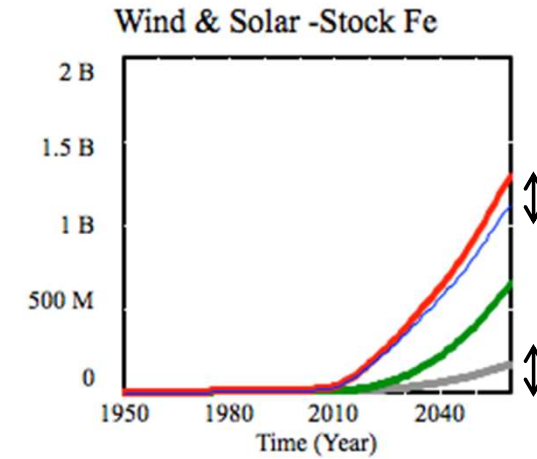
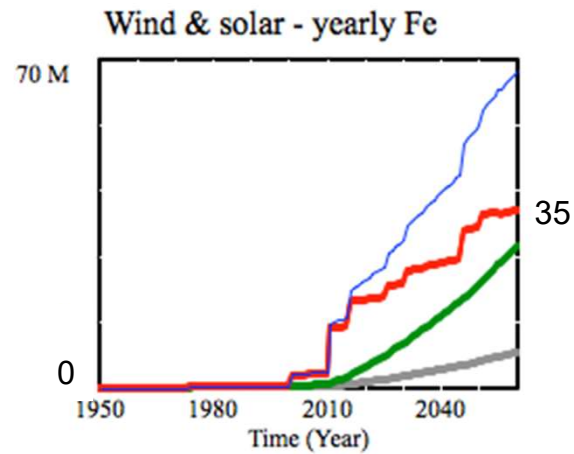
Stock (Mt)

Lifetime = 10 years



Primaire
Recyclé
Perdu - out
Infrastructure

Lifetime = 30 years



Needs in copper for electricity and transport

200 to 400 Mt Cu are needed for electricity generation and transport, = 10 to 20 years of 2015 global production

75-120Mt
production



3 Mt storage



150-
300 Mt Cu
Use

Transport &
distribution

20 Mt



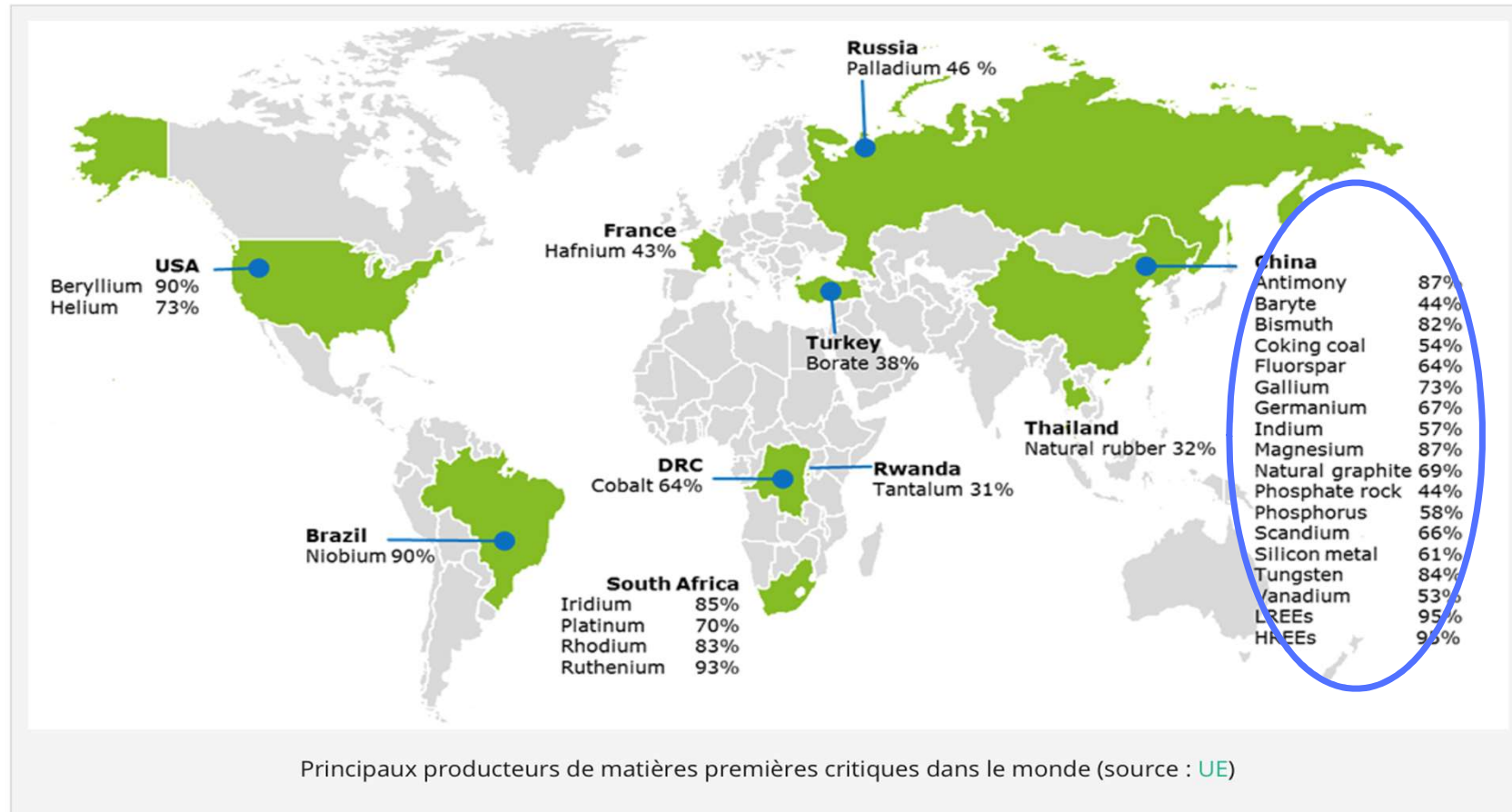
200 to 400 Mt Cu
1500 Mt Al
5000 Mt Fe



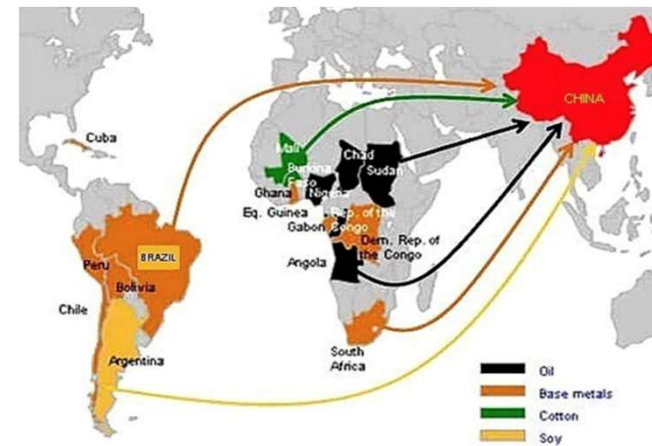
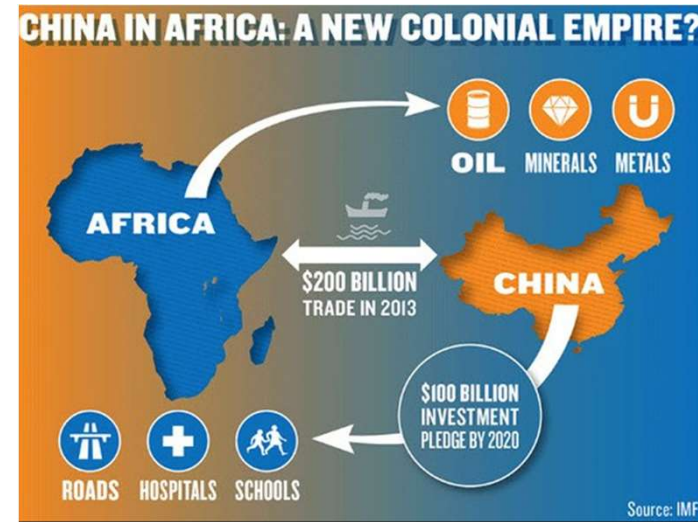
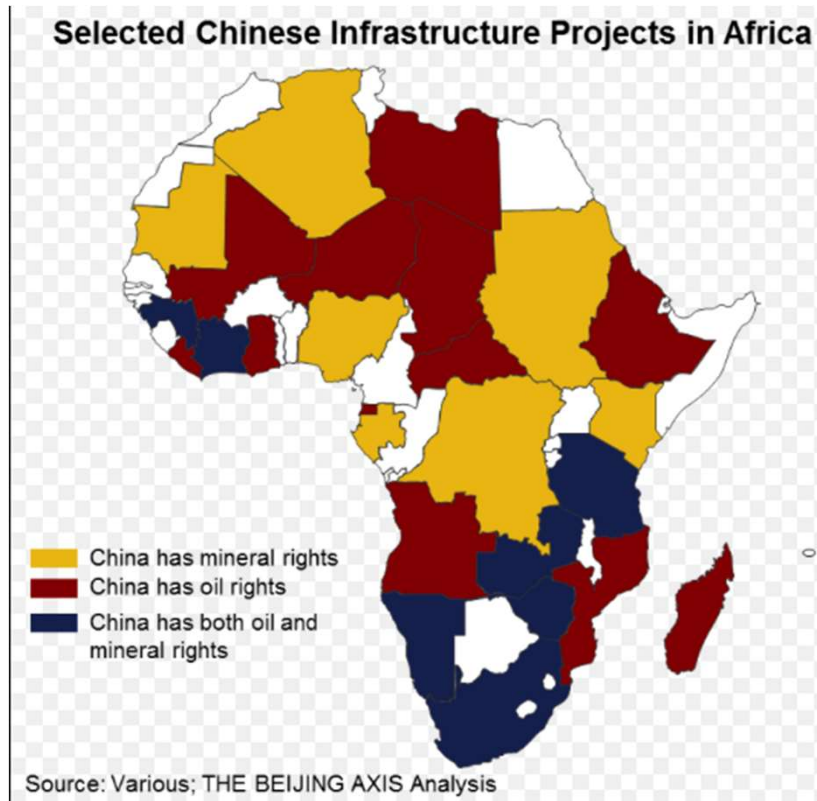
Kennecott Copper Mine (Utah) $3.2 \times 1.2 \times 1.2 \text{ km}^3$.



Risques géopolitiques



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





Recherche



Métaux : les besoins colossaux de la transition énergétique

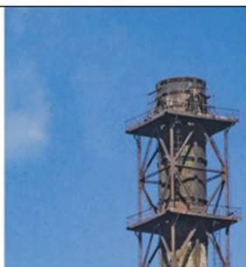
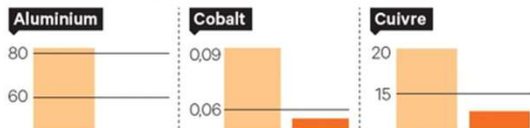
Les technologies requises pour limiter le réchauffement du climat feront grimper la demande de ressources naturelles. C'est, selon la Banque mondiale, un risque majeur pour l'environnement.

Lire plus tard 07 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°



Les échos 2018

« Si certains se sont inquiétés d'un manque à venir de lithium, du Chili (52 % des réserves) à la Bolivie, en passant par l'Australie (actuellement premier producteur), en fait, les réserves abondent. »

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 Commenter



Panasonic va réduire de moitié le cobalt présent dans ses batteries

Un minéral ~~essentiel~~, mais qui coûte cher

Publié le 15/07/18 à 12h31

Panasonic va réduire de moitié la teneur en cobalt de ses batteries. Le japonais a pris cette décision face à l'explosion du prix de ce minéral rare, actuellement essentiel dans la composition des cellules destinées à la fabrication de batteries.



INDICATORS	COBALT	NICKEL
<i>World prices \$/ton, end-month</i>		
March 2017	54,600	10,000
December 2017	75,200	12,700
February 2018	82,800	13,875

Autres technologie d'accumulateurs à Lithium **sans** cobalt : Lithium iron phosphate (LFP), lithium manganese oxide (LMO) and lithium titanate (LTO)

Un nouveau processus pour recycler proprement les batteries au Lithium

Une bonne nouvelle pour la planète !

PAR LÉO TOUSSAINT - @LEOTOUSS - 1 FÉVRIER 2018



Un nouveau processus de recyclage des batteries d'ordinateur et smartphone vient de voir le jour. Il permet de donner une seconde vie aux composants principaux de la batterie en utilisant la moitié de l'énergie nécessaire des processus actuels.

LA QUOT NUMÉ

Recevez chaque futur du numé

Votre adresse



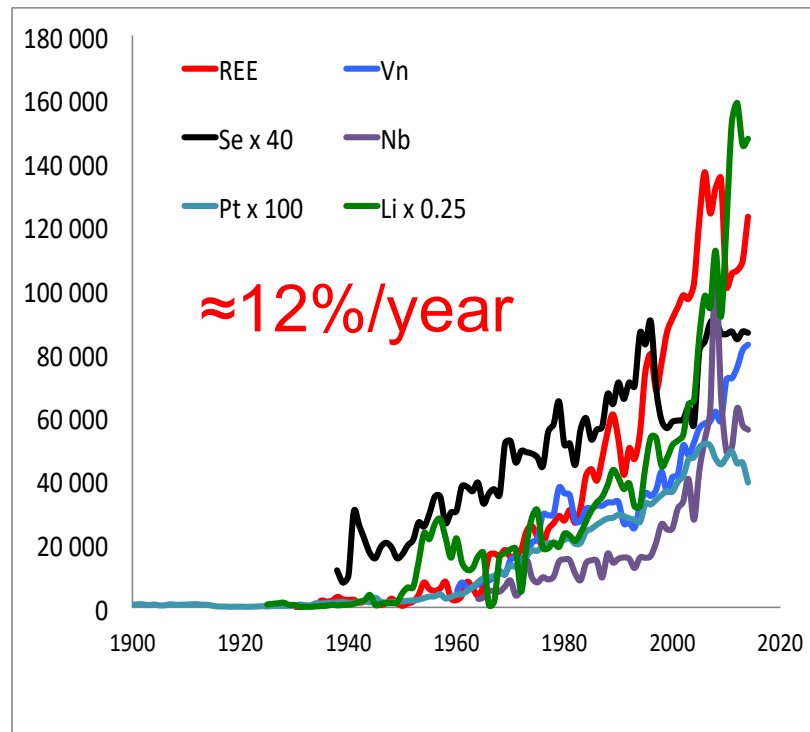
LES F



WeFind : pour obt compte I



The situation of « high tech » metals is more worrying on the short term and focuses much attention

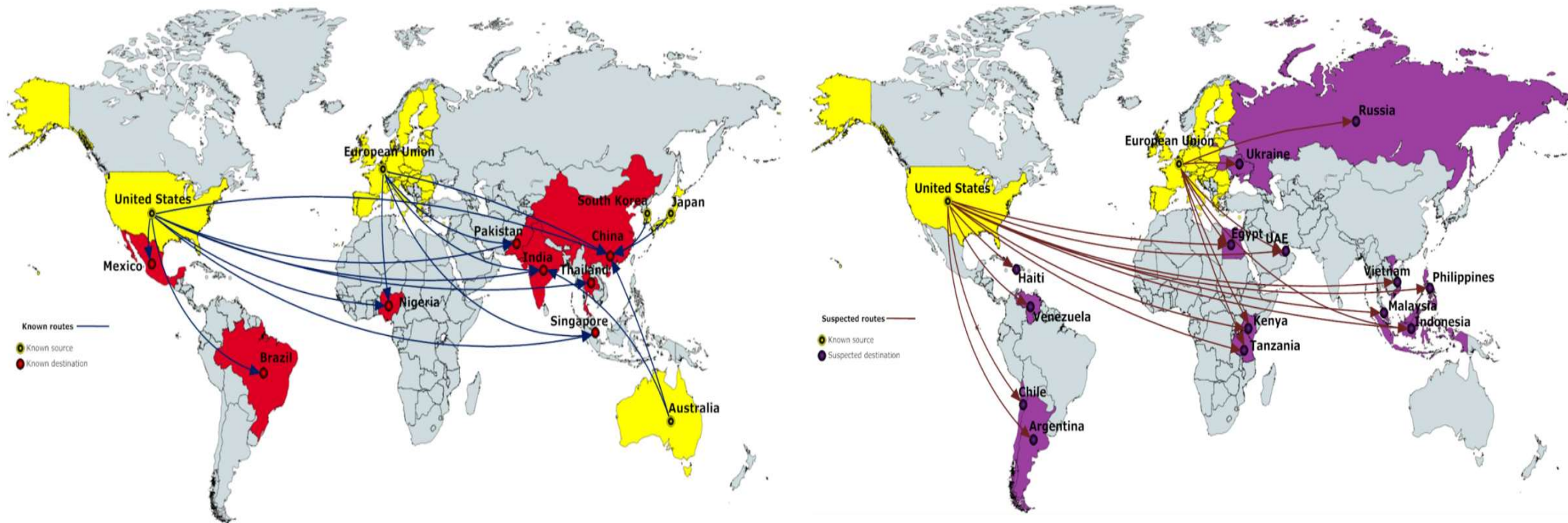


However, economy of use and substitution is still possible, efficiency can be improved:

- *High-efficiency permanent magnet with no REE (Hitachi, 2012)*
- *Reluctance motors using electro- instead of permanent-magnets are an option for electrical vehicles.*
- *Two-fold increase of the Net Energy Ratio of PV in 10 years (Koppelaar et al., 2016)*

⇒ Innovation is likely to improve the situation. **This is not the case for the structure metals used in huge amounts**

Traffic illégal & suspecté de déchets électroniques



Ref : Int. J. Environ. Res. Public Health 2016, 13(8), 789;
Quantifying the Effect of Macroeconomic and Social Factors on Illegal E-Waste Trade
Loukia Efthymiou, Amaryllis Mavragani and Konstantinos P. Tsagarakis * [ORCID]
Business and Environmental Technology Economics Lab, Department of Environmental Engineering, School of Engineering, Democritus University of Thrace, Vas. Sofias 12, Xanthi 67100, Greece



- **Contexte global – consommation matières premières**
- **Transition énergétique – hausse de la demande**
- **Terminaux numériques – hausse de la demande**
- **Limites thermodynamiques à l'extraction**
- **Besoin de modélisation**
- **Impacts et risques**

DYNAMINE
La mine, prédatrice et dangereuse



Selon vous, quels sont les impacts humains, socio-économiques, environnementaux et sanitaires possibles d'une exploitation minière ? (23)



ISF SystExt Janvier 2017 - Illustration X. Aliot (cc-by-sa-nc)



DYNAMINE

La mine, prédatrice et dangereuse



Impacts sanitaires

INJECTION D'ACIDE SULFURIQUE DANS LES RÉSERVES D'EAUX POTABLES À MOPANI



- 2000 : MCM, géant suisse Glencore rachète mine lixiviation in situ
- 2005 : accident pollue les nappes souterraines à l'acide, coupure du réseau d'eau courante
- 2008 : l'acide contamine l'eau potable des habitants : 800 personnes sont hospitalisées
- 2009 : camion se renverse et déverse son acide sulfurique dans la rivière Tukula Mutima

Impacts environnementaux

EMISSIONS MASSIVES DE DIOXYDE DE SOUFRE, FONDERIES DE CUIVRE



- 1920 : ville de Potrerillos construite autour d'une fonderie
 - Ajd : 600t SO₂/tCu. 4000 habitants, les ouvriers et leurs familles, ainsi que les Collas, une tribu indigène, continuellement exposés aux gaz toxiques issus de l'usine.
- => La société d'État : déménagement à 250 km dans le désert, habitations pour les mineurs à 3 km de la fonderie

Violation des droits humains

MINES ARTISANALES DE CUIVRE ET DE COBALT À KAMBOVE (KATANGA)



RDC



CUIVRE, COBALT



- 2014 : 2,5M influant sur 25M dépendants (1/3 pop)
- entre 6 et 17 ans: inhalation des poussières, exposition pendant de longues heures au soleil, consommation d'eau non potable, transport sur la tête, sur les épaules et sur le dos de charges trop lourdes pour leur âge... prédisposent à de nombreuses maladies (respiratoires, digestives, articulaires, etc.)

Bouleversements socio-économiques

VILLE-USINE DE NORILSK BÂTIE PAR DES BAGNARDS DU GOULAG



Ville minière et usines de Norilsk (2008) [6]

- Norilsk, 300km nord du cercle polaire
- 1935 : 350 000 prisonniers, 17 000 morts
- 1953 : compensation, salaires élevés, des voyages payés, des facilités d'accès aux logements, un réseau de magasins bien approvisionnés, etc
- 1992 : 1/3 pop travaille dans industrie, grosses inégalités
- Aujourd'hui : Pollution parmi les 10 pires lieux au monde l'usine émet encore aujourd'hui près de 2 MtSO₂ (4xFrance), 70Mm³ d'eau contaminée dans les cours d'eau.

Conclusion : penser et déployer la sobriété numérique

Le problème des hautes technologies n'est pas un problème technologique. Il s'agit d'un problème d'utilisation proposée par les industriels, approuvée et soutenue par les politiques et ensuite adoptée par les citoyens

Un exemple emblématique: StarLink -> 1300 (aujourd'hui) satellites => 12000 en 2025

- Ce n'est pas une demande de la population
- Les impacts (migrateurs, pollution lumineuse, déchets dans un espace "bien commun", retombées, etc) n'ont pas été évalués
- Projet validé par l'administration Américaine sans concertation internationale + Soutien financier (Starlink postule à un fonds américain de subvention de 16 milliards de dollars pour le développement du numérique en milieu rural visant à apporter le haut débit)

La concurrence s'aligne (Amazon, opérateur chinois)

Satellites + Antenne à changement de phase + stockage et traitement de l'information. Quels besoins pour bâtir l'infrastructure ? quels impacts ?

=> possible catastrophe écologique sans demande ni information citoyenne, avec des modifications profondes de la société (connectivité des appareils, surveillance des citoyens, pas d'alternative proposée)



Questions ?

