



**Le Mans  
Université**

Notre ambition,  
c'est vous.

# UEO « Limites planétaires et risques d'effondrement »

Dominique Py

2022-2023

# La planète a-t-elle déjà connu une concentration de CO<sub>2</sub> aussi élevée qu'aujourd'hui?

## **Le niveau de CO<sub>2</sub> dans l'atmosphère bat un record vieux de 3 millions d'années**

Selon une récente étude, le taux de CO<sub>2</sub> dans l'atmosphère dépasse aujourd'hui les 412 ppm. Il faut remonter à l'ère du Pliocène, il y a environ 3 millions d'années, pour observer des concentrations similaires.

### **DES ARBRES POUSSAIENT EN ANTARCTIQUE**

Les mesures ont été réalisées à l'aide de sédiments marins et de carottes glaciaires prélevés à l'endroit le plus froid de la planète. Ces dernières sont de véritables témoins du temps géologique ; la glace qui les compose emprisonne et conserve en elle les particules et impuretés présentes dans l'air, ainsi que leur temporalité.

C'est donc il y a 3 millions d'années, pendant le Pliocène, que la concentration en dioxyde de carbone a dépassé les 400 ppm pour la toute dernière fois. Durant cette période, les températures étaient alors 3 à 4°C plus élevées et des arbres poussaient en Antarctique. Le niveau des océans lui était 15 à 20 mètres plus haut. Ce CO<sub>2</sub> avait été capturé par les arbres, les plantes, les animaux, puis enterrés avec eux. « Ce que nous faisons depuis 150 ans, c'est le déterrer et le renvoyer dans l'atmosphère » confirme Martin Siebert, professeur de géoscience à l'Imperial College de Londres.

[\[National Geographic 2019\]](#)

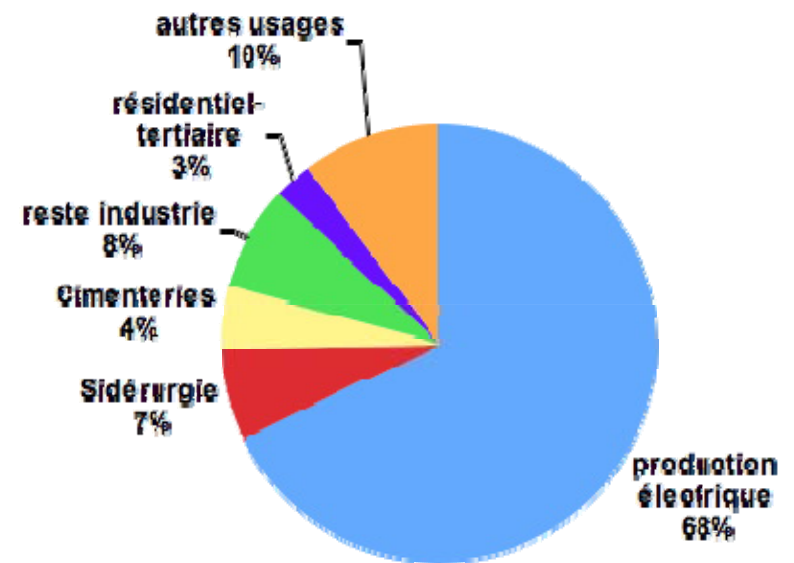
# I. Les limites planétaires

## Plan

1. Le climat: changement climatique
2. La biodiversité: sixième extinction de masse
- 3. Les énergies fossiles (charbon, gaz, pétrole)**
4. Les métaux

# A quoi sert le charbon?

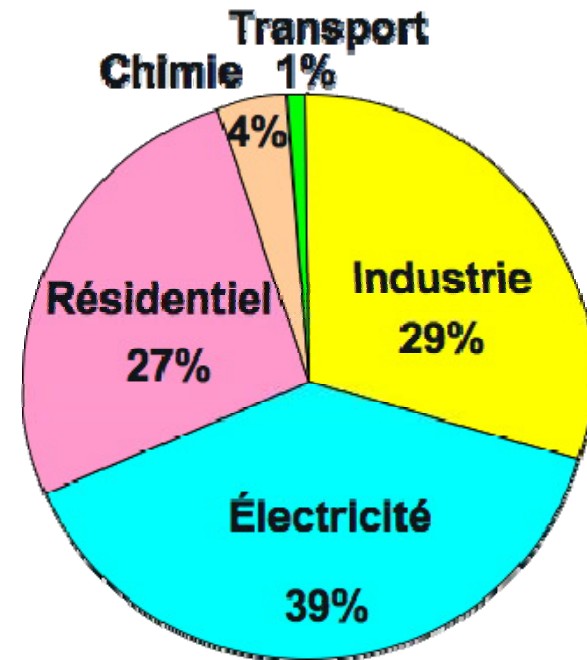
- **Production électrique**
- Production d'acier
- Production de ciment
- Autres usages industriels, chauffage, pétrochimie



Répartition par usage du charbon consommé dans le monde en 2007.

# A quoi sert le gaz?

- **Production électrique**
- Chauffage résidentiel et tertiaire
- Fours et chaudières industriels
- Chimie: engrais azotés



Répartition par usage du gaz consommé dans le monde en 2007.

# A quoi sert le pétrole?

- **Transports (~60%)**
  - Transport terrestre: voitures, camions, bus, trains de marchandises...
  - Transport aérien (~10%)
  - Transport maritime (~10%)
- **Autres usages énergétiques**
  - Chaudières industrielles
  - Chauffage des bâtiments (fioul)
  - Engins agricoles, de chantier, bateaux de pêche...
- **Usages non énergétiques (~10%)**
  - Plastiques, textiles, lubrifiants, solvants, détergents, médicaments, engrais, pesticides, bitume...

# Mais...

Les transports dépendent du pétrole

- à 100% pour les transports aérien et maritime
- à plus de 90% pour les transports terrestres  
sauf: électricité (trains, trams), agrocarburants

Aucune alternative (agrocarburants, électricité, charbon liquéfié, etc.) n'est susceptible de le remplacer à ce jour

« Le pétrole est le sang de l'économie »

# Quelques chiffres

Les quantités de pétrole se mesurent en tonnes ou en barils

- 1 baril = 159 litres
- 1 tonne = 7,6 barils = 1208 litres



Consommation mondiale: ~100 millions de barils **par jour** en 2019 (~15 milliards de litres)

Prévisions pour 2023: 101 millions de barils par jour (redémarrage de l'économie chinoise, croissance de l'aviation)



# Attention aux effets d'annonce...

## Un gisement de pétrole «géant» découvert au Mexique

**ECONOMIE** 07:45 07.12.2019 (mis à jour 07:57 07.12.2019) [URL courte](#)

12 37 6

S'abonner [Google News](#)

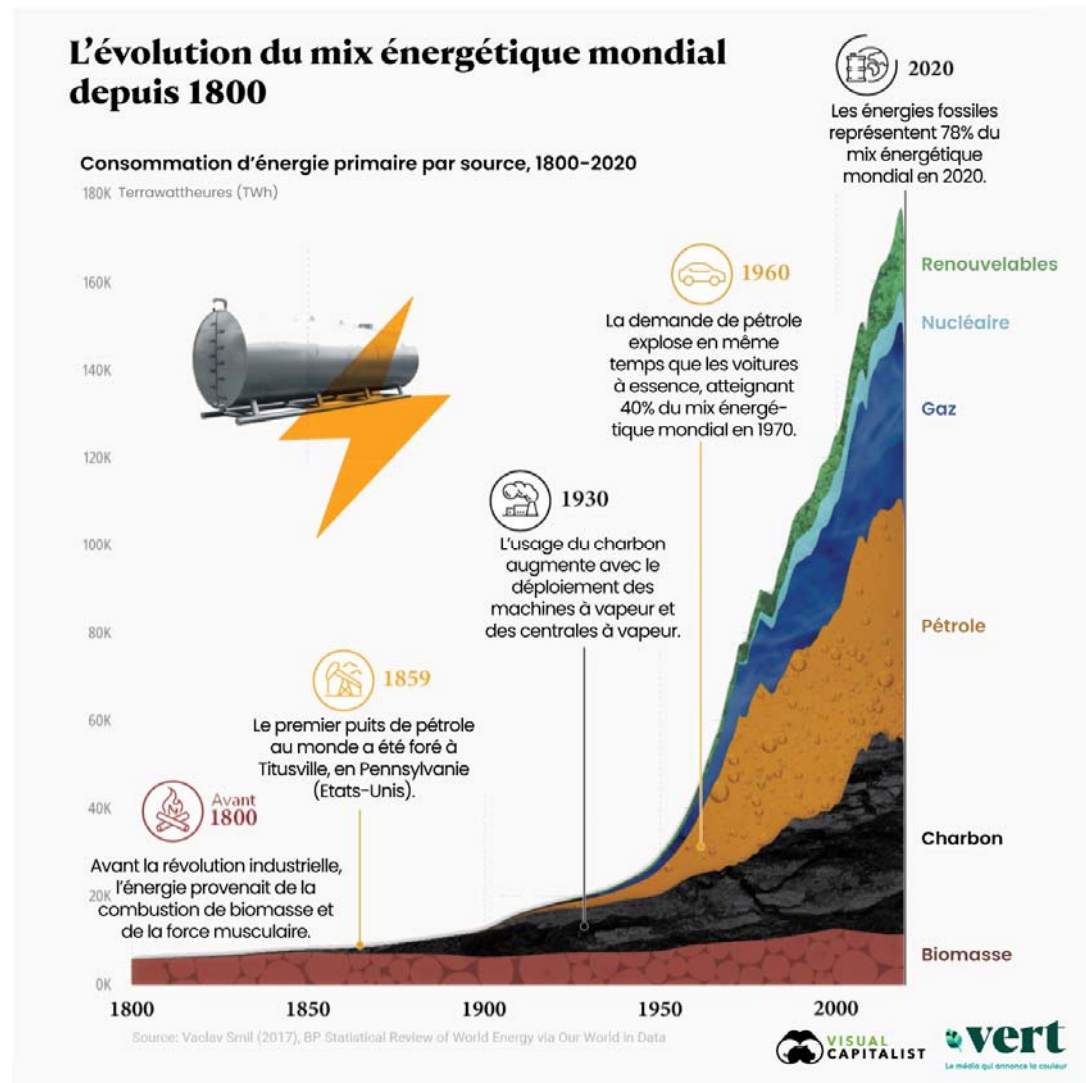
**Des travaux d'exploration et de forage sont déjà en cours sur un important gisement découvert dans le sud-est du Mexique, selon la compagnie pétrolière en charge.**

Un [gisement de pétrole qui devrait permettre](#) la production de 500 millions de barils de brut a été découvert dans l'État de Tabasco, dans le sud-est du Mexique, a annoncé la compagnie pétrolière Petróleos Mexicanos (Pemex) lors de la visite du Président de ce pays.

*«Nous pouvons confirmer aujourd'hui l'existence d'un gisement géant de 500 millions de barils d'équivalent de pétrole brut», a déclaré Octavio Romero Oropeza, directeur général de la société. Il a précisé que ce gisement était classé «3P» c'est-à-dire «probable, prouvé et possible».*

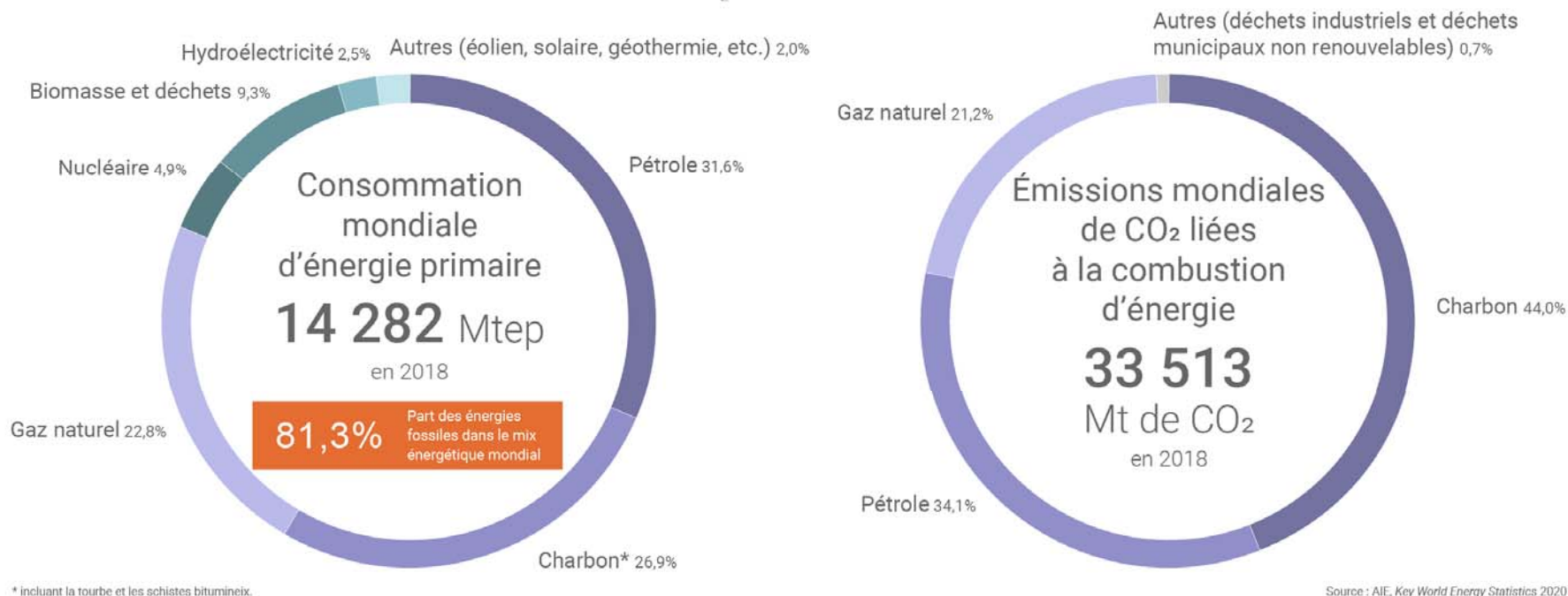
500 millions de barils = 5 jours de consommation mondiale

# Énergies fossiles: une consommation en hausse



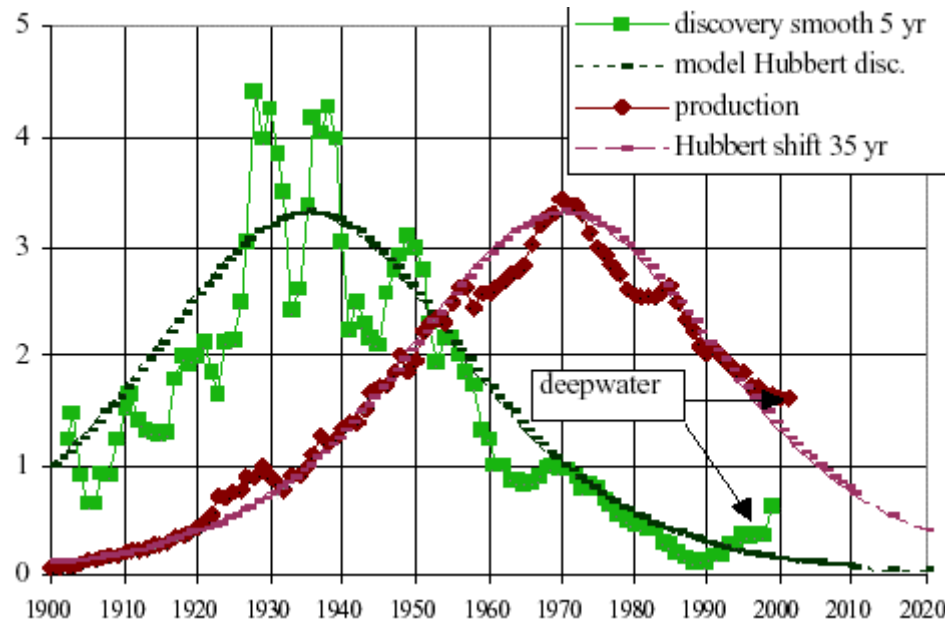
# Énergies fossiles: plus de 80% de l'énergie mondiale

**Monde** La consommation d'énergie et les émissions de CO<sub>2</sub> associées

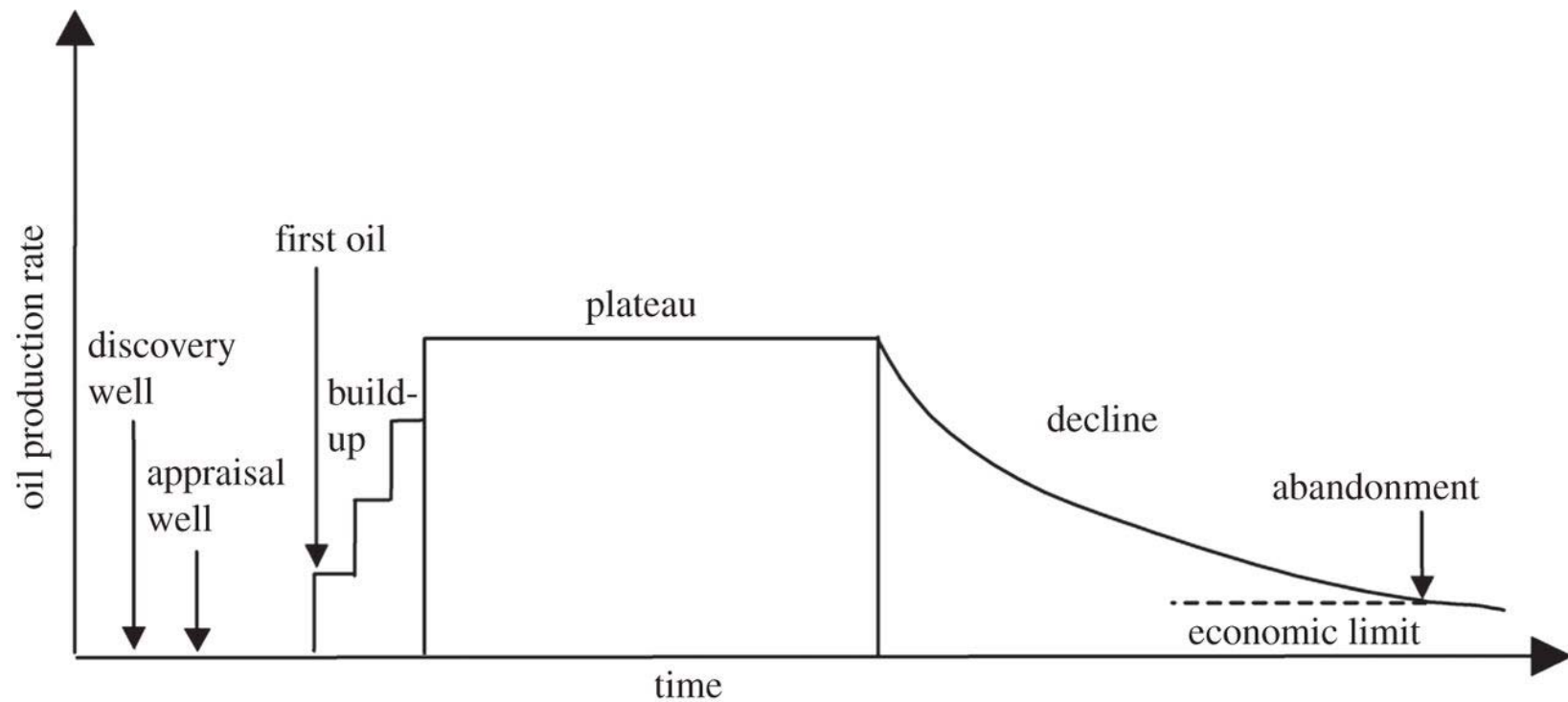


# Le pic pétrolier (*peak oil*)

En 1956, le géologue M. K. Hubbert prédit que la production de pétrole aux USA atteindra un maximum puis déclinera après 1970.



# Comportement théorique d'un gisement

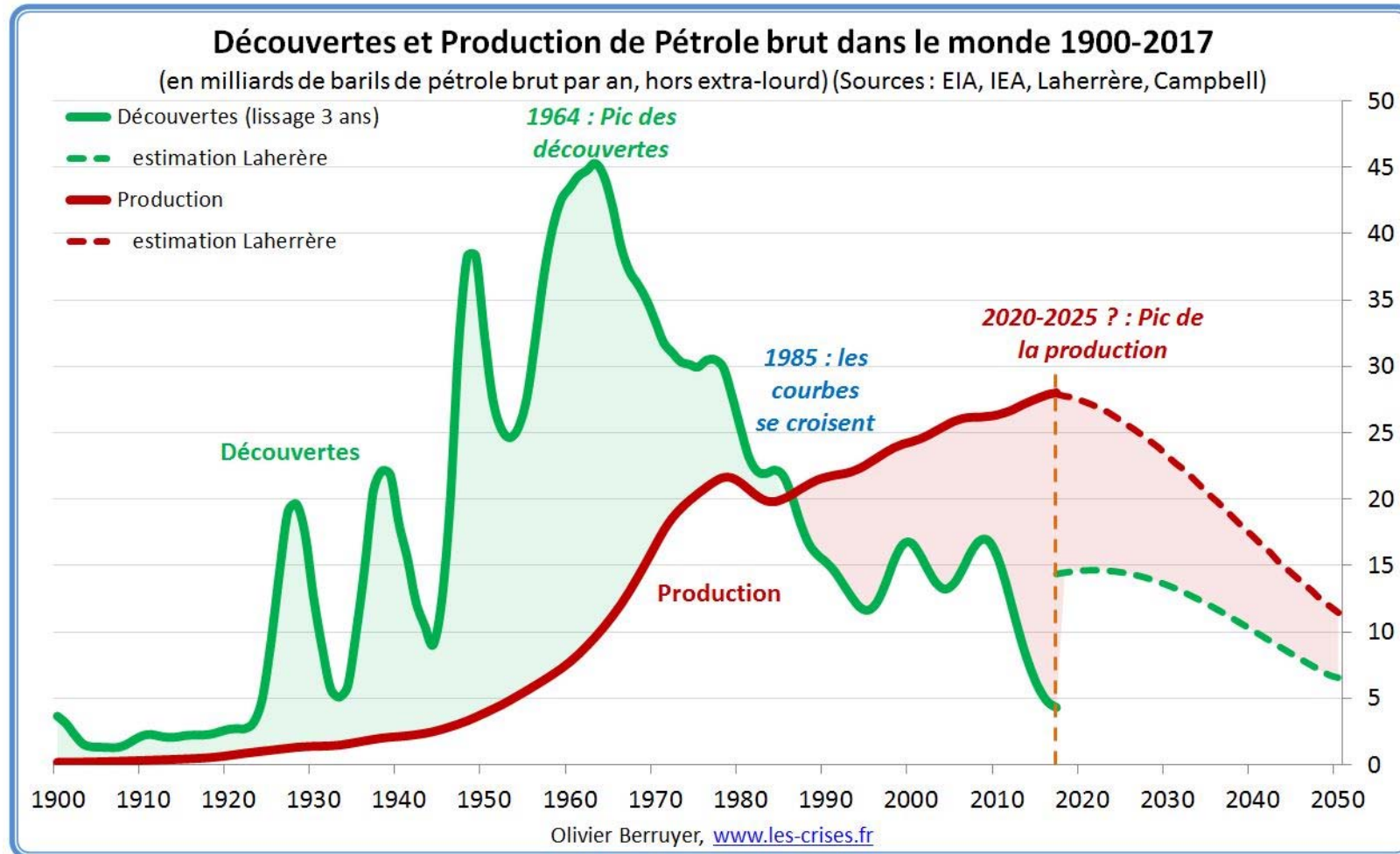


(Höök 2013)

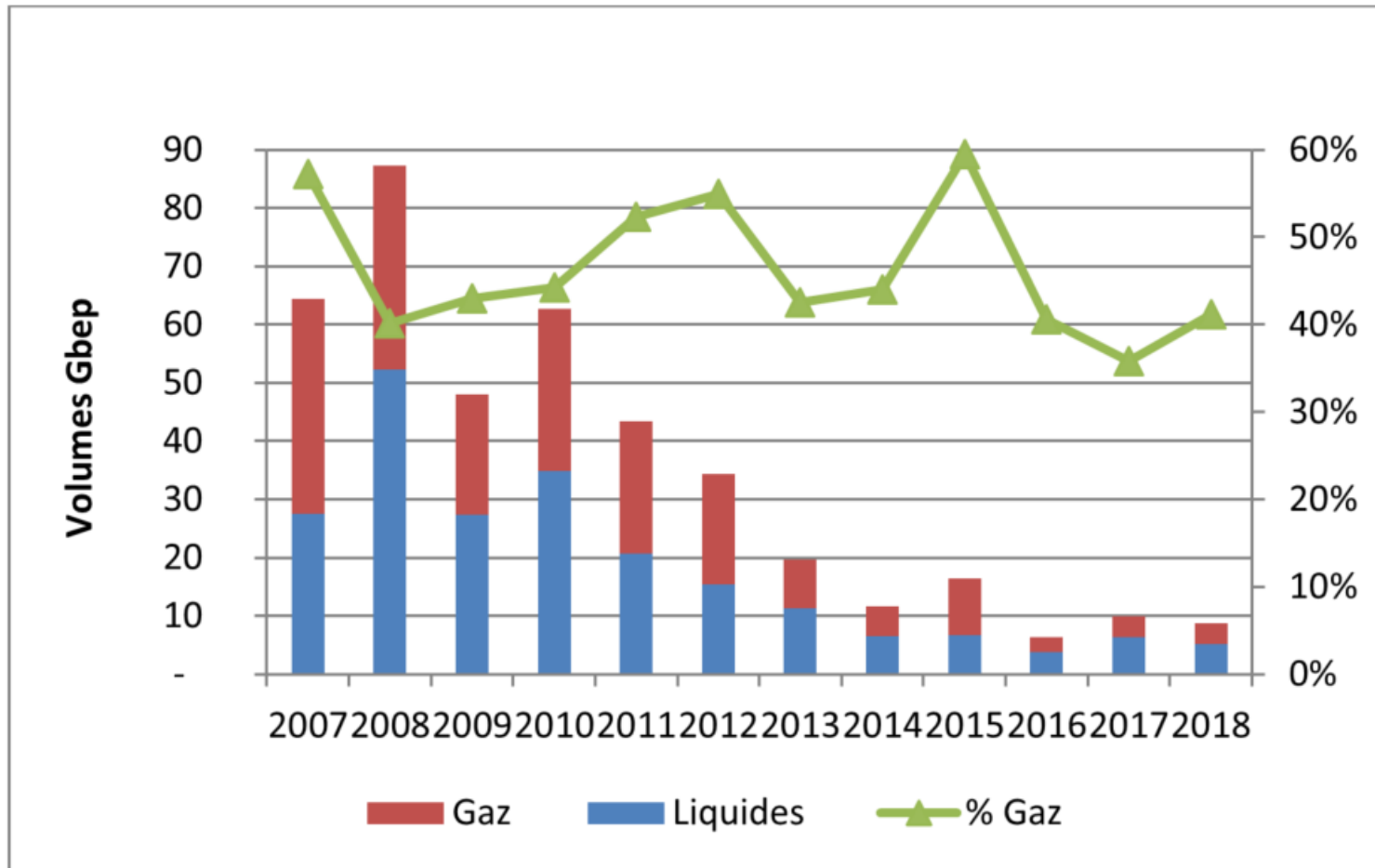
# Réerves: l'incertitude des chiffres

- On distingue
  - Réerves *ultimes*: la totalité de ce qui aura été extrait quand le gisement sera épuisé
  - Réerves *prouvées* (90% de chances d'être exploitées), *probables* (50%), *possibles* (10%)
- Les chiffres officiels fournis par les pays producteurs et les sociétés pétrolières ne sont pas toujours fiables
- L'Agence Internationale de l'Énergie (**AIE**) produit un rapport annuel (WEO: World Energy Outlook)
- L'agence privée d'analyse et de conseil **Rystad** possède une base de données très complète sur la production de pétrole et de gaz
- Les ingénieurs et géologues de l'**ASPO** (Association for the Study of Peak Oil) collectent, analysent et publient des données sur les pics pétrolier et gazier (en France: [aspofrance.org](http://aspofrance.org))

# Les découvertes sont en baisse



# Les découvertes sont en baisse



(Rystad Energy)



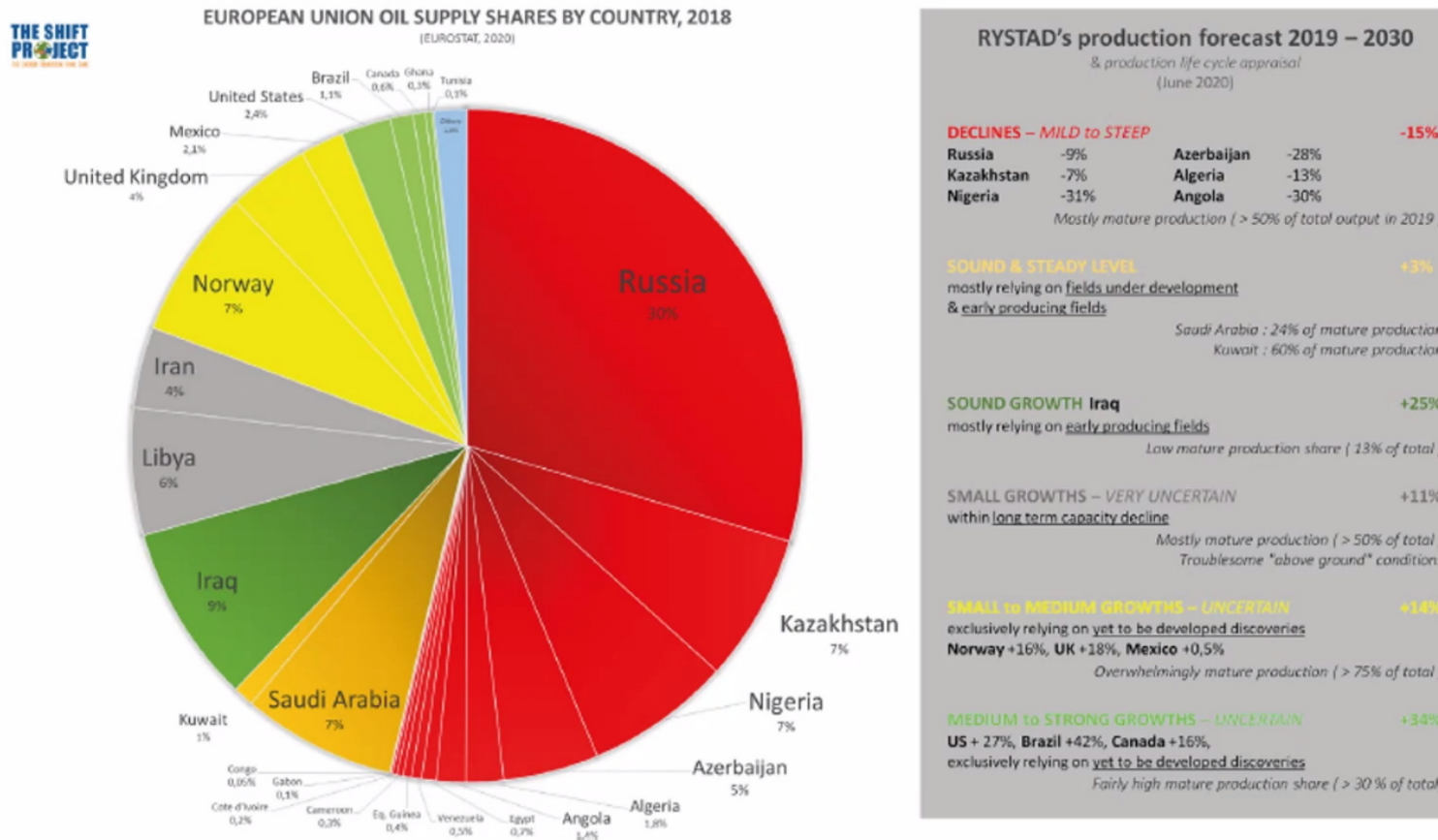
# A quand le pic mondial?

Selon les estimations

- le pic mondial des pétroles *conventionnels* aurait été passé aux alentours de 2008
- le pic « tous pétroles » est probable avant 2030 (AIE, ASPO, Rystad)
- plus de la moitié des champs pétroliers mondiaux ont passé leur pic (rapport AIE 2016)

# Et en Europe?

## La double contrainte carbone L'énergie : la dépendance pétrolière de l'Europe



# Et les fossiles non conventionnels?

Ils regroupent

- le pétrole offshore profond (>1500m.), le pétrole « polaire »
- les sables bitumineux (*tar sands*) : Canada, Venezuela
- les pétroles de roche-mère ou pétroles de schiste (*tight oil, shale oil*)
- parfois aussi: charbon liquéfié, agrocarburants...

Mais

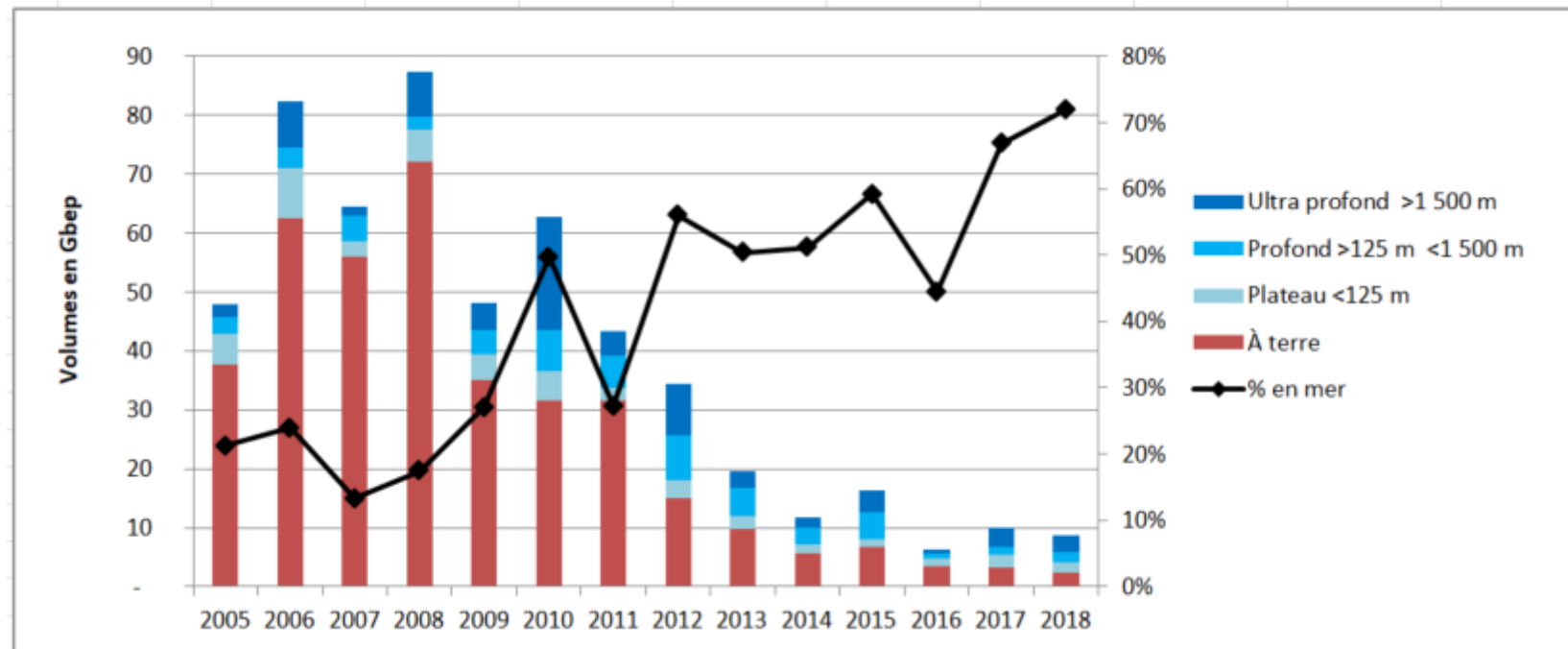
- Coûteux à extraire et à transformer
- Nécessitent des investissements élevés
- Très dommageables à l'environnement et au climat

⇒ un « sursis » de quelques années  
au pic pétrolier, pas une alternative



Sables bitumineux au Canada 19

# Découvertes de gisements par type



(Rystad Energy)

Les gisements non conventionnels deviennent majoritaires dans les découvertes, mais ils ne compenseront pas le déclin annoncé

# Répartition mondiale des réserves

Crude Oil Reserves in Billion Barrels (Gbbbl)



Note: For visualization purposes we are showing only countries with 100,000,000 bbl (0.1 Gbbbl) of crude oil reserves or more.

How to read this map: Countries appear bigger as their crude oil reserves are bigger. e.g. Venezuela. Conversely, countries that have smaller reserves of crude oil appear smaller. e.g. Côte d'Ivoire

Article & Sources:

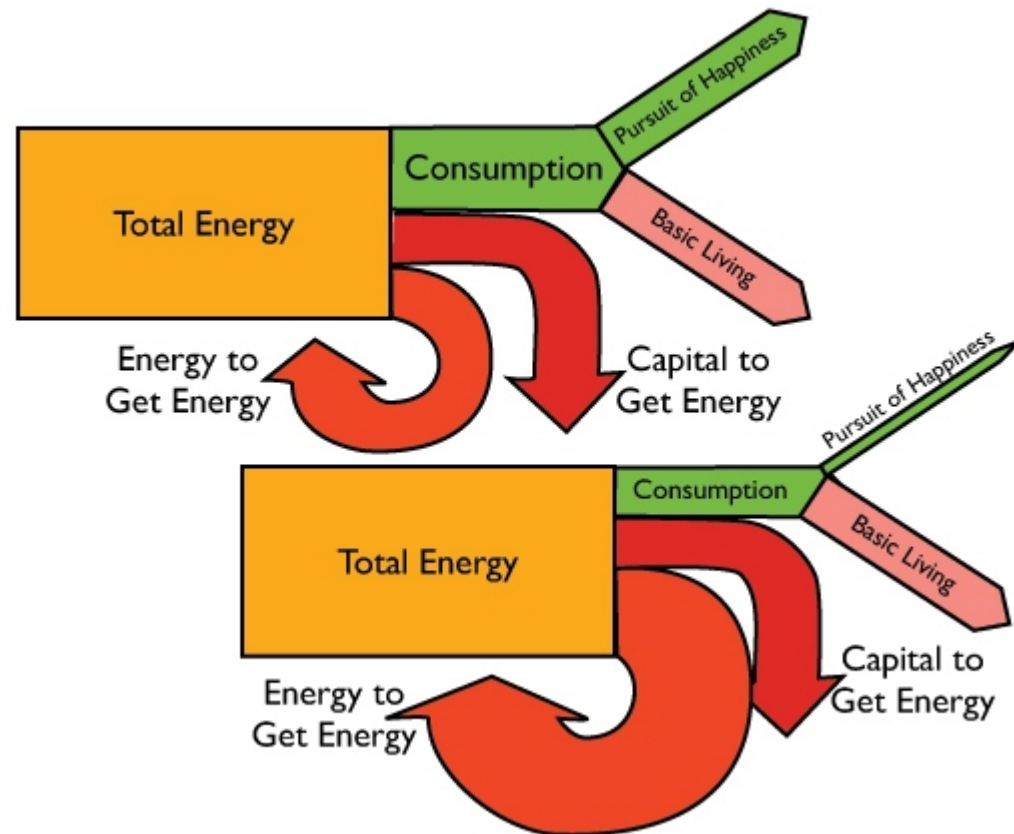
<https://howmuch.net/articles/worlds-biggest-crude-oil-reserves-by-country>  
Central Intelligence Agency - <https://www.cia.gov/library>

# Le TRE: Taux de Retour Énergétique (ou EROI: *Energy Return on Investment*)

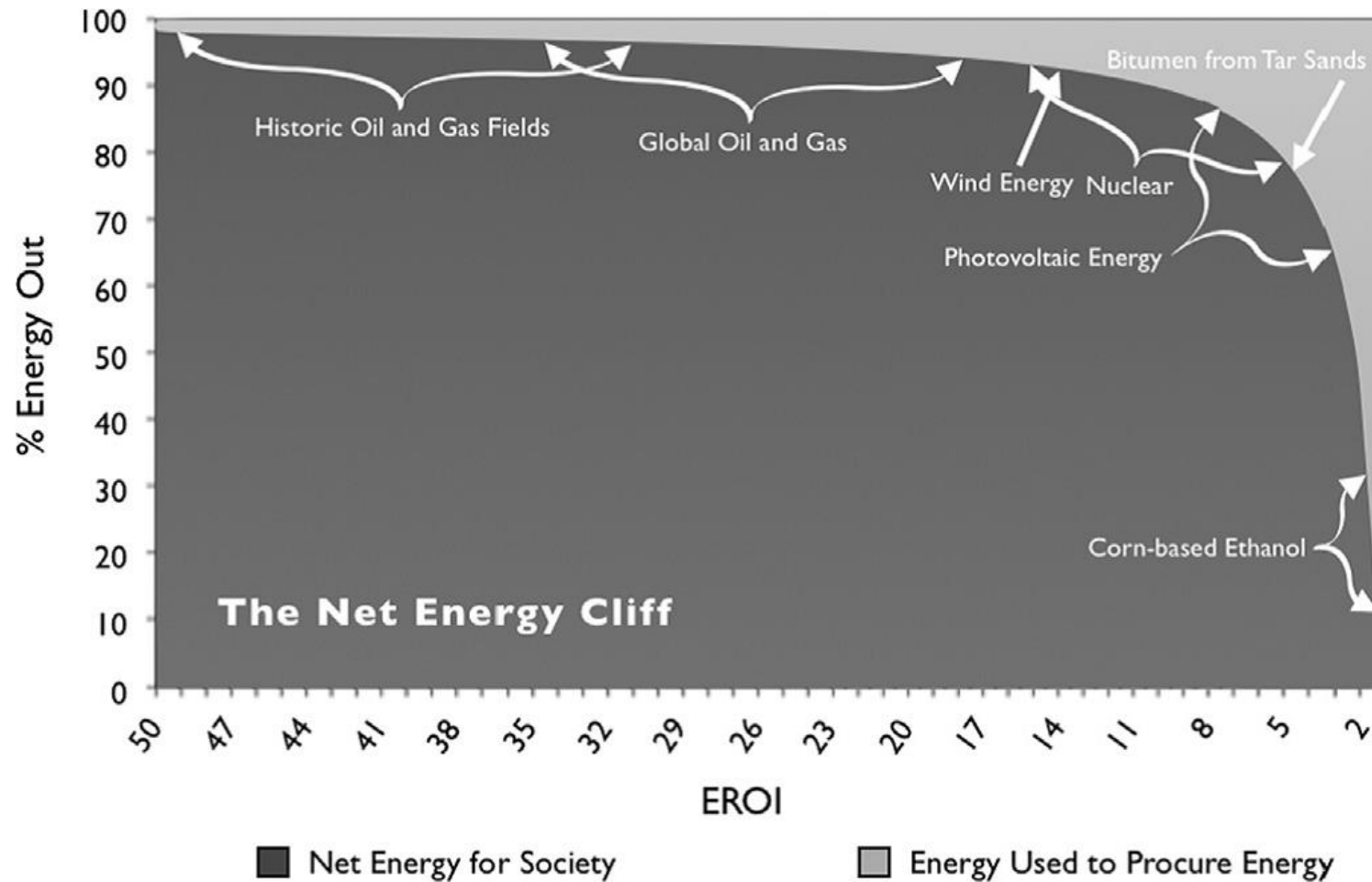
TRE = énergie produite/énergie dépensée

TRE élevé =  
énergie disponible  
pour la société

TRE faible =  
« cannibalisme  
énergétique »

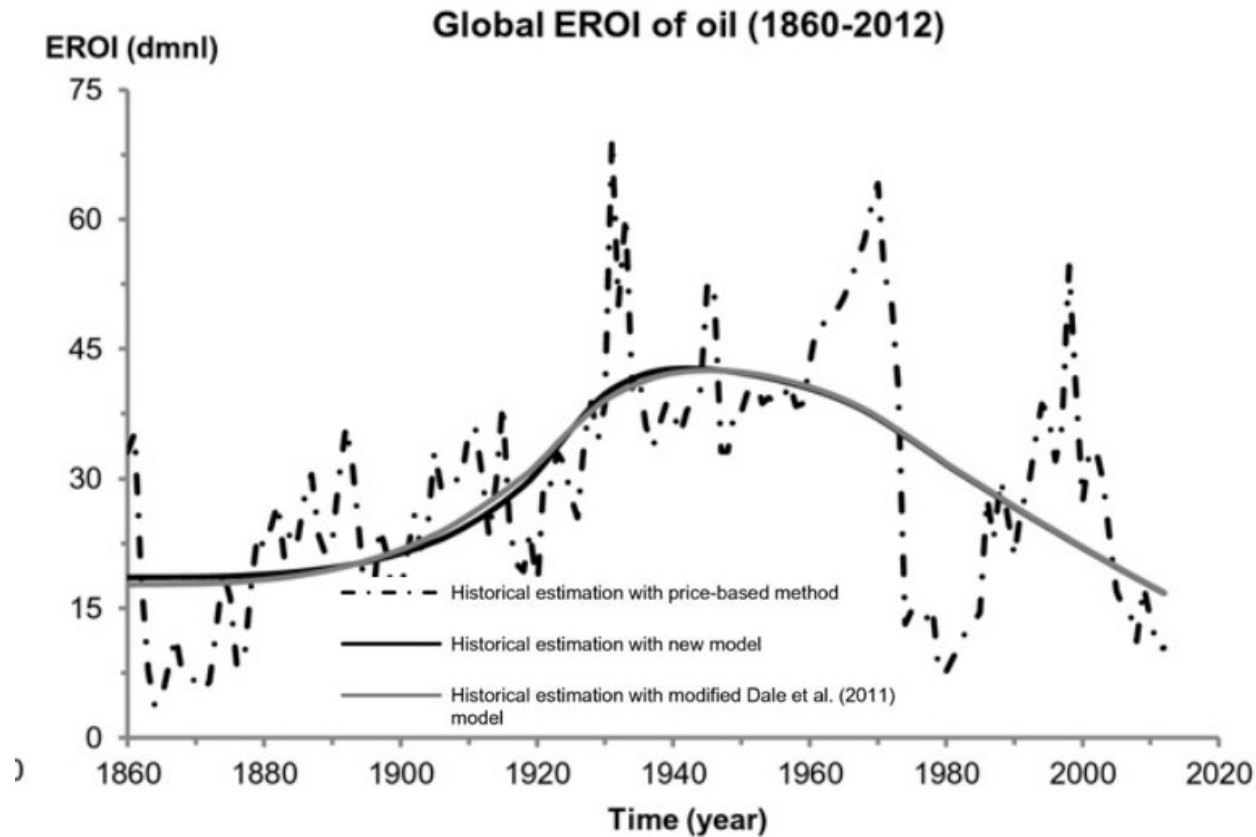


# Le TRE varie selon les énergies



(Lambert 2014)

# Le TRE mondial tend à décroître

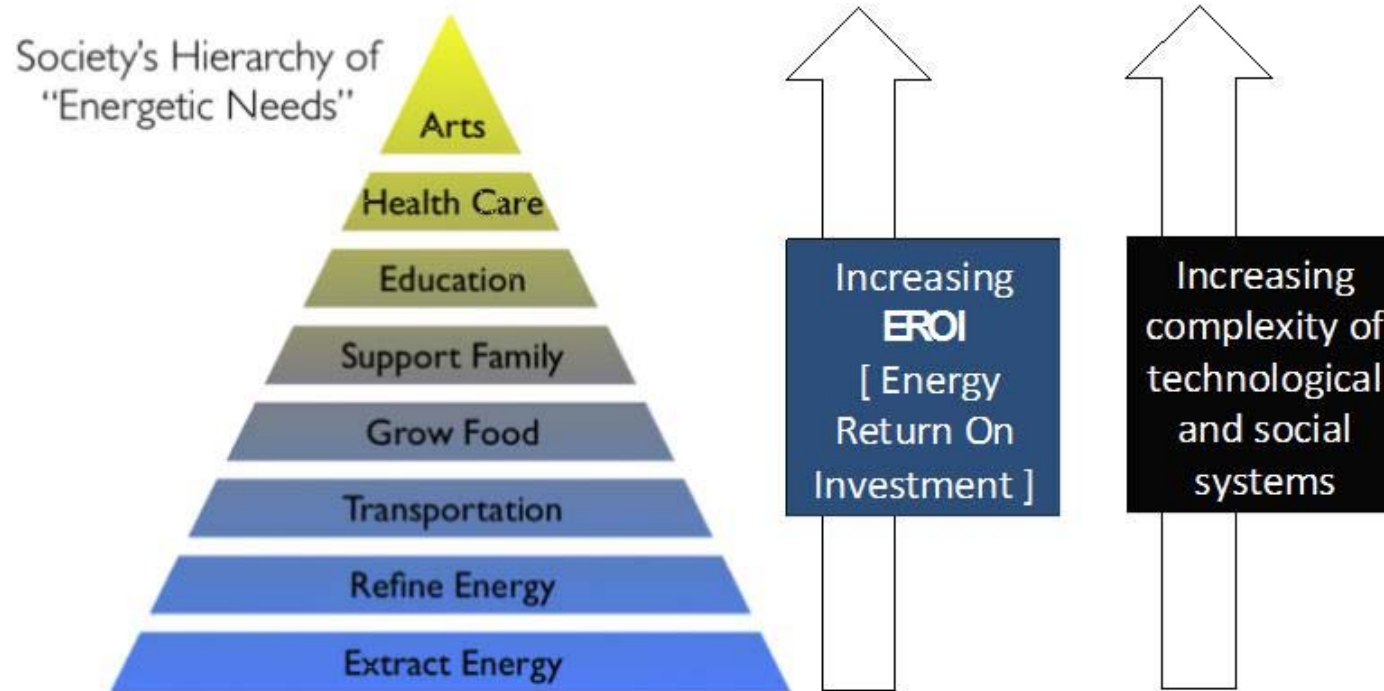


[Court et Fizaine 2017]



# TRE et satisfaction des besoins de la société

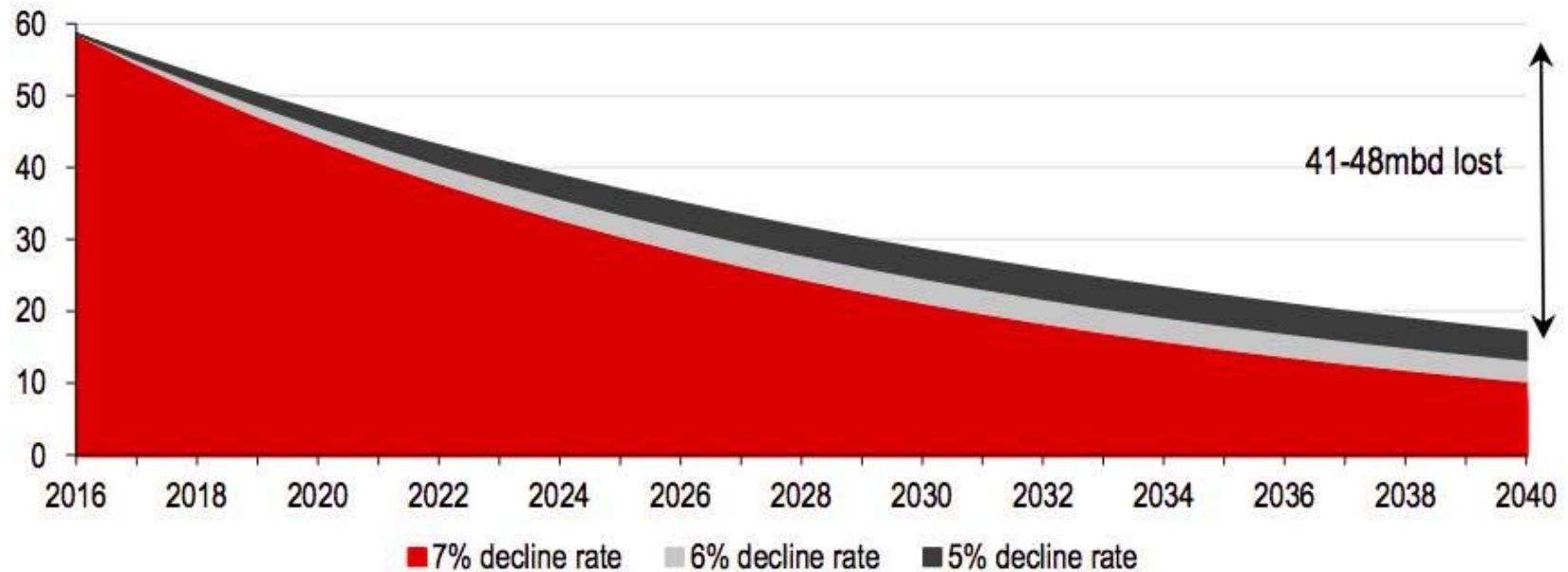
J.G. Lambert et al. / Energy Policy 64 (2014) 153–167



$$EROI = \frac{\text{energy returned to society}}{\text{energy invested to get that energy}}$$

# Après le pic: la déplétion

Post-peak production (benign definition) – sensitivity to 5-7% decline rate to 2040



Source: HSBC estimates

Un gisement parvenu à son pic décline de 4%-5% par an  
Le petits gisements déclinent plus rapidement que les gros gisements

# Quelles issues?

1. L'offre: à production égale, trouver des substituts aux fossiles
  - remplacer la pétrochimie par des produits biosourcés? Moindres qualités, énergivore, limites de surfaces et conflit avec les cultures alimentaires
  - électrifier les transports et l'industrie? Moindre puissance, problèmes de stockage, **déplétion des métaux**
2. La demande: revoir les besoins à la baisse
  - réduire fortement la consommation et le gaspillage par la réglementation

# Énergie fossile et travail humain

Pour cuire un plat dans un four électrique à 200°C durant 1h:

- Quelle surface faudrait-il de panneaux solaires?
- Combien faudrait-il de charbon?
- Combien faudrait-il de pétrole?
- Combien de cyclistes faudrait-il faire pédaler pendant une heure?

# Énergie fossile et travail humain

Pour cuire un plat dans un four électrique à 200°C durant 1h :

- Quelle surface faudrait-il de panneaux solaires? **50 m<sup>2</sup>**
- Combien faudrait-il de charbon? **1 pelletée**
- Combien faudrait-il de pétrole? **1 canette (= 33cl)**
- Combien de cyclistes faudrait-il faire pédaler pendant une heure? **10**

# L'image des « esclaves énergétiques » (H. P. Dürr)

Principe: estimer la quantité de travail humain équivalente à l'emploi d'énergies fossiles (via une conversion en kW/H)

Par exemple, 1 litre d'essence  $\leftrightarrow$  2 « esclaves énergétiques » qui travaillent une journée

D'après J.M. Jancovici, au travers des énergies fossiles, un français dispose en moyenne de 500 à 600 « esclaves énergétiques »

# Exemple: camion à benne

**SUBSTITUER L'ÉNERGIE DU PÉTROLE  
PAR CELLE DU TRAVAIL PHYSIQUE ?**

**Un seul CAT 797F**  
(charge utile : 363 tonnes,  
vitesse moyenne : 50 km/h)

**fournit le travail de**  
**90 760 mulets**  
(charge utile : 80 kg,  
vitesse de 2,5 à 3,5 km/h  
en terrain accidenté,  
6 à 8 heures par jour)

**...ou de 300 000 esclaves !**  
(qu'il faudrait nourrir)

1 litre  
= ●  
10 kW/h

Page 61 : « Nous aurons du mal à remplacer les 70 camions (*dumpers*) de 290 tonnes de charge utile du Bingham Canyon, parcourant au total 20 000 km par jour, par [...] quelques millions [3 624 819] de mulets ! »

Quel futur pour les métaux ?  
Raréfaction des métaux : Un nouveau défi pour la société  
de Philippe Bihouix et Benoît de Guillebon,  
Éditions EDP Sciences

Mine de cuivre à ciel ouvert (mountain top removal)  
de Bingham Canyon, Utah, USA

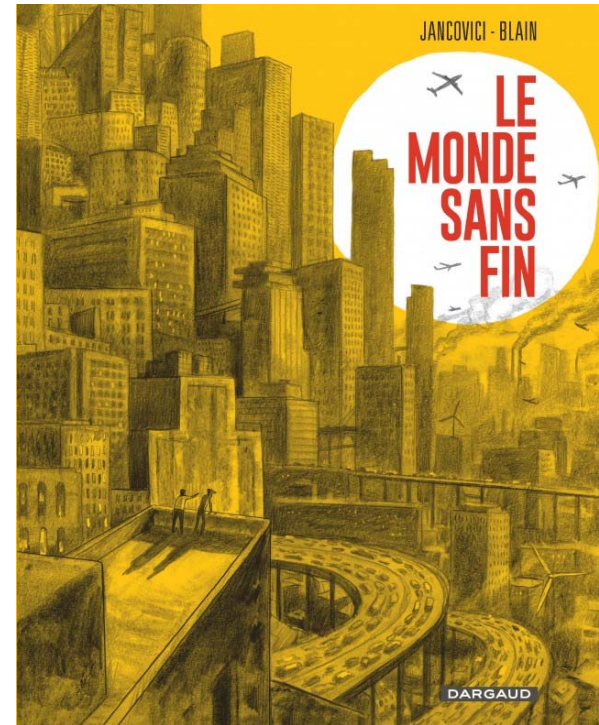
Infographie : Fred Moreau - < Sherkian1962@hotmail.com > 2020

QUEL FUTUR POUR LES MÉTAUX ?  
Raréfaction des métaux  
proposé par Philippe Bihouix

# Vidéo

Combien de temps peut-on tenir avec le pétrole?

<https://www.youtube.com/watch?v=9G5KH9lxNWU>



« Le monde sans fin, miracle énergétique et dérive climatique » de Christophe Blain (scénario, dessin) et Jean-Marc Jancovici (scénario)



# I. Les limites planétaires

## Plan

1. Le climat: changement climatique
2. La biodiversité: sixième extinction de masse
3. Les énergies fossiles (pétrole, gaz, charbon)
4. **Les métaux**



*Cette partie est adaptée et traduite de la présentation:*  
**Disponibilité des ressources en métaux et limites du recyclage:**

**de Philippe Bihouix**



**Les Houches  
2016**

# Les métaux

Les premiers métaux exploités

- Cuivre, or, argent, étain, fer, plomb

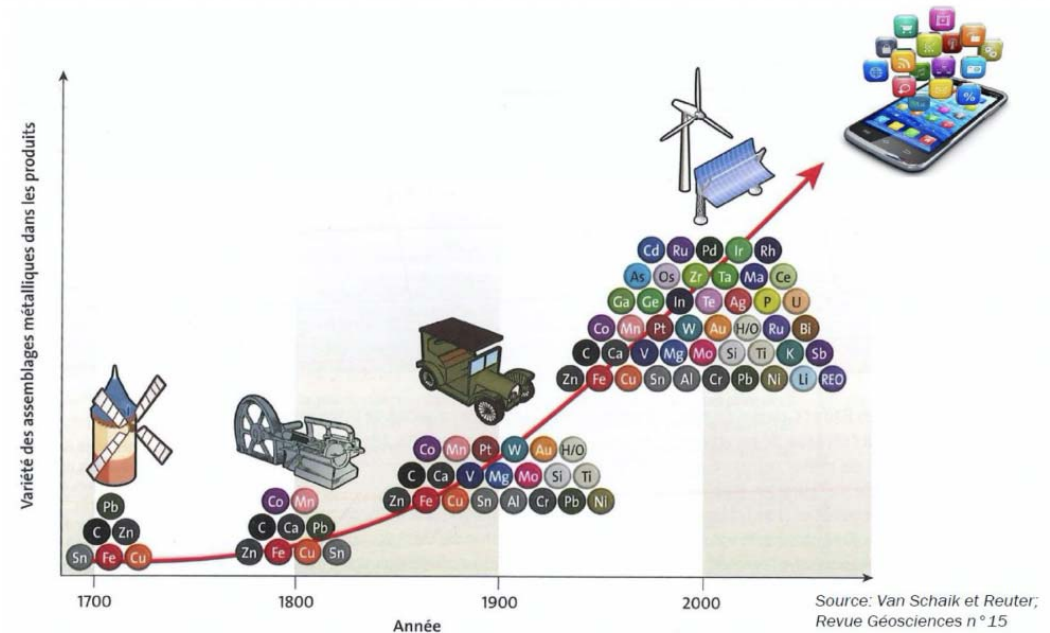
A la révolution industrielle

- Platine, zinc, cobalt, nickel, chrome, tungstène, manganèse, molybdène, aluminium...

Plus récemment

- Silicium, titane, lithium, tantale, indium, gallium, sélénium, germanium, néodyme...

Figure 1 – Illustration de l'augmentation du nombre de métaux utilisés selon l'évolution technologique

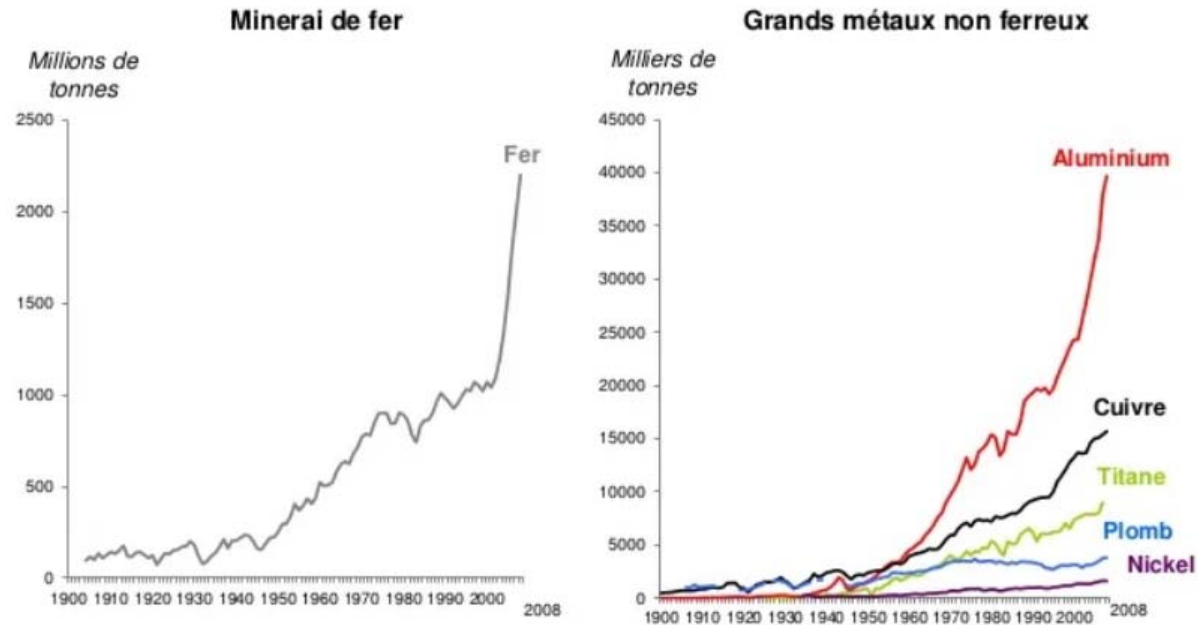


# Principaux métaux utilisés par secteur économique

- Bâtiment et infrastructures (cuivre, acier, alu, zinc, plomb)
- Transports
  - Automobile (acier, alu, cuivre, zinc, plomb)
  - Aéronautique (alu, acier, titane)
- Agriculture (platine pour engrais, cuivre comme fongicide)
- Nucléaire (nickel, zirconium, hafnium)
- Batteries (lithium, cobalt, nickel)
- Chimie: catalyseurs (cobalt, platine, rhénium)
- Électronique et NTIC (platine, or, argent, gallium, indium, tantale, terres rares)
- ...

# Une consommation en hausse

## Croissance de la consommation mondiale

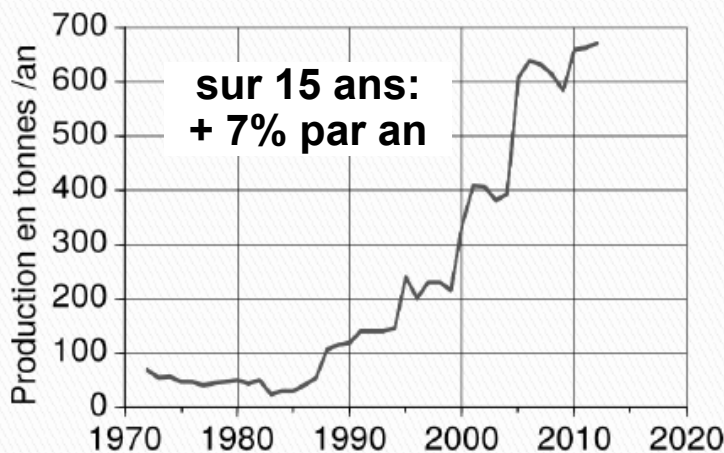


Source : United States Geological Survey

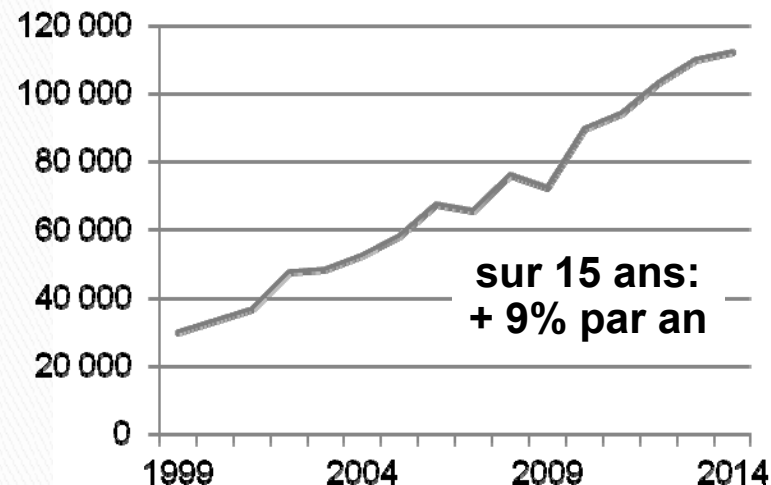
Notre dépendance aux métaux n'a jamais été aussi forte

# Consommation de métaux spécifiques

## Production d'indium



## Production de cobalt



52  
Te

Mémoires flash,  
photovoltaïque...

32  
Ge

Wifi...

49  
In

Écrans plats...

Disques durs...

44  
Ru

31  
Ga

LED...

63  
Eu

Lampes compactes  
fluorescentes...

65  
Tb

Micro condensateurs...

73  
Ta

Batteries...

27  
Co

3  
Li

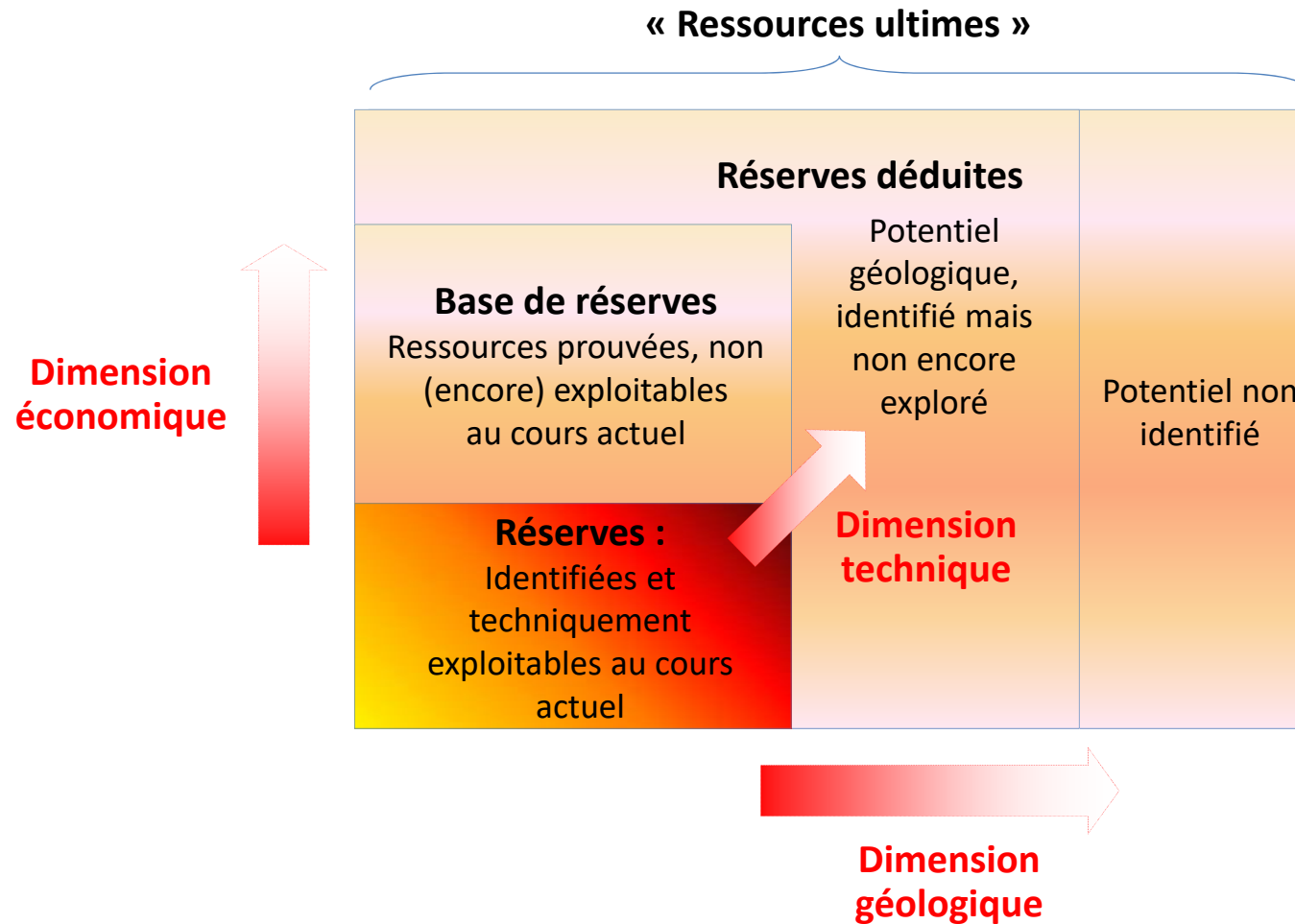
60  
Nd

66  
Dy

57  
La

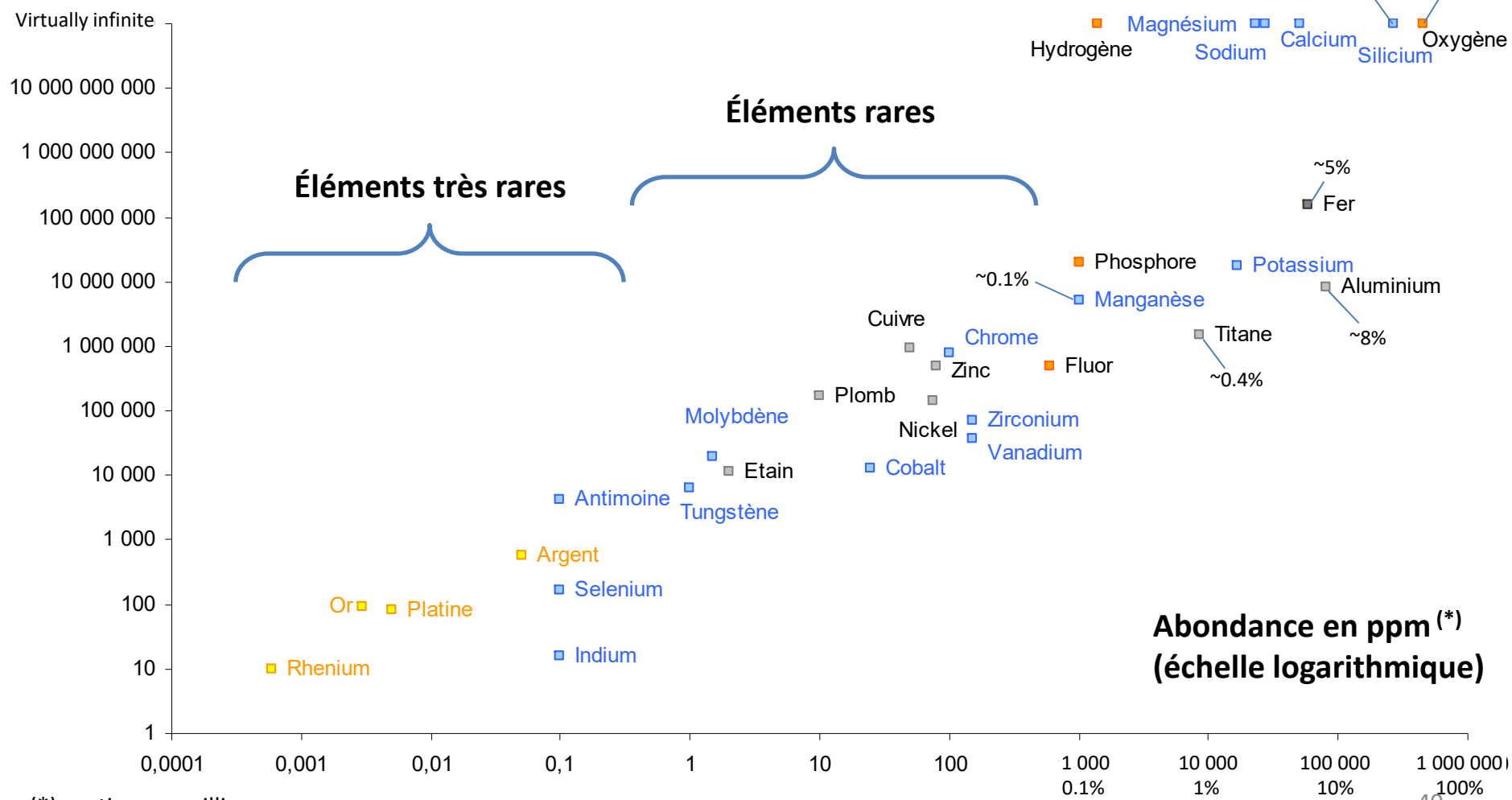
Eoliennes offshore, voitures hybrides...

# Comment estimer les réserves?



# Ressources en métaux : état des lieux

Réserves en milliers de tonnes  
(échelle logarithmique)



(\*) parties par million  
Sources : BRGM, USGS 2007



# Concentration en métaux

- L'abondance d'un métal ne dit pas ce qui est exploitable
  - En moyenne, 100 g de terre contient 5 mg de cuivre. Les réserves totales sont de 20 000 milliards de tonnes. Mais les réserves exploitables seraient comprises entre 500 millions et 3 milliards de tonnes
- La concentration moyenne est en baisse
  - La concentration moyenne des minerais de cuivre exploités est passée de 1,8 % (55 tonnes de minerai pour un tonne de métal) dans les années 1930 à 0,8 % aujourd'hui (125 tonnes de minerai pour une tonne de métal).
  - La concentration des mines d'or en Australie et en Afrique du Sud est passée de plus de 20 grammes par tonne de roche à moins de 5 grammes en l'espace d'un siècle.
  - Projet « Montagne d'or » en Guyane: 1,6 g. d'or par tonne de roche



Mine de cuivre  
Photo: dillonmarsh.com

# Certains métaux sont des sous-produits d'autres

Groupe → ↓ Période	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
1	1 H																	2 He
2	3 Li	4 Be											5 B	6 C	7 N	8 O	9 F	10 Ne
3	11 Na	12 Mg											13 Al	14 Si	15 P	16 S	17 Cl	18 Ar
4	19 K	20 Ca	21 Sc	22 Ti	23 V	24 Cr	25 Mn	26 Fe	27 Co	28 Ni	29 Cu	30 Zn	31 Ga	32 Ge	33 As	34 Se	35 Br	36 Kr
5	37 Rb	38 Sr	39 Y	40 Zr	41 Nb	42 Mo		44 Ru	45 Rh	46 Pd	47 Ag	48 Cd	49 In	50 Sn	51 Sb	52 Te	53 I	54 Xe
6	55 Cs	56 Ba	*	72 Hf	73 Ta	74 W	75 Re	76 Os	77 Ir	78 Pt	79 Au	80 Hg	81 Tl	82 Pb	83 Bi			
7			**															
	*Lanthanides			57 La	58 Ce	59 Pr	60 Nd		62 Sm	63 Eu	64 Gd	65 Tb	66 Dy	67 Ho	68 Er	69 Tm	70 Yb	71 Lu
	**Actinides				90 Th		92 U											

**Terres rares**      **Groupe du platine**

- Grands métaux
- Petits métaux– production propre
- Éléments terrestres rares
- Petits métaux– production propre ou sous-produits
- Sous-produits des métaux
- Non exploités
- Sous-produits des grands métaux

# Certains métaux sont des sous-produits d'autres

Groupe → ↓ Période	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
1	1 H																	2 He
2	3 Li	4 Be											5 B	6 C	7 N	8 O	9 F	10 Ne
3	11 Na	12 Mg											13 Al	14 Si	15 P	16 S	17 Cl	18 Ar
4	19 K	20 Ca	21 Sc	22 Ti	23 V	24 Cr	25 Mn	26 Fe	27 Co	28 Ni	29 Cu	30 Zn	31 Ga	32 Ge	33 As	34 Se	35 Br	36 Kr
5	37 Rb	38 Sr	39 Y	40 Zr	41 Nb	42 Mo		44 Ru	45 Rh	46 Pd	47 Ag	48 Cd	49 In	50 Sn	51 Sb	52 Te	53 I	54 Xe
6	55 Cs	56 Ba	*	72 Hf	73 Ta	74 W	75 Re	76 Os	77 Ir	78 Pt	79 Au	80 Hg	81 Tl	82 Pb	83 Bi			
7		**																
	*Lanthanides		57 La	58 Ce	59 Pr	60 Nd		62 Sm	63 Eu	64 Gd	65 Tb	66 Dy	67 Ho	68 Er	69 Tm	70 Yb	71 Lu	
	**Actinides			90 Th		92 U												

Le cobalt est souvent un co-produit du nickel ou du cuivre

Terres rares

Groupe du platine

- Grands métaux
- Petits métaux– production propre
- Éléments terrestres rares
- Petits métaux– production propre ou sous-produits
- Sous-produits des métaux
- Non exploités
- Sous-produits des grands métaux

# Interaction entre l'énergie et les métaux



**Minéraux de moins  
en moins concentrés**



**Extraction des métaux  
nécessitant de plus en plus  
d'énergie  
(15-17% de l'énergie mondiale)**

**Production d'énergie  
nécessitant de plus en  
plus de métaux**



**Énergie de moins  
en moins accessible**



# Le « pic de tout » (*peak all*)

- Pour la majorité des métaux, les réserves se situent entre 30 et 60 ans
- Substituer un métal par un autre (quand c'est possible) ne fait que déplacer le problème
- Il n'existe pas de substituts acceptables pour certains usages (cuivre pour applications électrique, nickel + chrome pour aciers inox, argent pour électronique...)
- Plus de métaux nécessite plus d'énergie et vice-versa
- Pic du pétrole + pic des métaux = « pic de tout »

Contrairement aux énergies fossiles, les métaux ne disparaissent pas à l'usage: quid du recyclage?

# Les limites du recyclage

## 1) L'usure, la perte mécanique



Usure mécanique



Perte au feu



Déchets métalliques radioactifs



Corrosion et rouille

# Les limites du recyclage

## 2) Les usages dissipatifs

Cosmétiques,  
médicaments



Peintures et teintures



Encres



Feux d'artifice, armes



Agriculture



Plastiques, textiles



# Les limites du recyclage

## 3) Alliages, pureté et perte de qualité

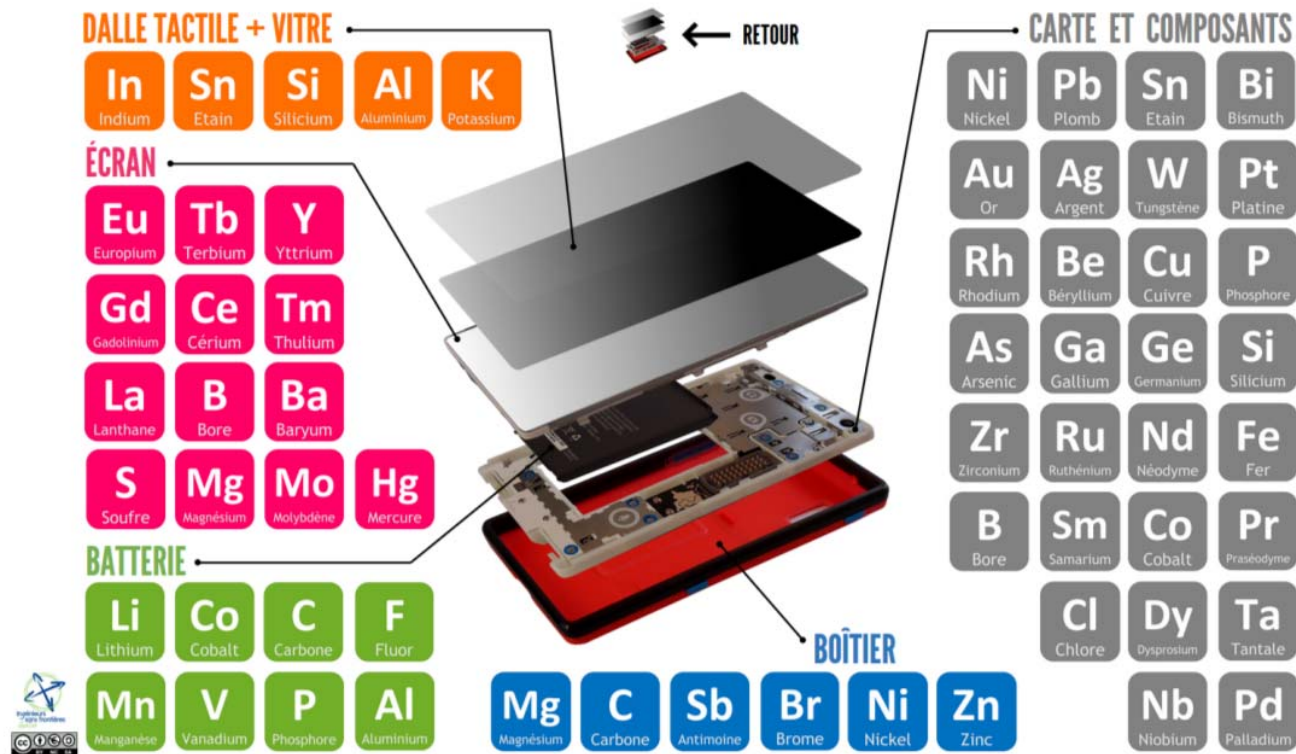


Usages « nobles » → usages « dégradés »



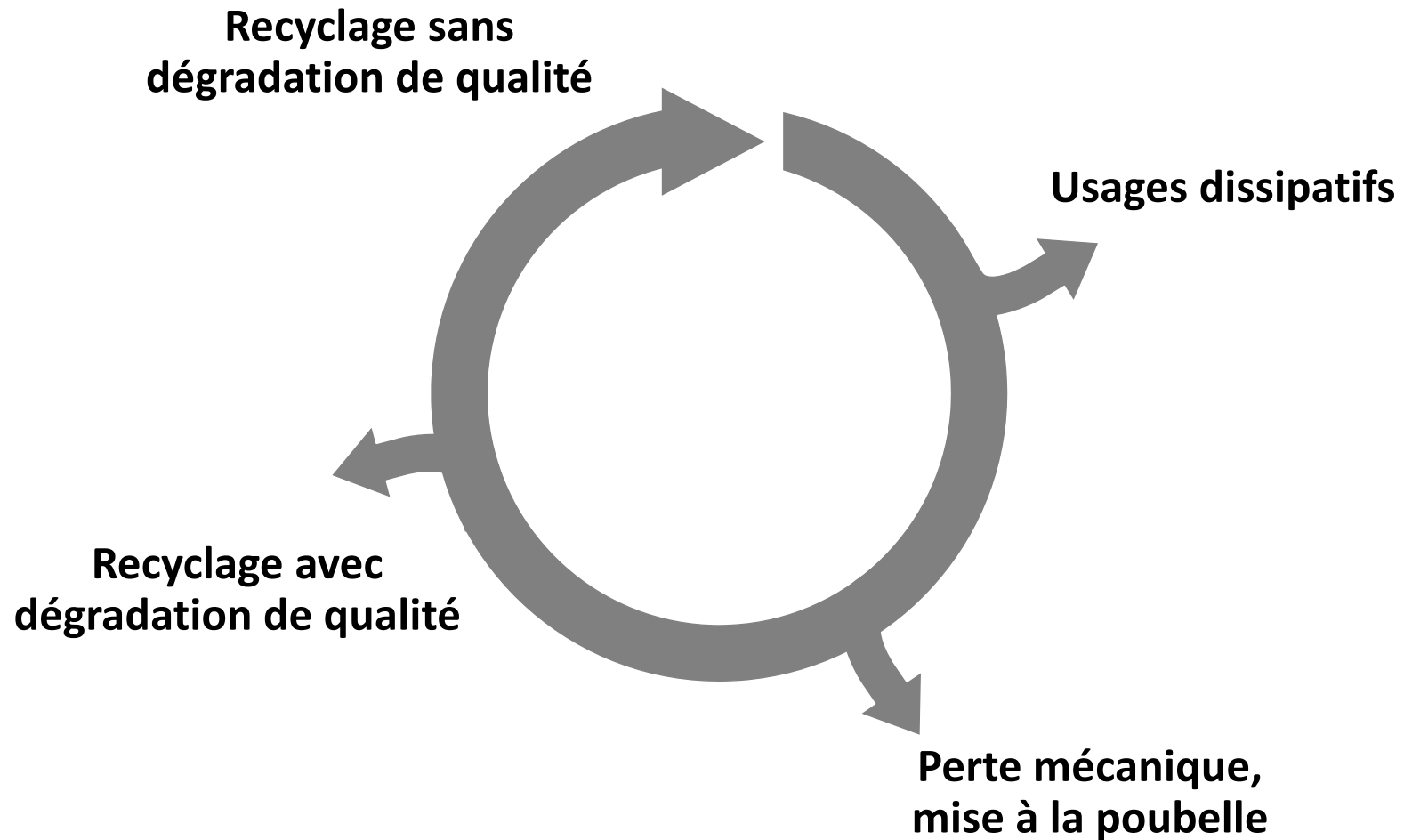
# Les limites du recyclage

## 3) Alliages, pureté et perte de qualité



Le recyclage ne récupère qu'une petite partie des métaux: ceux pour lesquels l'opération est rentable

# Le « cercle vertueux » du recyclage



# Le recyclage effectif est très faible

## Taux de recyclage de 60 métaux

Groupe → ↓ Période	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
1	1 H																	2 He
2	3 Li	4 Be											5 B	6 C	7 N	8 O	9 F	10 Ne
3	11 Na	12 Mg											13 Al	14 Si	15 P	16 S	17 Cl	18 Ar
4	19 K	20 Ca	21 Sc	22 Ti	23 V	24 Cr	25 Mn	26 Fe	27 Co	28 Ni	29 Cu	30 Zn	31 Ga	32 Ge	33 As	34 Se	35 Br	36 Kr
5	37 Rb	38 Sr	39 Y	40 Zr	41 Nb	42 Mo		44 Ru	45 Rh	46 Pd	47 Ag	48 Cd	49 In	50 Sn	51 Sb	52 Te	53 I	54 Xe
6	55 Cs	56 Ba	*	72 Hf	73 Ta	74 W	75 Re	76 Os	77 Ir	78 Pt	79 Au	80 Hg	81 Tl	82 Pb	83 Bi			
7			**															
	*Lanthanides (Terres rares)			57 La	58 Ce	59 Pr	60 Nd		62 Sm	63 Eu	64 Gd	65 Tb	66 Dy	67 Ho	68 Er	69 Tm	70 Yb	71 Lu
	**Actinides				90 Th		92 U											

34 (> la moitié)

18 (< un tiers)

■ < 1%

■ 1 – 10%

■ 10 – 25%

■ 25 – 50%

■ > 50%

# La « croissance verte » et la « transition énergétique » sont très gourmandes en métaux

Recherche d'une « voiture propre »



Lutte high-tech  
contre les émissions de CO2



Énergie « verte »



La recherche de performance conduit à rechercher  
la plus grande pureté des métaux et alliages

# De nouveaux usages (non énergétiques) accroissent encore la consommation

Nanotechnologies et usages  
dissipatifs



Hyperconnectivité,  
automatisation des services



Obsolescence technique par la  
recherche de performance







Internet des objets, robots, drones,  
big data...



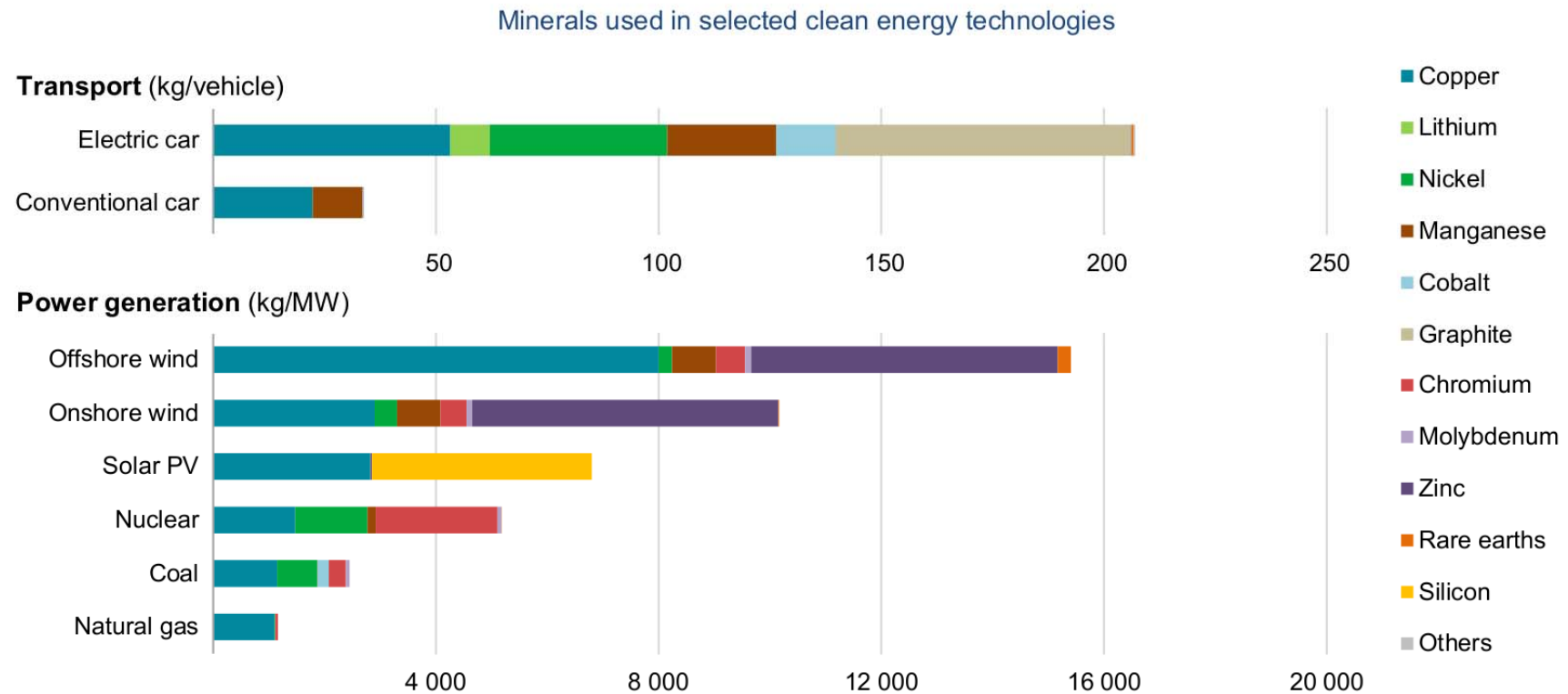
# Quelques métaux nécessaires aux « énergies nouvelles »

Groupe →  
↓ Période

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
1	1 H																	2 He
2	3 Li	4 Be											5 B	6 C	7 N	8 O	9 F	10 Ne
3	11 Na	12 Mg											13 Al	14 Si	15 P	16 S	17 Cl	18 Ar
4	19 K	20 Ca	21 Sc	22 Ti	23 V	24 Cr	25 Mn	26 Fe	27 Co	28 Ni	29 Cu	30 Zn	31 Ga	32 Ge	33 As	34 Se	35 Br	36 Kr
5	37 Rb	38 Sr	39 Y	40 Zr	41 Nb	42 Mo		44 Ru	45 Rh	46 Pd	47 Ag	48 Cd	49 In	50 Sn	51 Sb	52 Te	53 I	54 Xe
6	55 Cs	56 Ba	*	72 Hf	73 Ta	74 W	75 Re	76 Os	77 Ir	78 Pt	79 Au	80 Hg	81 Tl	82 Pb	83 Bi			
7			**															
	*Lanthanides (Terres rares)			57 La	58 Ce	59 Pr	60 Nd		62 Sm	63 Eu	64 Gd	65 Tb	66 Dy	67 Ho	68 Er	69 Tm	70 Yb	71 Lu
	**Actinides				90 Th		92 U											

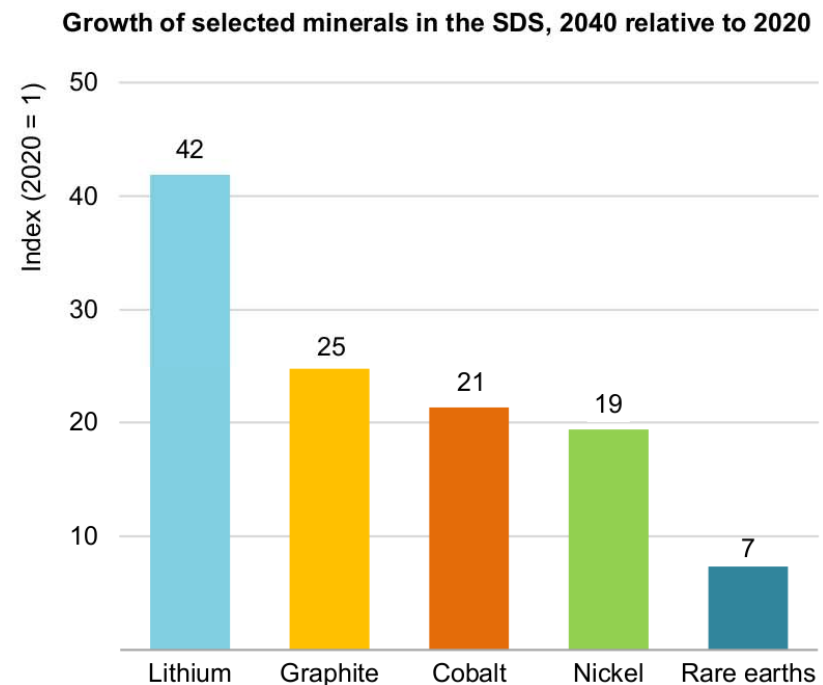
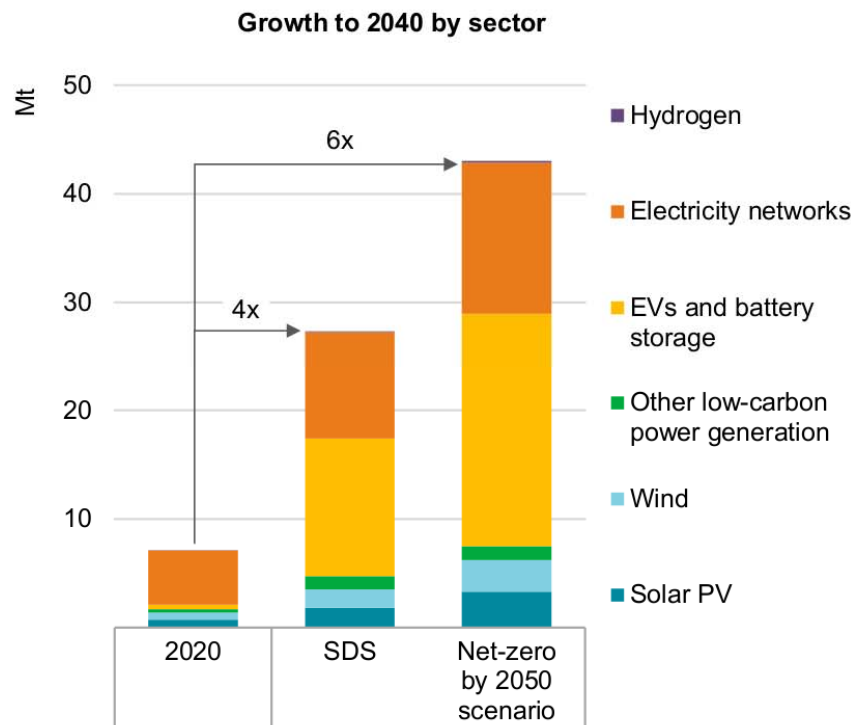





# Les énergies renouvelables accroissent la demande en métaux



[Rapport AIE 2021]

# Croissance de la demande dans le scénario « zéro émissions »

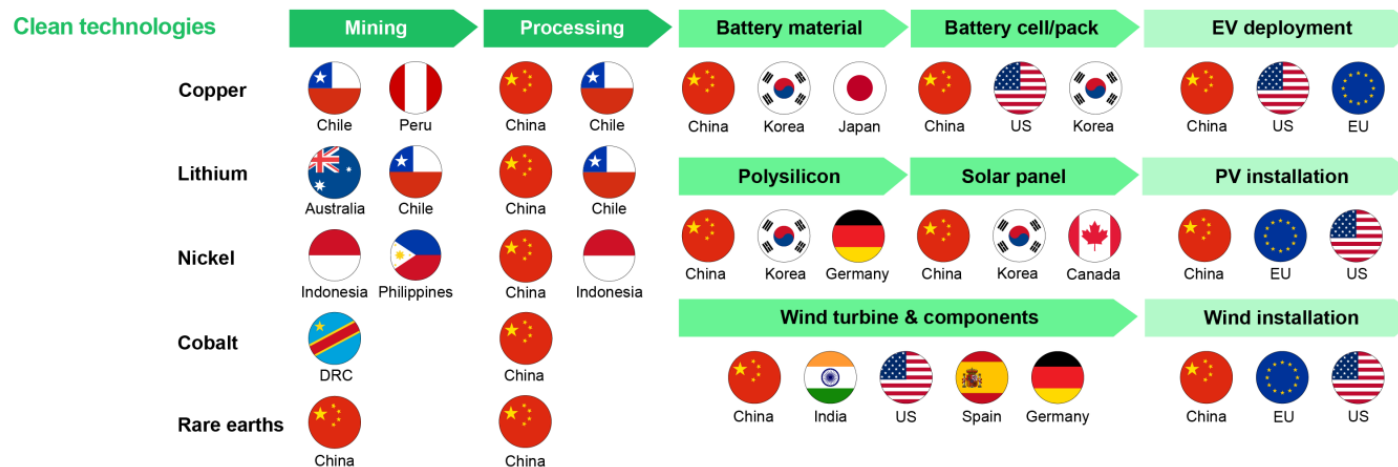


[Rapport AIE 2021]



# Risques au plan géopolitique et au plan environnemental

- La production et le traitement de plusieurs métaux « critiques » est concentrée dans un petit nombre de pays



- Impacts environnementaux des mines: émissions de GES, destruction de milieux naturels, déchets miniers, consommation d'eau, pollutions

# La « croissance verte » est une impasse

- On bute sur des limites physiques: les ingénieurs ne feront pas de miracle
- Il n'y a pas de « sortie par le haut »: la *high-tech* aggrave les problèmes au lieu de les résoudre
- Il faut travailler sur la *demande* davantage que sur *l'offre*
- Nous avons besoin d'idées et d'innovations, mais pas celles que nous avons explorées jusqu'ici

# Réfléchir à l'usage et au recyclage

Les appareils devraient être

- Réparables
- Modulables
- Réutilisables
- Faciles à démonter

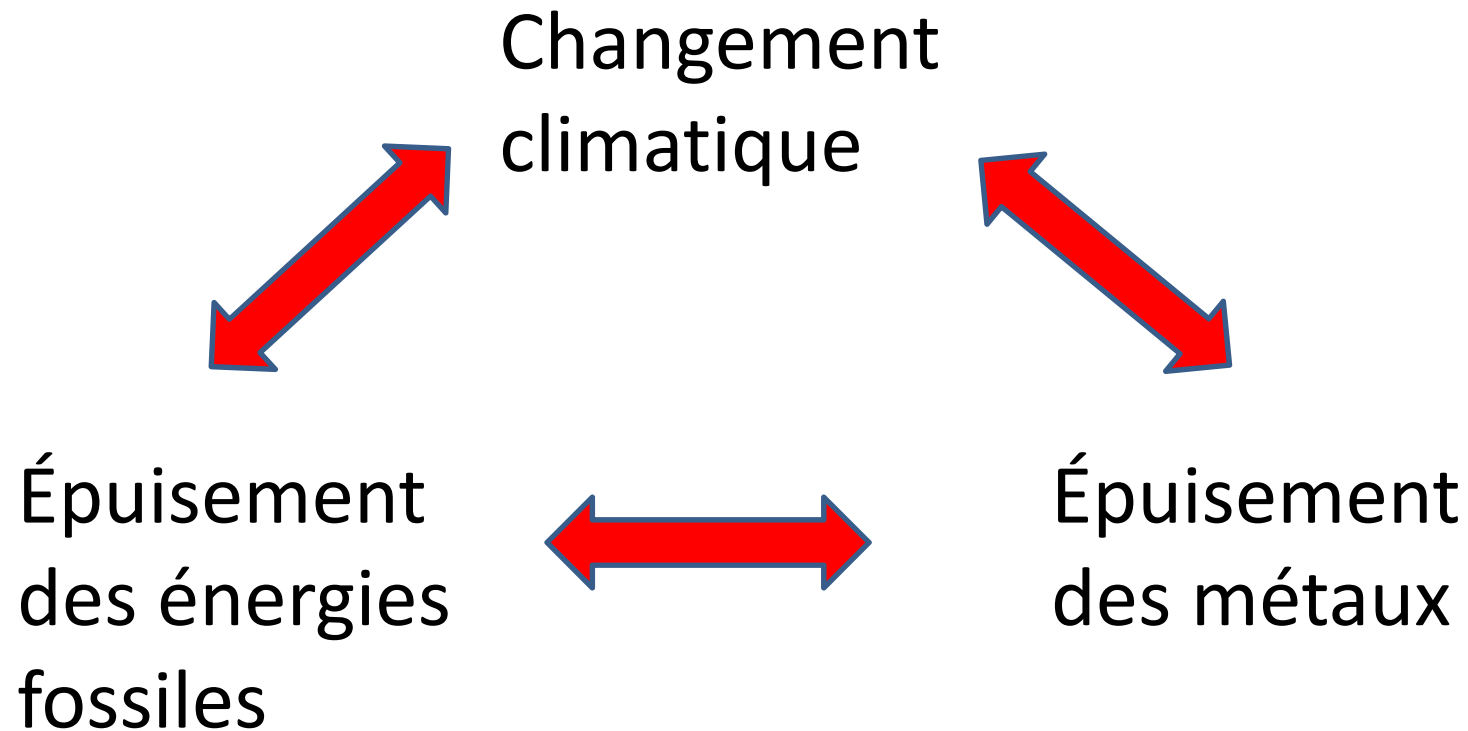
La conception devrait viser

- Robustesse
- Simplicité
- Matériau unique
- Éviter les métaux rares (si possible)
- Éviter l'électronique (autant que possible)

=> les « low-tech » (à venir, cours 8)



# Conclusion : des problèmes interdépendants



# Références

- Anne Lefèvre-Balleudier, « L'après-pétrole – Lorsque les puits seront à sec », Larousse, 2009
- <https://jancovici.com>
- <https://aspofrance.com> Association pour l'étude du pic pétrolier
- <https://www.iea.org/> Agence Internationale de l'Énergie
- <https://www.rystadenergy.com/> Rystad Energy
- Mikael Höök et al., “Decline and depletion rates of oil production: a comprehensive investigation”, Trans. Royal Soc., 2014
- The Shift Project, “[Pétrole : quels risques pour les approvisionnements de l'Europe?](#)”, 2021
- The Shift Project “[Pétrole: l'Union Européenne va-t-elle en manquer?](#)”, 2020
- Jessica Lambert et al., “Energy, EROI and quality of life”, Energy Policy, 2014
- Victor Court et Charles Fizaine, “Long-Term Estimates of the Energy-Return-on-Investment (EROI) of Coal, Oil, and Gas Global Productions”, Ecological Economics 138, 2017
- Philippe Bihouix, Benoît de Guillebon « Quel futur pour les métaux? », EDP Sciences, 2010
- Philippe Bihouix « L'âge des low-tech », Seuil, 2014
- UNEP, “[Metal stocks and recycling rates](#)”, 2011
- Agence Internationale de l'Énergie, “[The Role of Critical Minerals in Clean Energy Transitions](#)”, mai 2021
- Green Letter Club #32, “[Métaux: un risque de pénurie?](#)” avec Emmanuel Hache, IFP Énergies Nouvelles, mai 2021 (podcast)

# Pour la prochaine séance

Effectuer le calcul suivant:

Un pays a un taux de croissance économique de 5% par an. Au bout de combien d'année son PIB aura-t-il doublé? On suppose que le PIB est de 100 l'année de référence.

Année 0: 100

Année 1: 105

Année 2: 110,25

etc.

# Travaux pratiques

## Jeu "Mission climat"

Ce jeu consiste à proposer un scénario climat 2030 pour la France, permettant de limiter les impacts du dérèglement climatique à un niveau soutenable. Vous devez choisir les valeurs de différents paramètres (chauffage des logements, distance parcourue en voiture, etc.) et le simulateur vous indique à quelle hausse de température conduirait l'application de vos mesures à l'horizon 2100.

Faites le jeu une première fois en indiquant ce que vous seriez prêt à accepter vous-même (pour les mesures qui vous concernent personnellement) ou bien ce que vous pensez acceptable par la population française. A la fin, vous pouvez cliquer sur "résultats complets" pour avoir le détail.

Refaites le jeu en visant cette fois à ne pas dépasser 1,5° en 2100,

Compte-rendu à faire:

- 1) Présentez brièvement le premier scénario que vous avez testé et le résultat obtenu (t°, émissions)
- 2) Qu'avez-vous dû modifier pour ne pas dépasser 1,5° en 2100? Le scénario que vous obtenez vous semble-t-il réaliste et pourquoi?
- 3) L'un des paramètres proposés dans le simulateur a plus d'impact sur les émissions que les autres. Lequel, selon vous? Comment peut-on l'expliquer?