

# **Quelques aspects scientifiques de la transition qui nous attend**

Une occasion en or de réviser les bases de la physique, de la chimie et des mathématiques.

# Effondrement (Collapse) – Kézaco ?

- « [une situation dans laquelle] les besoins de base (eau, alimentation, logement, habillement, énergie, mobilité, sécurité) ne sont plus fournis à une majorité de la population par des services encadrés par la loi. » (*Yves Cochet*)
- [https://fr.wikipedia.org/wiki/Th%C3%A9ories\\_sur\\_les\\_risques\\_d%27effondrement\\_de\\_la\\_civilisation\\_industrielle](https://fr.wikipedia.org/wiki/Th%C3%A9ories_sur_les_risques_d%27effondrement_de_la_civilisation_industrielle)

# Collapsologie – Kézaco ?

- La **collapsologie** est « l'exercice transdisciplinaire d'étude de l'effondrement de notre civilisation industrielle et de ce qui pourrait lui succéder, en s'appuyant sur les deux modes cognitifs que sont la raison et l'intuition et sur des travaux scientifiques reconnus » (*Servigne & Stevens, 2015*).
- Son objectif est de nous éclairer sur ce qui nous arrive pour pouvoir discuter sereinement des politiques à mettre en place.
- <https://fr.wikipedia.org/wiki/Collapsologie>

## **Nous avons quelques soucis ...**

- **Quelles en sont les « causes » ?**
- **Comment les « causes » se développent en « conséquences » ?**
- **Comment réagir ?**

# Les grands domaines en déséquilibre

- Cause primaire = notre interaction avec notre environnement
  - L'anthropocène
- Déséquilibres qui sont des « causes secondaires »
  - Les ressources énergétiques, minérales et métalliques
  - Les flux d'énergie
  - La complexité et les aspects systémiques
  - Le changement climatique
  - La sixième extinction de masse de la biodiversité
- Déséquilibres qui sont des « conséquences »
  - La perception des inégalités sociales
  - La baisse du « niveau de vie »
  - La désagrégation de certains acquits

# Les ressources

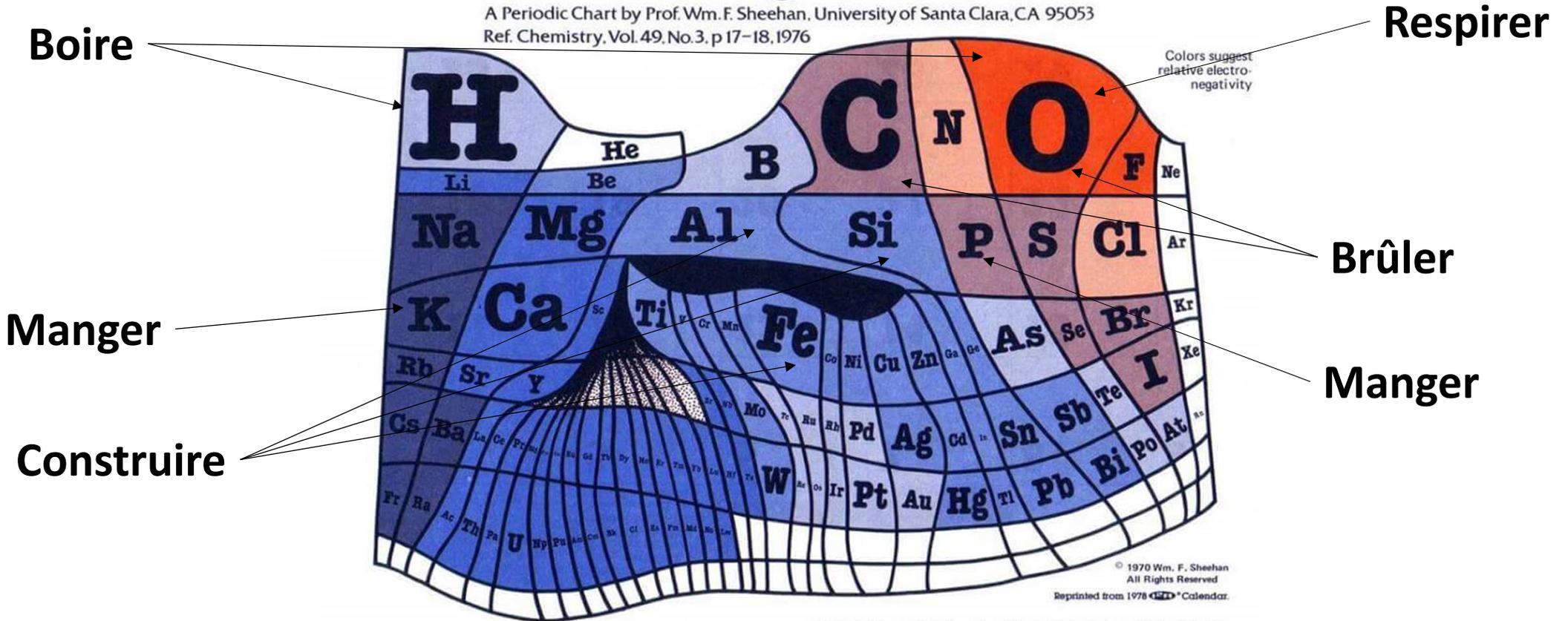
Une question de gestion de stocks



# Classement des métaux selon leur abondance

## The Elements According to Relative Abundance

A Periodic Chart by Prof. Wm. F. Sheehan, University of Santa Clara, CA 95053  
 Ref. Chemistry, Vol. 49, No. 3, p 17-18, 1976



Roughly, the size of an element's own niche ("I almost wrote square") is proportioned to its abundance on Earth's surface, and in addition, certain chemical similarities (e.g., Be and Al, or B and Si) are sug-

gested by the positioning of neighbors. The chart emphasizes that in real life a chemist will probably meet O, Si, Al, . . . and that he better do something about it. Periodic tables based upon elemental abundance would, of course, vary from planet to planet. . . W.F.S.

NOTE: TO ACCOMMODATE ALL ELEMENTS SOME DISTORTIONS WERE NECESSARY, FOR EXAMPLE SOME ELEMENTS DO NOT OCCUR NATURALLY.

# Les métaux *critiques* : pénuries en vue

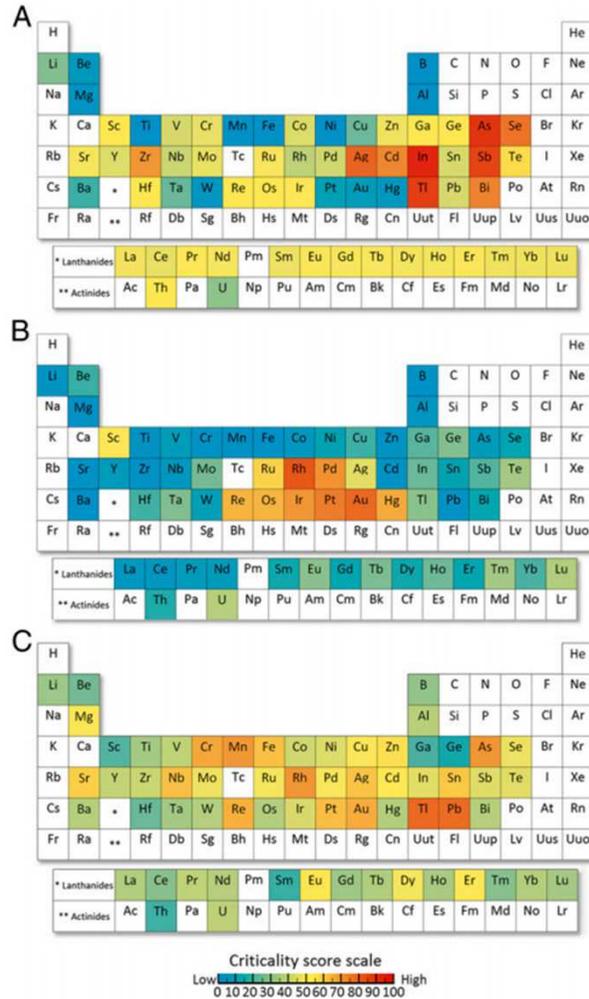


Fig. 6. Periodic tables of criticality for 62 metals, 2008 epoch, global level for (A) supply risk, (B) environmental implications, and (C) vulnerability to supply restriction.

## Criticité :

### **A. Insécurité d'approvisionnement**

indium, arsenic, antimoine, thallium, argent, sélénium, cadmium et bismuth

### **B. Risques environnementaux (*pour leur production*)**

rhodium, or, platine, palladium, mercure

### **C. Restrictions sur le débit de production**

thallium, du plomb, du rhodium, du manganèse, de l'arsenic, de l'or, du rhénium et du platine.

B) et C) indium, arsenic, thallium, antimoine, argent et sélénium

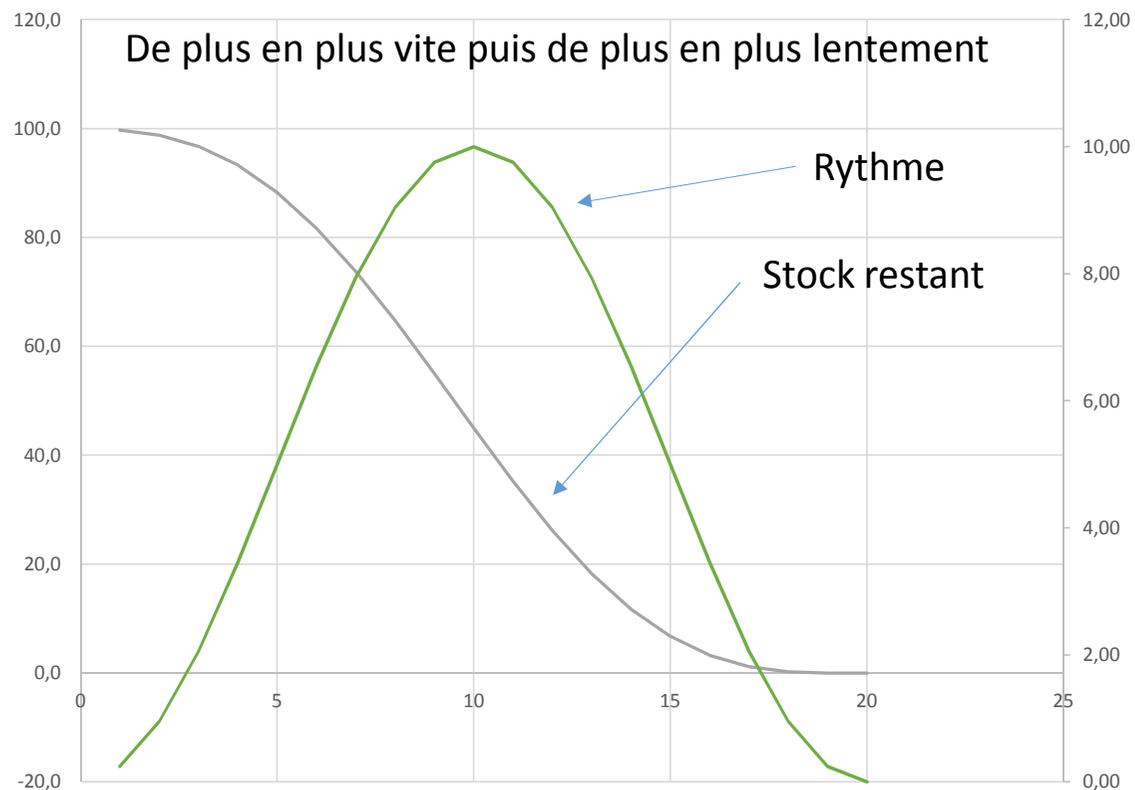
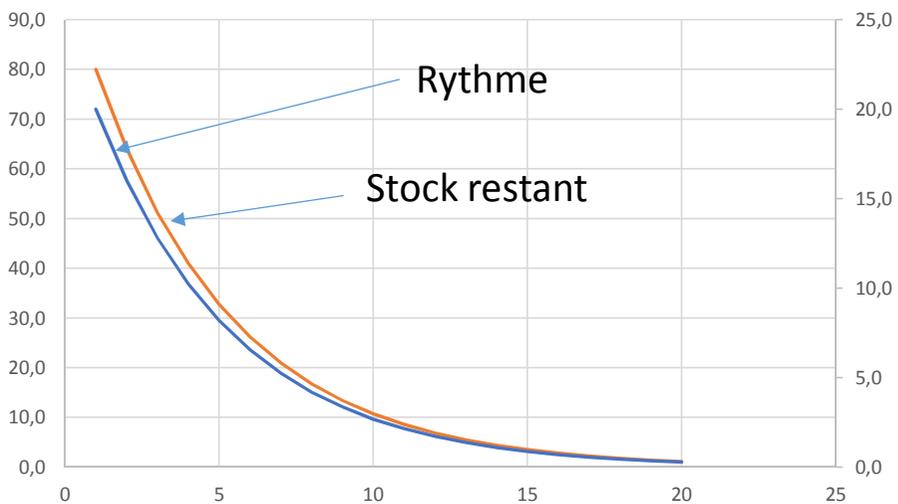
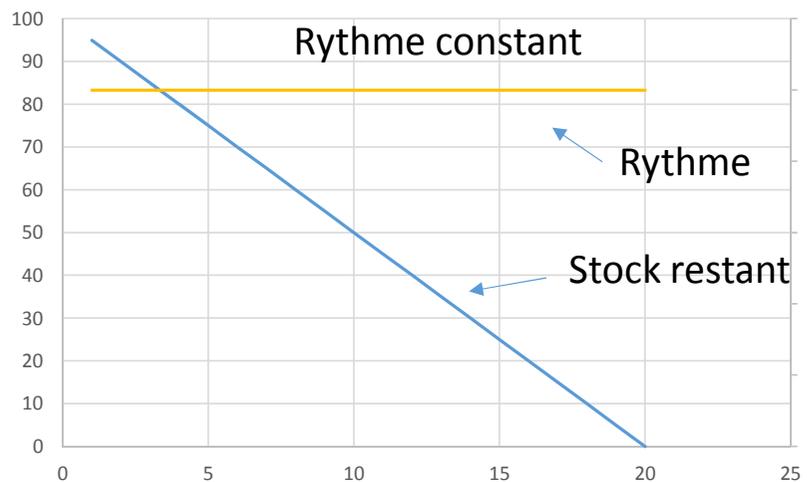
## Les minéraux critiques :

Phosphore (phosphates), Potassium (potasse) pour les engrais.

# La fonction de stock – 30'' de maths

- Soit un stock  $S_0$
- Je puise dans ce stock un flux constant  $s(t) = s$
- $S_0 = \int_0^T s(t) = s.T$
- Le stock restant à l'instant  $t$  est :  $S(t) = S_0 - \int_0^t s(t) = S_0 - s.t$
- Quand  $t = T$ ,  $s(T) = 0$
- Rythme de prélèvement du stock – quelques scénarii
  - Je puise à un rythme (flux) constant
  - Je puise dans ce stock à un rythme inversement proportionnel au stock restant
  - Je puise de plus en plus vite puis de plus en plus lentement

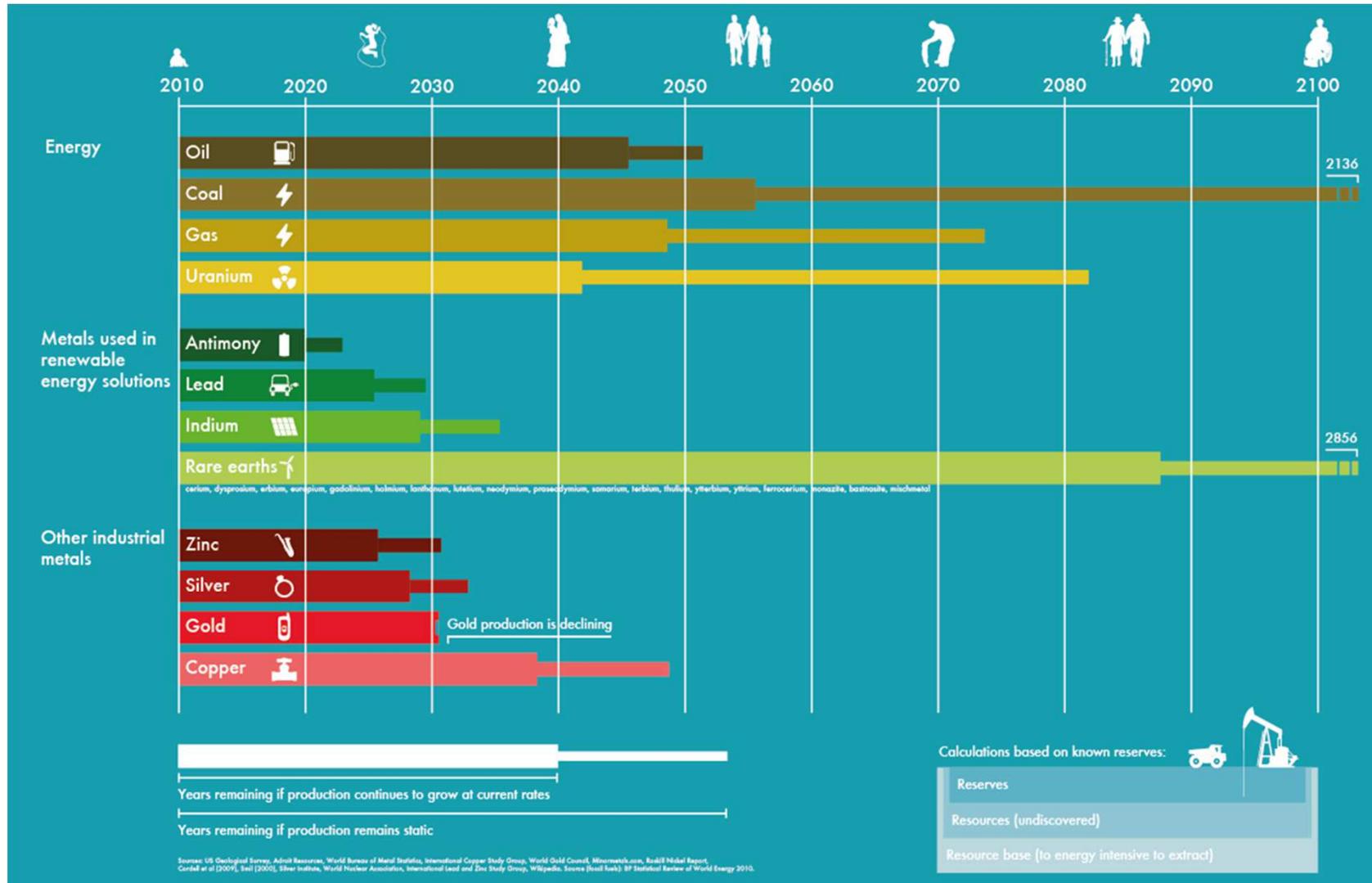
# La fonction de stock



# Le rythme d'exploitation réel

- N'est pas constant
- AUGMENTE en général (la « croissance »)
- Diminue la plupart du temps, car
  - C'est de plus en plus difficile à extraire
  - Exploitation des sources les plus productives au début
    - Épuisement des meilleures sources au début
    - Accroissement des coûts au fur et à mesure de l'épuisement des sources

# Le rythme d'exploitation – état des lieux



The image features a central globe of the Earth, showing continents and oceans, surrounded by a complex network of glowing blue lines that resemble energy fields or magnetic field lines. The background is a dark blue gradient. The text is overlaid on this background.

# **L'énergie**

**La transformation physique du monde**

# Les types d'énergies

Origine fondamentale	Origine première	Type	Forme utile
<b>Propriétés nucléaires</b>	Rayonnement solaire (lumière et chaleur)	Rayonnement	Énergie solaire
		Cinétique	Énergie éolienne, houlomotrice, hydraulique
		Thermique	Énergie solaire thermique
		Chimique	Photosynthèse, énergies carbonées (charbon, pétrole, gaz, etc.)
	Propriétés des matériaux	Nucléaire	Énergie de la fission ou de la fusion (uranium, deutérium, tritium, thorium, etc.)
		Thermique	Énergie géothermique
<b>Propriétés des masses</b>	Influence des astres	Gravitationnelle	Énergie marémotrice, potentielle, géothermie

D'après Hermann (2006)

# Quelques caractéristiques des types d'énergies

- Les « sources » d'énergie ne sont pas « égales »
- Réelles ... ou fictives
  - L'hydrogène n'est pas une énergie
- Finies vs « infinies »
- Stockables ... ou pas
- Primaires vs secondaires – électricité
- Effets secondaires sur la santé, l'environnement
- Concentration volumique (J/m<sup>3</sup>)
- Concentration massique (J/kg)
- Mobilité – on ne transporte pas une centrale nucléaire
- La disponibilité – le pilotage
- La puissance

Voir Court (2016)

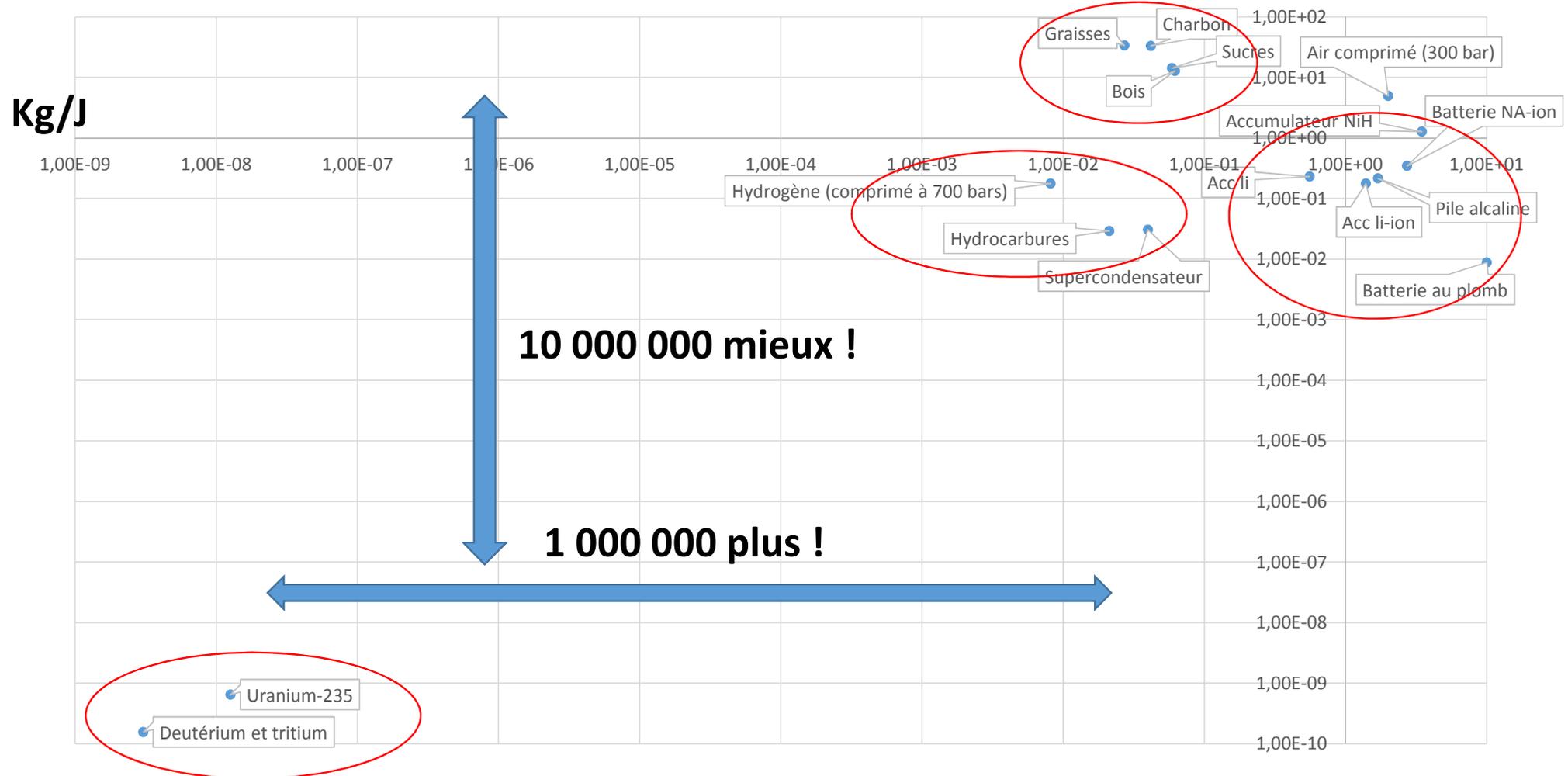
# Energies primaires et secondaires

- **Il faut de l'énergie pour extraire des énergies primaires**
  - Fossiles
  - Rayonnement solaire
  - Cinétique – éoliennes
- **Il faut de l'énergie primaire pour fabriquer des énergies secondaires (et tertiaires)**
  - Electricité
  - Hydrogène
  - Calorifique – pompe à chaleur (tertiaire)
  - Question du rendement secondaire sur primaire

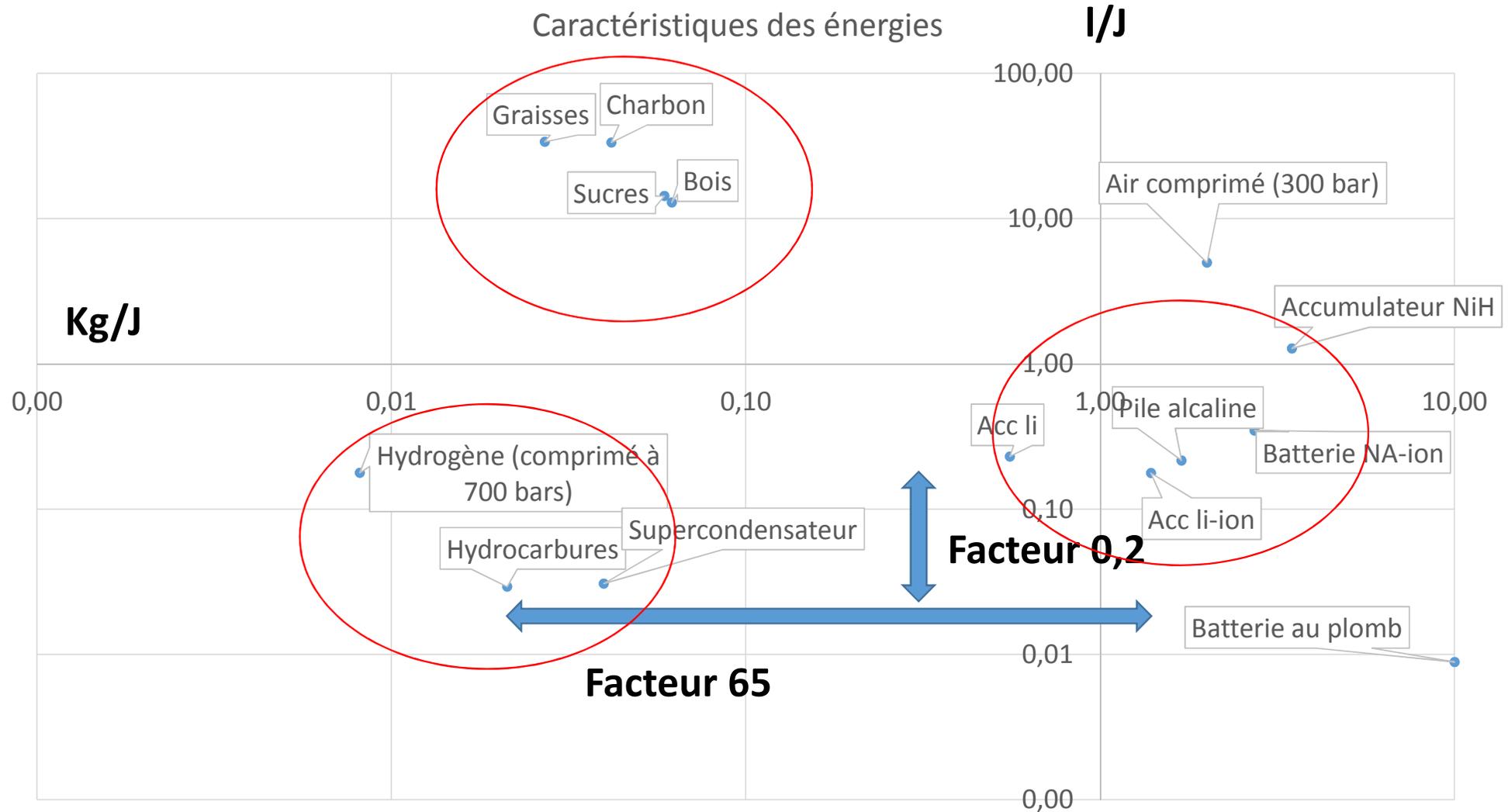
# Energies primaires et secondaires

Caractéristiques des énergies

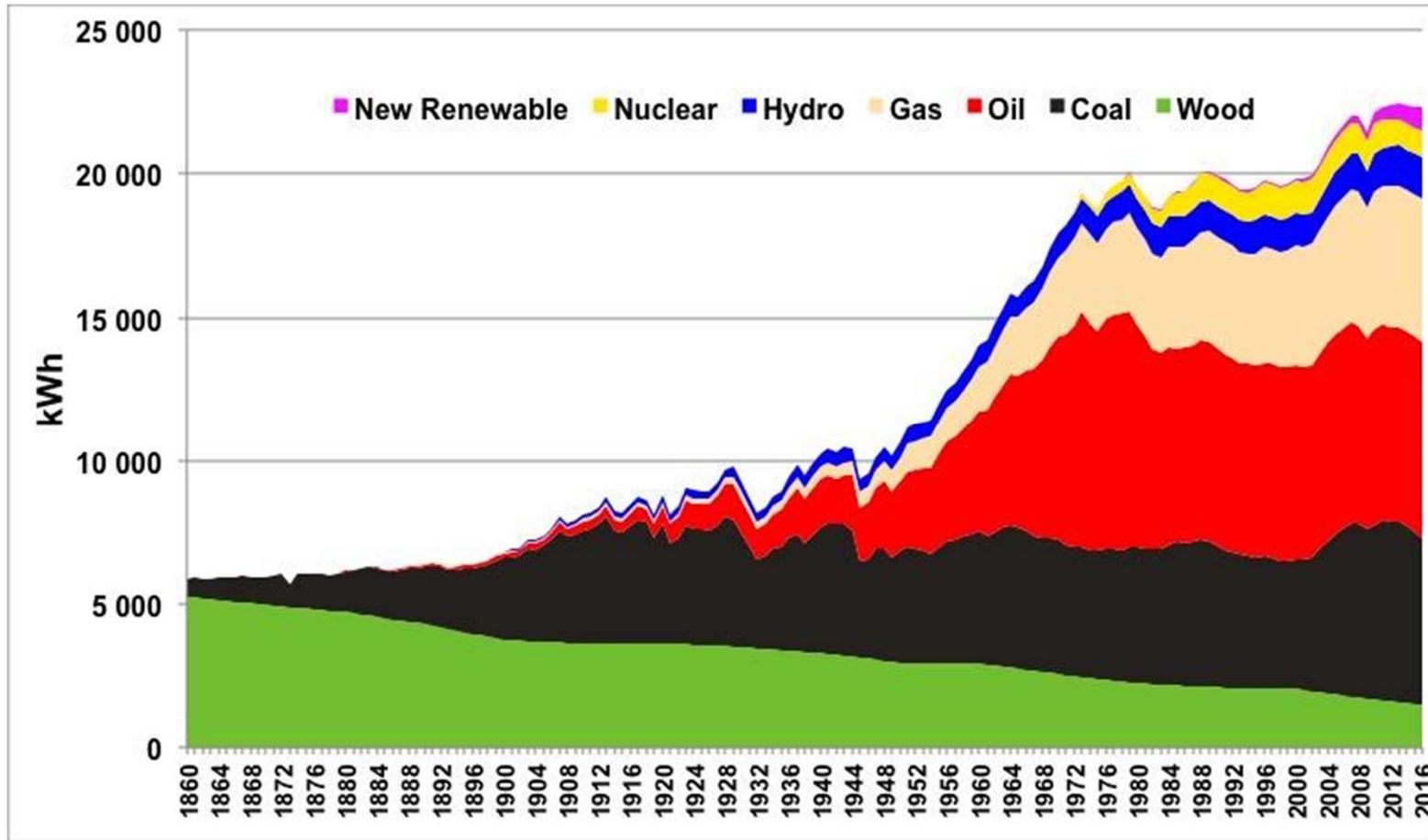
I/J



# Energies primaires et secondaires

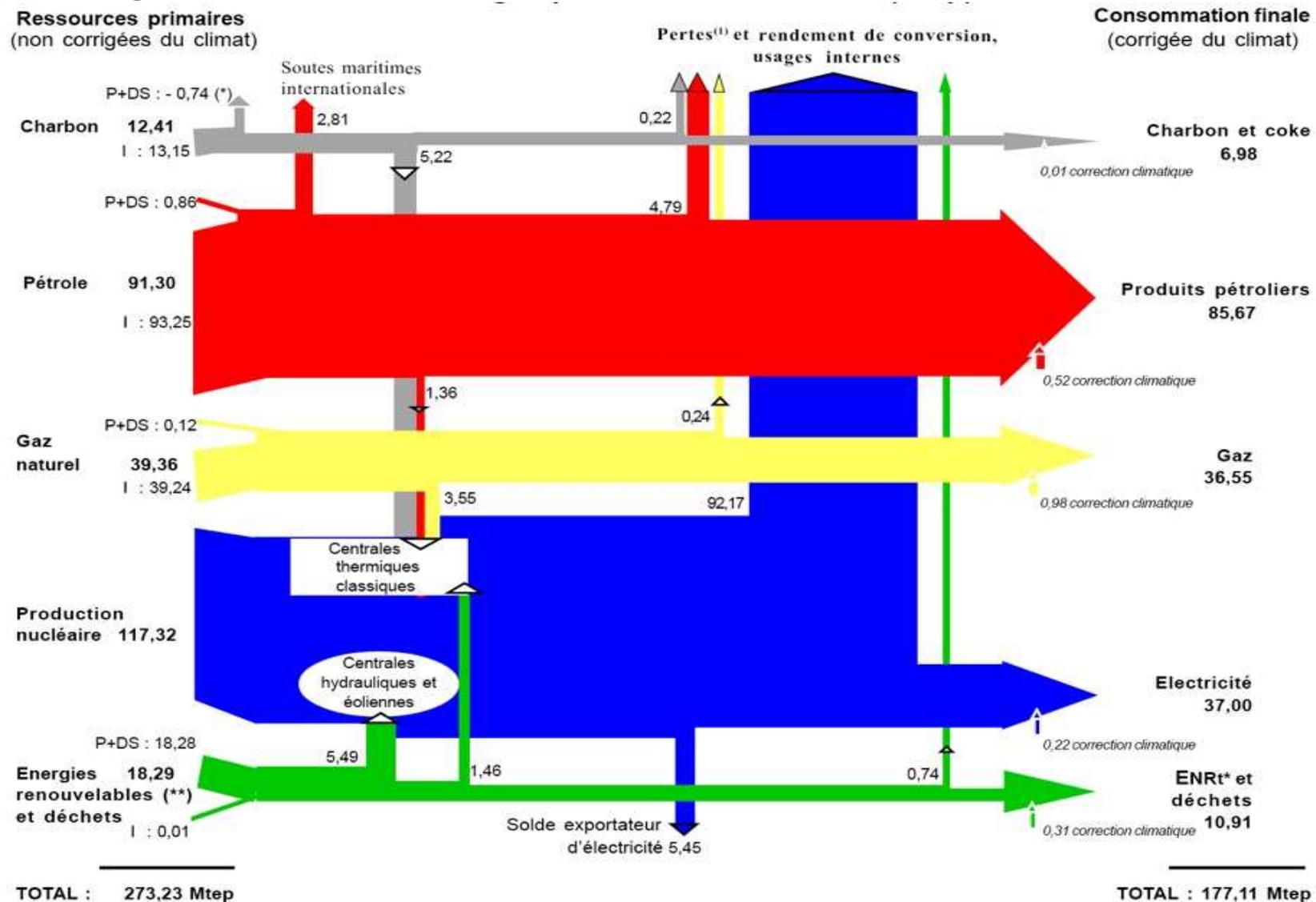


# Les énergies primaires aujourd'hui



+80% fossile

# Energies primaires et secondaires - France



# Les problèmes des renouvelables

## Les problèmes liés à la construction et à l'entretien

- Pétrolisation
- Bouclage partiel

## Les problèmes liés à l'exploitation

- Intermittence
- Stockage

## Les problèmes liés à l'usage

- Uniquement alimentation électrique – mobilité ?
- TRE généralement bas
- Facteur d'échelle

# Les flux et les volumes

Encore des problèmes de robinets !

# Le Taux de Retour énergétique (TRE – EROEI)

En 1900



1 baril investi

100 barils  
extraits

TRE = 100:1

Aujourd'hui



1 baril investi

+/- 10 barils  
extraits

TRE = 10:1

# Le Taux de Retour énergétique (TRE – EROEI)

## Quelques valeurs Adapté de Court (2016 : 121)

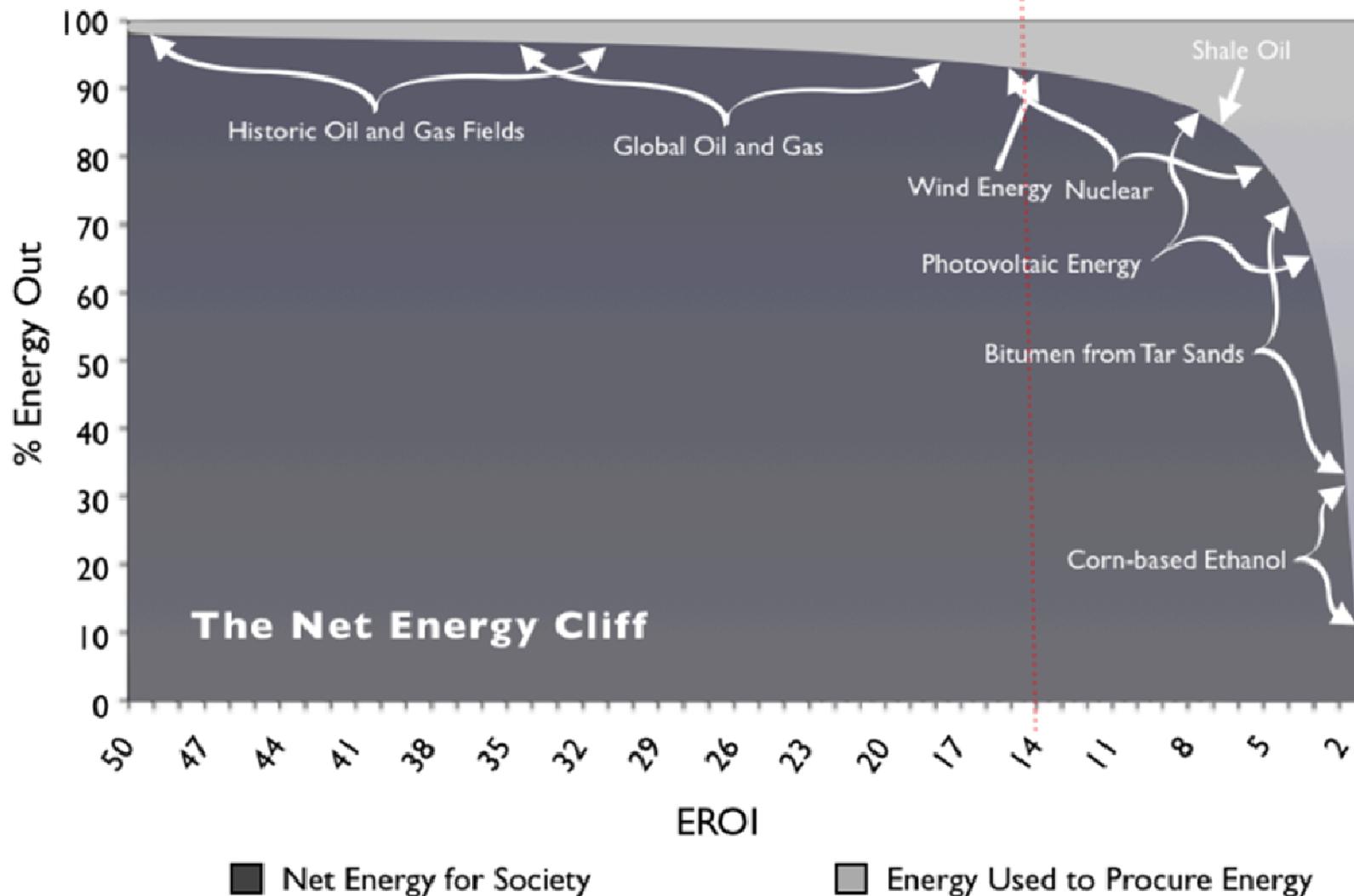
Ressource énergétique	TRE*
<i>Renouvelables</i>	
Hydroélectricité sans tampon	50
Hydroélectricité avec tampon**	35
Éolien sans tampon	20 à 16
Éolien avec tampon**	4
Électricité géothermique	25
Electricité houlomotrice / marémotrice	15
Photovoltaïque sans tampon	4 à 12
Photovoltaïque avec tampon	2,5

\* Les TRE supérieurs à 5 : 1 sont arrondis.

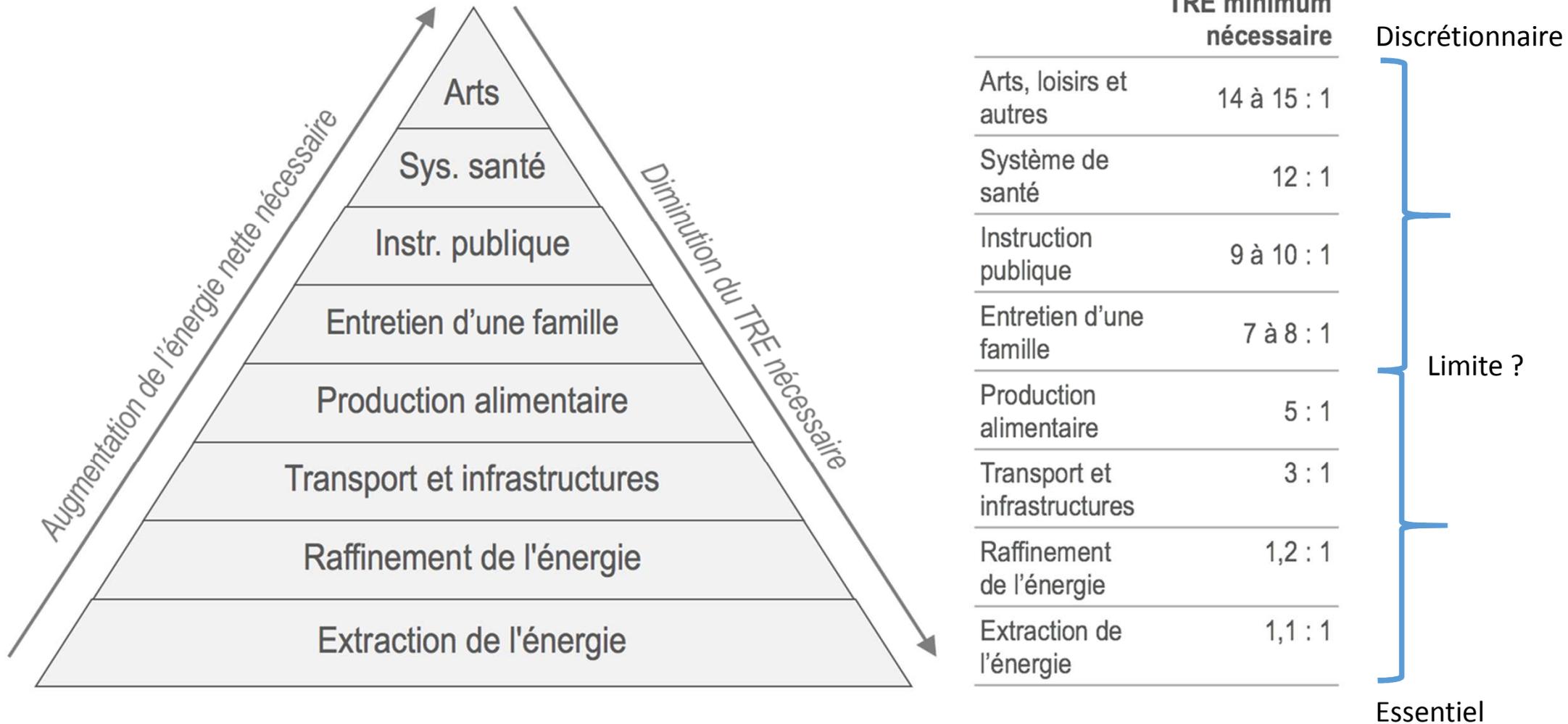
\*\* Tampon : indique le TRE du système en prenant en compte l'énergie nécessaire pour assurer les mêmes prestations qu'un système conventionnel, c'est-à-dire sans intermittence. Nécessite des infrastructures de stockage et l'adaptation du réseau, voire sa reconstruction. D'où une diminution significative du TRE.

Ressource énergétique	TRE*
<i>Concentrateurs d'énergie solaire</i>	
Panneaux paraboliques sans tampon	19
Panneaux paraboliques avec tampon**	9
Installation de Fresnel sans tampon	17
Installation de Fresnel avec tampon**	8
Tour solaire	20
<i>Biomasse (stock fourrager)</i>	
Éthanol (canne à sucre)	4 - 8
Éthanol (maïs ou blé)	0,7 à 1,6
Éthanol (bois ou paille)	2 à 3,3
Éthanol (algues)	0,3 à 0,4
Biodiesel (soja ou tournesol)	0,6 à 5

# Le Taux de Retour énergétique (TRE – EROEI)

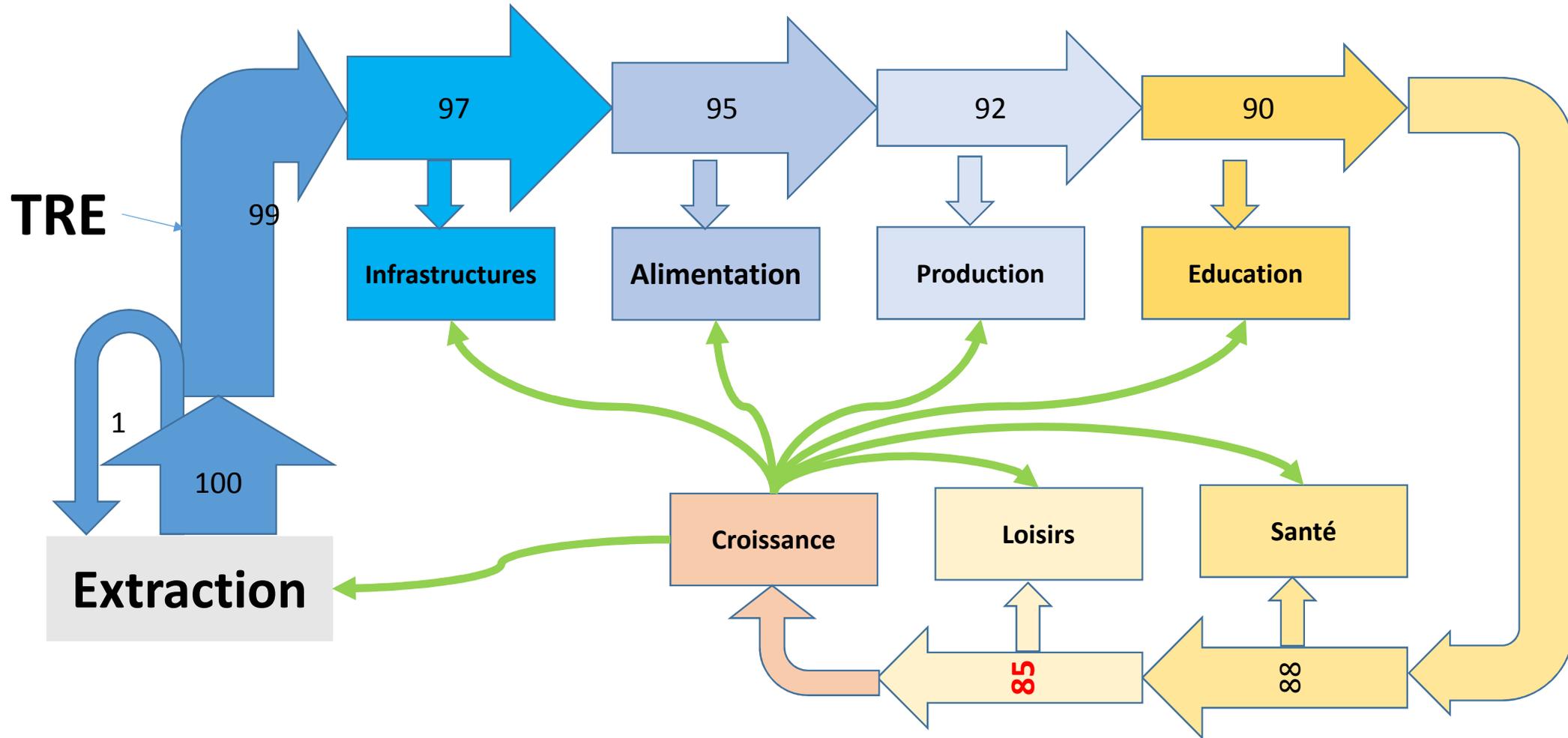


# Pyramide de Maslow – Besoins énergétiques

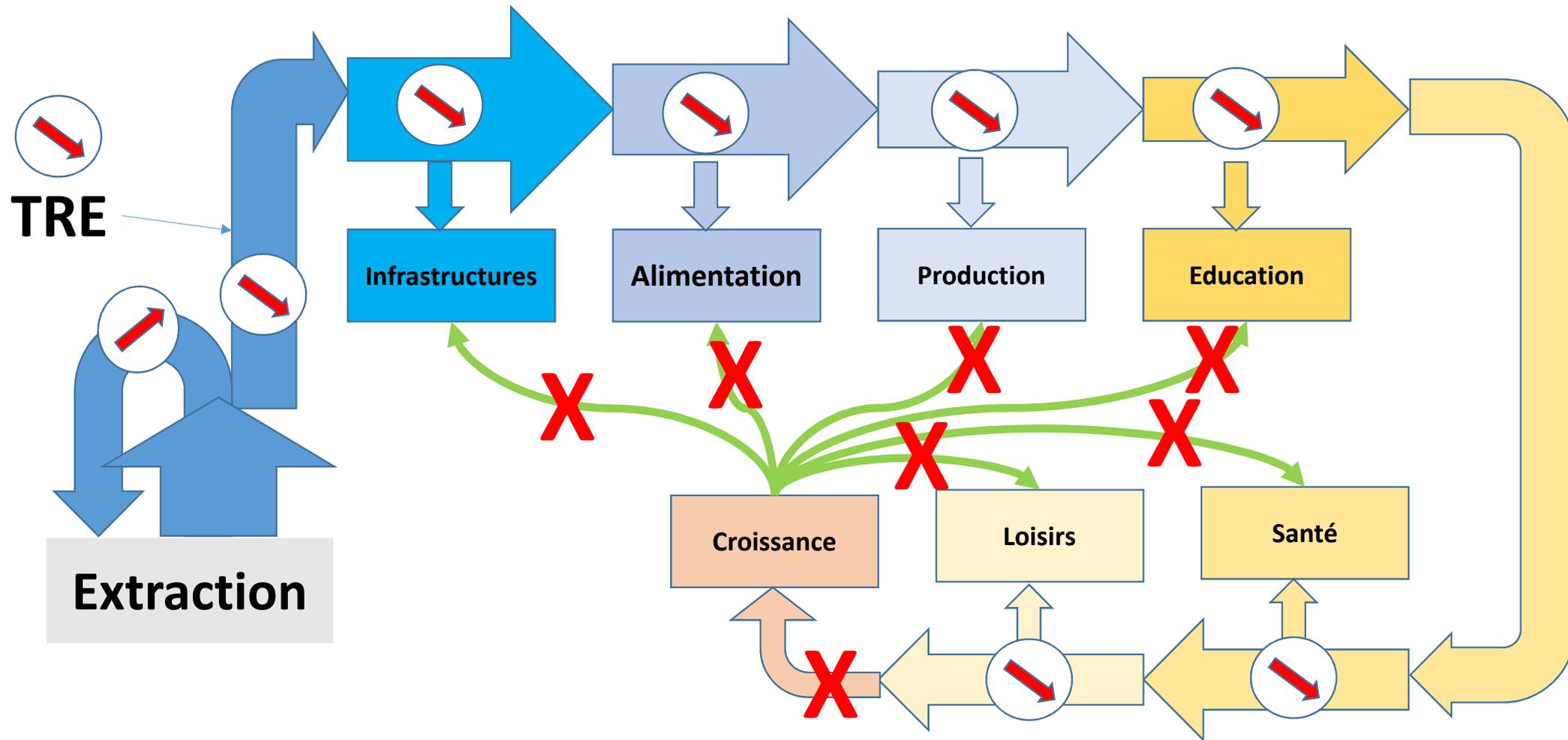


D'après Lambert et al. (2014 : 154) et Hall (2017 : 155-155) et Tremblay (2013) – Attention, pas de méthodologie harmonisée à ce jour

# Le Taux de Retour énergétique (TRE – EROEI)



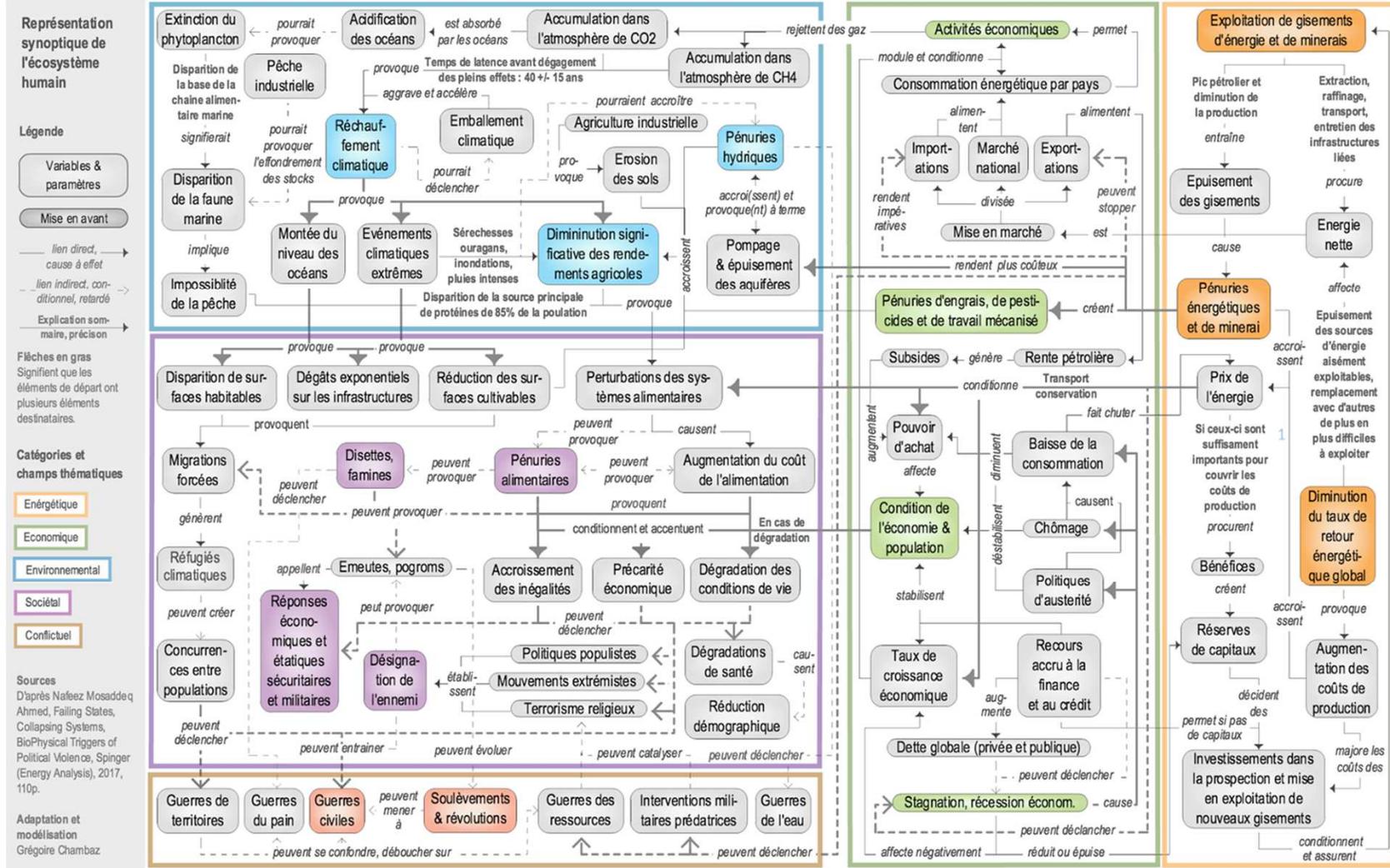
# L'impact de la baisse du TRE



# Les couplages systémiques

C'est complexe à modéliser, mais pas à comprendre

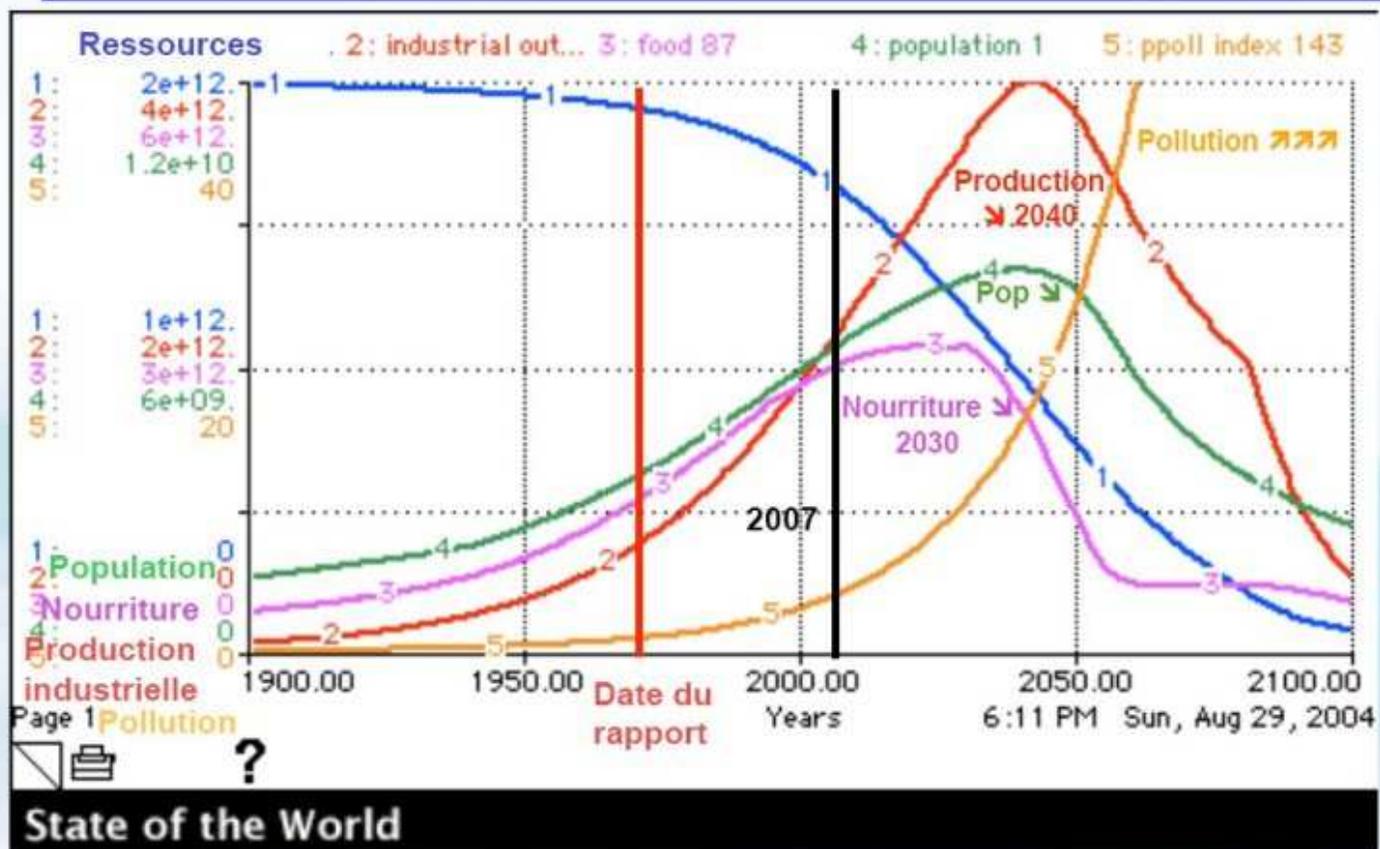
# L'écosystème humain



Chambaz (2017b)

# Le modèle World3 - Meadows

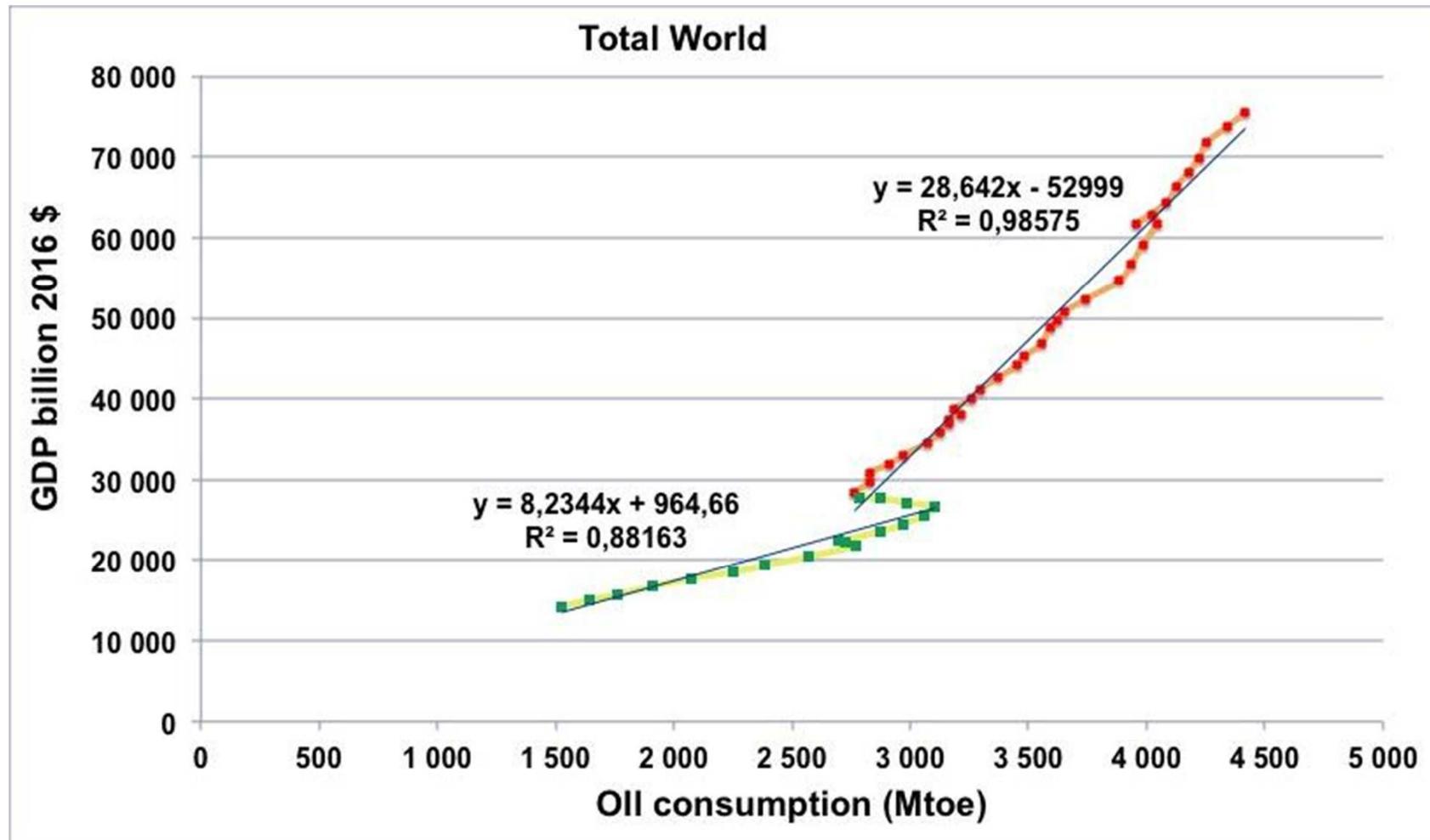
Le « message » du Club de Rome : tout va bien... avant que tout aille mal



Scénario « business as usual » du rapport Meadows (The Limits To Growth, improprement traduit en Français par « halte à la croissance ? »)

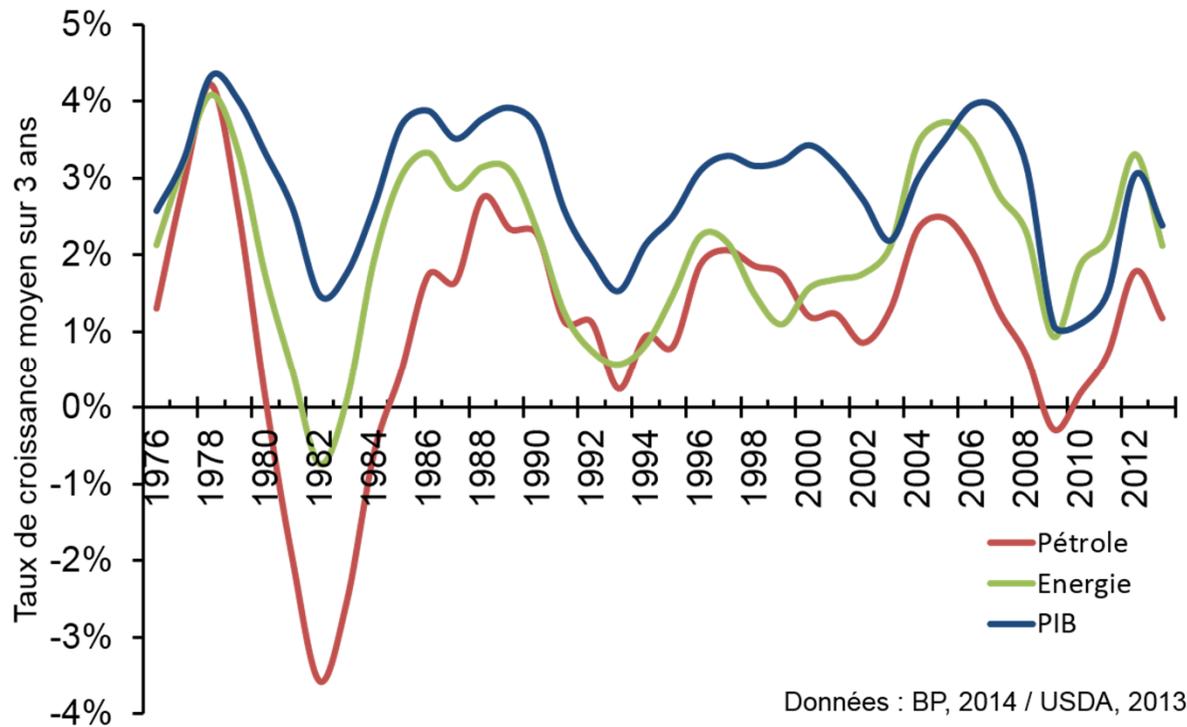
# L'économie est accro au pétrole et à l'énergie

Corrélation n'est pas causalité



# Couplage énergie PIB (dérivée = croissance)

Corrélation n'est pas causalité



Tverberg (2014), modifié par Servigne et Stevens (2015)

# La complexité

## Définitions

- Sociétés : organisations qui résolvent des problèmes
- Durabilité : capacité à résoudre des problèmes
- Complexité : accroissement en :
  - hiérarchie, spécialisation, contrôle, intégration
  - Exemple : bureaucratie grandissante (en taille et en fonctions)
- Effondrement : réduction rapide de complexité

## Résolution de problèmes

- Les problèmes d'un système sont résolus par un système plus complexe (théorie du contrôle)
- Conséquence : Tendance irrémédiable à se complexifier dans le temps (pour résoudre des problèmes), comme les problèmes se complexifient également

## Apports majeurs de Tainter

- La résolution de problèmes est une fonction économique
- Cette dépendance économique est liée à l'exploitation à des "subsides énergétiques", sous la forme de richesse, de ressources transformées ou non transformées et d'énergie

Voir Tainter (1988)

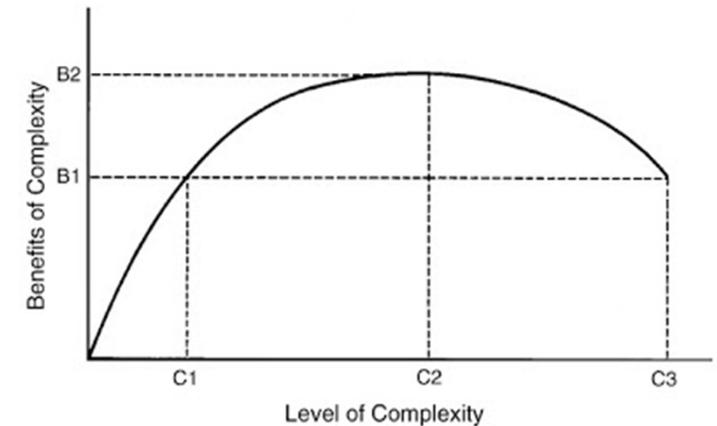
# L'effondrement dû à la complexité

**Fonction économique : implique des rendements décroissants**

- Rendements baissent pour investissement identique jusqu'à ce qu'ils deviennent négatifs

**Problèmes fondamentaux**

- Inertie : pas facile de décomplexifier / resimplifier
- Les sociétés incapables de s'y adapter s'effondrent, comme celles qui n'ont pas assez de ressources
- En d'autres termes, les sociétés subissent une dégradation de leur TRE moyen. L'énergie nette à leur disposition diminue en conséquence. Cette diminution suit la trajectoire de la falaise énergétique.



# L'équation de Kaya – un couplage fort

Réduire le  
niveau de vie

Améliorer la  
productivité de  
l'énergie

Décarboner

$$- \quad CO_2 = POP * \frac{PIB}{POP} * \frac{E}{PIB} * \frac{CO_2}{E}$$

- La population augmente de 1,2% par an → en 15 ans x 1,2
- Diviser le CO2 par 4, alors que la population est multipliée par 1,2 revient à diviser l'ensemble des autres facteurs par 5 !

# L'équation de Kaya – un couplage fort

- $\frac{PIB}{POP}$  augmente de 2,3 % par an (x 1,4 en 15 ans)
- $\frac{E}{PIB}$  diminue de 1,1 % par an (x 0,85 en 15 ans)
- $\frac{CO_2}{E}$  augmente de 0,2% par an (après avoir diminué dans le passé) ( x 1,35 en 15 ans)
- La trajectoire nous amène à x 1,6.

# Conclusion

Du pain sur la planche pour ceux qui acceptent le constat.

Ne pas croire au Père Noël.

# Les mythes et le rêve techniciste

- **Il n'existe pas d'énergie libre et donc pas de complot mondial des industries pétrolières visant à en empêcher l'utilisation.**
- **L'eau n'est pas combustible et n'a pas de mémoire 😊.**
- **La téléportation quantique n'est pas une source d'énergie et ne permet pas d'échapper aux effets du changement climatique**
- **Internet consomme près de 12% de l'énergie consommée sur terre. Croissance annuelle de l'ordre de 5%.**
- **Quel est le TRE minimal pour soutenir une société exploitant des gisements sur Mars ? Pour capturer et stocker le CO2 ?**

# **Un ensemble d'éléments factuels déplaisants**

- **Le problème énergétique est une question de flux avant d'être une question de volumes.**
  - **Il ne « suffit » pas de mettre plus d'éoliennes partout**
- **La finitude des ressources impacte autant la production énergétique que la production de biens manufacturés et que l'alimentation.**
  - **Ca va taper dans tous les compartiments.**
- **Il n'existe pas de solution technologique « toutes choses égales par ailleurs » pour poursuivre la trajectoire actuelle.**
  - **Pas d'autre choix que de changer de trajectoire**

# **Construire un avenir viable**

- . Quel TRE viser ? Entre 8 et 12 ?**
- . A quoi ressemble une société basée sur ce TRE ?**
- . Quelle taille de population viser ?**