

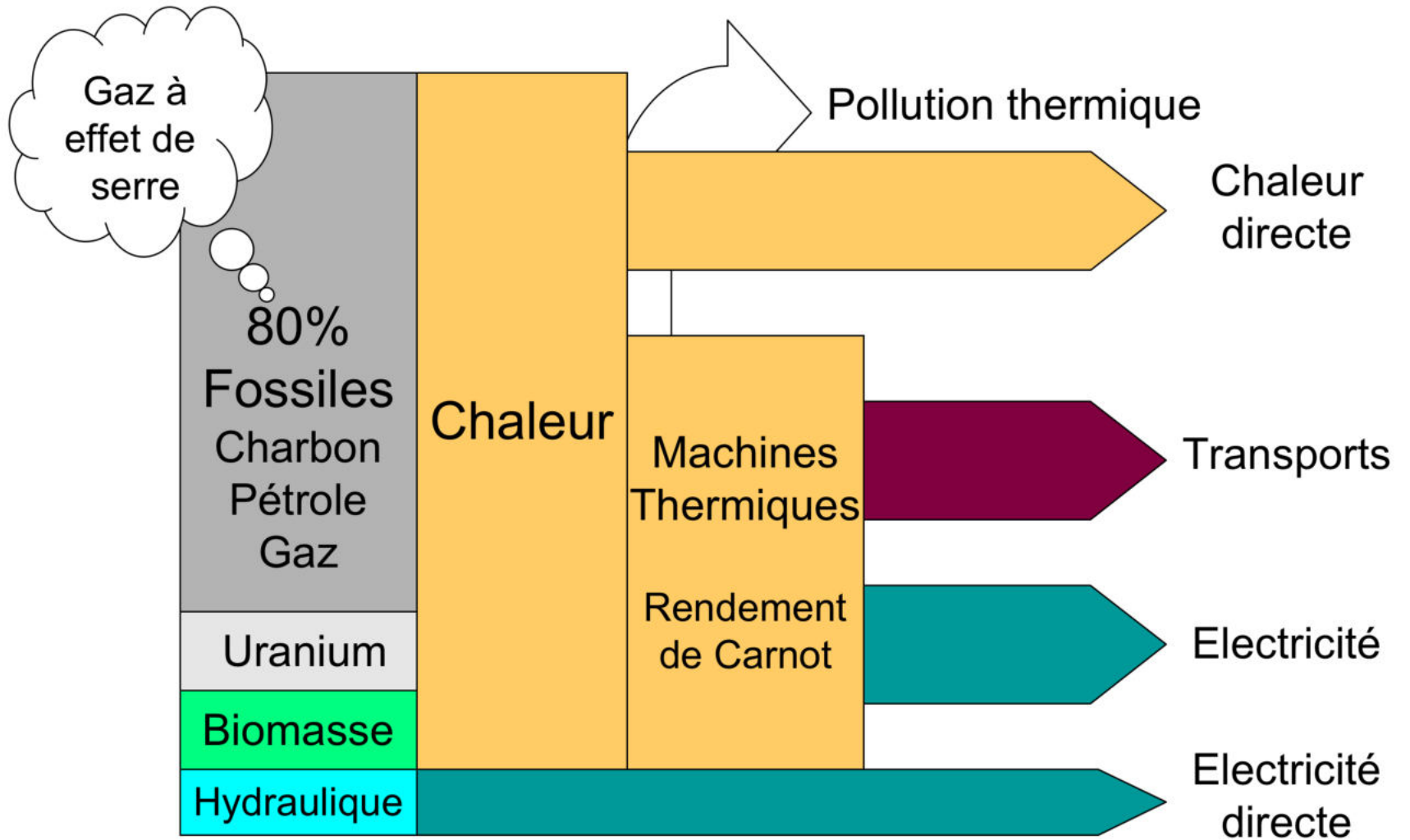
# Transition énergétique, éléments de scénariologie comparée

Jean Louis Bobin  
Université Pierre et Marie Curie  
Prospective 2100

# Sommaire

- Conjoncture en ce début de XXI<sup>e</sup> siècle
- Scénarios
  - Scénarios et modèles
  - Dans quel but et comment?
  - Alternatives écologiques

# Situation actuelle:



# Tendances lourdes

- Moindre taux d'accroissement de la population
- Urbanisation: 2010, 50%; 2050, 75%; mégaloilles.
- Croissance de la consommation d'énergie par habitant
- Croissance plus rapide de la consommation d'électricité par habitant
- Demande de motorisation individualisée pour les déplacements
- Demande d'information et de communication

# Un monde en transition

## En cours:

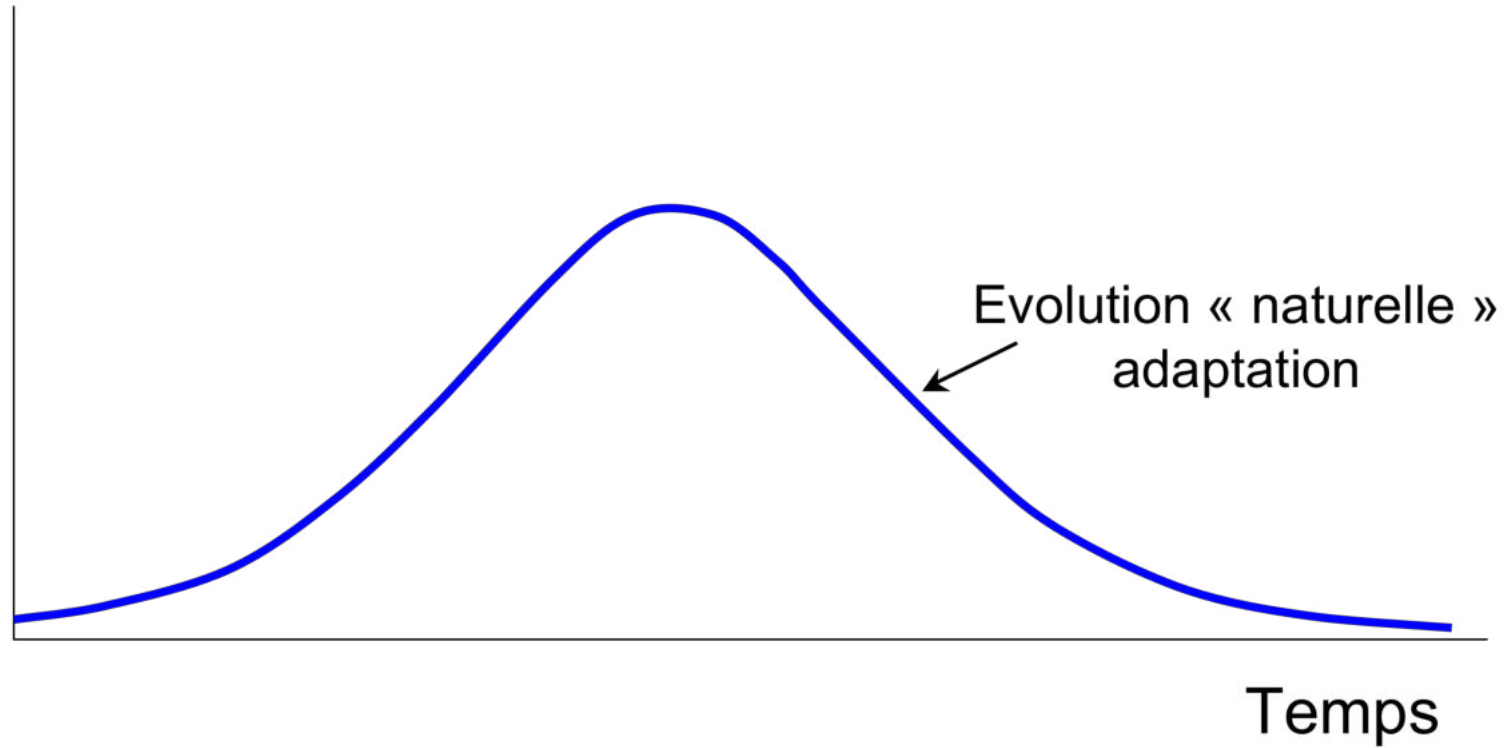
- Une grande transition démographique
- Une grande urbanisation
- Une transition du développement
- Une transition économique :
  - transferts d'emplois de l'industrie aux services
  - augmentation du coût de l'énergie
- Une globalisation économique et culturelle
- **Crises**

# Des raisons pour décréter une transition énergétique

- Objectives, la civilisation du carbone n'est pas durable:
  - Perspective d'une pénurie de ressources en combustibles fossiles (pics)
  - Emission de gaz à effet de serre:
    - > 25 milliards de tonnes de CO<sub>2</sub> par an à réduire d'un facteur 2 d'ici 2050 (4 en OCDE)
    - Menace d'un changement climatique
- Subjectives et idéologiques:
  - Soumission à la « Nature » (Terre Mère, Gaia)
  - Décroissance et risque zéro
  - Rejet (peur) du nucléaire
  - Rejet des hydrocarbures non conventionnels
- ...

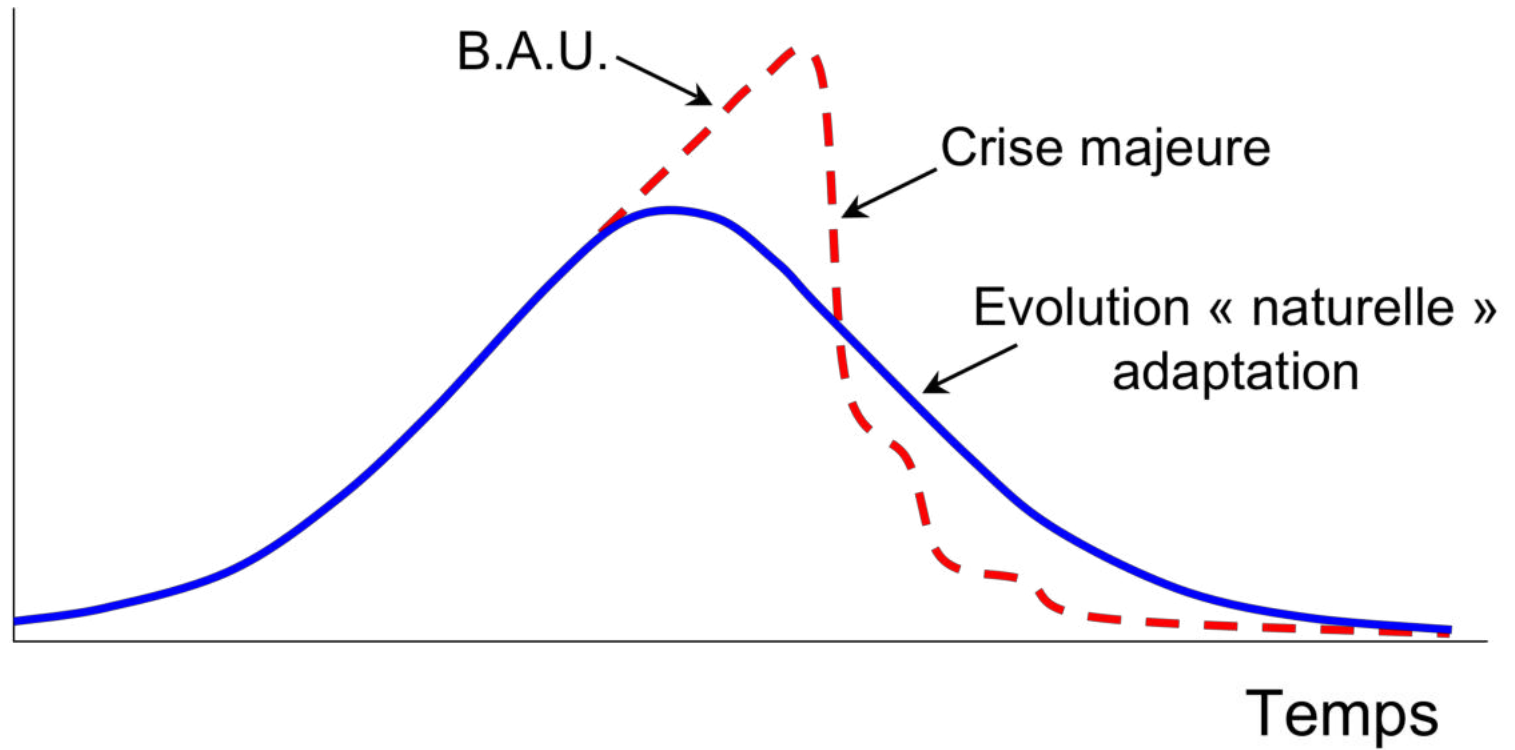
# Piquisme

Consommation



# Piquisme

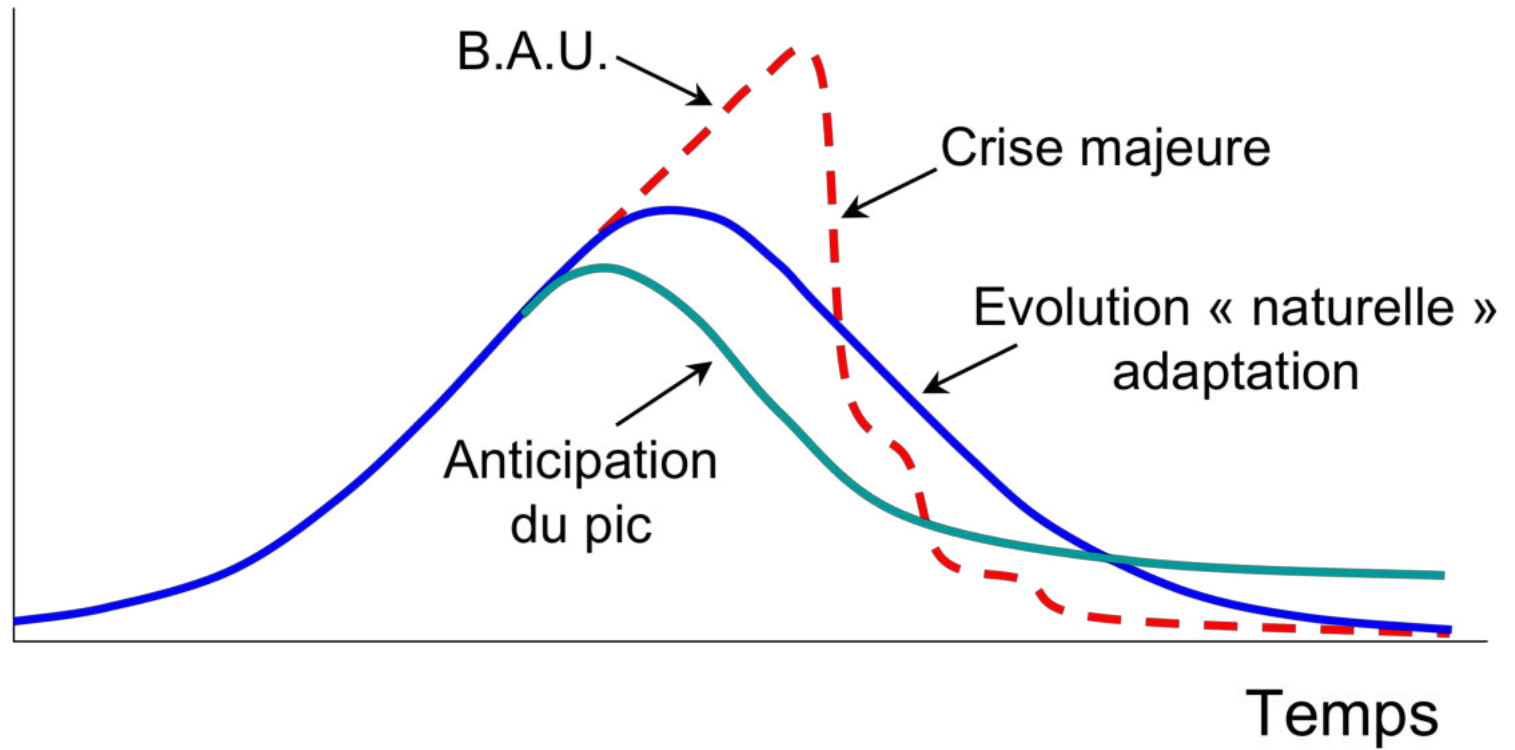
Consommation



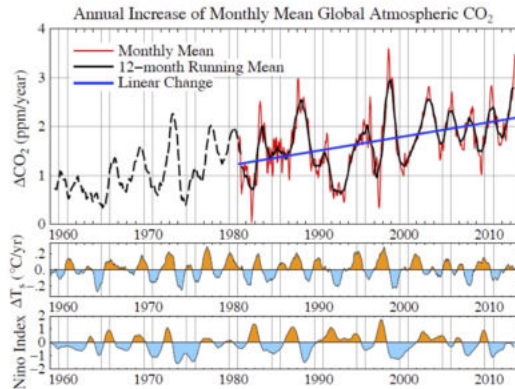


# Piquisme

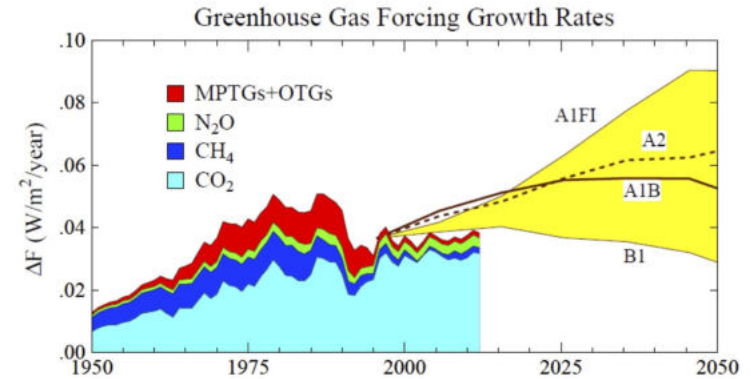
Consommation



# La contrainte climatique

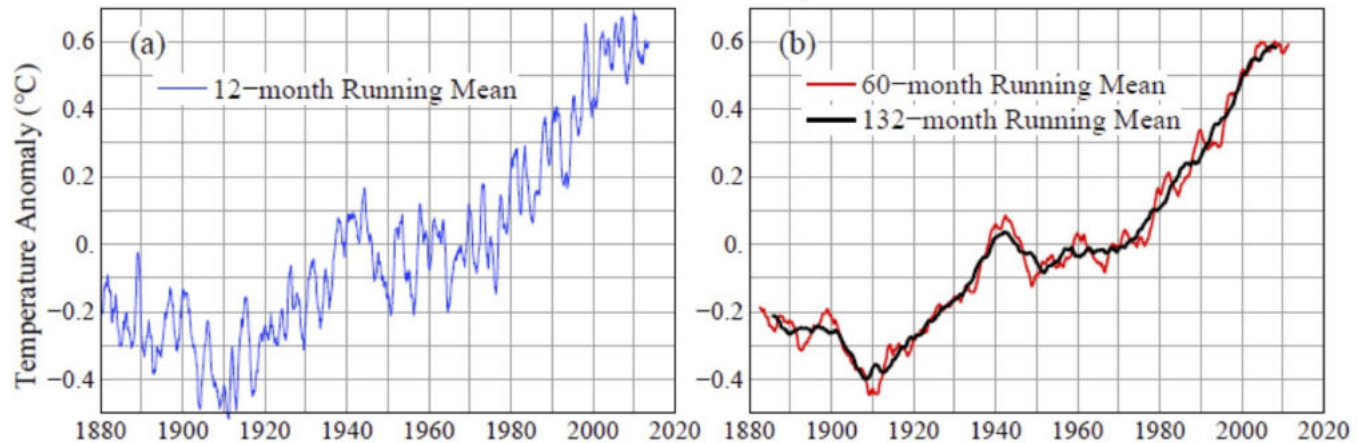


Annual increase of CO<sub>2</sub> based on data from the NOAA Earth System Research Laboratory; prior to 1981 the CO<sub>2</sub> change is based on only Mauna Loa, Hawaii. Temperature changes are 12-month running means for the globe and Niño3.4 area; Niño index uses NOAA's 1981-2010 base period.



Update of 5-year mean of the growth rate of climate forcing by well-mixed greenhouse gases; ozone and stratospheric water vapor, neither well-mixed nor well-measured, are not included.

## Global Surface Temperature



Global surface temperature relative to 1951-1980 mean for (a) 12-month running mean, and (b) 5-year and 11-year running means.

# Scénarios

- Un scénario raconte une histoire qui pourrait advenir.

*Mais :*

- Connaître la situation à un instant donné et les tendances à cet instant ne suffisent pas à déterminer l'évolution ultérieure (topologie de la queue de cheval).
- Pour écrire un scénario, il faut se donner la fin de l'histoire ou du moins lui imposer des contraintes plus ou moins fortes.
- L'inertie des systèmes énergétiques détermine partiellement l'avenir proche (25 à 50 ans).

# Transitions à scénariser

## Menaces:

- Epuisement des ressources
- Changement climatique

## Transitions induites:

- Grande transition énergétique: sobriété, décarbonisation, « déthermalisation »?
- Transition écologique (éviter les désastres écologiques) ?
- Un changement de modes de vie?

# Précisions

- Une transition ne se réduit pas à un changement de bouquet énergétique (évolution de l'offre)
- C'est aussi
  - Des évolutions de la demande
  - Des changements dans la distribution et les réseaux
  - Des changements dans l'organisation de la société
- Facteurs à ne pas oublier:
  - L'inertie et le temps
  - Le comportement des différents acteurs: états, collectivités, multinationales, ONG, lobbys, entrepreneurs...

# Historique 1: grande transition énergétique d'Occident (1770-1880)

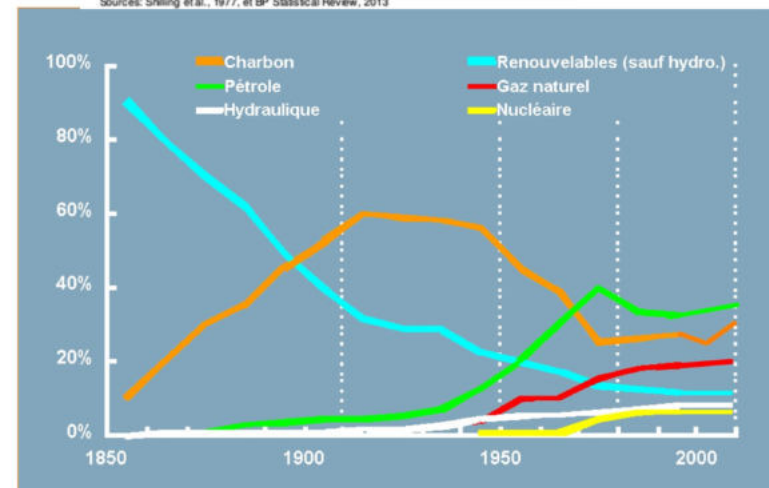
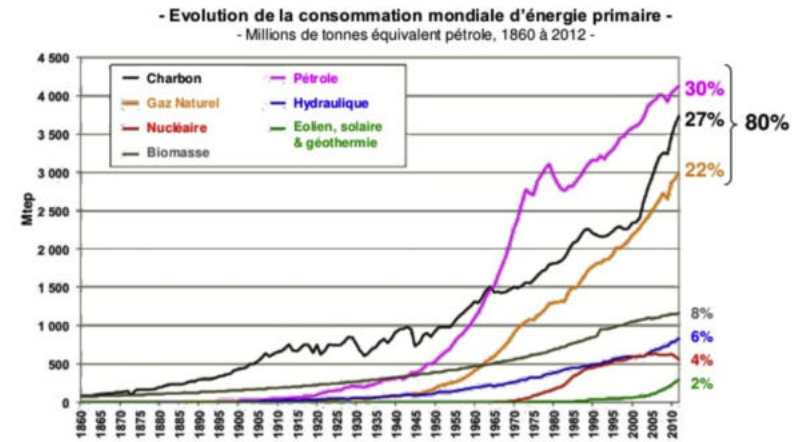
	Avant		Après	
Source d'énergie dominante	Biomasse y compris le travail animal et humain		Combustibles fossiles	
Catalyseurs		Innovation, capital et liberté d'entreprendre	Machinisme	
Société	Rurale (pénurie)		Urbaine (consommation)	
Facteur structurant	Rituels contraignants		Davantage de liberté d'entreprendre	
Principes politiques	Déclinaisons du droit divin		Davantage de démocratie représentative	
France		10 régimes politiques		

# Historique 2

« Substitution » énergétique

Consommation d'énergie primaire par source)

Parts de marché d'après P.R. Bauquis



# Scénaristes

## Donneurs d'ordres

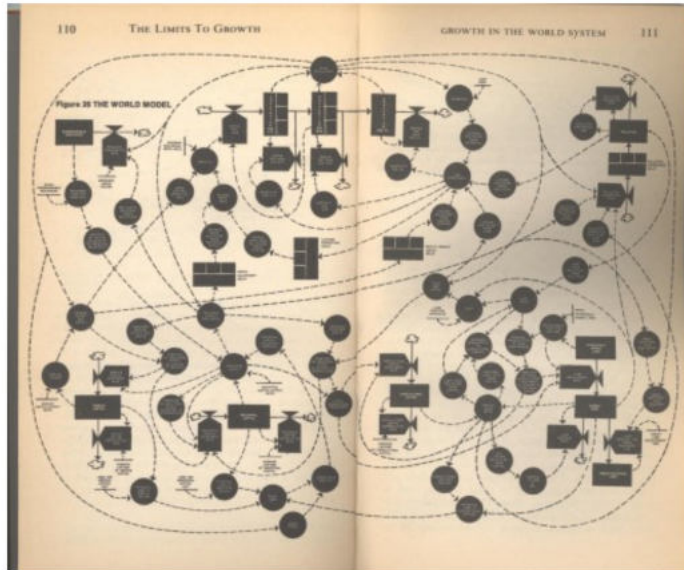
- Club de Rome
- Organisations internationales (ONU, CEE, OCDE...)
- Etats
- ONG ( $\pm$  militantes)
- Acteurs du secteur de l'énergie
- Acteurs du secteur financier
- ...

## Fournisseurs de modèles

- MIT
- IIASA (Laxenburg)
- Ecofys
- WISE
- Chercheurs (institutionnels ou non)
- ...



# Le premier modèle global : *Limits to growth* club de Rome, D. Meadows (1972)



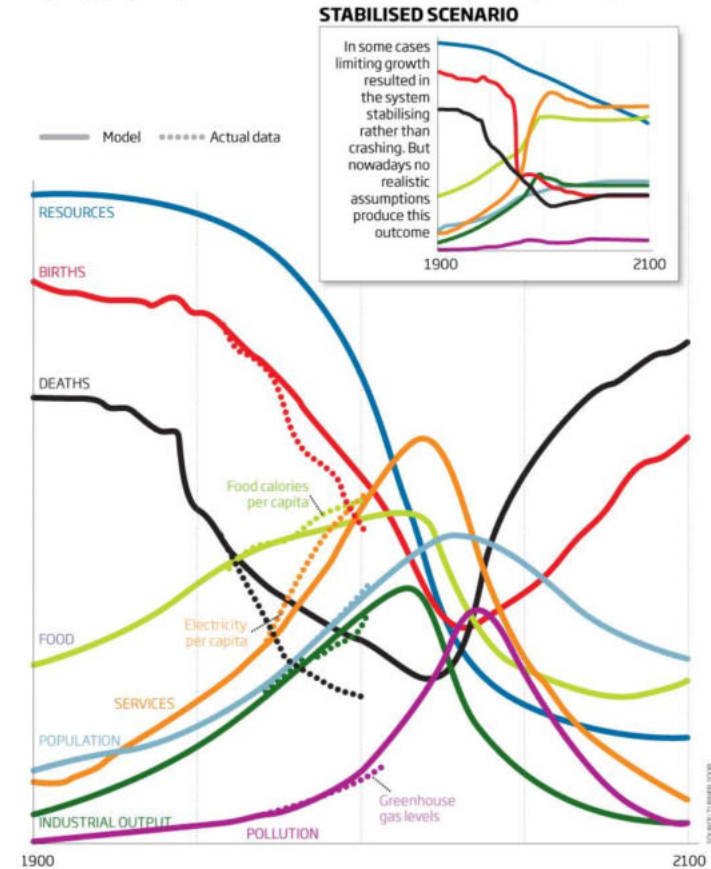
Le modèle (fermé)

Prévisions et réalité →

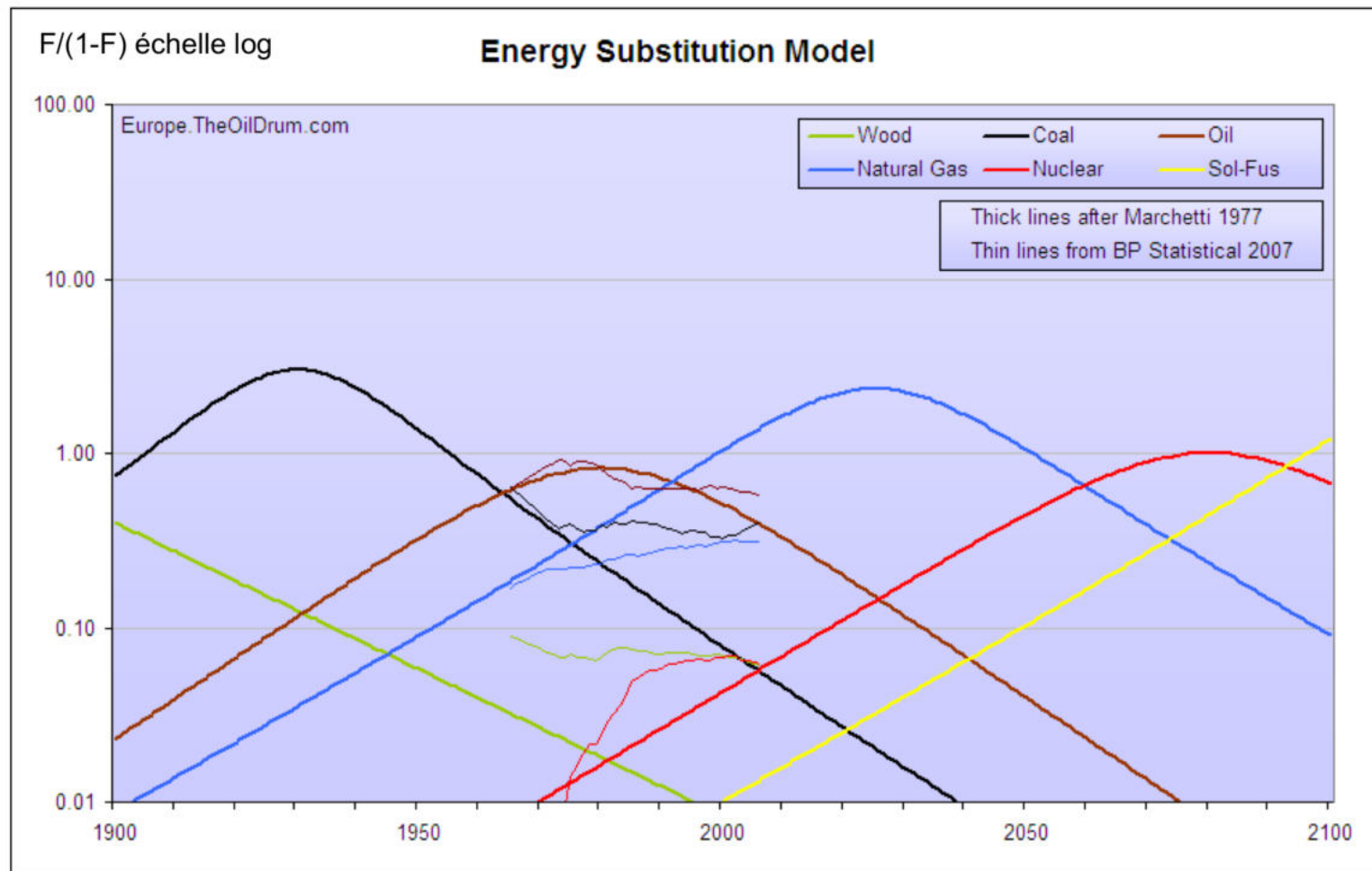
## Boom and bust

©NewScientist

In most runs of the World3 computer model, rapid growth is followed by sharp decline. So far the standard run (main graphic) corresponds well with measurements of real-world equivalents (dotted lines)



# Une modélisation par des équations logistiques couplées (Cesare Marchetti)



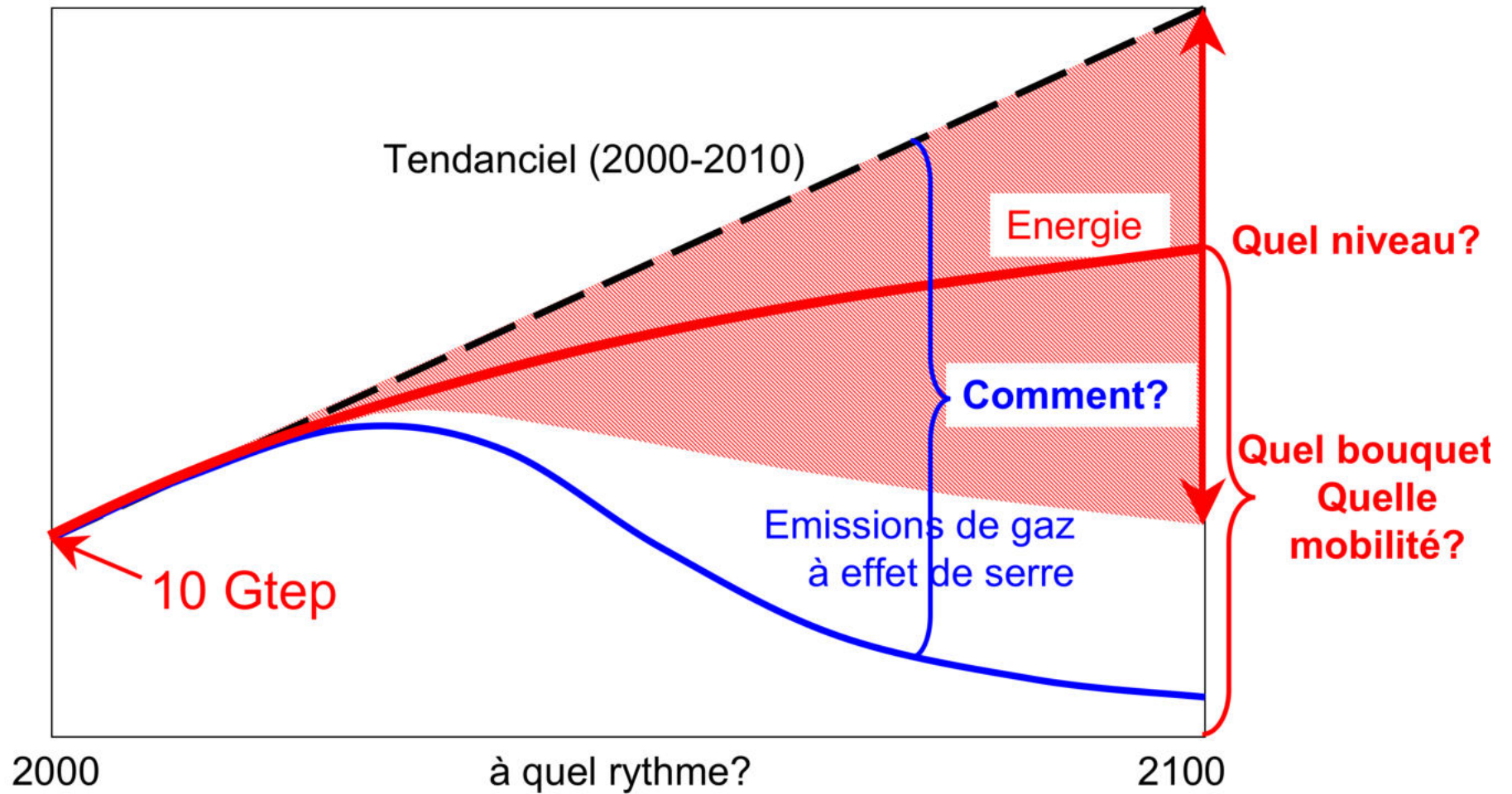
F = % de la production

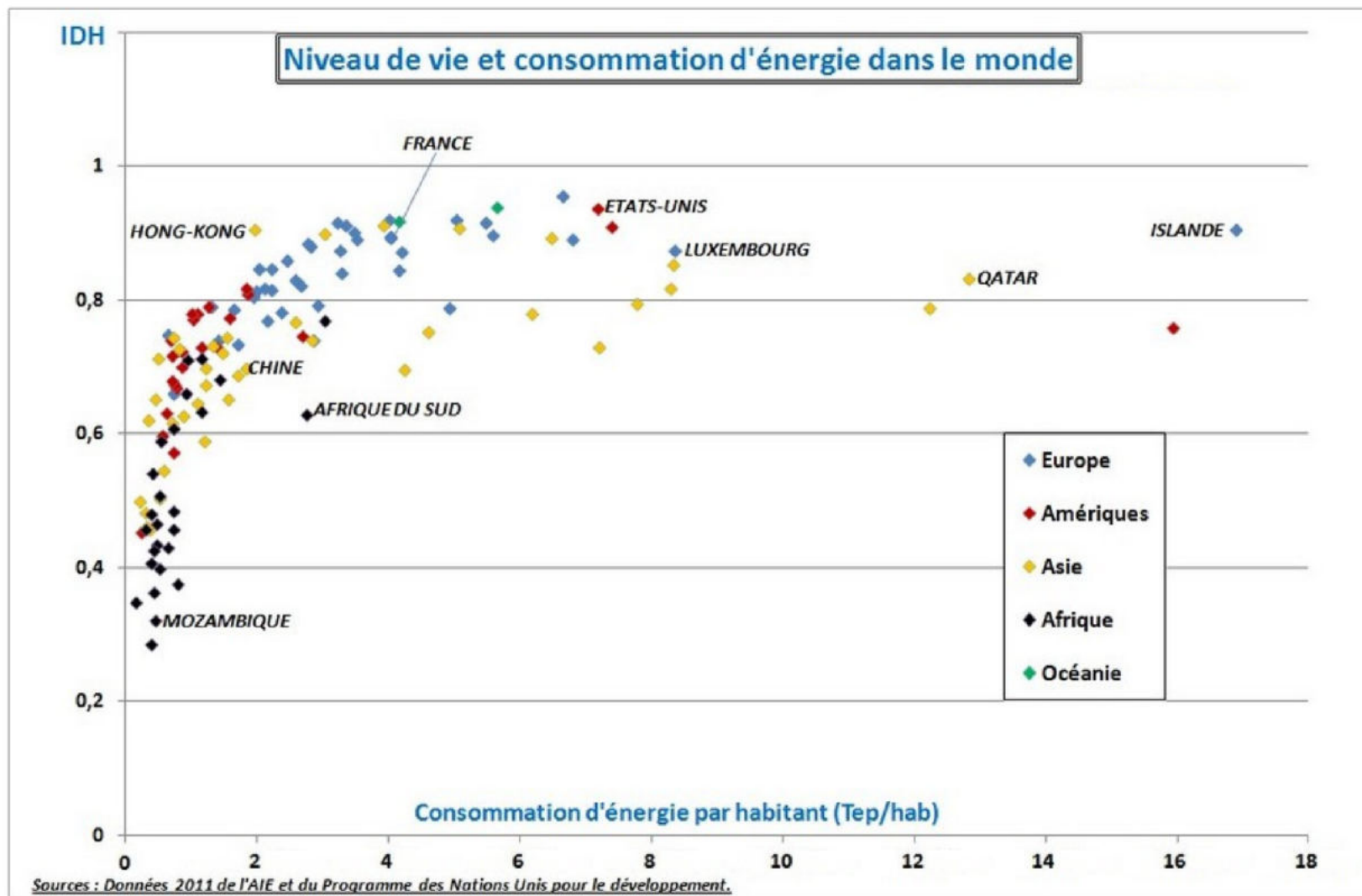
iDées

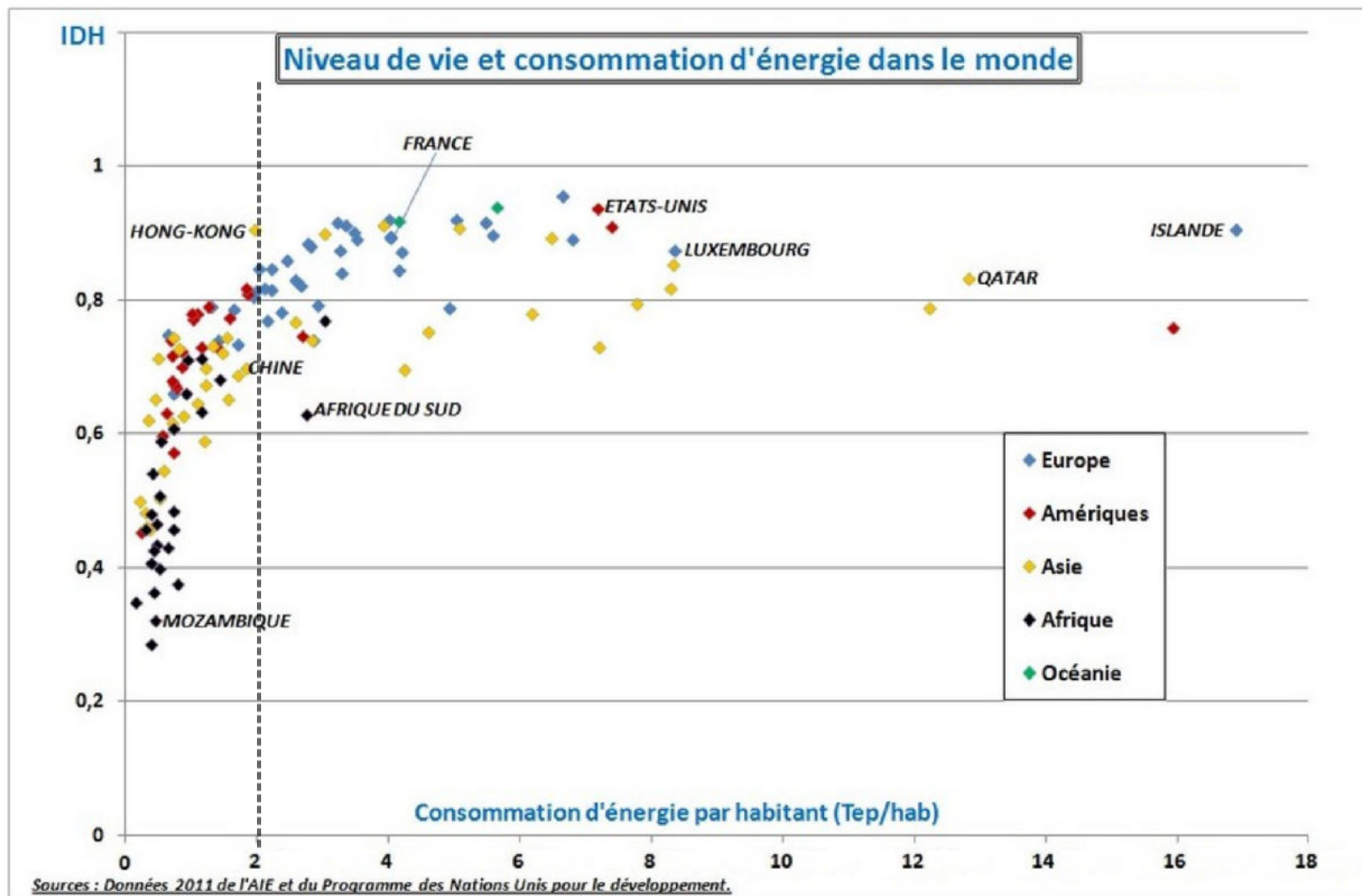
10 mars 2014

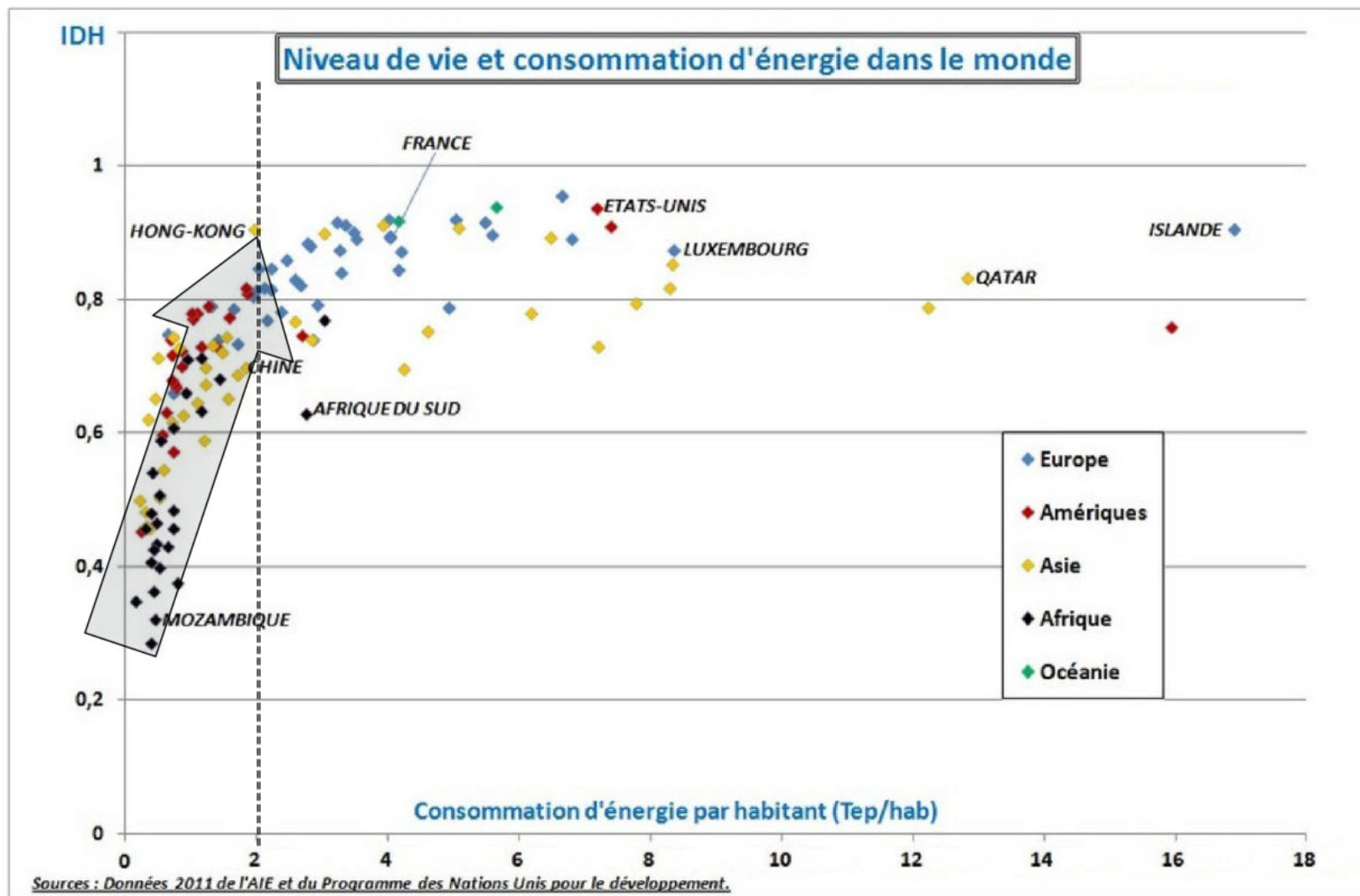
16

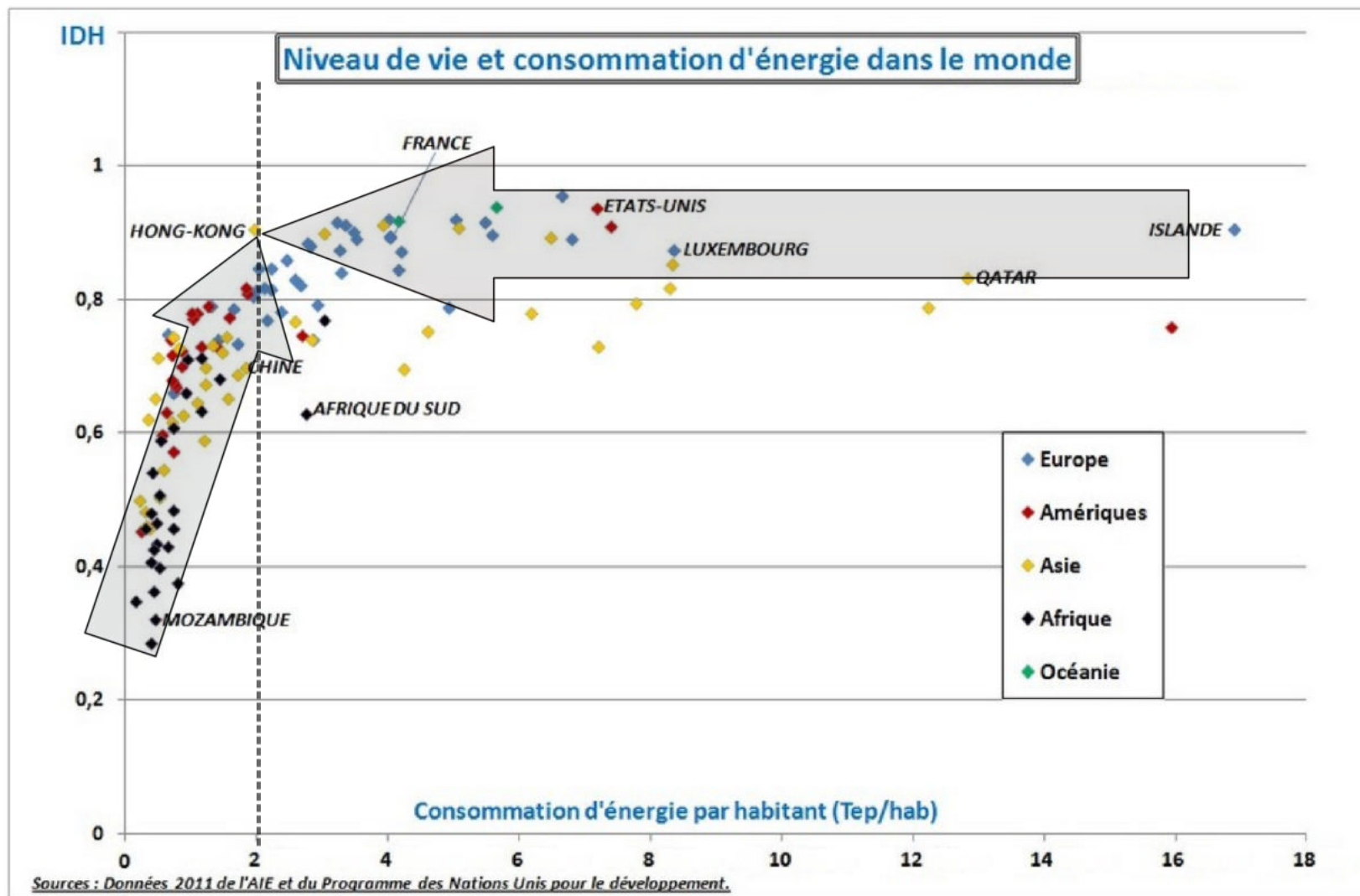
# Questions relatives à la nécessaire transition énergétique











# Objectifs de politique énergétique 1

## Consensus

- Décarbonisation du système énergétique
- Meilleure efficacité
- Adaptation de l'habitat
- Solaire thermique

## Désaccords

- Croissance de la demande
- Gaz non conventionnels
- Part de l'électricité
- Electronucléaire
- Mobilité
  
- Financements des actions à entreprendre



# Objectifs de politique énergétique 2

- 2020 Europe
- 3x20

- Consommation - 20%
- CO<sub>2</sub> - 20%
- Renouvelables +20%

Nouvelle politique européenne  
(en discussion):

CO<sub>2</sub> - 40 % en 2030  
ref. 1990

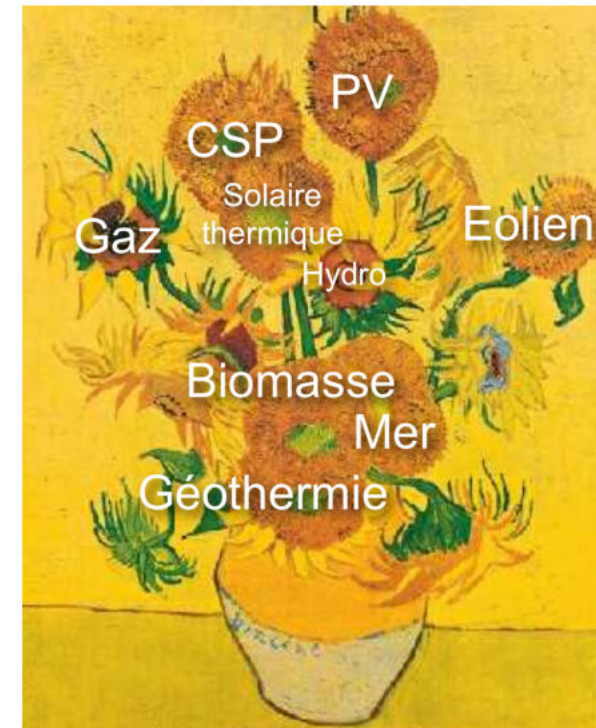
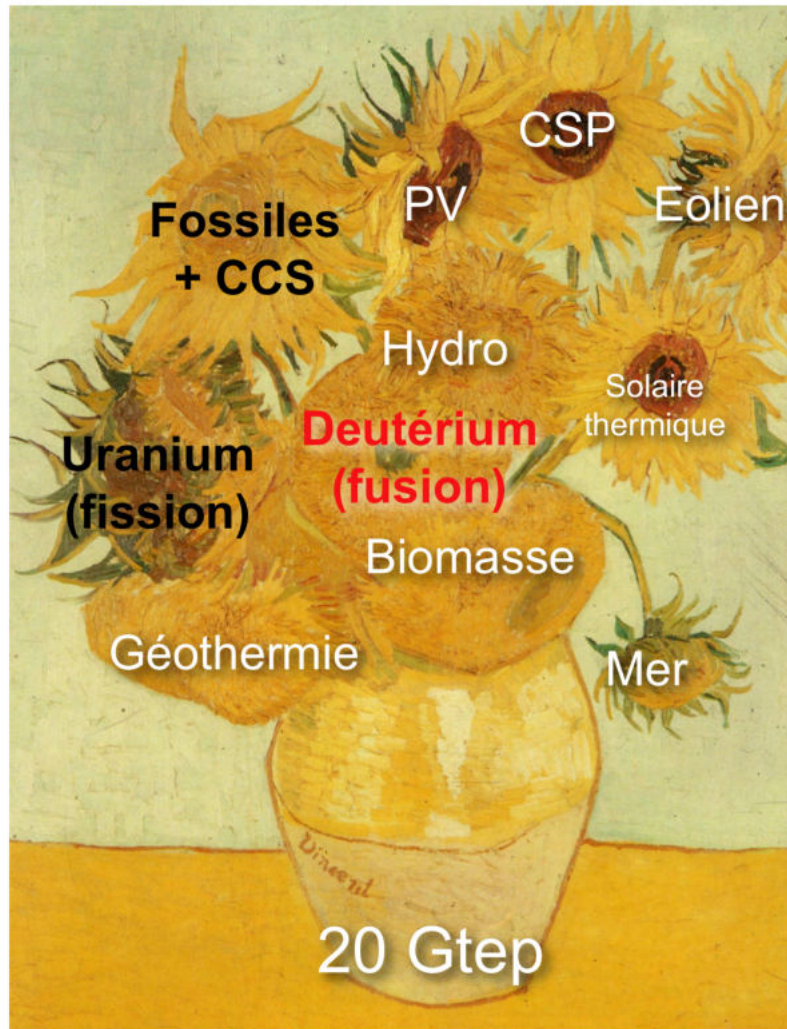
- 2050 Monde
- 3X50

- Population + 50%
- Energie par habitant + 50%
- CO<sub>2</sub> par habitant - 50%

NB les scénarios « écologiques »  
impliquent:

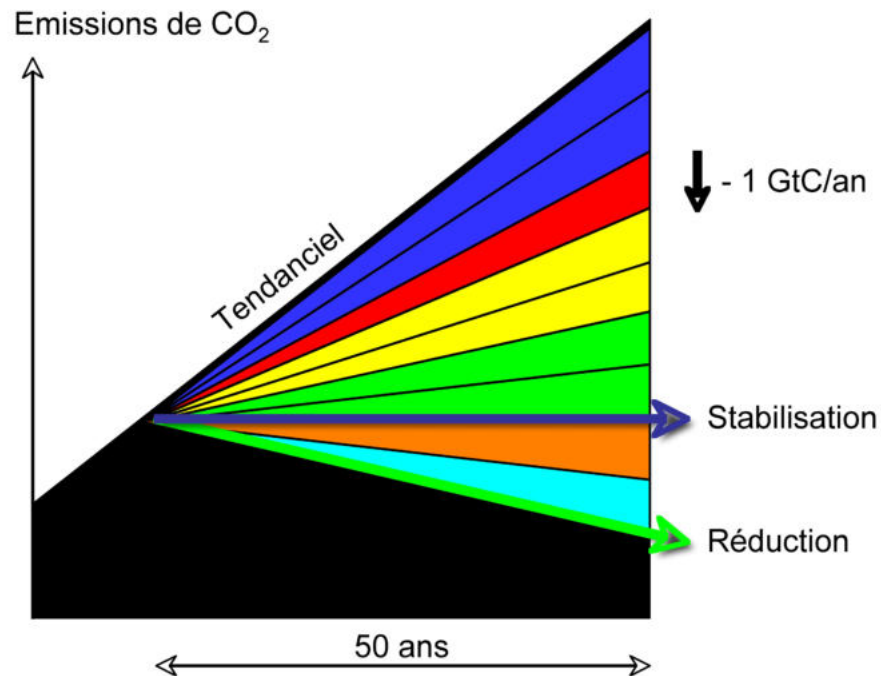
énergie par habitant - 30%

# Art floral: quel bouquet énergétique après 2050?



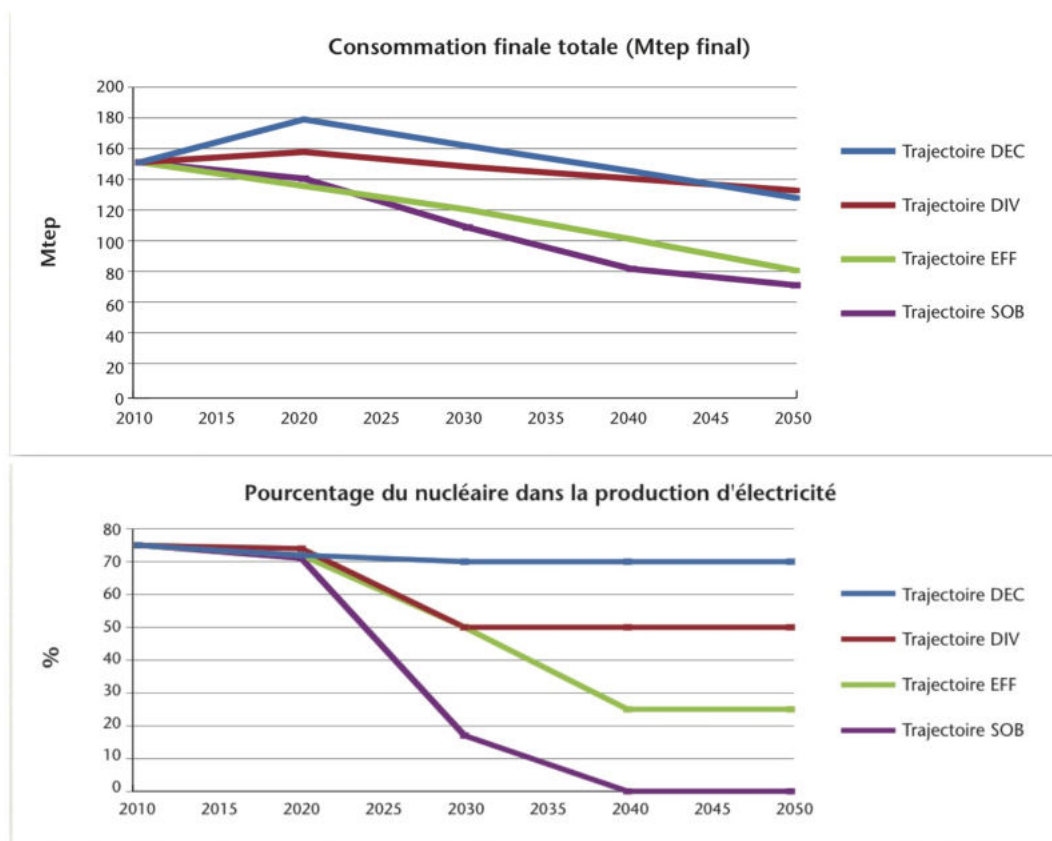
Demande restreinte: - 30%/hab p.r. 2000

# A l'échelle des problèmes stratégie de S. Pacala et R. Sokolow



- 1 GtC/an dans 50 ans représentent chaque année :
- Conversion de 40 Mtep de charbon en 40 Mtep de gaz
  - Equipement de 20 GW<sub>e</sub> de centrales à flamme en CCS. Transport et séquestration de 7.5 10<sup>6</sup> t CO<sub>2</sub> supplémentaires
  - Mise en service de 20 Mtep de biomasse (bois énergie et biocarburants)
  - Mise en service de 8 EPR
  - Mise en service de 50 000 éoliennes de 2 MW
  - Mise en service de 3 000 km<sup>2</sup> de panneaux PV
  - ...

# Scénarios pour la France, classement du DNTTE



Familles de scénarios :

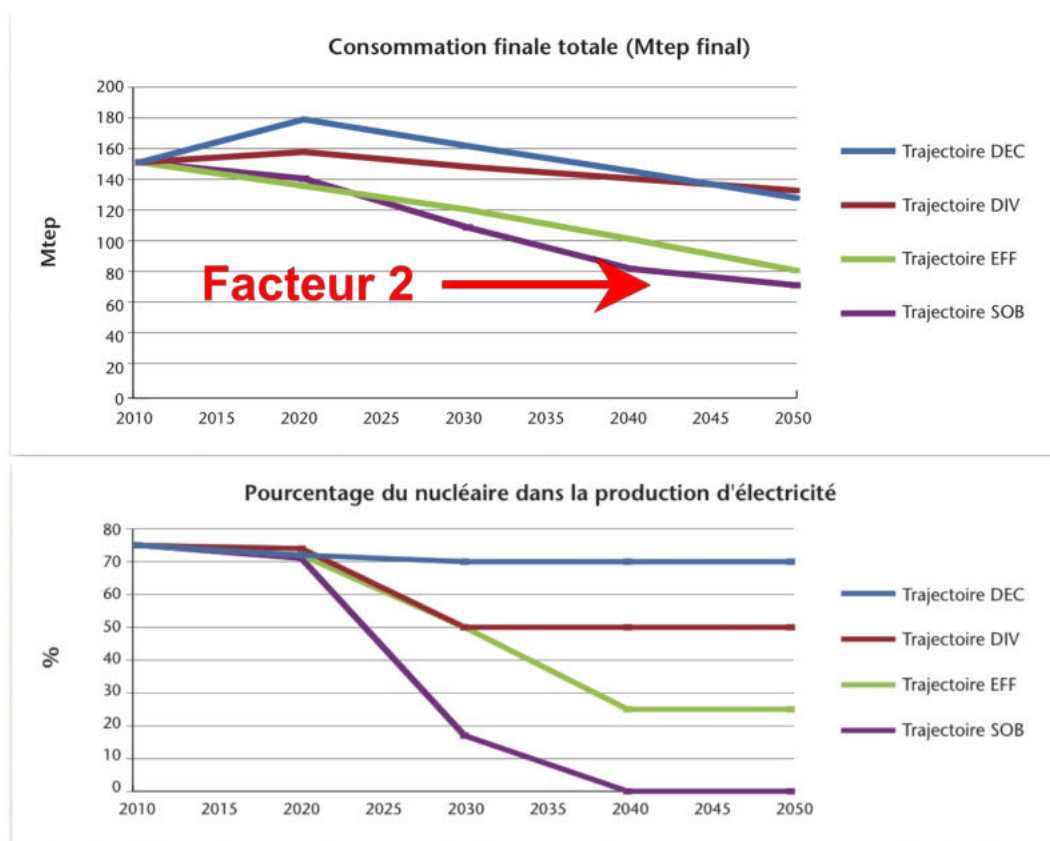
DEC trajectoires de décarbonisation de l'offre

DIV diversification des sources d'énergie

EFF fort développement de l'efficacité énergétique

SOB facteur 4 et sortie complète du nucléaire

# Scénarios pour la France, classement du DNTE



Familles de scénarios :

DEC trajectoires de décarbonisation de l'offre

DIV diversification des sources d'énergie

EFF fort développement de l'efficacité énergétique

SOB facteur 4 et sortie complète du nucléaire

# France: 2010-2050



	Situation en 2010	Situation en 2050					
		1. B.A.U.	2. Sobre DIV	3. Avec Nucléaire DEC	Restrictif		6. Facteur 4 Négatep DEC
					Sortie du nucléaire		
					4. Age d'or du gaz EFF	5. Négawatt 2011 SOB	
Electricité TWh	450+50 (ex)	<b>900</b>	<b>675</b>	<b>450</b>	<b>450</b>	<b>300</b>	<b>990</b>
Chaleur (hors élec.) Mtep	78	<b>110</b>	<b>73</b>	<b>49</b>	<b>49</b>	<b>33</b>	<b>57</b>
Mobilité (hors élec.) Mtep	54	<b>75</b>	<b>50</b>	<b>33</b>	<b>33</b>	<b>22</b>	
Energie finale Mtep	170	<b>271</b>	<b>180</b>	<b>120</b>	<b>120</b>	<b>85</b>	<b>150</b>
Energie primaire Mtep	266	<b>420</b>	<b>260</b>	<b>175</b>	<b>153</b>	<b>90</b>	<b>279</b>
$E_{\text{prim}}$ /habitant tep	4.4	<b>7</b>	<b>4</b>	<b>2.7</b>	<b>2.3</b>	<b>1.4</b>	<b>4.2</b>
Rejets MtC/an	115	<b>173</b>	<b>85</b>	<b>38</b>	<b>90</b>	<b>&lt; 10</b>	<b>30</b>

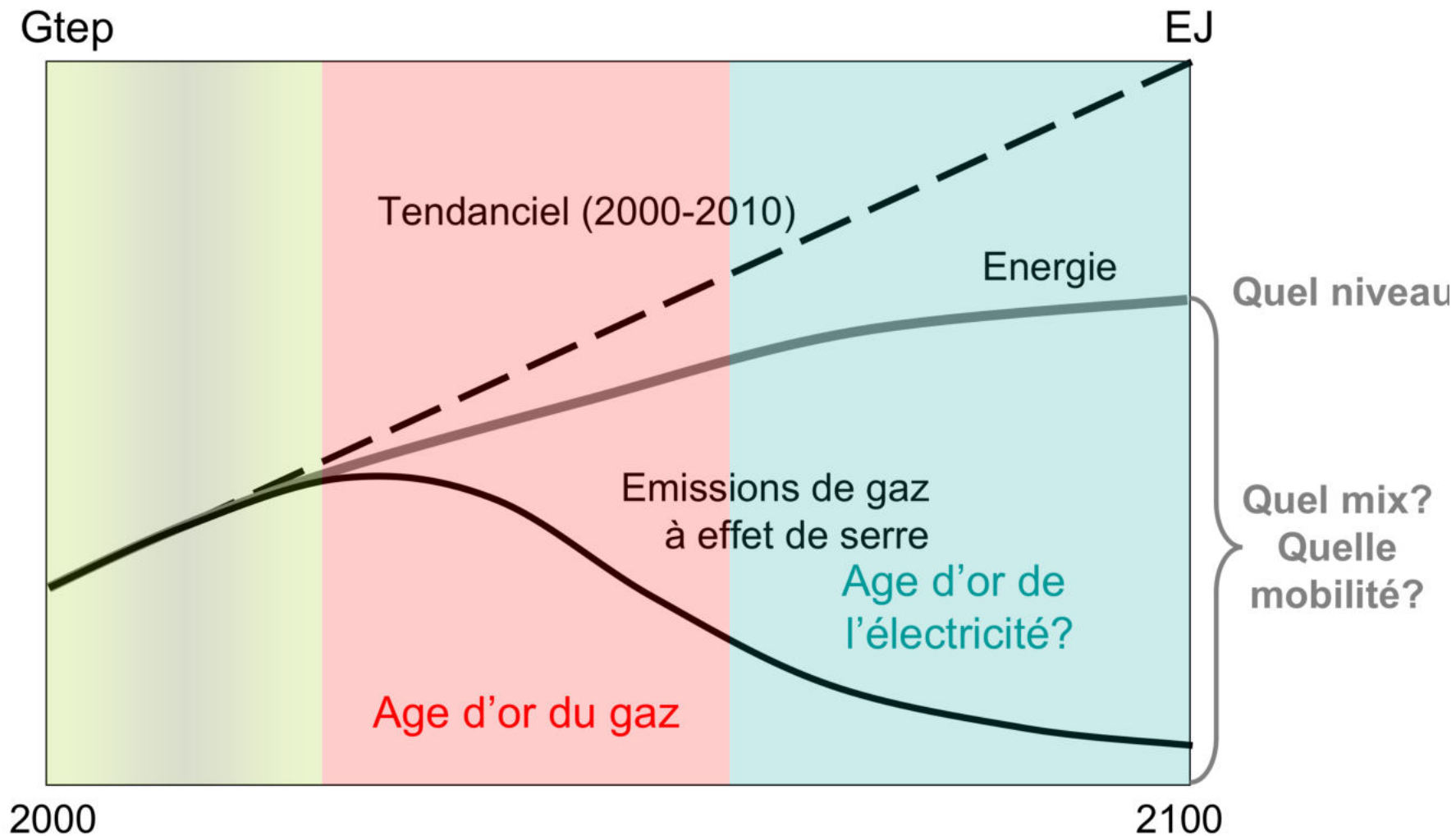
# France: 2010-2050



	Situation en 2010	Situation en 2050					
		1. B.A.U.	2. Sobre DIV	3. Avec Nucléaire DEC	Restrictif		6. Facteur 4 Négatep DEC
					Sortie du nucléaire		
					4. Age d'or du gaz EFF	5. Négawatt 2011 SOB	
Electricité TWh	450+50 (ex)	900	675	450	450	300	990
Chaleur (hors élec.) Mtep	78	110	73	49	49	33	57
Mobilité (hors élec.) Mtep	54	75	50	33	33	22	
Energie finale Mtep	170	271	180	120	120	85	150
Energie primaire Mtep	266	420	260	175	153	90	279
$E_{\text{prim}}$ /habitant tep	4.4	7	4	2.7	2.3	1.4	4.2
Rejets MtC/an	115	173	85	38	90	< 10	30

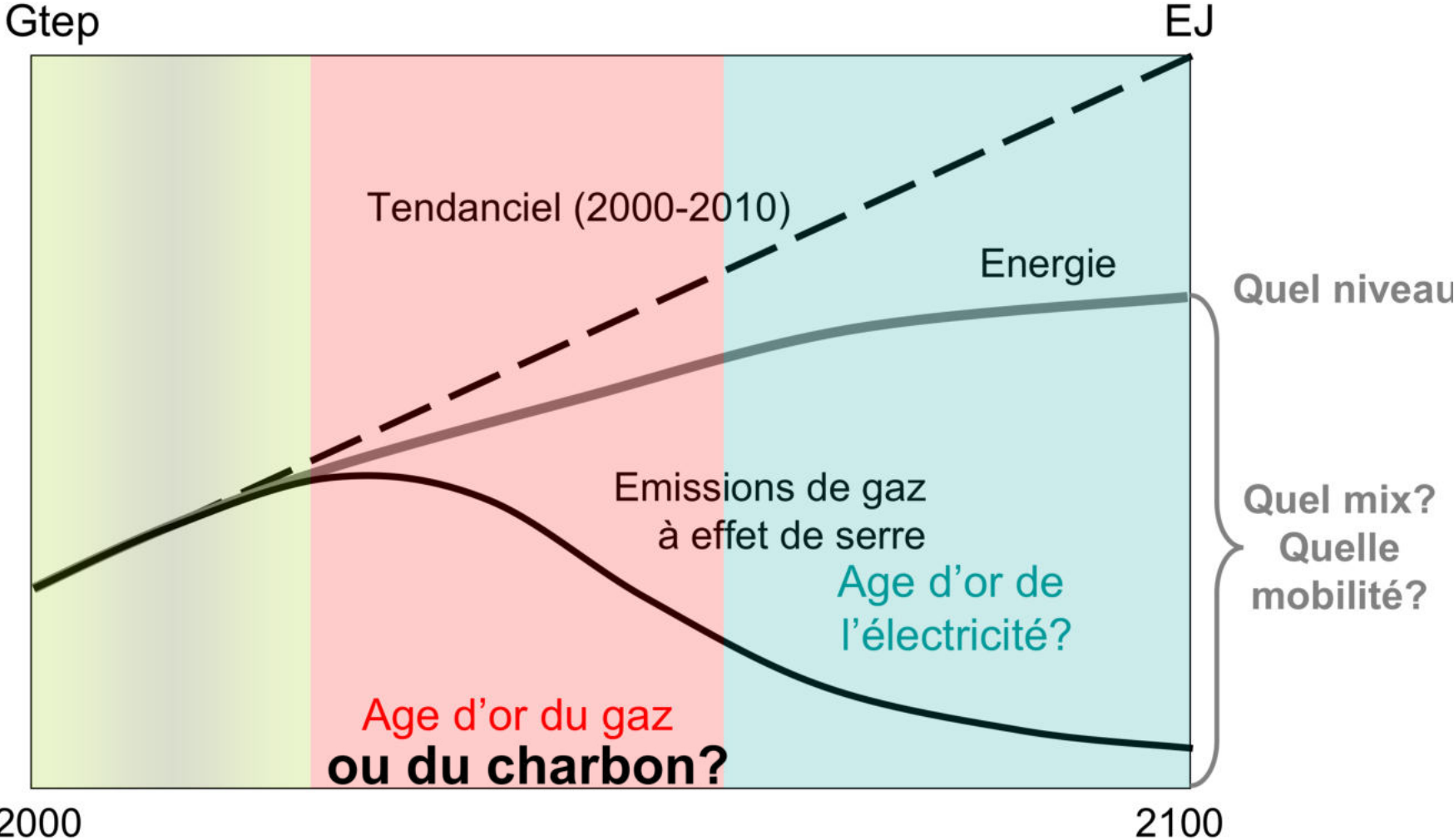
**Facteur 2**

# Tendances: d'un âge d'or à l'autre





# Tendances: d'un âge d'or à l'autre



# ONG environnementales (ONG-E) et tendances lourdes

## Préconisations à contre courant

- Décroissance de la demande globale
- Décroissance de la demande d'électricité
- Décentralisation de la production d'électricité
- Décroissance de la demande de mobilité

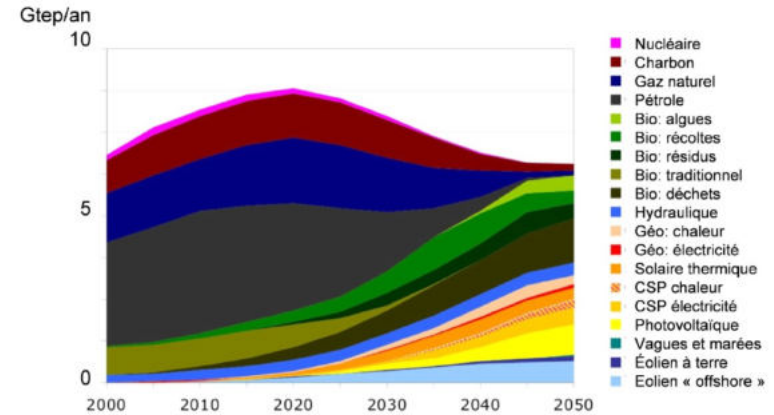
## ...quoique pas tout à fait

- Concentration urbaine
- Sobriété énergétique

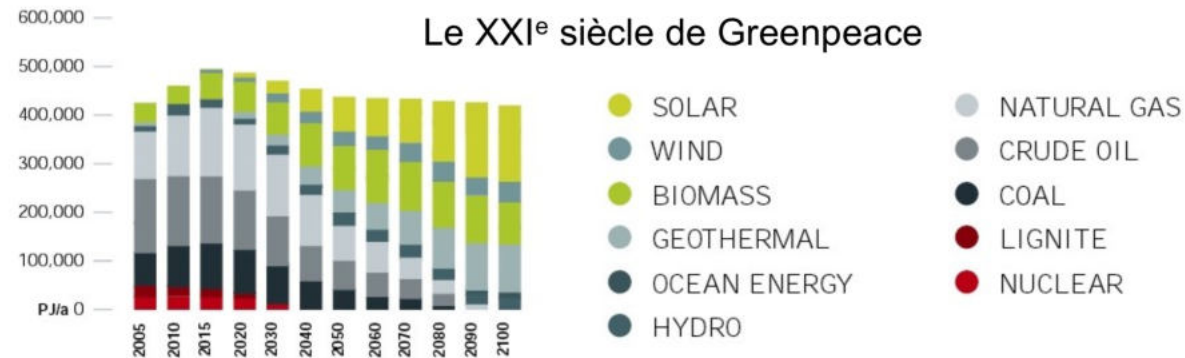
# L'« autre monde » des écologistes



Demande d'énergie selon Ecofys-WWF



FOSSIL FUEL PHASED OUT BY 2095



# Technologies pour la production d'électricité

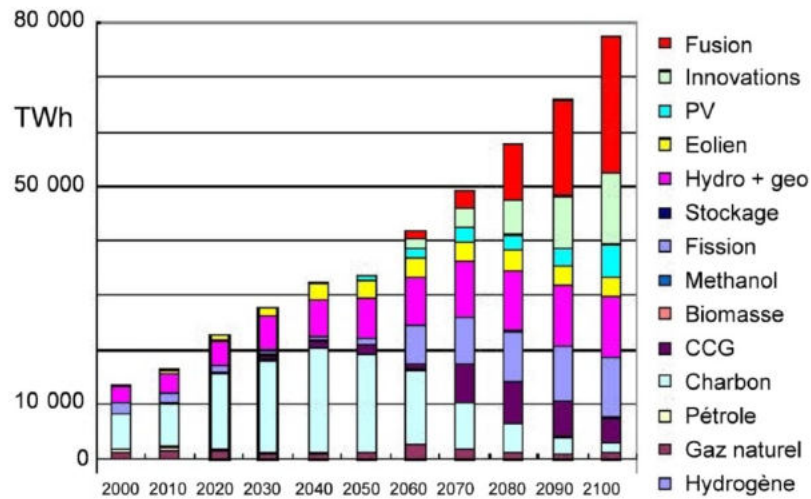
	D'ici à 2050	2050-2100	Après 2100
C Stockage Séquestration	Emergente	Eprouvée	
Electronucléaire G4	Emergente	Eprouvée	
Fusion thermonucléaire		Emergente	Eprouvée
Eolien	Eprouvé		
Géothermie	Emergente	Eprouvée	
Solaire à concentration (CSP)	Emergente	Eprouvée	
Energie des vagues	Emergente	Eprouvée	
Solaire PV	Emergente	Eprouvée	
PV spatial		Emergente	Eprouvée

Questions annexes:

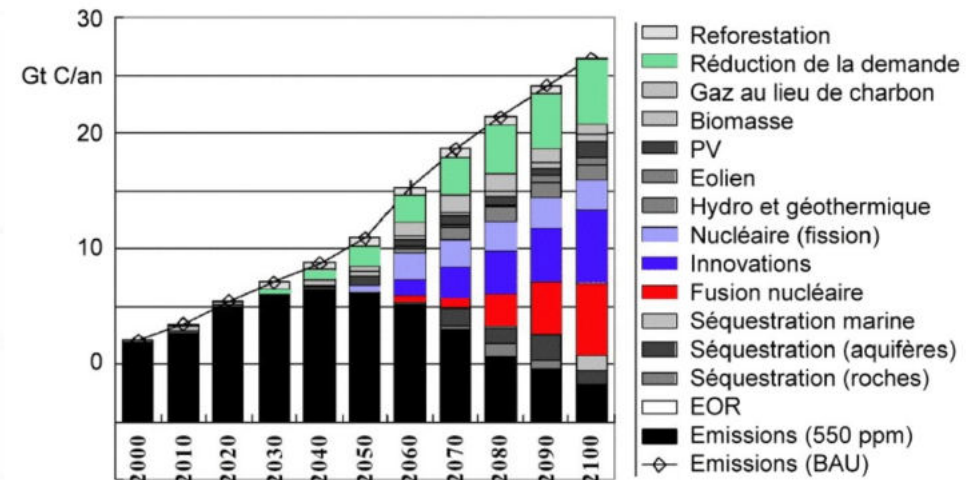
intermittence, acceptabilité

puissance des générateurs GW, MW, kW ?

# Une vision de la transition énergétique



a)



b)

- a) Système électrique planétaire décarboné en 2100: 45% nucléaire (fission et fusion), 45% renouvelables dont 10 de solaire spatial (innovations)
- b) Trajectoire de décarbonisation visant 550 ppm de CO<sub>2</sub> dans l'atmosphère

Et à la fin...

Et à la fin...

L'économie, le plus souvent, l'emporte.

# Pour en savoir plus





# Un mirage: décentralisation/individualisation

- « *Think globally, act locally!* » efficace, nécessaire mais pas suffisant
- Une mégaloopole asiatique ne peut pas avoir le même système énergétique qu'une « *suburbia* » à l'américaine
- Méconnaissance des besoins de l'industrie (pôles gros consommateurs) et des grandes infrastructures de transport (TGV)
- Coût élevé de la multiplication des acteurs

# Energie/information un parallèle biaisé

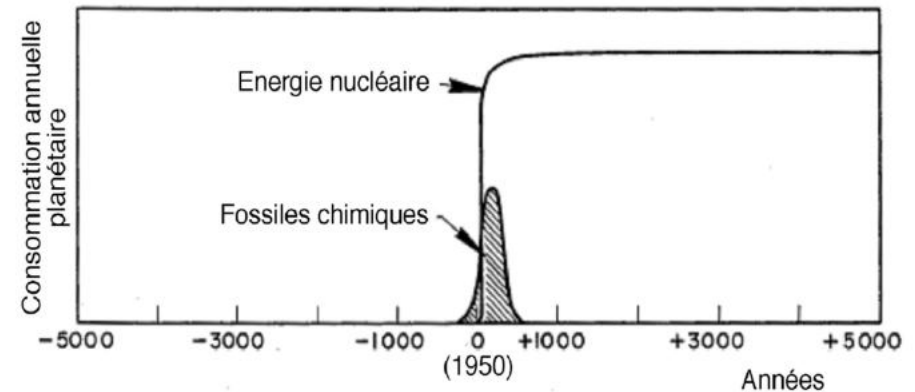
- Jeremy Rifkin: *La troisième révolution industrielle*, « internet de l'énergie »; Joel de Rosnay: « le mariage du numérique et de l'énergétique »
- Réseau d'information:
  - Problèmes de bande passante,
  - Très loin des limites physiques
- Réseau de transport et de distribution d'énergie
  - Hiérarchie des puissances à transporter
  - Aux limites physiques

# L'art du décret

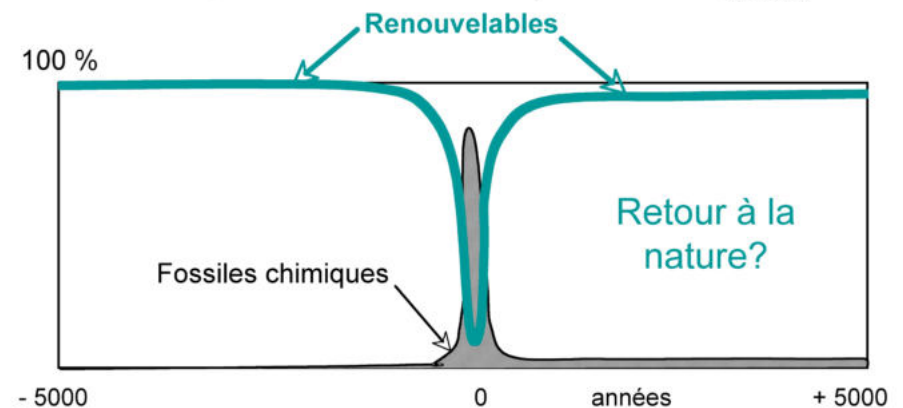
- Il est toujours possible de décréter des objectifs qui ne seront pas forcément respectés (ex: 20-20-20 européen)
- Les décrets opérationnels sont faciles à prendre quand la voie est tracée (ex: Japon de Meiji, Chine de Deng)
- Les états décident des grands investissements de recherche (ex: nucléaire de 4<sup>e</sup> génération, fusion nucléaire, espace)
- Il est facile d'interdire et de faire respecter l'interdiction, (ex: gaz de schiste) mais cela peut coûter cher (ex; sortie du nucléaire en Allemagne)
- Contrer une évolution massive relève de l'impossible (ex: téléphone portable, équipement électrique)

# Deux visions globales de l'avenir énergétique

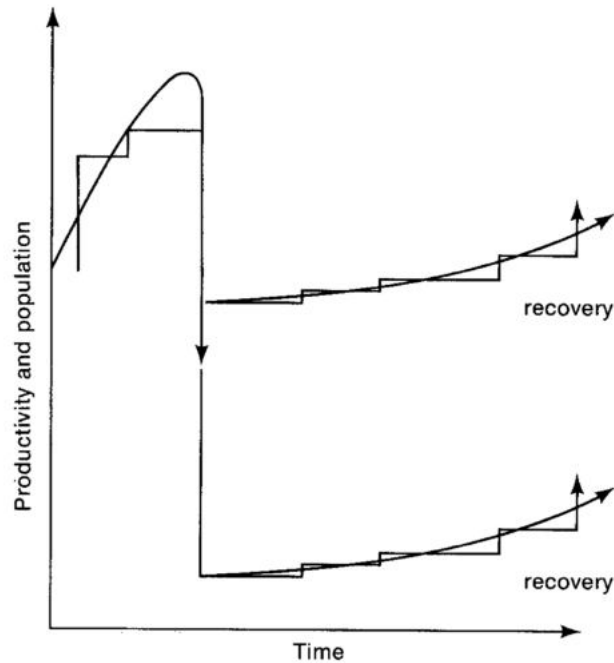
- M. King Hubbert (1956)



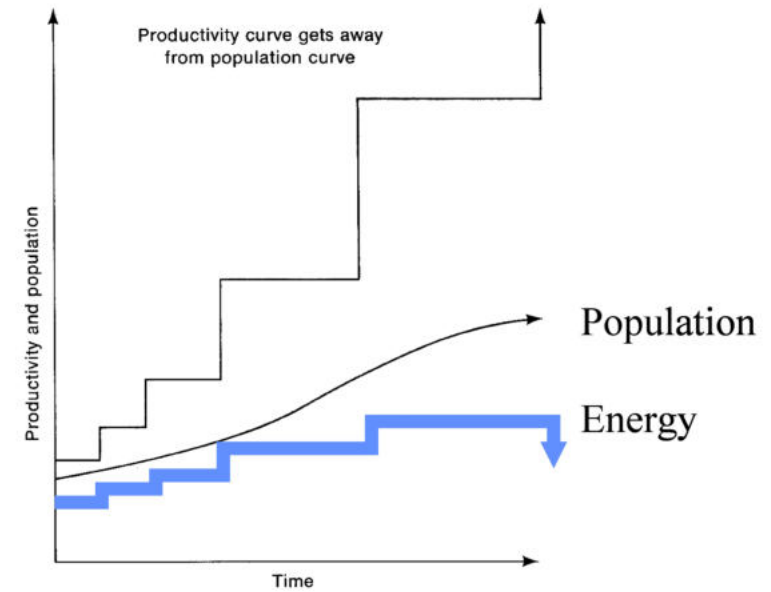
- « Ecologiste »



# Les vues d'avenir d'un astrophysicien



The collapse of an isolated community, followed by a slow unaided recovery. The more advanced the technology of a society, the greater the collapse is likely to be.

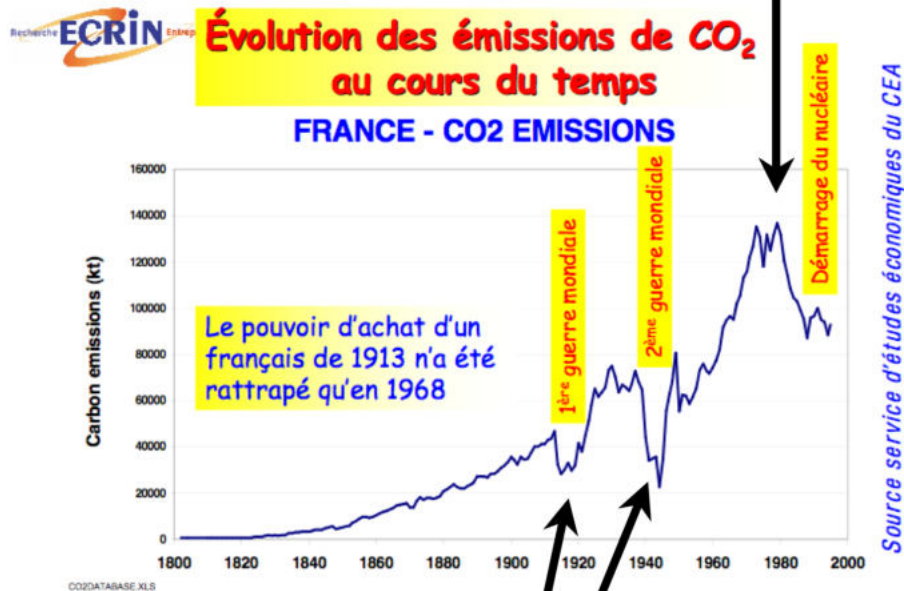


Assuming compulsory population limitation, productivity can advance far beyond the material demand of society, permitting enormous investment in new techniques and ideas. In this situation, humanity becomes one of the creatures in the Galaxy that "make it" through to a higher level of the hierarchy of life.

Fred Hoyle (1977), *Ten Faces of the Universe*, Freeman

# Recettes éprouvées pour réduire les émissions de gaz à effet de serre

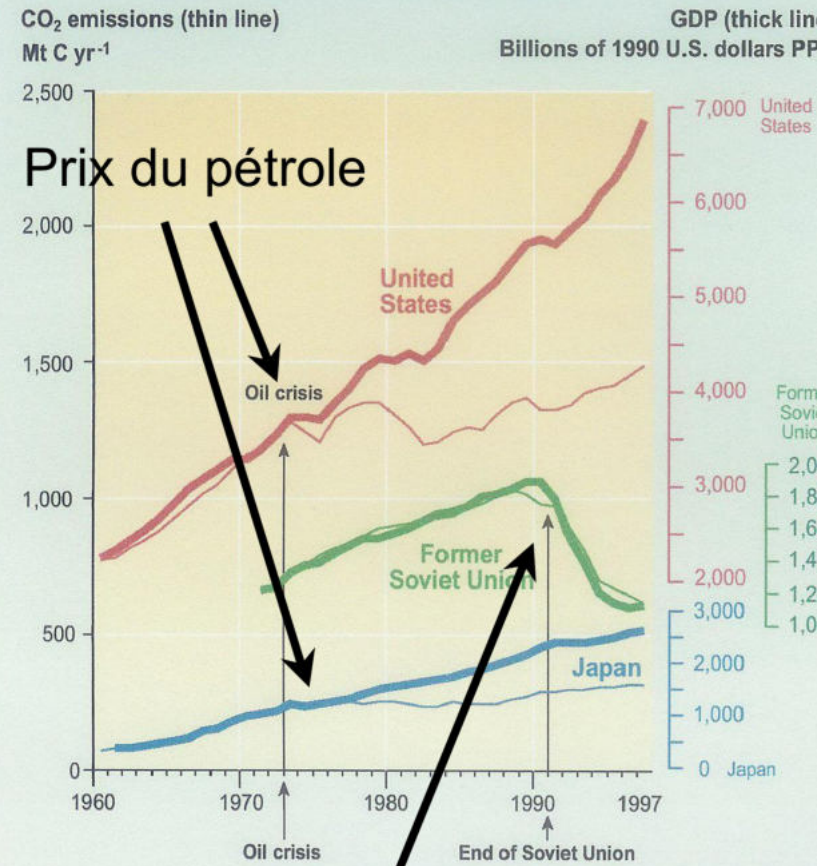
Electronucléaire



Les émissions de CO<sub>2</sub> sont fortement liées à l'évolution de la vie économique

Economie de guerre

Comparison between GDP and CO<sub>2</sub> emissions for selected countries



Prix du pétrole

Effondrement économique



# Graine d'incompréhension:



# Graine d'incompréhension:

COMMISSARIAT  
GÉNÉRAL AU  
DÉVELOPPEMENT  
DURABLE

n° 490  
Janvier  
2014

## Chiffres & statistiques

### Les émissions de CO<sub>2</sub> dues à la combustion d'énergie dans le monde en 2011

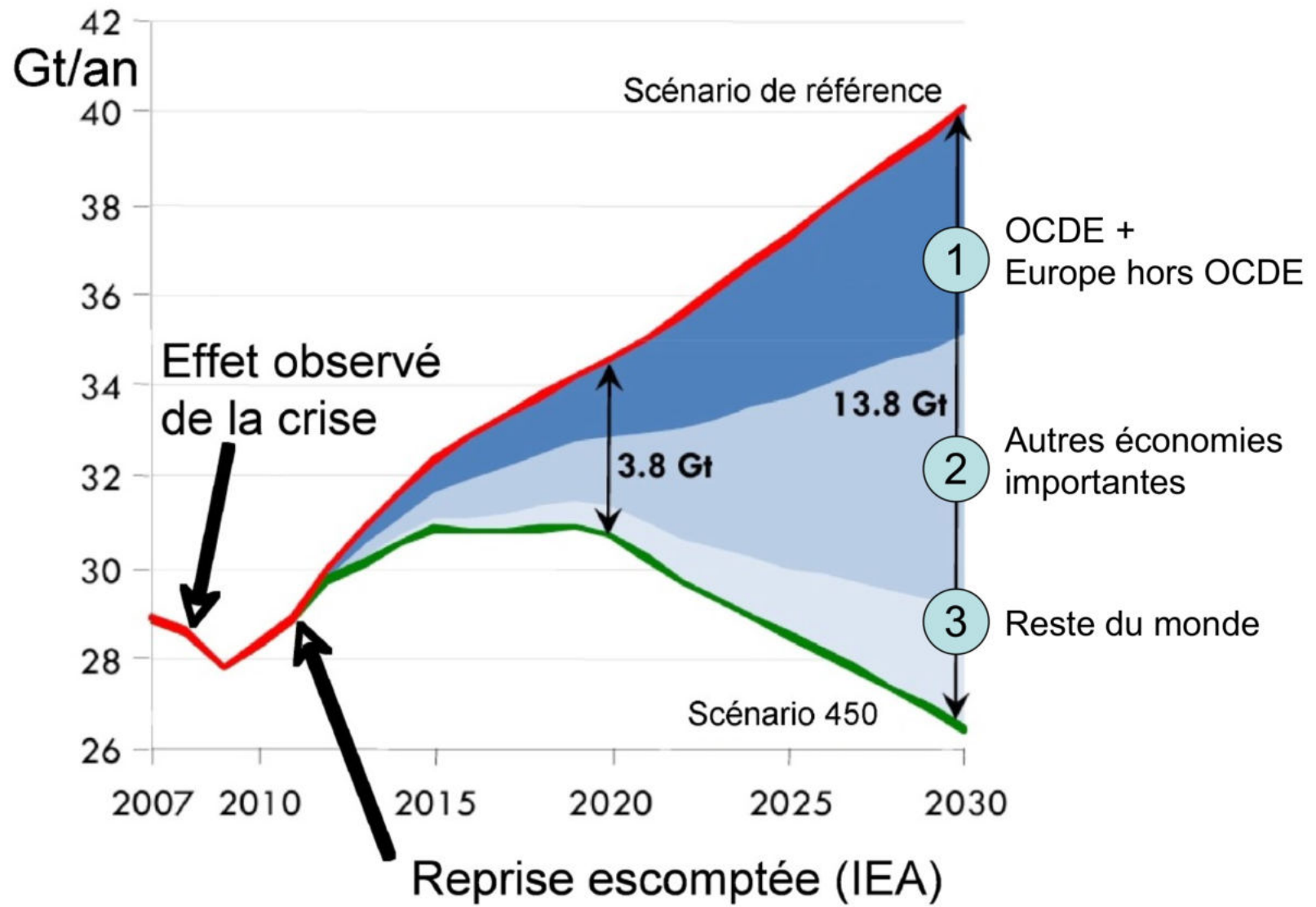
# Graine d'incompréhension:

COMMISSARIAT  
GÉNÉRAL AU  
DÉVELOPPEMENT  
DURABLE

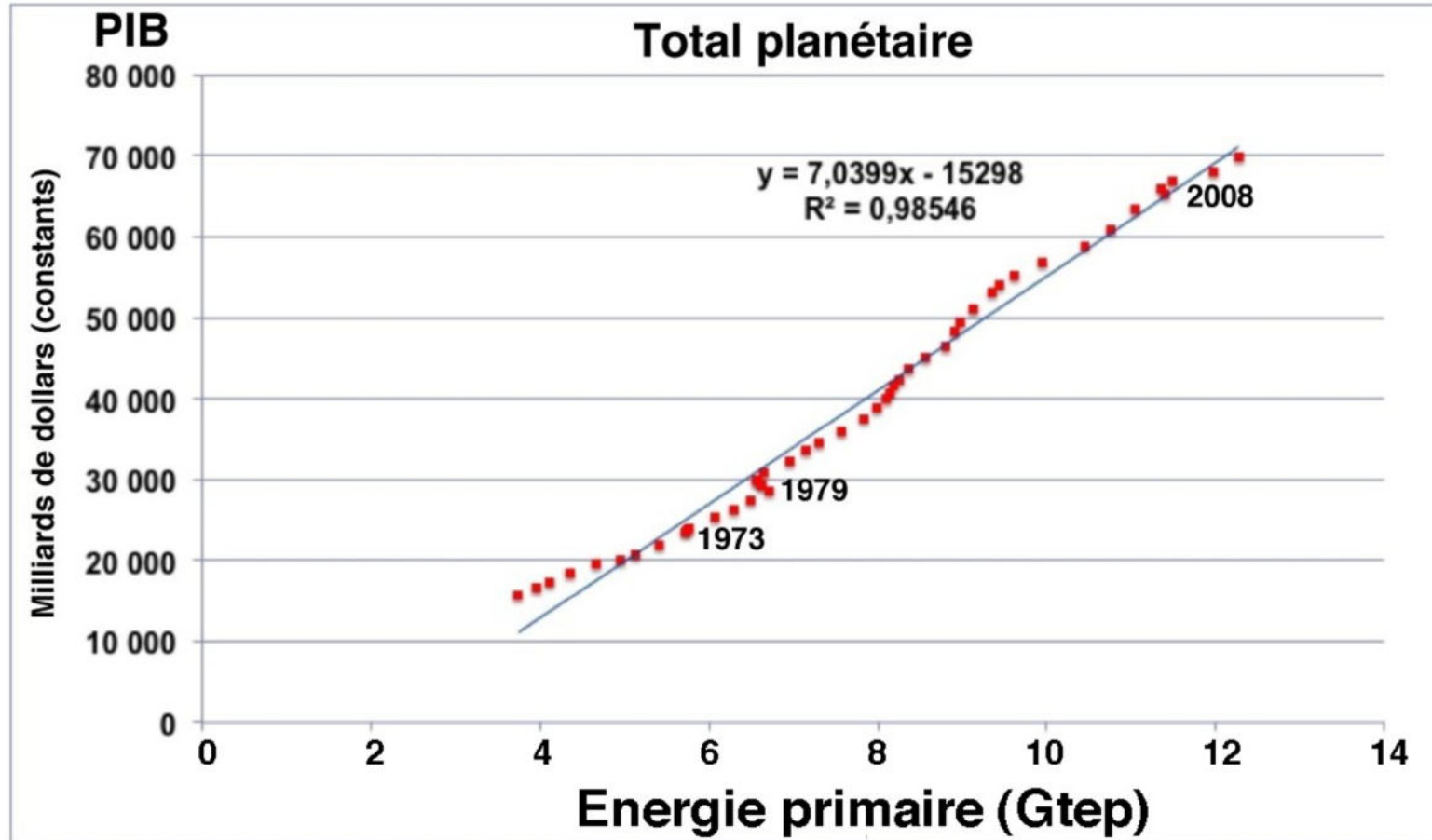
n° 490  
Janvier  
2014

## Chiffres & statistiques

Les émissions de CO<sub>2</sub> dues à  
la combustion d'énergie  
dans le monde en 2011



# Une loi d'airain ?



d'après Jean-Marc Jancovici

# Relation énergie PIB pour la France

