



**GEOL-F-103 : Problèmes actuels de gestion de l'Energie  
2 ECTS (option BAC1-2-3, 24-0-0-0)**

**P.H. HEENEN (physicien ULB) et A. PREAT (géologue ULB)**

<http://uv.ulb.ac.be>

- L1 Introduction et effet de serre**
- L2 Notions de géologie et bassins sédimentaires**
- L3 Plaque arabique et évolution kérogène**
- L4 Formation hydrocarbures et notion de gisement**
- L5 Combustibles fossiles: réserves-prod.-géopolitique**
- L6 Energie nucléaire: fusion et fission**
- L7 Réacteurs nucléaires: fonctionnement et filières**
- L8 Le cycle du combustible nucléaire**
- L9 Energie nucléaire: sécurité et futur**
- L10 Géothermie-Hydraulique-Biomasse**
- L11 Energies solaires**
- L12 Synthèse et débat**

- + résumé L1-L5
- + glossaire géologie hydrocarbures et effet de serre
- + glossaire énergie nucléaire
- + liste bibliographique

**P.H. HEENEN A. PREAT**



## QCM

- **10 questions à 3 choix : 10 points**
- **2 questions à 5 points chacune: 10 points**  
**[2 heures]**

LECON 1 - 2016

L'ENERGIE  
GLOBALE



# INTRODUCTION GENERALE



# LES ENSEIGNEMENTS DES PRINCIPALES SOURCES D'ÉNERGIE

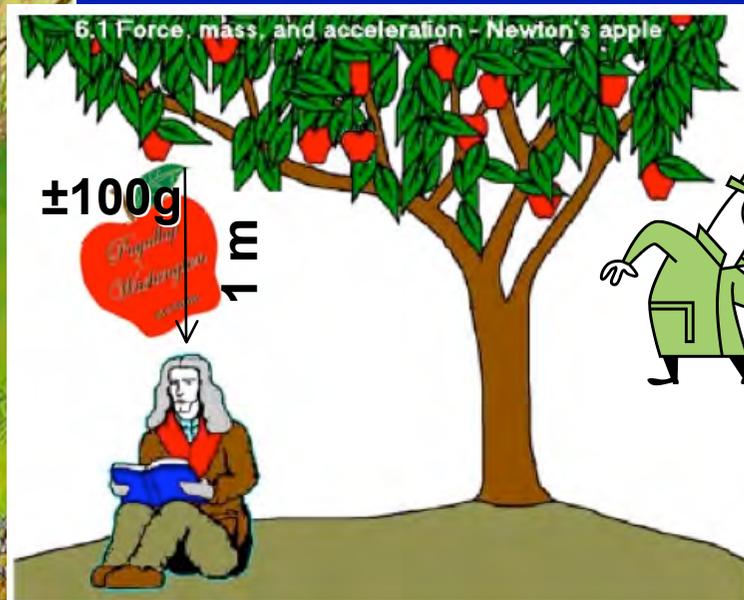
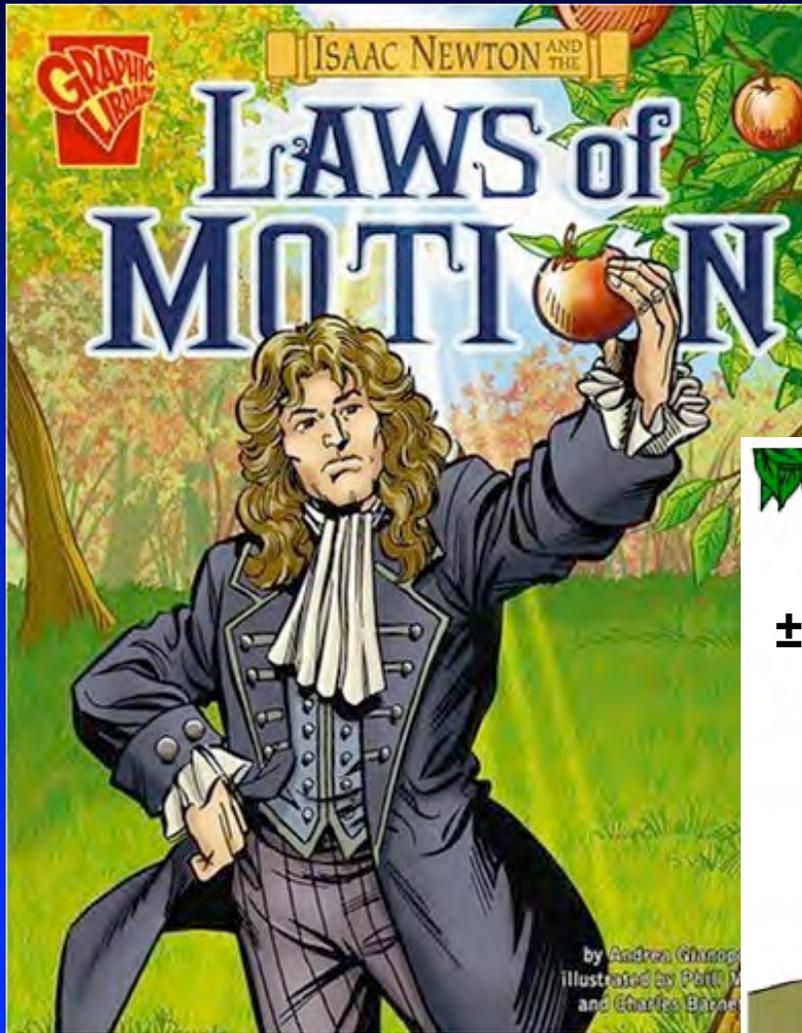
- **ENERGIES FOSSILES** = énergies **concentrées** mais non renouvelables [*E solaire stockée au cours des temps géologiques*]
  - ◇ **Charbon** ◇◇ **Pétrole** ◇◇◇ **Gaz naturel**
- **ENERGIES NUCLEAIRES** = énergies **très concentrées**
  - un gramme  $U^{235}$  = autant d'E qu'une tonne de pétrole!,  $1\text{cm}^3 = 19\text{g } U^{235} = 47,5 \text{ T charbon!}$
  - ◇ **Fission** [*Centrales nucléaires actuelles*] ◇◇ **Fusion** [...]
- **ENERGIES RENOUVELABLES** = énergies **diluées** ou diffuses mais renouvelables
  - ◇ **Hydraulique** ◇◇ **Solaire** ◇◇◇ **Eolienne**
  - ◇◇◇◇ **Biomasse** ◇◇◇◇◇ **Géothermie**

en 1h le Soleil déverse 'notre' Energie de 365 jours  
ou il déverse 15000X notre consommation mondiale à chaque instant

L'unité de base de l'énergie dans le système international est le **Joule** qui est aussi l'unité de travail et de chaleur

=

Travail d'une force de 1N dont le point d'application se déplace de 1m dans la direction de la force



1 (G) tep  
= 42 GJ

1 kJ = Energie dégagée sous forme de chaleur par une personne au repos toutes les 10 secondes

• **1tep = ±42GJ = 100.10<sup>9</sup>cal ou ±11700kWh**

1 calorie = 4,18 J (1cal = quantité de chaleur pour élever de 14,5° à 15,5° la T° de 1g d'eau)

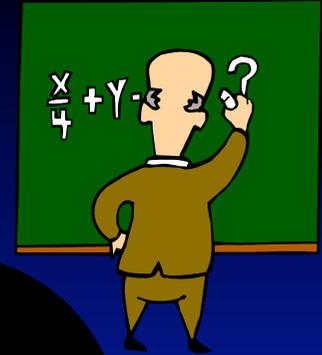
Le saut d'une puce = 10<sup>-7</sup> J (soit environ 4 dix-millionième de cal),

L'homme a besoin de 10<sup>7</sup> J d'énergie/j [±2500Kcal] sf de nourriture, de chaleur ...

Une tep représente donc 11<sub>1/2</sub> ans de ses besoins vitaux!

[1bbl = ±1<sub>1/2</sub> an, 1l = 3,6j]

• Un cyclone dans les Caraïbes = 3,8 x 10<sup>18</sup> J soit 100. 10<sup>6</sup> tep



**1t <sup>235</sup>U ==> 10 000 tep**

**1000m<sup>3</sup> gaz p<sub>atm</sub> ==> 0,9 tep**

**1t charbon ==> 0,7 tep**

**1 Réacteur Nucléaire de 1GW<sub>e</sub>**

**= 100km<sup>2</sup> solaire pv, soit 5000km<sup>2</sup> pour toute l'électricité en France**

**= 2 500 éoliennes (de 2MW) et 500km<sup>2</sup>**

**= 50 000km<sup>2</sup> à partir géothermie**

**= 30 000km<sup>2</sup> à partir biodiesel (tournesol ou colza)**

**ou 43µg <sup>235</sup>U(0,0000043g) = 70g essence = 3,6t eau sur 100m = 1kWh**

Tacona et al. 2009

# Contexte général

## 2014 : 11%

Énergies renouvelables

73%

Énergie hydraulique

Biomasse



Énergie solaire

Énergie éolienne

Géothermie

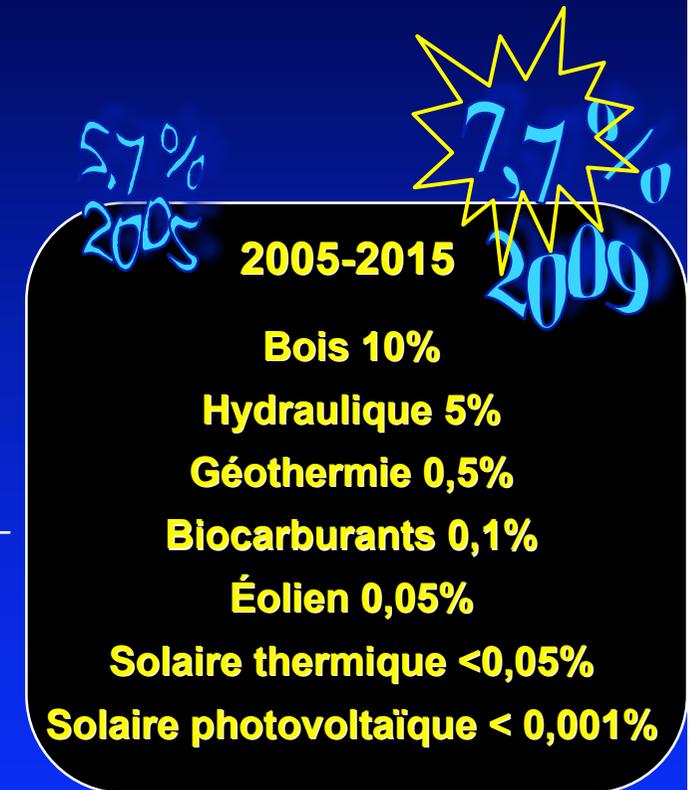
# CONSOMMATION D'ENERGIE PRIMAIRE COMMERCIALE DANS LE MONDE

ENERGIE	2008	2007	1998
<b>1</b> Pétrole	3,928	<b>3,939</b>	3,39
<b>2</b> Charbon	3,304	<b>3,195</b>	2,22
<b>3</b> Gaz	2,726	<b>2,652</b>	2,02
Hydraulique	0,718	<b>0,696</b>	0,69
Nucléaire	0,620	<b>0,623</b>	0,63
<b>TOTAL</b>	<b>11,3</b>	<b>11,1</b>	<b>± 9</b>

**Gtep** 12 Gtep (2009) 33%-27%-20% = 80% hors-bois

80% ou >

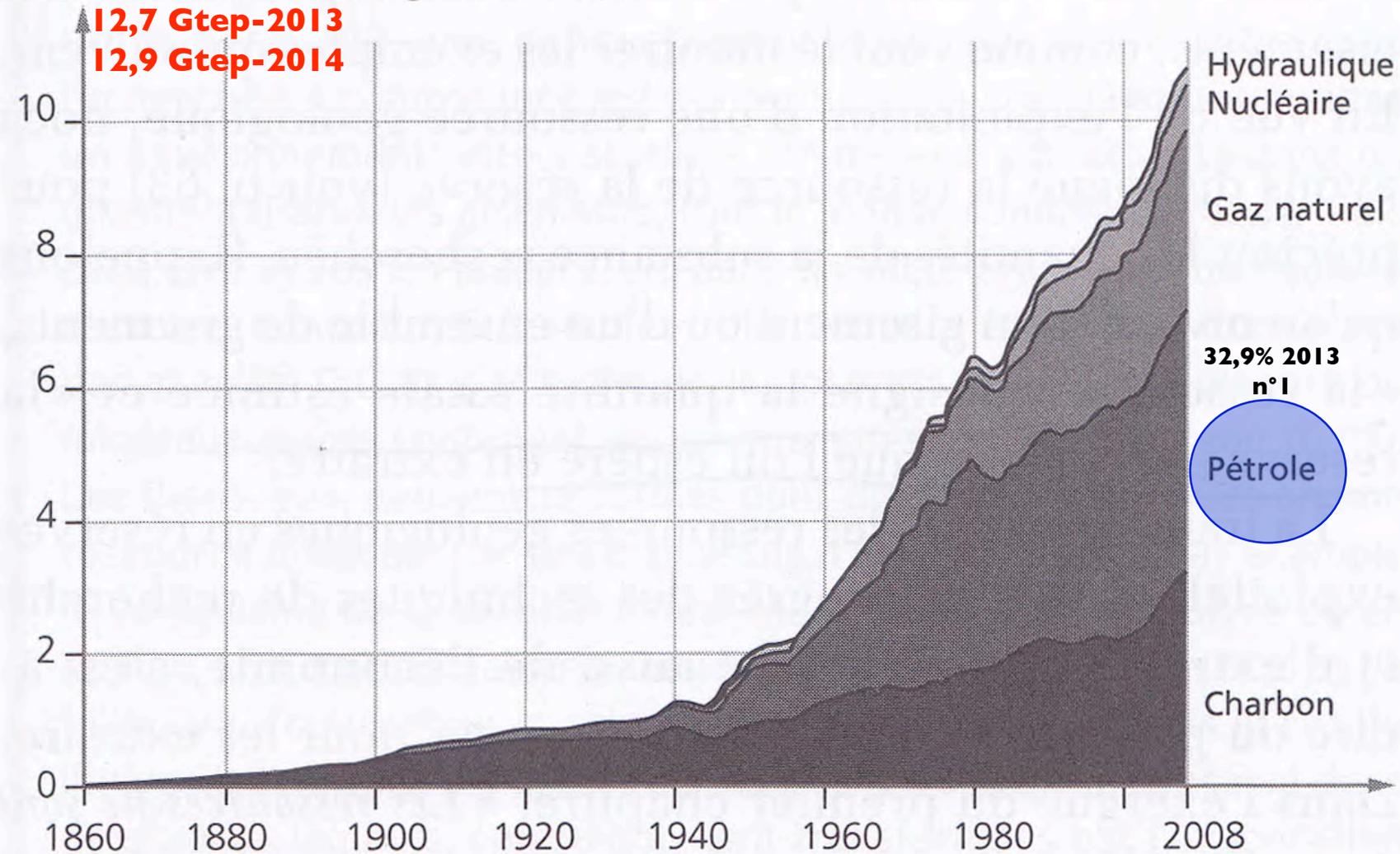
+ 1,176 (biomasse)  
+ 0,057 (renouvelables)



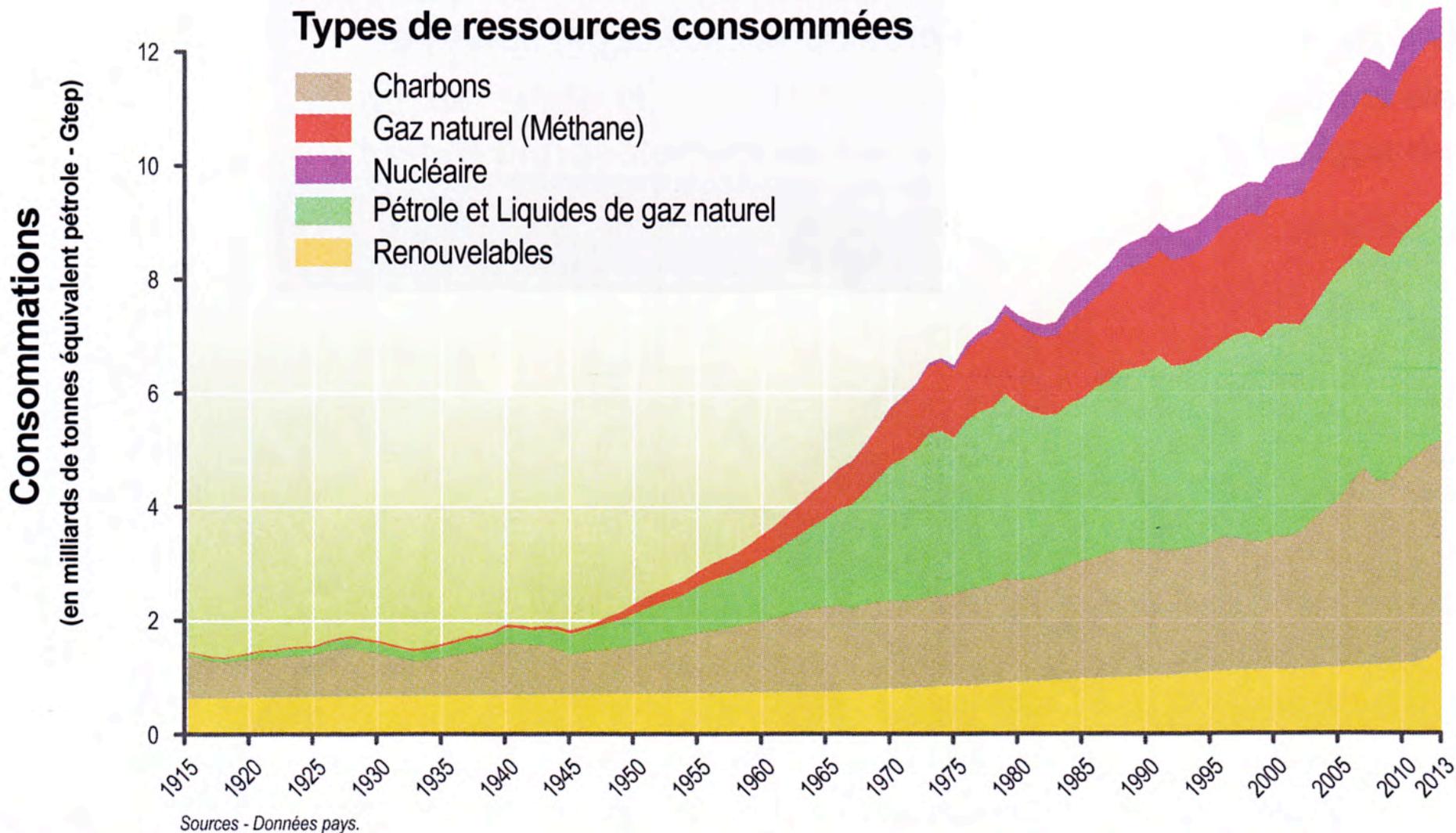
**2014 : 12,9 Gtep soit ±12000 réacteurs nucléaires (auj ±450 civils)**

# 22?Gtep-2050

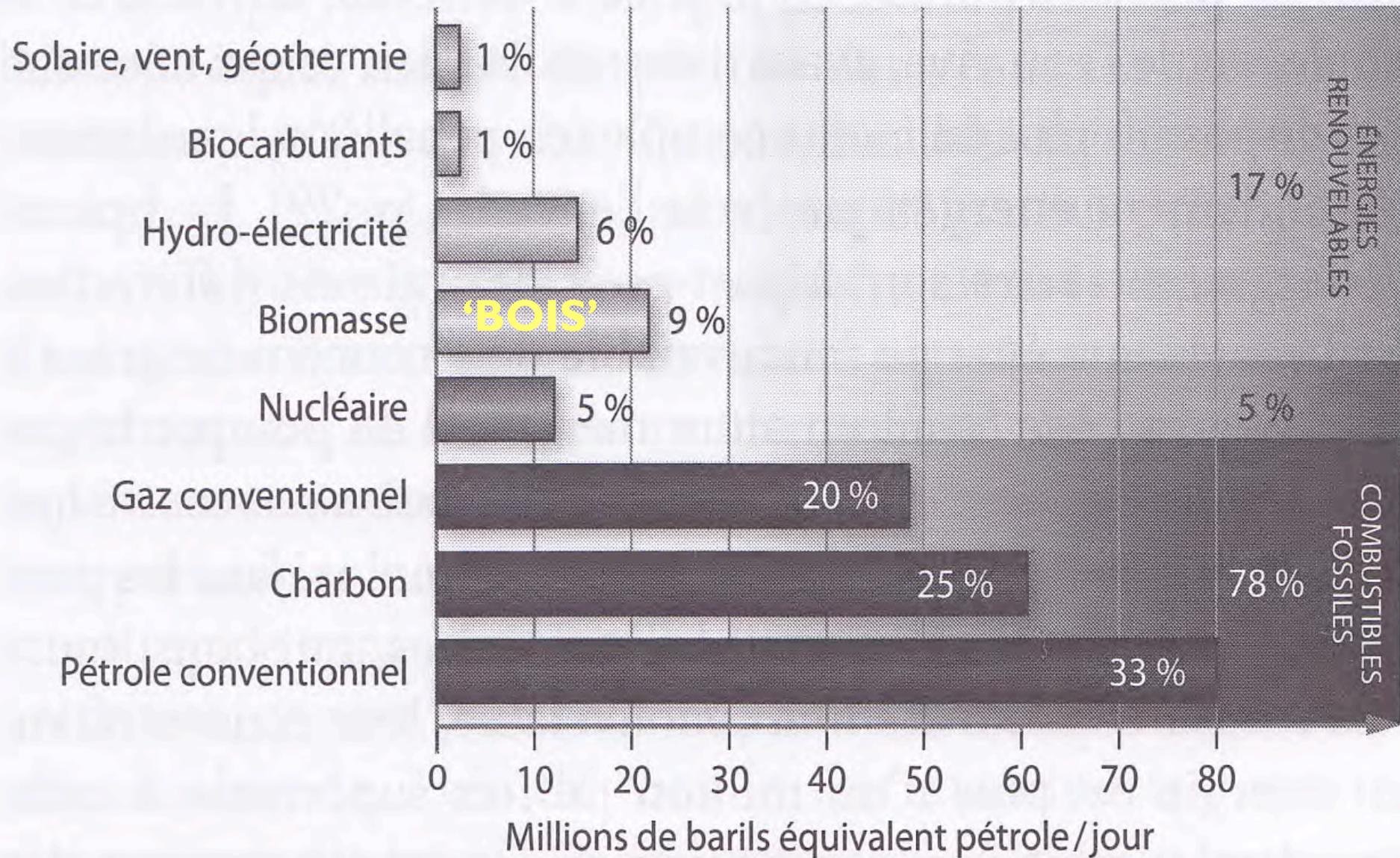
Consommation d'énergie (en Gtep)



Mathieu 2011



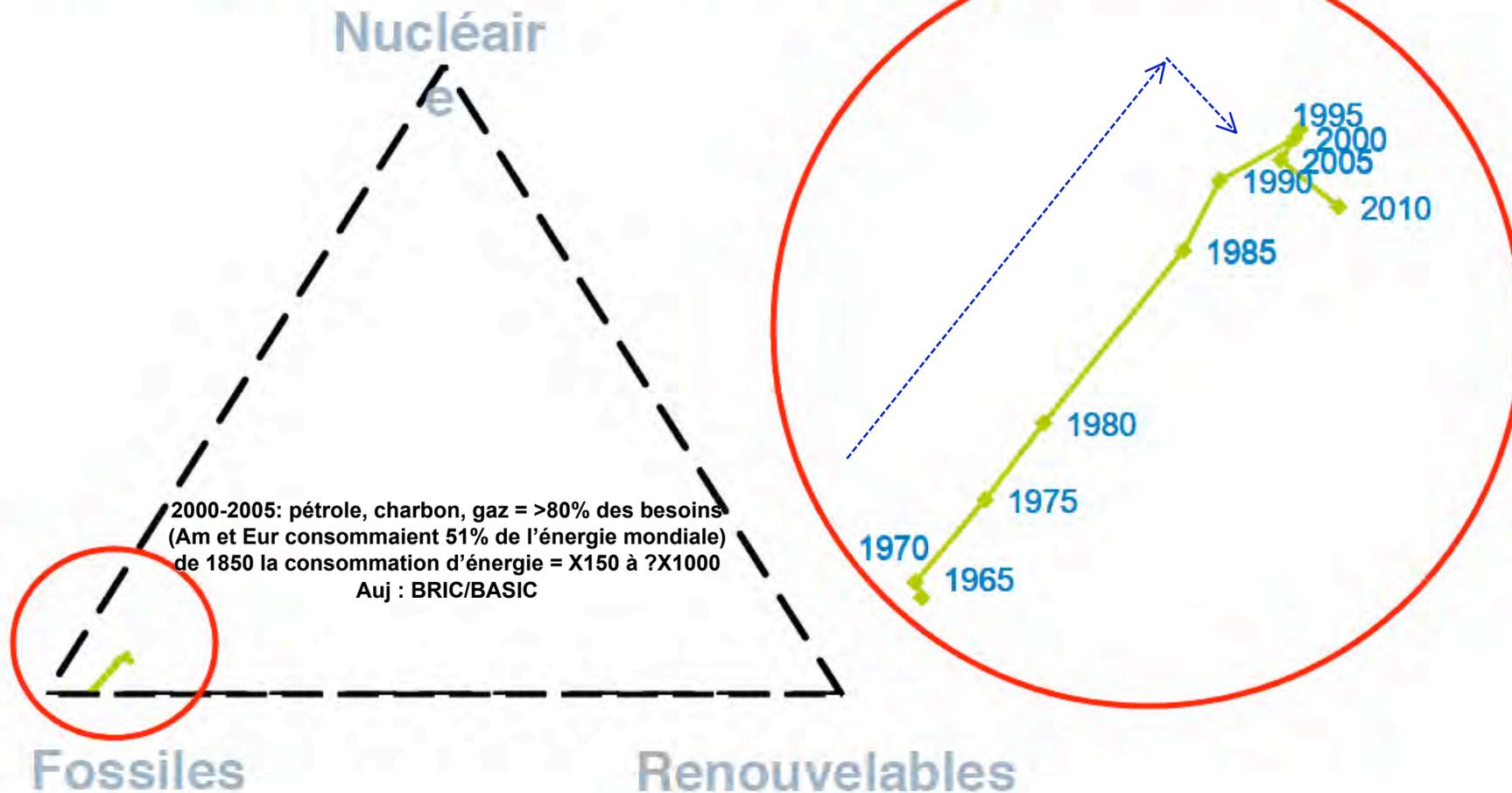
## Évolution des consommations énergétiques mondiales depuis 1915



AIE 2007

# Le temps de l'énergie est un temps long

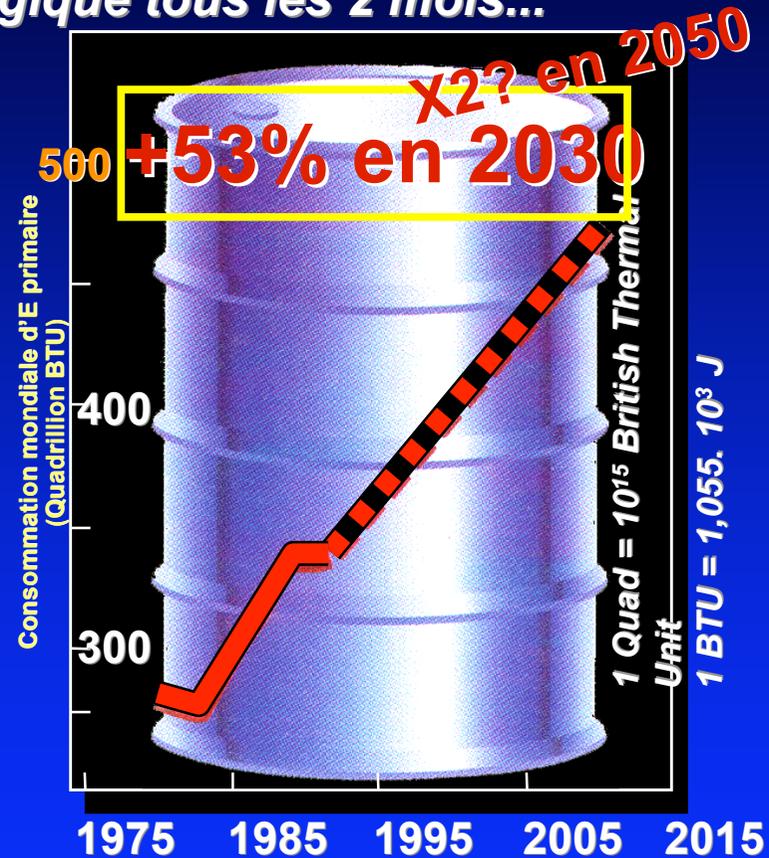
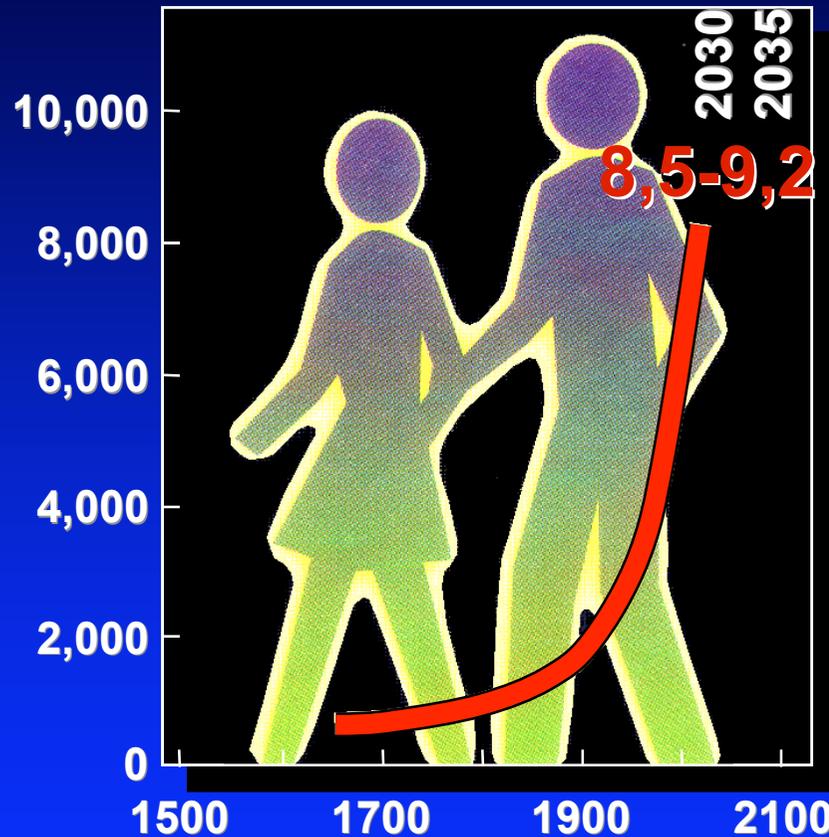
Bouquet énergétique mondial de 1965 à 2010



# Population - Besoins en Energie

Augmentera 'en moyenne' de 1,5%/an jusqu'en 2030

Chaque jour: 190 000 personnes en plus (N-D), donc  $\pm 6$  millions/mois!  
ou encore  $\pm$  la Belgique tous les 2 mois...



**En 2000-2005:** pétrole, charbon, gaz = 90% des besoins  
(Am et Eur consommaient 51% de l'énergie mondiale)  
**de 1850** la consommation d'énergie = X150 à ?X1000

# Population - Besoins en Energie

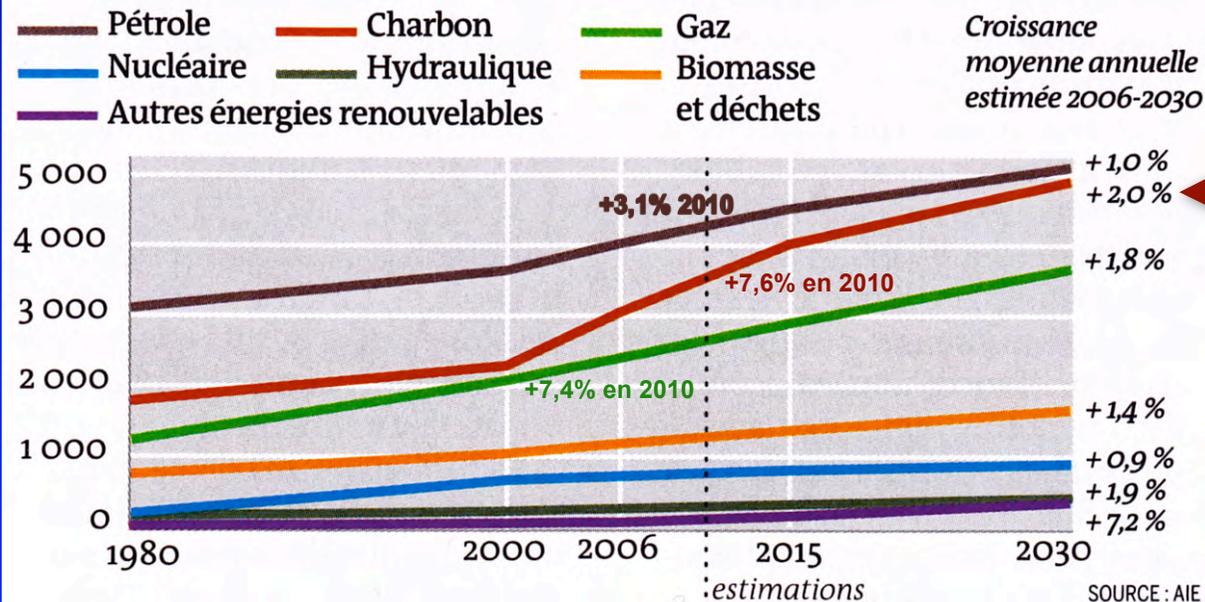
En 2008: CRISE et BL = 147\$!

- 1 Consommation mondiale PETROLE = -0,6%
- 2 Consommation mondiale CHARBON >2,5% (+4,9% entre 2000 et 2006)  
(plus forte augmentation du charbon, pour la 6<sup>ème</sup> année consécutive)
- 3 Consommation mondiale GAZ = +2,5%

TOTAL: la consommation mondiale d'énergie primaire a augmenté de +1,4 % en 2008 (malgré la crise...) et diminué! de 1,1% en 2009 (et +5,6% en 2010)

## Demande énergétique mondiale

En millions de tonnes équivalent pétrole (TEP)



soit +60% entre 2006-2030  
le charbon N'EST PAS cher  
(8-12\$ boe)

Sequestration pas avant 2020?  
et effets en 2030 (AIE, 2008)

**CONSOMMATION MONDIALE ENERGIE PRIMAIRE EN 2010 : + 5,6% (dont 1/5= Chine)**

**2011 : +2,5% = 12,275Gtep**

**... 2014 +0.9% pr 2013 (min pr 2009)**

**Pétrole : +0.8 % en 2014 (14<sup>ème</sup> année consécutive de moindre augmentation par rapport au charbon)**

**Gaz naturel : +0,4% en 2014 (surtout en Am N)**

**Charbon : +0.4 % en 2014**



**+0.8%**

**BP 2014**



**+0.4%**



**+0.4%**

## Spot crude prices

US dollars per barrel	Dubai \$/bbl*	Brent \$/bbl†	Nigerian Forcados \$/bbl	West Texas intermediate \$/bbl‡
1976	11.63	12.80	12.87	12.23
1977	12.38	13.92	14.21	14.22
1978	13.03	14.02	13.65	14.55
1979	29.75	31.61	29.25	25.08
1980	35.69	36.83	36.98	37.96
1981	34.32	35.93	36.18	36.08
1982	31.80	32.97	33.29	33.65
1983	28.78	29.55	29.54	30.30
1984	28.06	28.78	28.14	29.39
1985	27.53	27.56	27.75	27.98
1986	13.10	14.43	14.46	15.10
1987	16.95	18.44	18.39	19.18
1988	13.27	14.92	15.00	15.97
1989	15.62	18.23	18.30	19.68
1990	20.45	23.73	23.85	24.50
1991	16.63	20.00	20.11	21.54
1992	17.17	19.32	19.61	20.57
1993	14.93	16.97	17.41	18.45
1994	14.74	15.82	16.25	17.21
1995	16.10	17.02	17.26	18.42
1996	18.52	20.67	21.16	22.16
1997	18.23	19.09	19.33	20.61
1998	12.21	12.72	12.62	14.39
1999	17.25	17.97	18.00	19.31
2000	26.20	28.50	28.42	30.37
2001	22.81	24.44	24.23	25.93
2002	23.74	25.02	25.04	26.16
2003	26.78	28.83	28.66	31.07
2004	33.64	38.27	38.13	41.49
2005	49.35	54.52	55.69	56.59
2006	61.50	65.14	67.07	66.02
2007	68.19	72.39	74.48	72.20
2008	94.34	97.26	101.43	100.06
2009	61.39	61.67	63.35	61.92
2010	78.06	79.50	81.05	79.45
2011	106.18	111.26	113.65	95.04
2012	109.08	111.67	114.21	94.13
2013	105.47	108.66	111.95	97.99

**53 \$ le 2 fév 2015**  
**39 \$ le 29 déc 2015**



\*1976-1985 Arabian Light, 1986-2013 Dubai dated.

†1976-1983 Forties, 1984-2013 Brent dated.

‡1976-1983 Posted WTI prices, 1984-2013 Spot WTI (Cushing) prices.

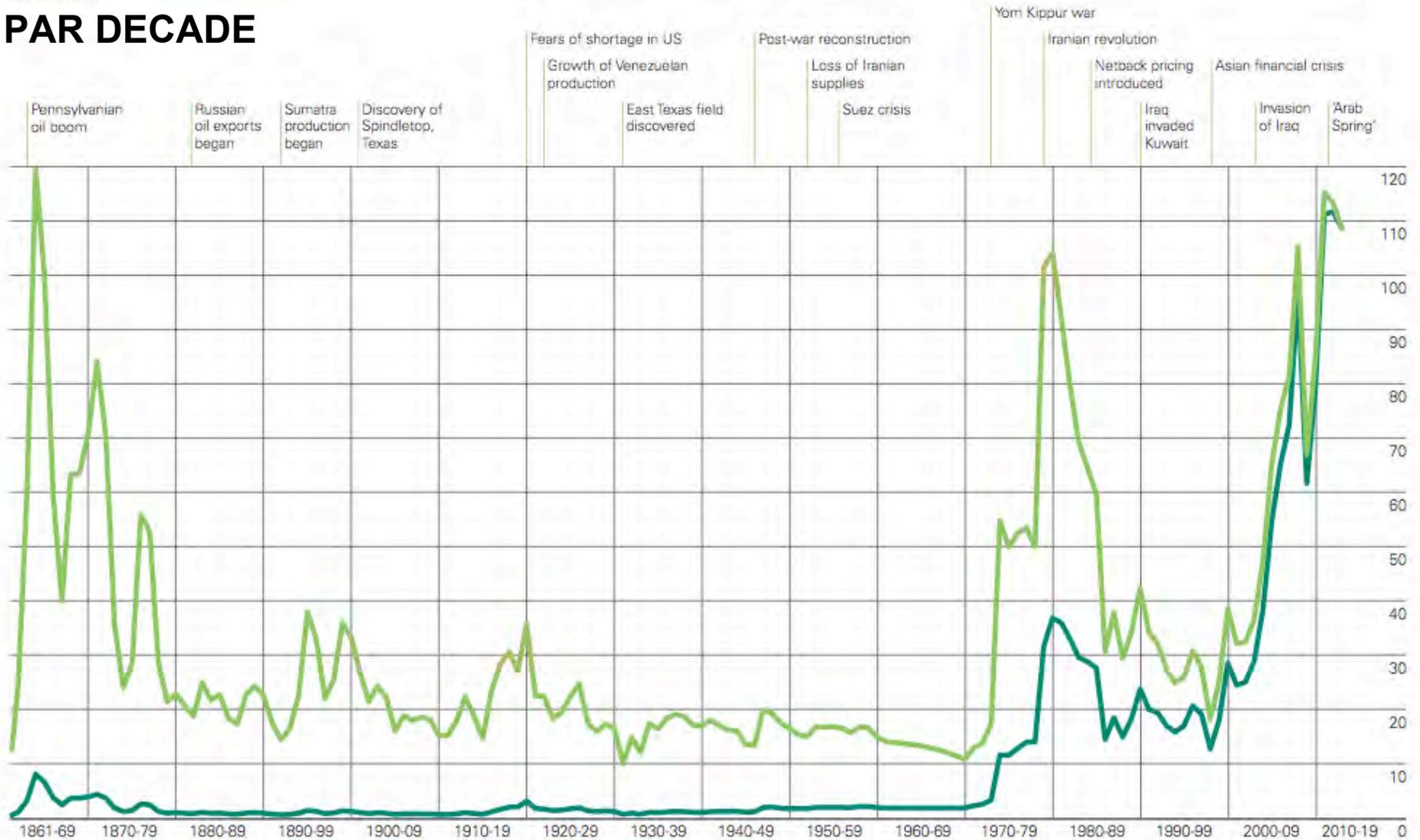
Source: Platts.

# Crude oil prices 1861-2013

US dollars per barrel

World events

## PAR DECADE



■ \$ 2013

■ \$ money of the day

1861-1944 US average.

1945-1983 Arabian Light posted at Ras Tanura.

1984-2013 Brent dated.

*in BP 2014*

# GÉOPOLITIQUE 2016

## Pétrole : l'Arabie saoudite joue à quitte ou double

Deuxier d'actualité  
par Raphaël Moulières

Le cours de baril de pétrole continue sa dégringolade spectaculaire.

L'Arabie saoudite, l'un des rares pays à pouvoir enrayer cette chute, s'entête dans une stratégie risquée.

Avec le retour de l'Iran sur les marchés, l'or noir devrait rester à très bas prix en 2016.

### Le pétrole va continuer à un prix plancher malgré les tensions au Moyen-Orient

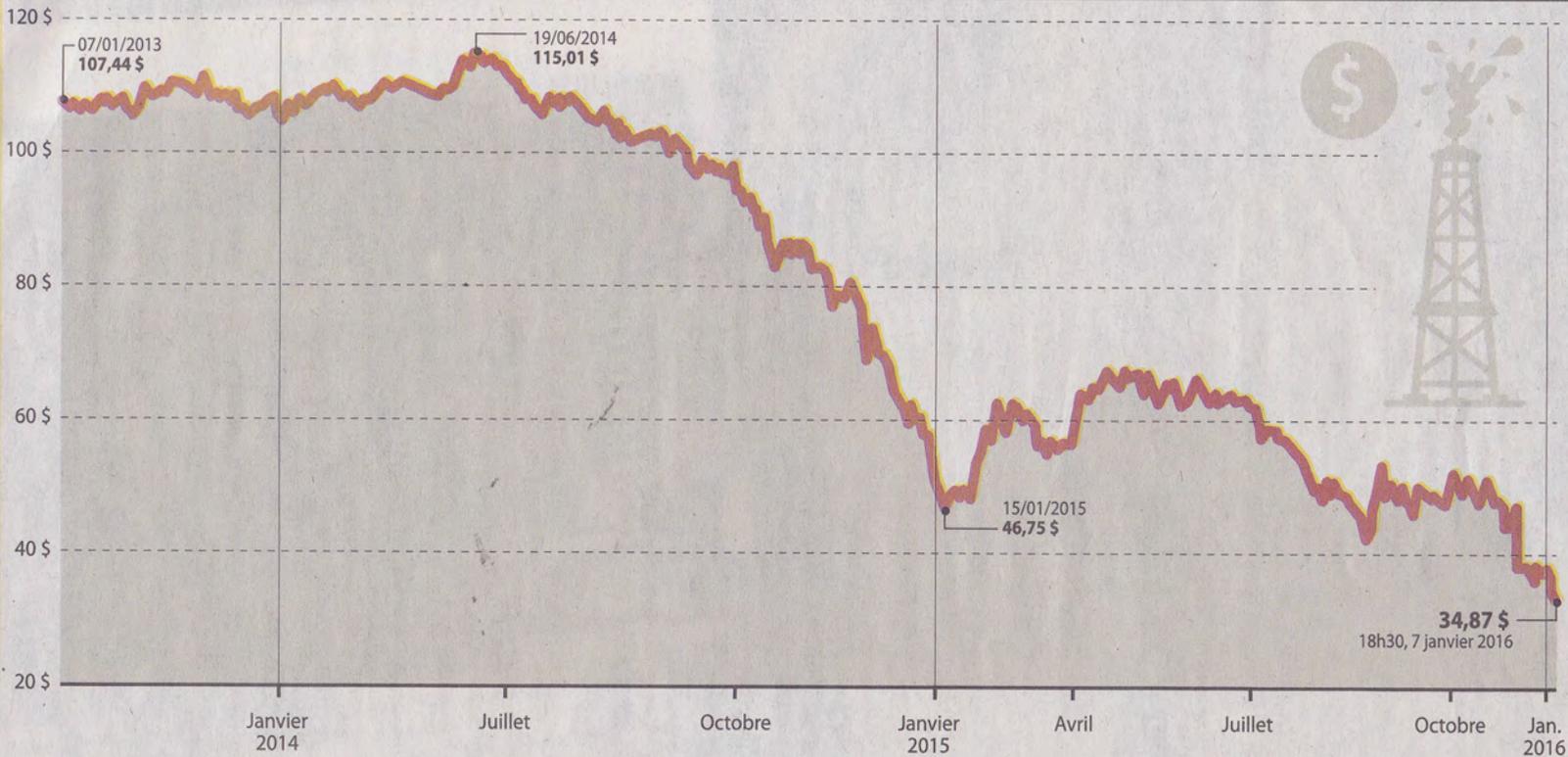
**O**ù va se terminer la chute ? Le cours du baril de pétrole s'est jamais élevé aussi haut depuis plus de deux ans. Mais le cours du Brent, la référence européenne, a été chassé à 34,02 dollars. La chute est spectaculaire puisque, à l'été 2014, ce baril planchait

à 115 dollars et était considéré comme le meilleur des mondes. Mais le cours du Brent, la référence européenne, a été chassé à 34,02 dollars. La chute est spectaculaire puisque, à l'été 2014, ce baril planchait

**34,02**  
DEPUIS 2004

productions de pétrole "non conventionnelles" américaines et saide démentir les analystes américains. Et cette guerre économique, ce processus ne sera l'arrêt du baril, s'il n'est pas flétri, selon Pierre Tordjman, directeur de Pétrostratégies qui table sur un pétrole à des prix toujours sous les 40 dollars en 2016. "C'est la seule issue possible", dit-il.

Cours du baril de Brent (à Londres) depuis deux ans



# Population - Besoins en Energie depuis 2005 ....



**ENERGIE PRIMAIRE**  
combustibles fossiles

80% ou +...

**PRODUCTION ELECTRICITE**  
combustibles fossiles

65% [charbon 40%]

Hydraulique 16% Nucléaire 15%

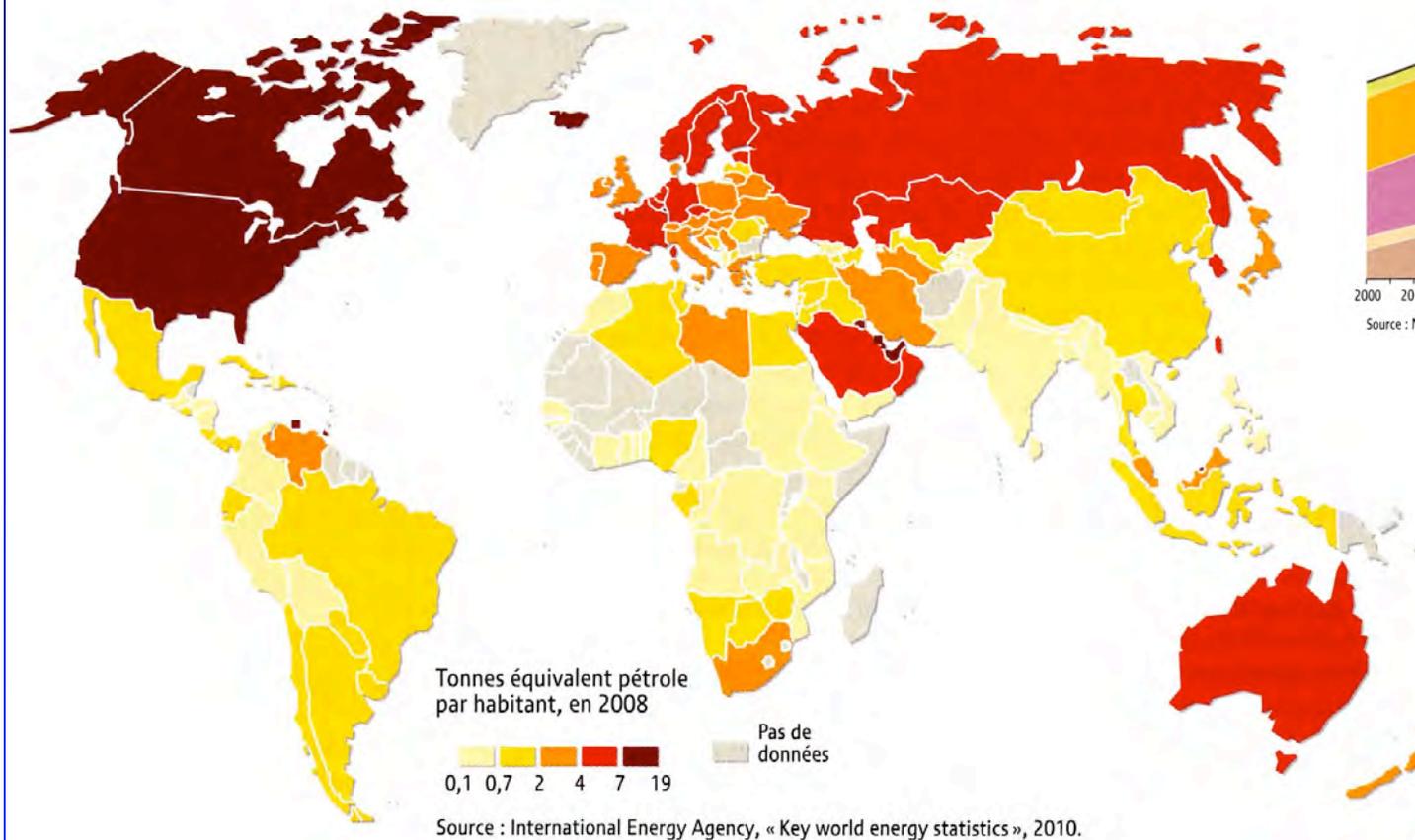


*Nb. en Chine, il se construit 2 centrales au charbon/semaine*

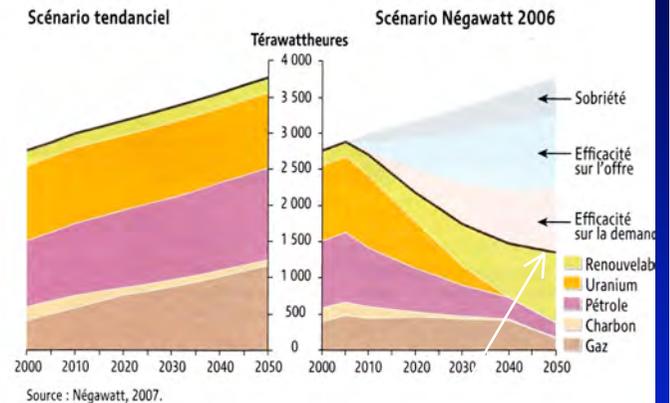
*Nb: aux USA, 640 centrales thermiques au charbon, 140 sont prévues d'ici peu*

# Aujourd'hui : pas de politique cohérente de l'utilisation de l'énergie...

## Consommation d'énergie primaire par habitant



### Evolution des ressources en énergies primaires entre le scénario tendanciel et le scénario Négawatt



> 50%?

2010 : +5,6%

(très élevé! max depuis 1973!

• pr 2009 : Chine +11,2%

Belg-Lux +6,1%; France +3,4%  
USA +3,7%)

• pr au Monde : Chine 20,3%

Bel-Lux 0,6% France 2,1%

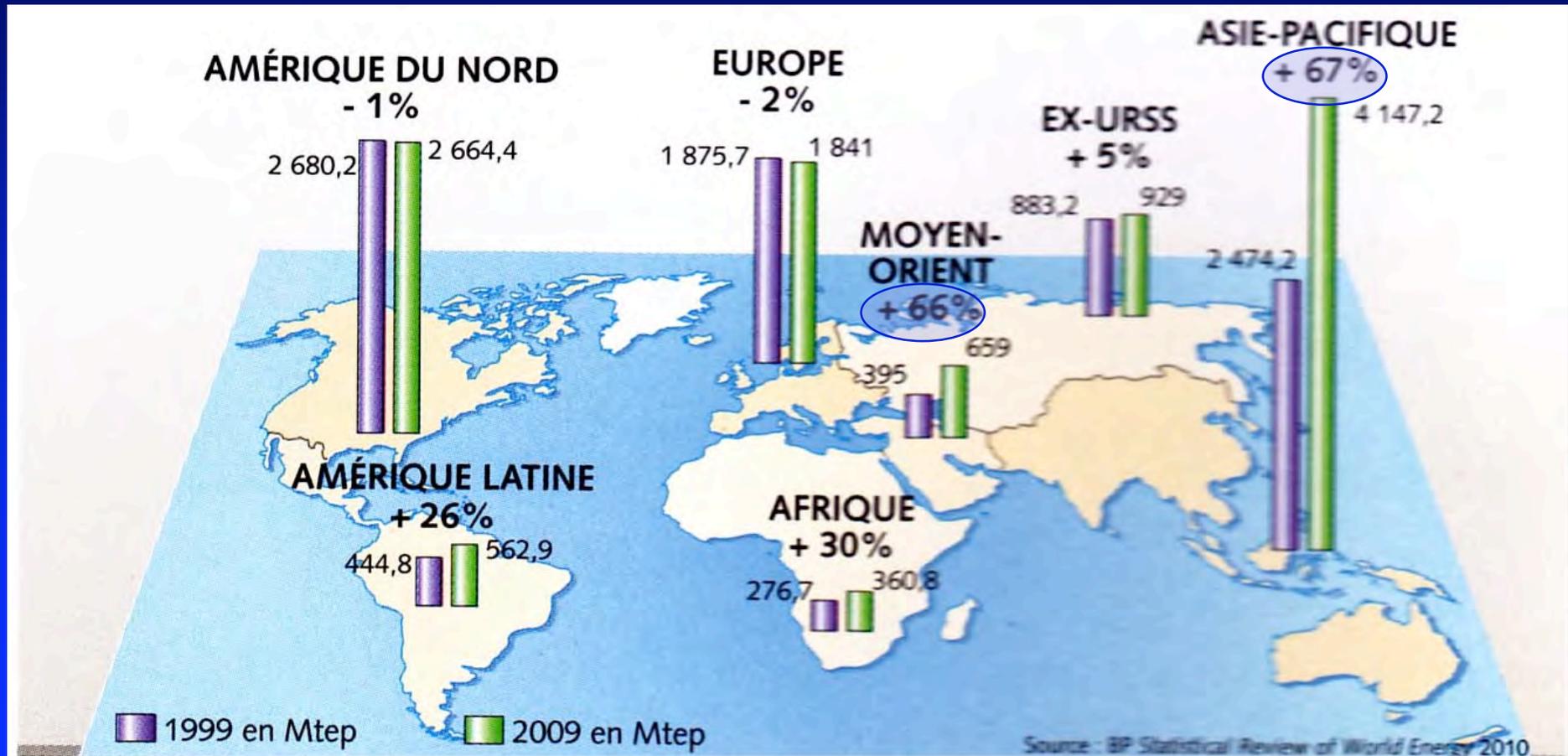
USA 19,0%

BP Statistical Review 2011

# Consommation mondiale d'énergie fossile (pétrole-gaz naturel-charbon)

bilan sur 10 ans 1999-2009

Pays émergents ET démographie (mondiale)

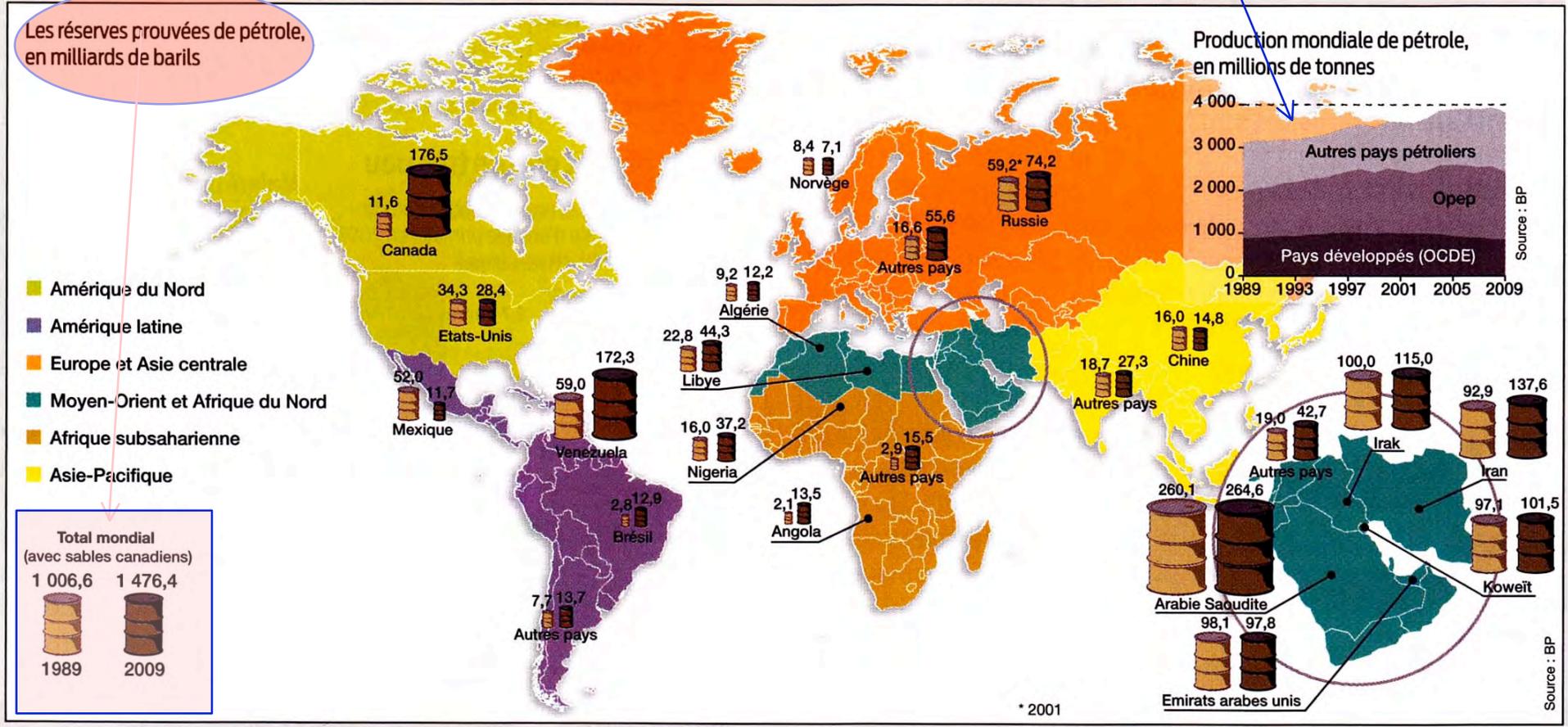


**courantes-contingentes-'à découvrir'**  
**1P-2P-3P**      **C-SC-NC**

2009

≠ réserves

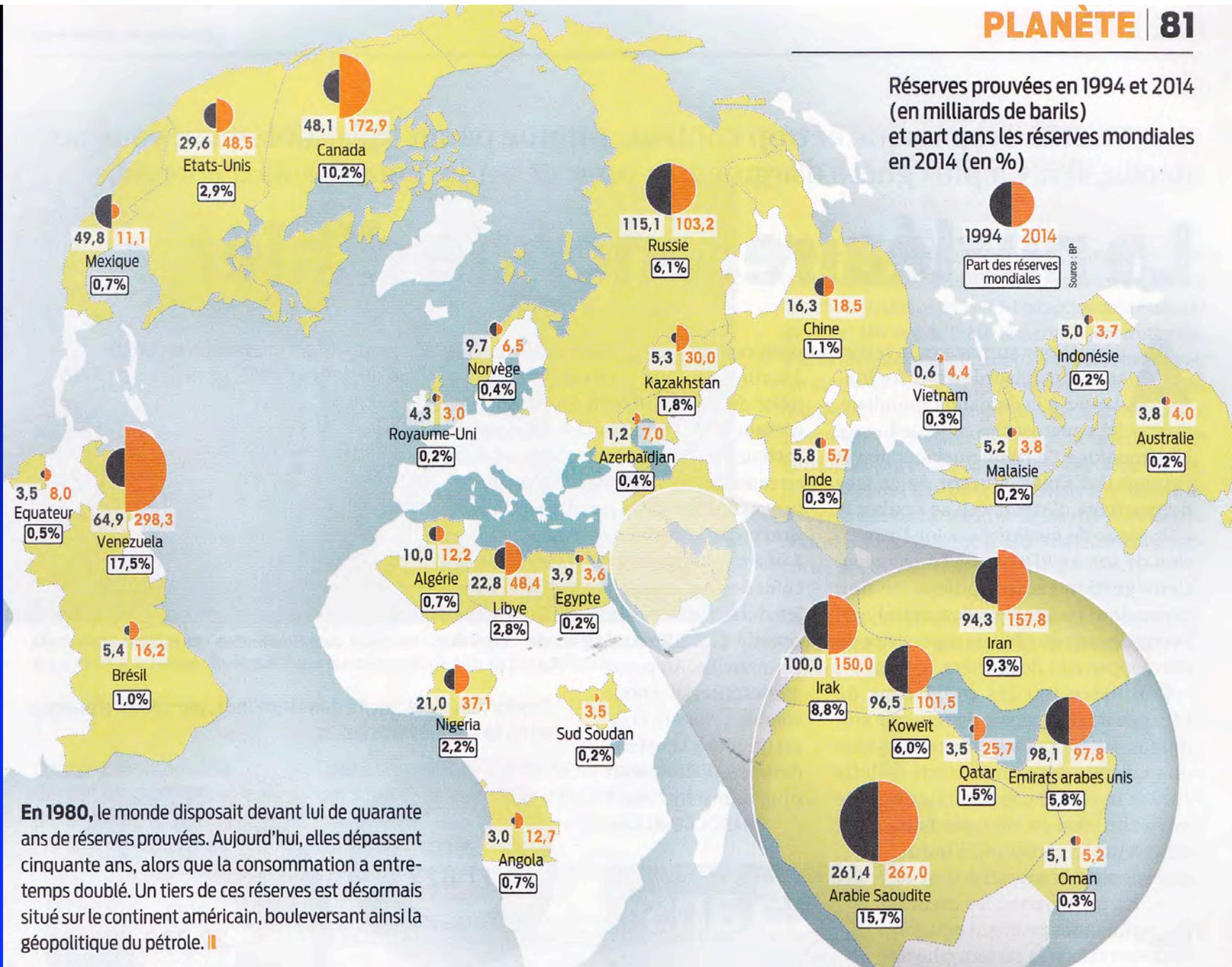
# Le pétrole, bientôt la fin ?



« On n'a pas quitté l'âge de la pierre faute de pierres »

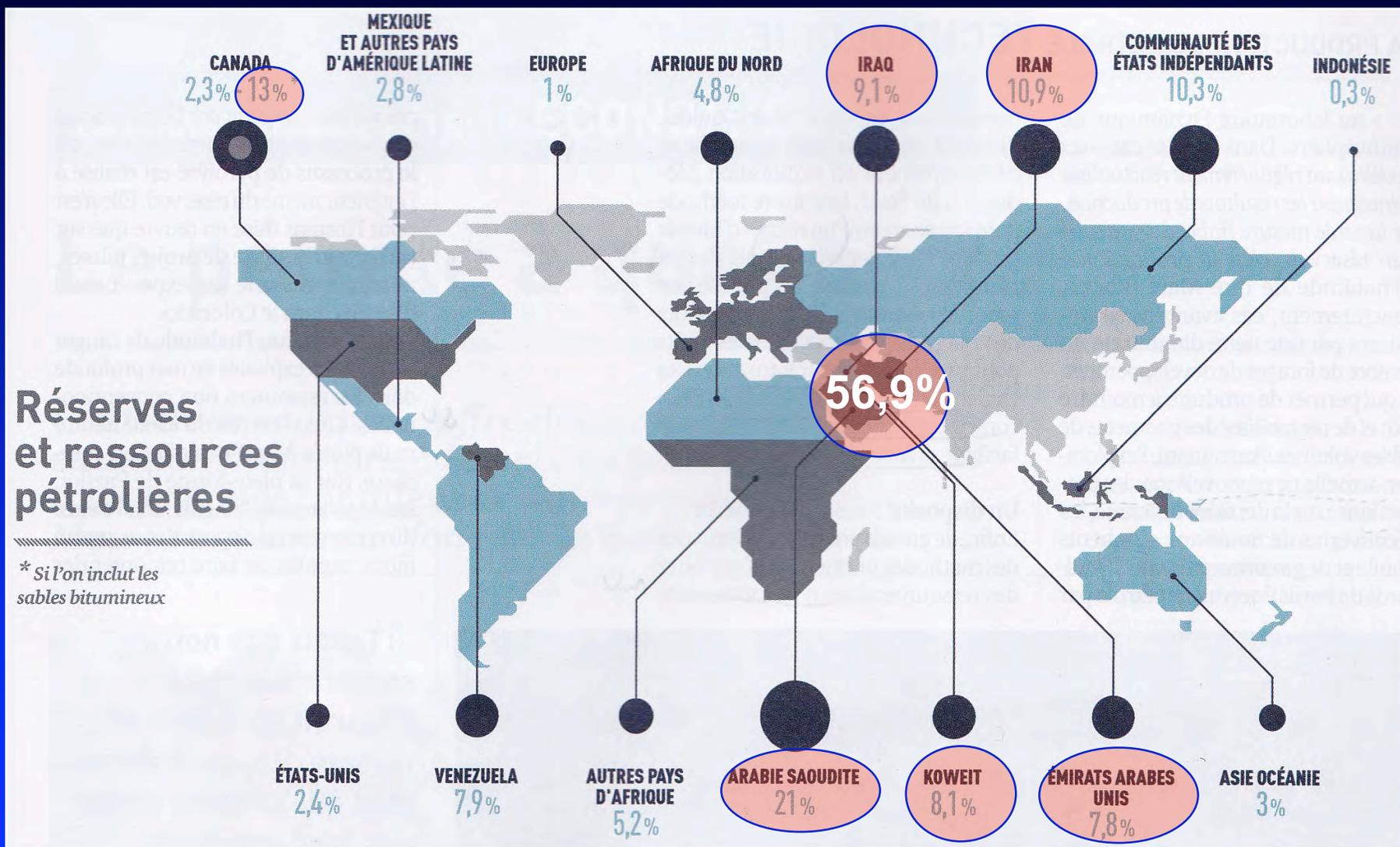
Sheikh Yamani, ancien ministre saoudien du pétrole (co-fondateur OPEP)

Réserves prouvées en 1994 et 2014  
(en milliards de barils)  
et part dans les réserves mondiales  
en 2014 (en %)

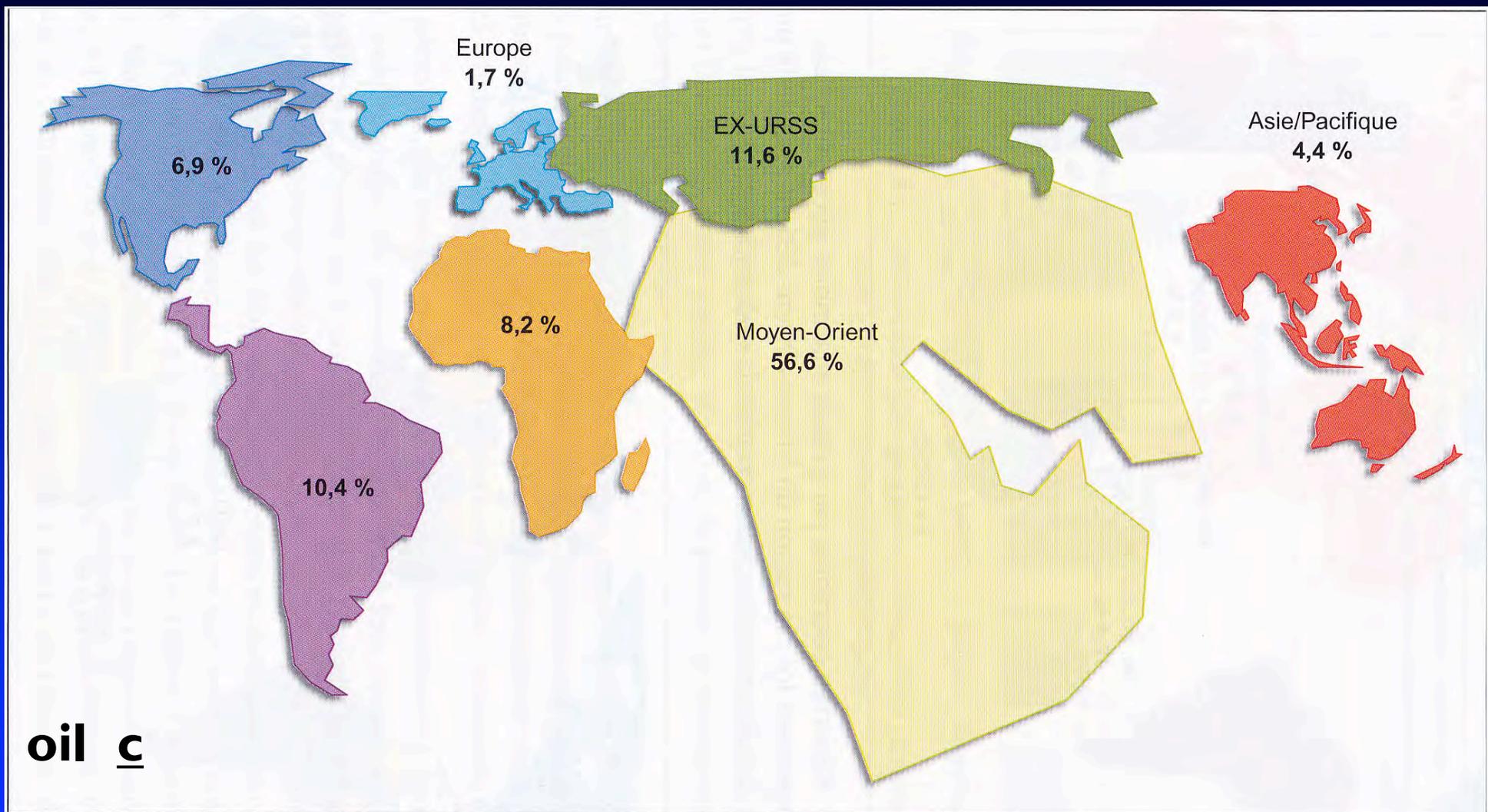


En 1980, le monde disposait devant lui de quarante ans de réserves prouvées. Aujourd'hui, elles dépassent cinquante ans, alors que la consommation a entre-temps doublé. Un tiers de ces réserves est désormais situé sur le continent américain, bouleversant ainsi la géopolitique du pétrole. ||

# IP\_C ou 'courantes' en 2012

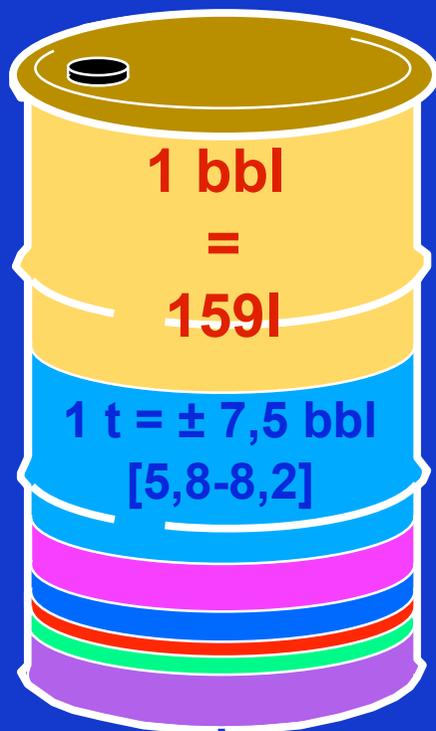


# RESERVES 1P



depuis  
**2013 - ±92,1 M bbl/j**  
(c + GL et Tar sands)

= travail 300 G esclaves pdt 24h



2007 : 85,8 soit 1M bbl/j en PLUS  
dont 0,7Asie (avec 0,3Chine)  
2008: 87,8 Mbbl/j .... jusque juillet 2008  
(finalement 82,7)



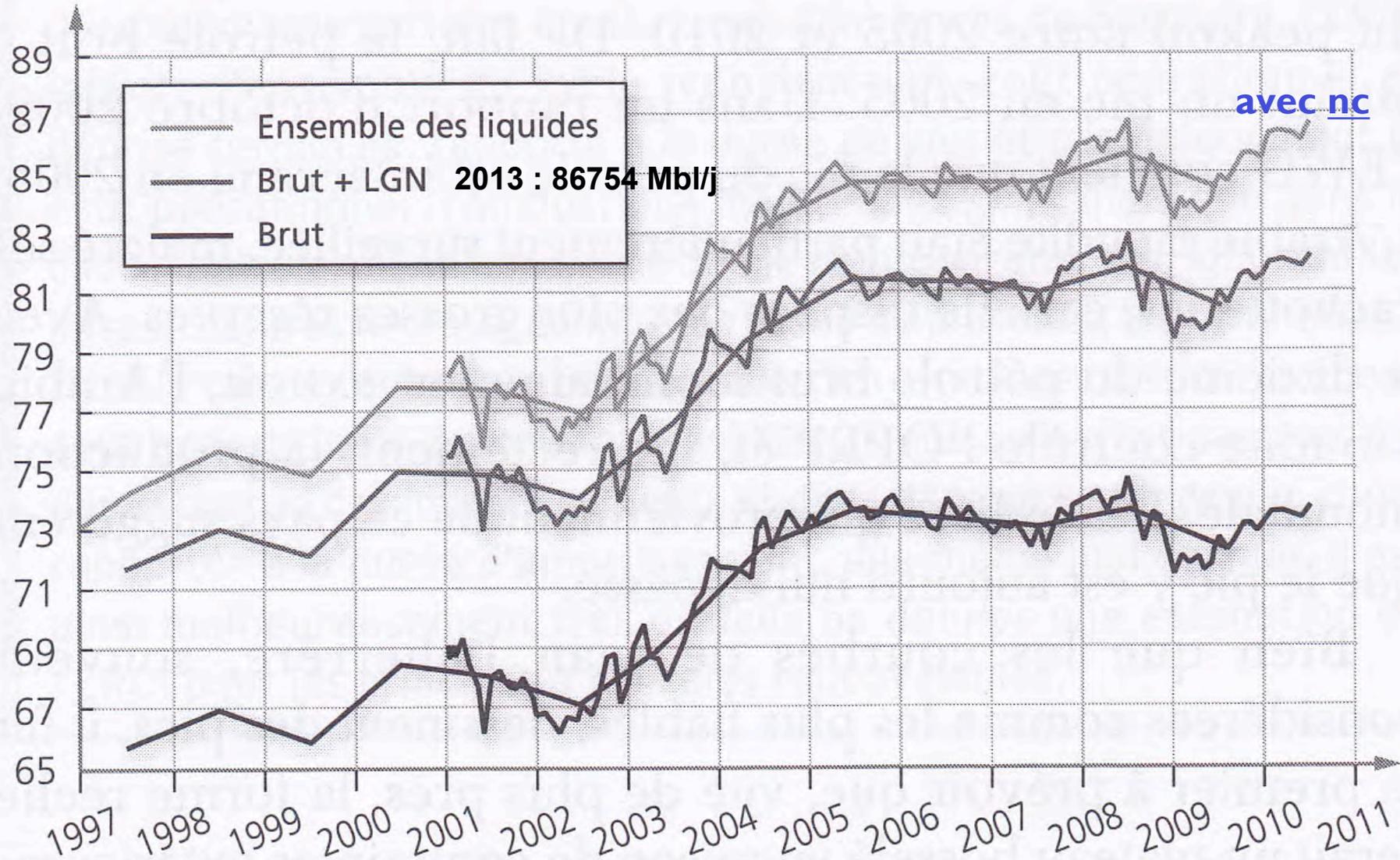
>1000 bbl/sec



soit 5500/j  
ou 550/conf

# Production (Mbarils/jour)

2014 : 92086 Mbl/j



# Population - Besoins en Energie

Au cours de sa vie, chaque Américain né en 2008 consommera...

**730,3 tonnes**  
de pierres, sable  
et graviers

**310 000 litres**  
de pétrole

**256,4 t**  
de charbon

**161 000 m<sup>3</sup>**  
de gaz naturel

**30,7 t**  
d'autres minerais  
et métaux

**29,7 t**  
de ciment

**13,4 t**  
de minerai  
de fer

**12,9 t**  
de sel

**9 t**  
de phosphates

**8,7 t**  
d'argile

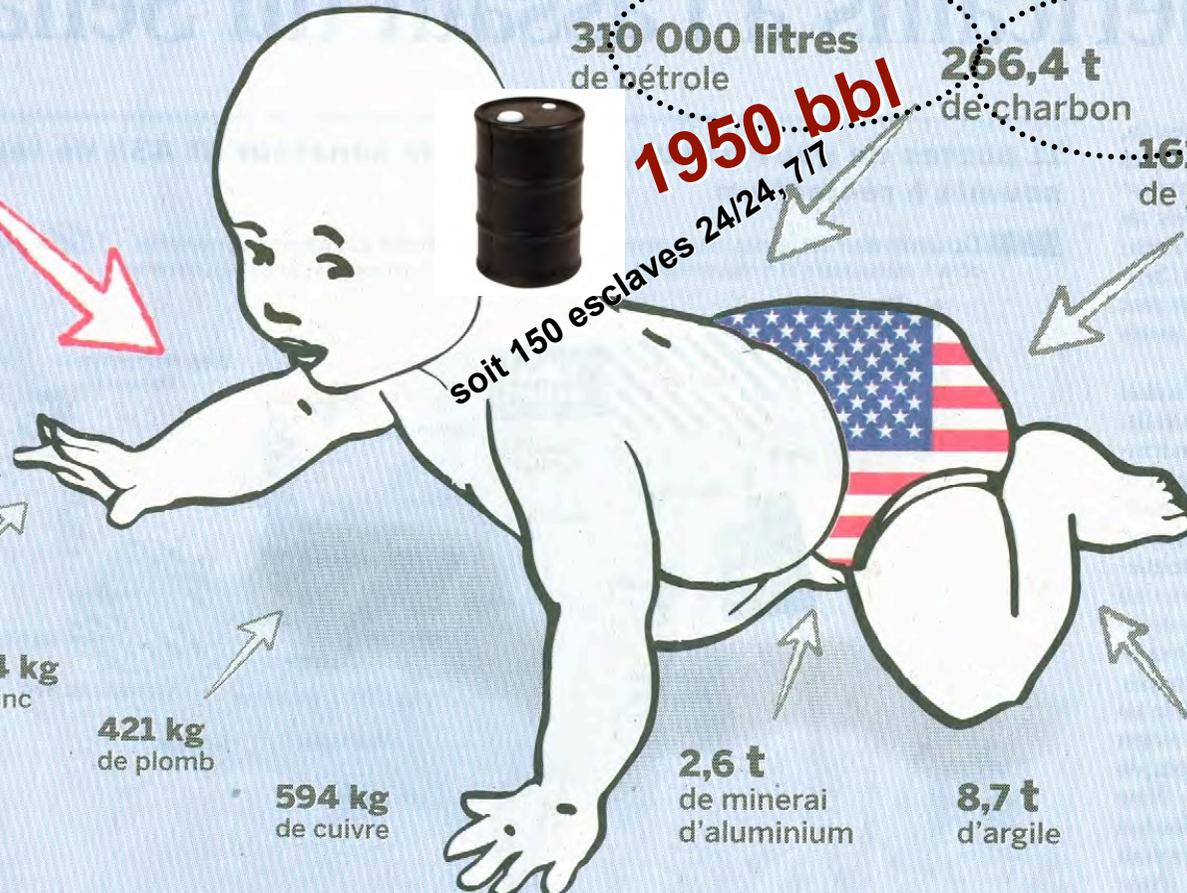
**2,6 t**  
de minerai  
d'aluminium

**594 kg**  
de cuivre

**421 kg**  
de plomb

**304 kg**  
de zinc

**1950 bbl**  
soit 150 esclaves  
24/24, 7/7

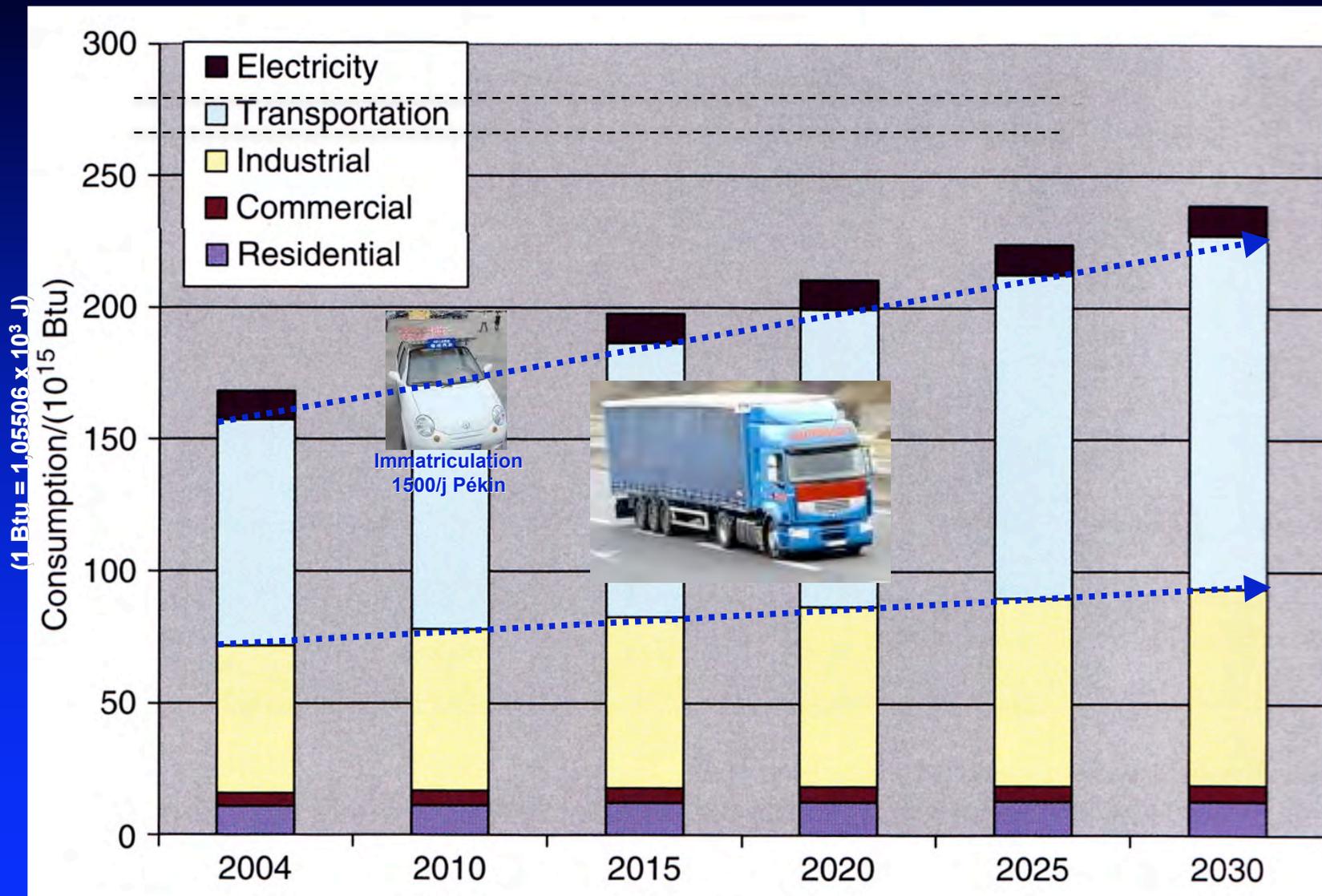


Source : Mineral Information Institute

En 2006, la consommation moyenne primaire annuelle mondiale/habitant **1,7 tep** (valeur basse sans grande signification) 0,024 tep/hab/an ETHIOPIE à 8,6 tep/hab/an USA (**ratio X358**) 4,5 Japon 4 Europe 1,3 Chine 0,4 Inde ....

**En 2009 : 97% du transport dépend du pétrole**

2009: seuls 2% de Chinois possèdent une voiture => 3,5 M voitures à Pékin sont à prévoir (auj 1voiture/minute à Pékin!)



Letcher 2009

En 2009: 476.194 voitures NEUVES ont été immatriculées en Belgique soit 1305/j (= -11% pr 2008) soit ±1voiture/min  
 En 2010: transport en Belgique = 27 millions de litres/jour: soit ± 170 000 bbl/jour (60% pour l'Etat)

2009

# 1/3 de l'E mondiale = transport



700 millions auj



X4

1,2 milliards 2020

2,9 milliards 2050

3\$ bbl avant 1973  
 18,50\$ 1985-2000  
 41,60\$ 2000-2007  
 98,50\$ 2008

La demande pétrole c = +1,1%/an  
Déclin production? 5%





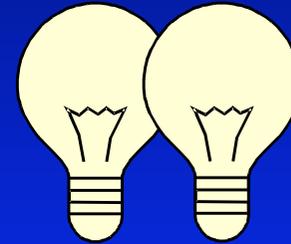
# LES SOURCES D'ENERGIES

## VECTEURS D'ENERGIE

- ENERGIES 'SECONDAIRES' OU DERIVEES, PRODUITES A PARTIR DES SOURCES PRIMAIRES

◇ L'électricité

◇◇ L'hydrogène



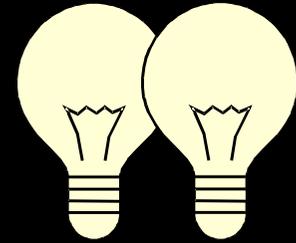
**Elles permettent un transport et une utilisation plus facile que celles des sources primaires**



# LES SOURCES D'ÉNERGIES

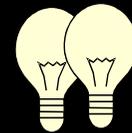
## Energie nucléaire **TRES** concentrée

- par fission 1g  $U^{235}$   $\implies$  22 000 kWh
- par fusion 1g H (Soleil)  $\implies$  180 000 kWh



## Energies 'moins' concentrées: pour $\implies$ 1kWh

- combustion  $\pm$  0,1kg pétrole, charbon, gaz
- condensation 1,6 kg vapeur d'eau
- captage E solaire sur une surface 1m<sup>2</sup>



## Energies 'pas' concentrées: pour $\implies$ 1kWh

- chute dans usine hydraulique de 3t d'eau d'une h de 100m
- éolienne: 20 000 m<sup>3</sup> d'air à 60 km/h





AVANT DE  
COMMENCER.



**DEFINITION GEOPOLITIQUE = FLOU...**

- ‘Robert 1965’: géopolitique est l’étude des rapports entre les données naturelles de la géographie et la politique des Etats
- ‘Grand Larousse 1962 : c’est l’étude des rapports qui unissent les Etats, leurs politiques et les lois de la nature, ces dernières déterminant les autres

**Révolution industrielle (18<sup>è</sup>s)-20<sup>è</sup> et 21<sup>è</sup>s = ENERGIE**

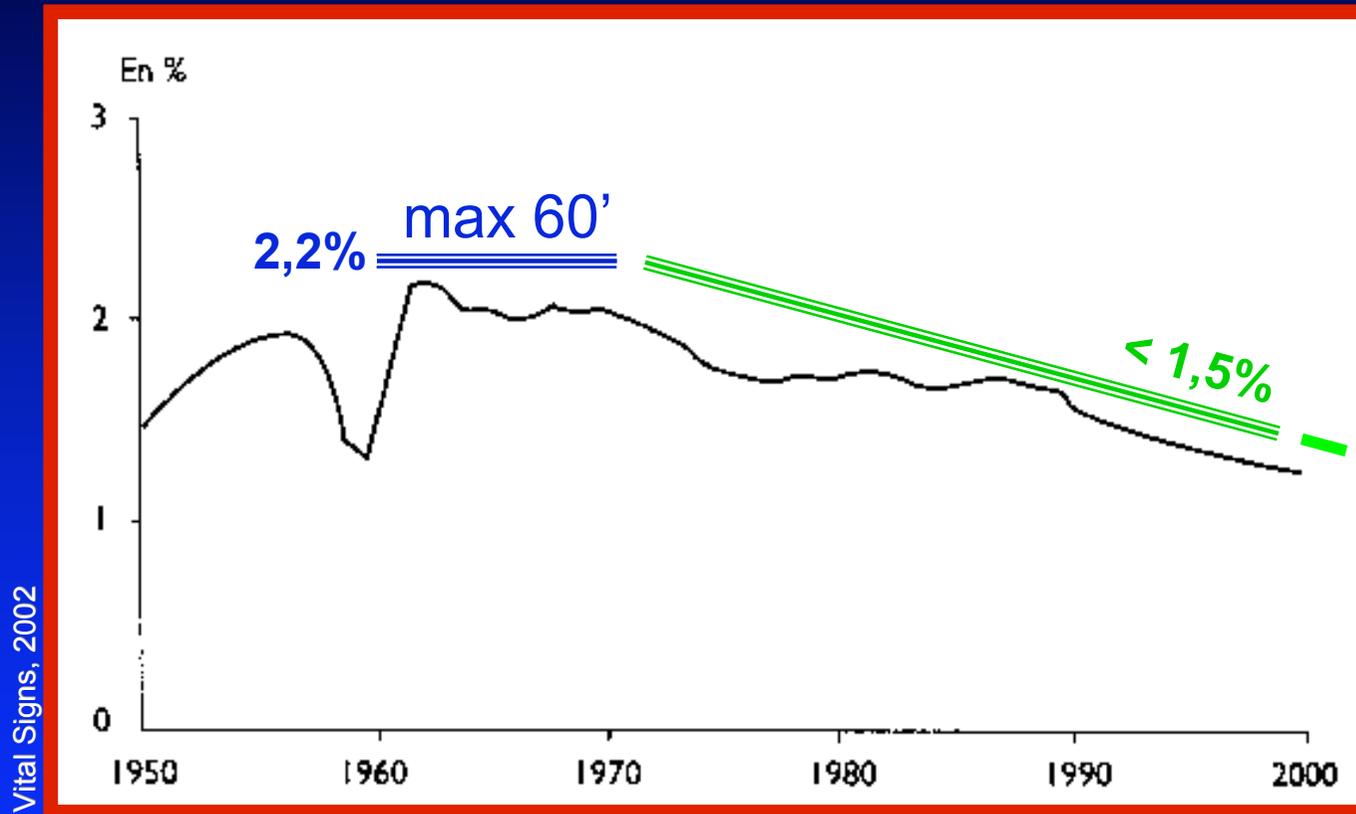
**càd science + technologie + industrie**

**21<sup>è</sup>s = INFORMATION?**

**càd informatique + cybernétique**

# Population- Besoins en Energie

## Variation du taux d'accroissement annuel de la population mondiale

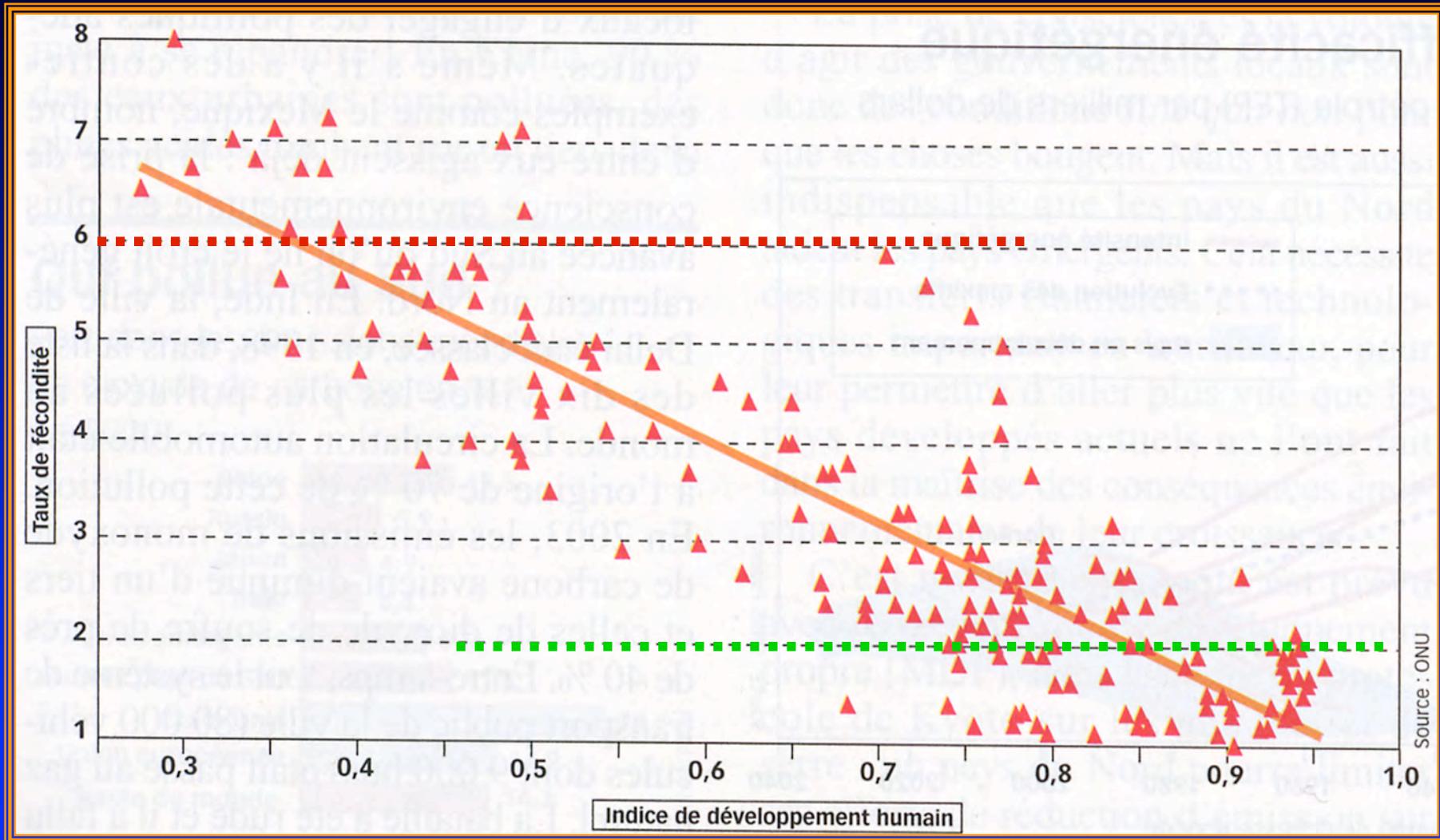


Stabilisation  
milieu XXI<sup>e</sup>  
± 8 à 10 milliards

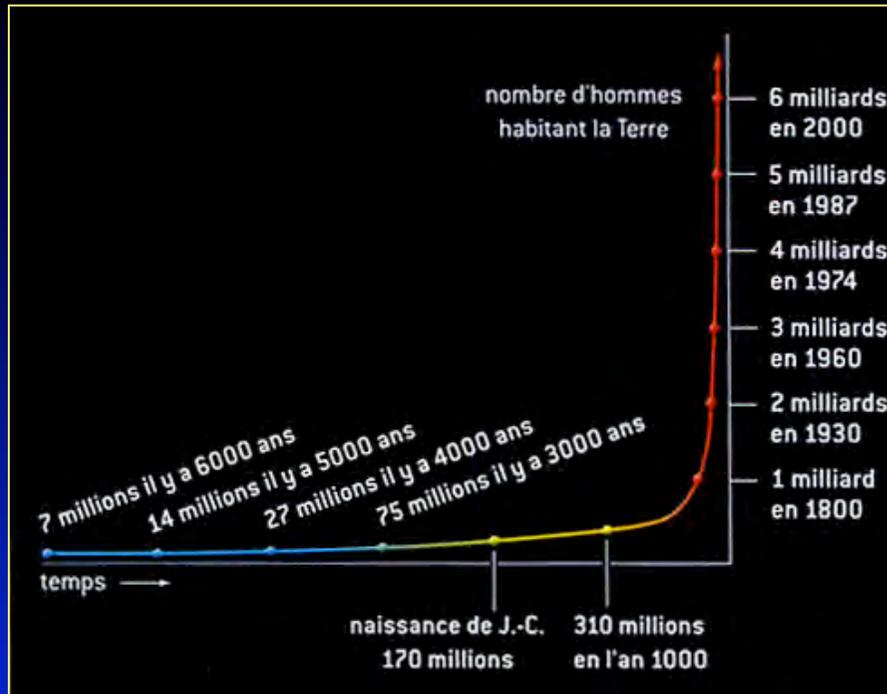
2008 : 350 000 naissances-160 000 décès/j  
= 190 000 humains/j

en 2011  
= 7 milliards

# C'est le développement qui 'freine' la démographie

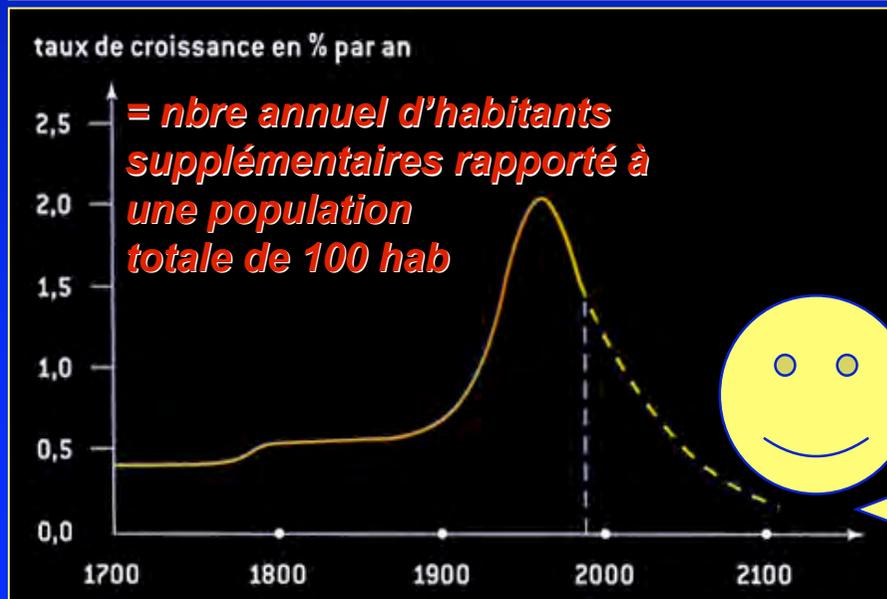


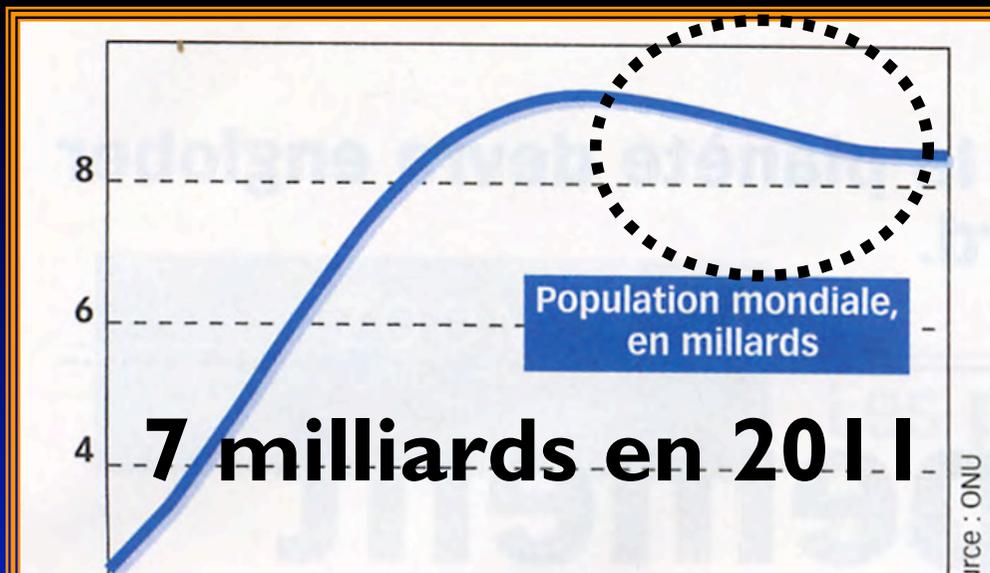
**Développement**  
= éducation, âge moyen de mariage, taux d'urbanisation ...



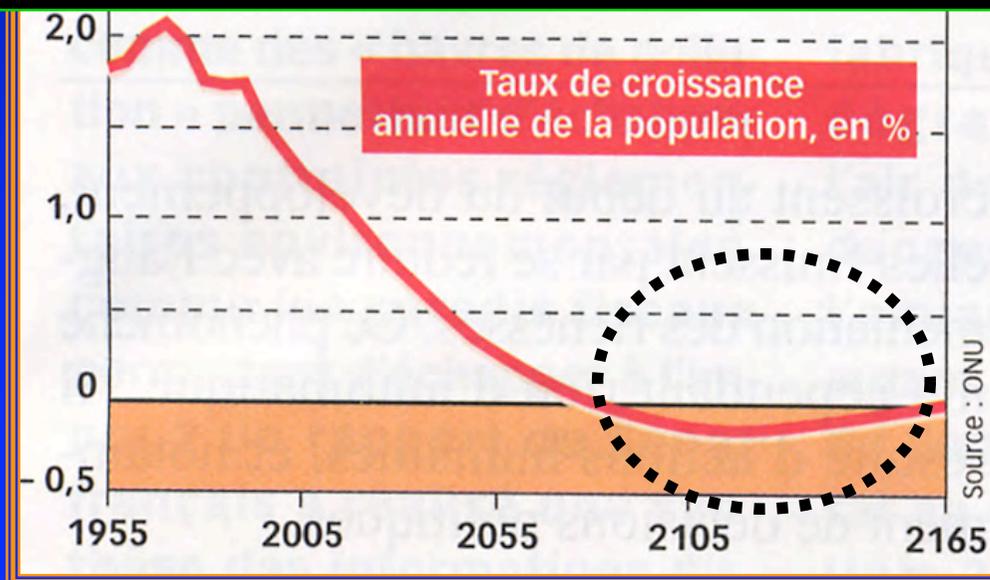
**Courbe symétrique!**  
= *décollage lent*  
*envolée (actuelle) rapide*

**Il a fallu >2 Ma à l'humanité pour atteindre 5 milliards d'individus**  
**... et il 'suffira' de 40 ans pour passer de 5 à 10 milliards [au taux actuel de croissance]**





Actuellement: croissance mondiale: 2 à 2,25%



# CASSE-TÊTE



# ENERGETIQUE



# Population- Besoins en Energie

## Pourquoi toujours le pétrole?

1 bbl = équivalent E de 25.000h travail humain,  
ou 10.000h en tenant compte des meilleurs engins  
convertisseurs de carburant en travail mécanique

Pétrole+Gaz Naturel+Charbon = auj 80% ou > de la  
consommation d'E primaire du monde = travail QUOTIDIEN de  
> 300 milliards d'êtres humains, 'comme si chaque  
personne sur Terre avait à sa disposition 50 esclaves...'  
(certains plus, d'autres moins...)

**... Le pétrole 'reste bon marché', il est très énergétique sous un  
faible volume, et aussi très économique lorsque associé à une  
machine...**



**Aucune source d'ER ne peut A ELLE SEULE  
remplacer le pétrole à court (et moyen?) terme**  
> les partisans du nucléaire espèrent profiter  
de la lenteur du développement des ER et des  
difficultés croissantes des EF pour 'se relancer'  
[aussi sans effet de serre, mais avec déchets...]

**en attendant = casse-tête énergétique**



**Une alternative TRES SERIEUSE  
= SOBRIETE = Réduire la consommation d'E  
===> association NEGAWATT [www.negawatt.org](http://www.negawatt.org)  
On pourrait diminuer jusqu'à 70% la consommation d'E  
par rapport aux tendances actuelles, dans nos pays!**



**en attendant = casse-tête énergétique**  
**3 à 4 %**

**une alternative**

**RES SERIEUSE**



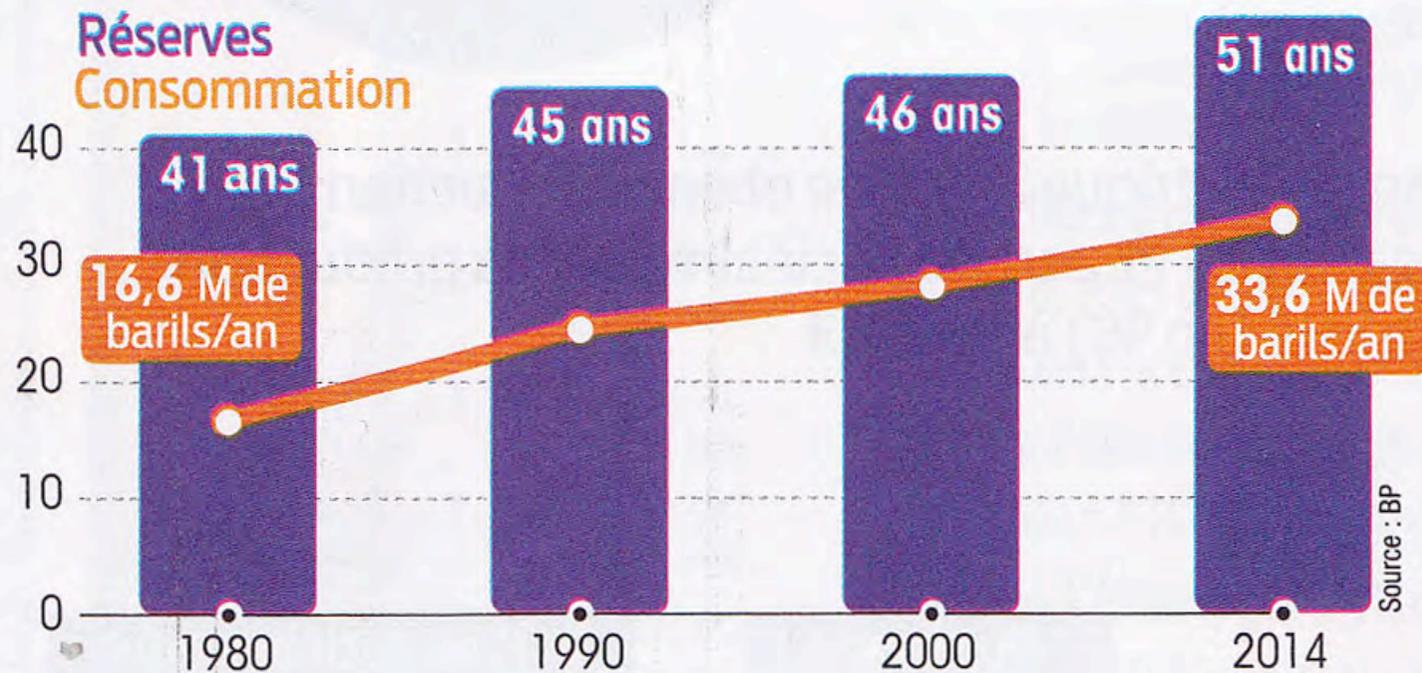
**= SOBRIETE**

**(20) à 25 %**

**ou 1/4 production mondiale**

**En 2008, 2009 les USA importent 60% de leur pétrole....**

## Consommation mondiale de pétrole (en milliards de barils/an) et réserves prouvées (en nombre d'années de production)

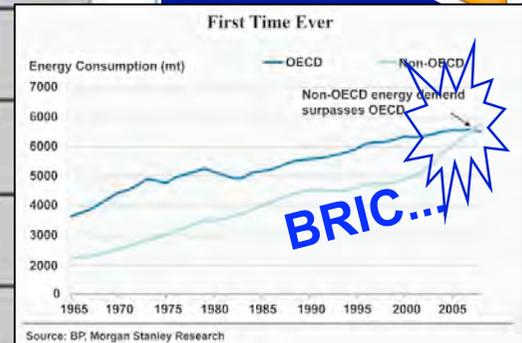
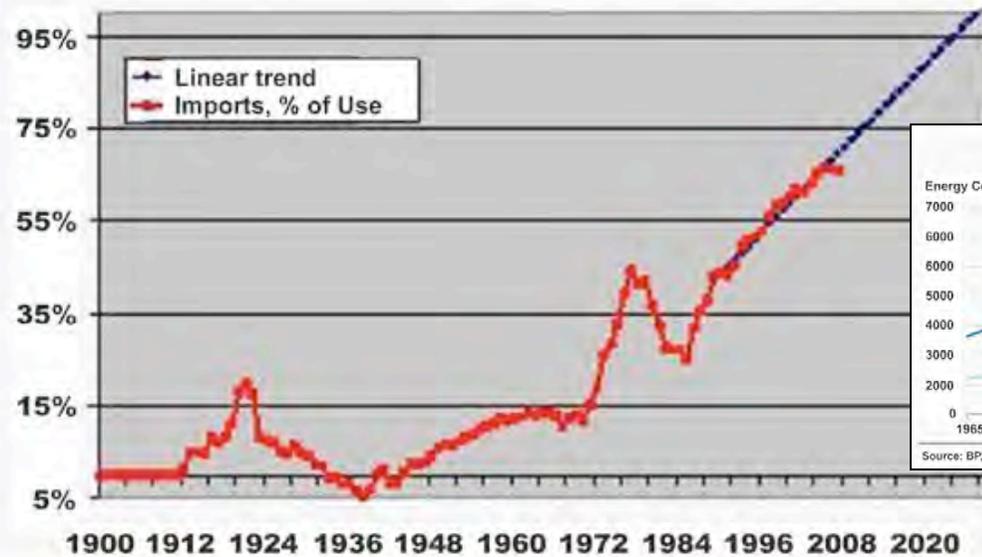


# Le TOP10 des consommateurs de pétrole en 2010

2010 Mbl/d pr 2009

USA	19,1	+2,0%
Chine+HK	9,4	+10,4%
Japon	4,5	+1,5%
Inde	3,3	+2,9%
Russie	3,2	+9,2%
Arabie S	2,8	+7,1%
Brésil	2,6	+9,3%
Allemagne	2,4	+1,1%
Corée Sud	2,4	+2,5%
Canada	2,3	+5,4%
	48,8	

U.S. Crude Oil Imports, Percent of Use, 1900-2007 & Linear Trend to 2028



Même type de graphique pour la Chine depuis son décollage économique

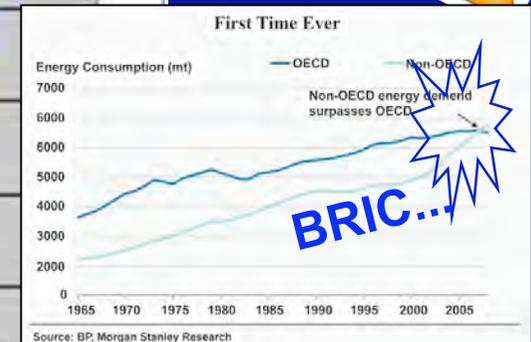
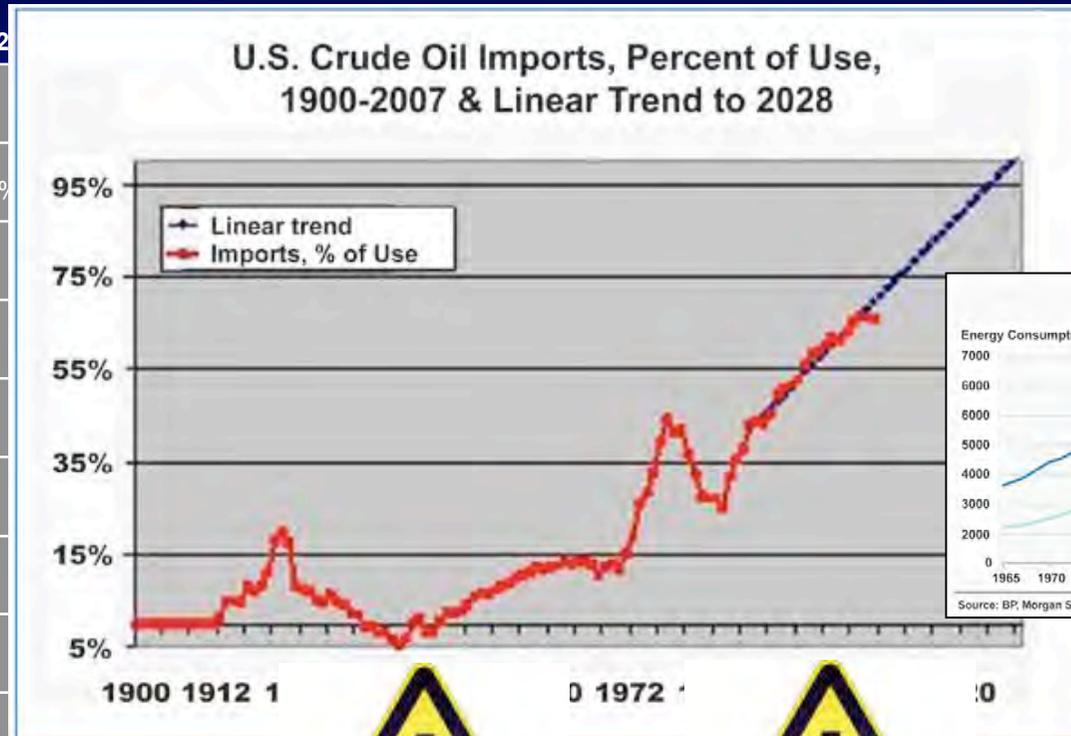
$\Sigma \pm 87,3$  +3,1%

En 2009 la Chine est devenue le premier consommateur mondial d'E primaire avec 2,2 Gtep devant les Etats-Unis (2,1Gtep)

# Le TOP10 des consommateurs de pétrole en 2013

2013 Mbl/d pr 2012

USA	18,9	+2,0%
Chine+HK	11,1	+3,84%
Japon	4,6	-3,8%
Inde	3,7	+1,2%
Russie	3,3	+3,1%
Arabie S	3,1	+3,1%
Brésil	3,0	+5,8%
Allemagne	2,4	+0,9%
Corée Sud	2,5	id
Canada	2,4	-0,5%
	55,0	



$\Sigma \pm 91,3$  +1,4%

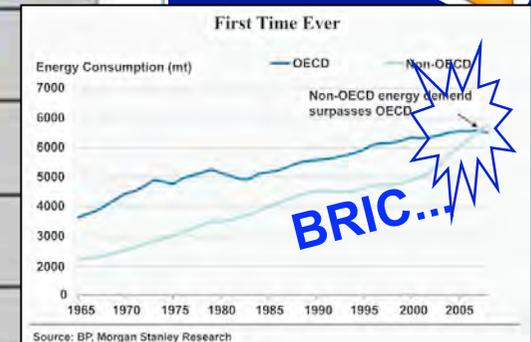
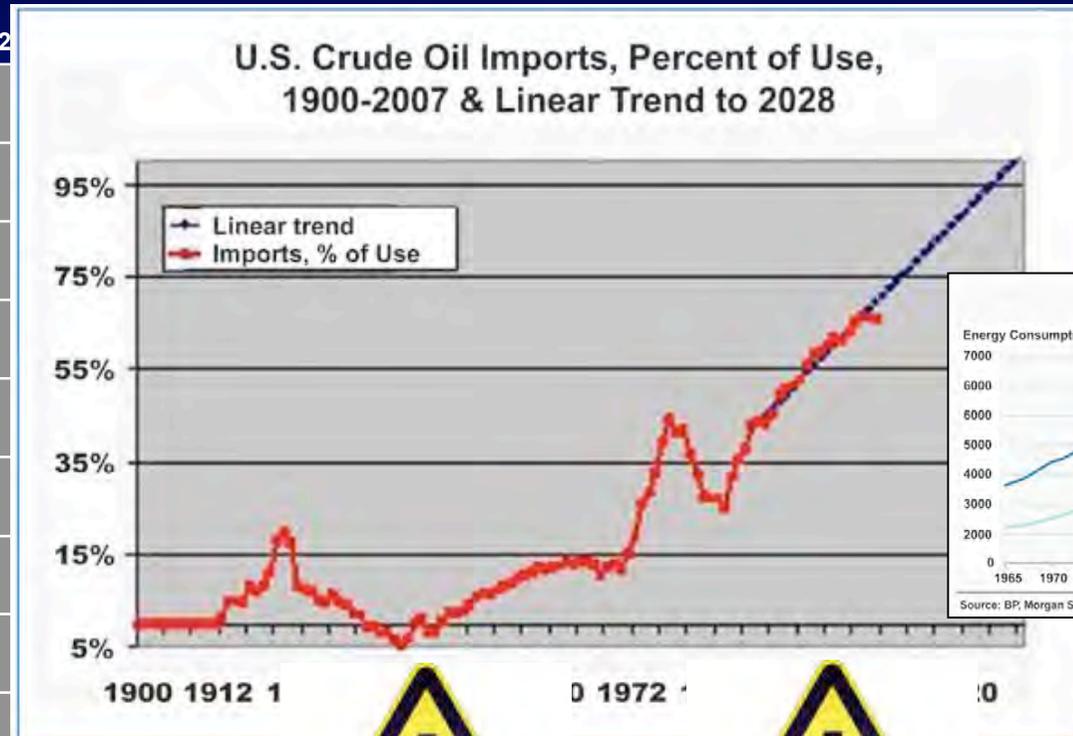
## 2012 : GAZ DE SCHISTE.....

# Le TOP10 des consommateurs de pétrole en 2014

2014 Mbl/d pr 2012

USA	19,0	+0,5%
Chine+HK	11,4	+3%
Japon	4,3	-5,2%
Inde	3,8	+3%
Russie	3,2	+0,9%
Arabie S	3,2	+7,3%
Brésil	3,2	+5,4%
Allemagne	2,4	id
Corée Sud	2,5	id
Canada	2,4	-0,5%
	55,4	

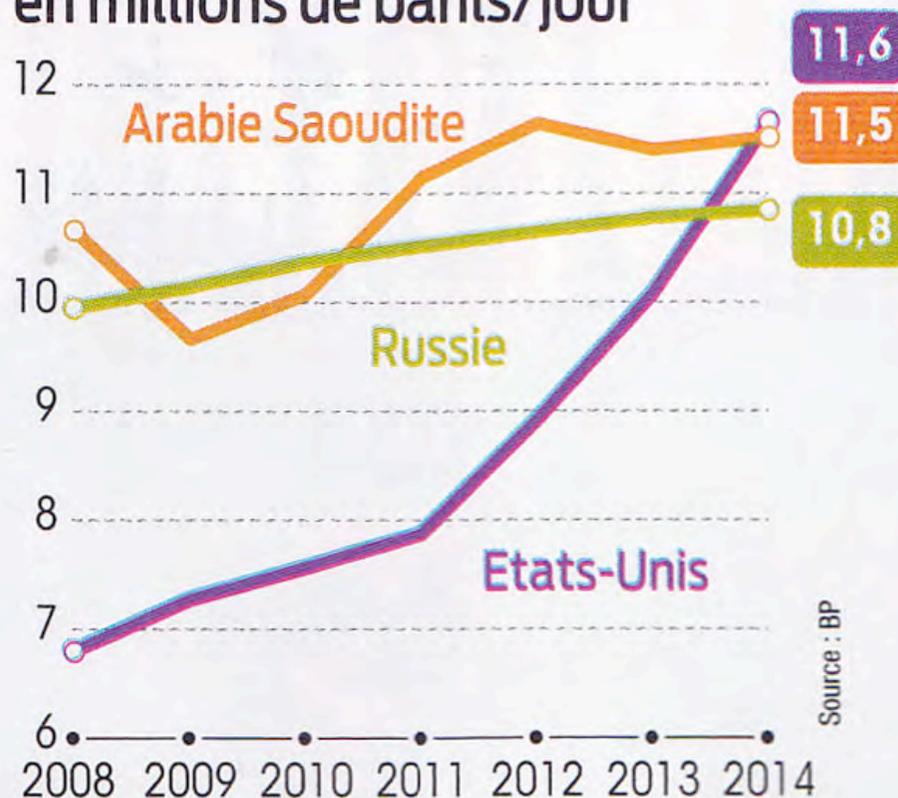
$\Sigma \pm 92,13$  +0.8



## 2012 : GAZ DE SCHISTE.....

# Les Etats-Unis, désormais n° 1 mondial

Production de pétrole,  
en millions de barils/jour



**L'explosion des prix des hydrocarbures** durant les années 2000 a poussé les Etats-Unis à exploiter leur pétrole de schiste. Cette ruée vers l'or noir a fait de ce pays le premier producteur mondial de brut, passé en 2014 devant l'Arabie Saoudite et la Russie. ||

# En attendant = casse-tête énergétique

## Population = Besoins en Energie

• Auj: nous consommons 3 à 4 bbl [1] pétrole pour 1 [5, 1960] découverts

- En dollars 2004 et de 1869 à 2004 prix mondial pétrole = 19,41\$ .... càd 'bon marché' .... (médiane = 15,17\$)
- en 2004: 3,5 milliards d'asiatiques ont consommé 20 millions bbl/j et les américains [293. 10<sup>6</sup> hab] 22 millions.

**En 2004: 1Américain 25bbl/an, 1Japonais 18, 1Européen 12, 1Terrien moyen 5, 1Chinois1,5 et 1Indien 1bbl/j**

1 bbl = 1600 kWh

31 pays  
16% Electr Mond



← il faut 2000 réacteurs nucléaires 'actuels' pour remplacer 1/4 production actuelle de pétrole

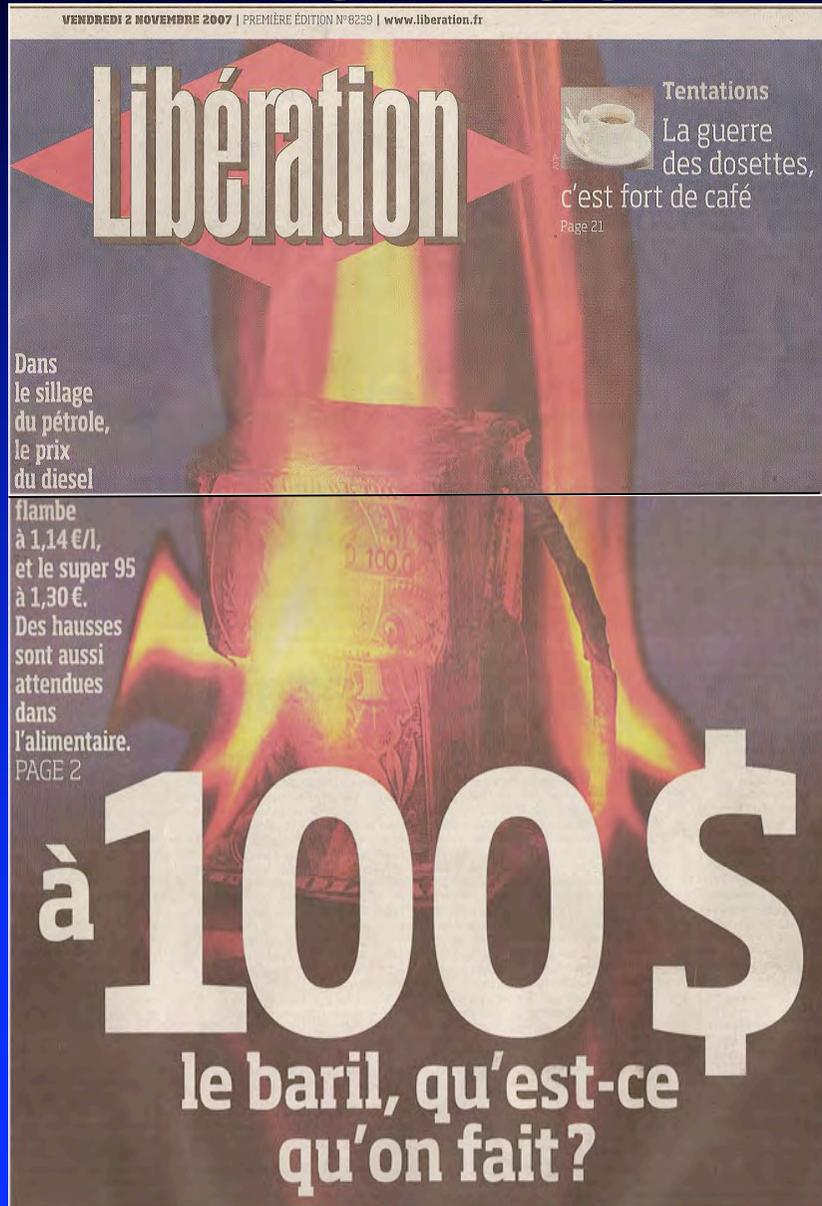
440 réacteurs dans le monde en 2008 (105 USA, 59 en France, 55 au Japon, 31 en Russie, 20 en Corée du Sud) Belgique : 11 arrêtés et 7 en fonctionnement

En 2006: 20 centr en constr [2Eur, 4Chine, 6Japon, 8Inde]

En Chine 2007: 15+5 ==> X2 en 2020

En 2009 (Monde): 200 centrales programmées ou proposées pour 2020

# 2 nov 2007



- 7 novembre 2007 : 98 \$ (NY, Singapour)**
- déplétion (diminution production)
  - demande asiatique
  - tension géopolitique (Turquie/Irak)
  - spéculation

...

**PAS DE CATASTROPHE CLIMATIQUE,  
NI DE GUERRE(S) ...**

**« grain de sable ».... >100\$**  
[seuil symbolique]  
... 200 \$, .... 300 \$

*Que faire? ° sobriété ° transport....  
En l'absence d'une vraie politique:*

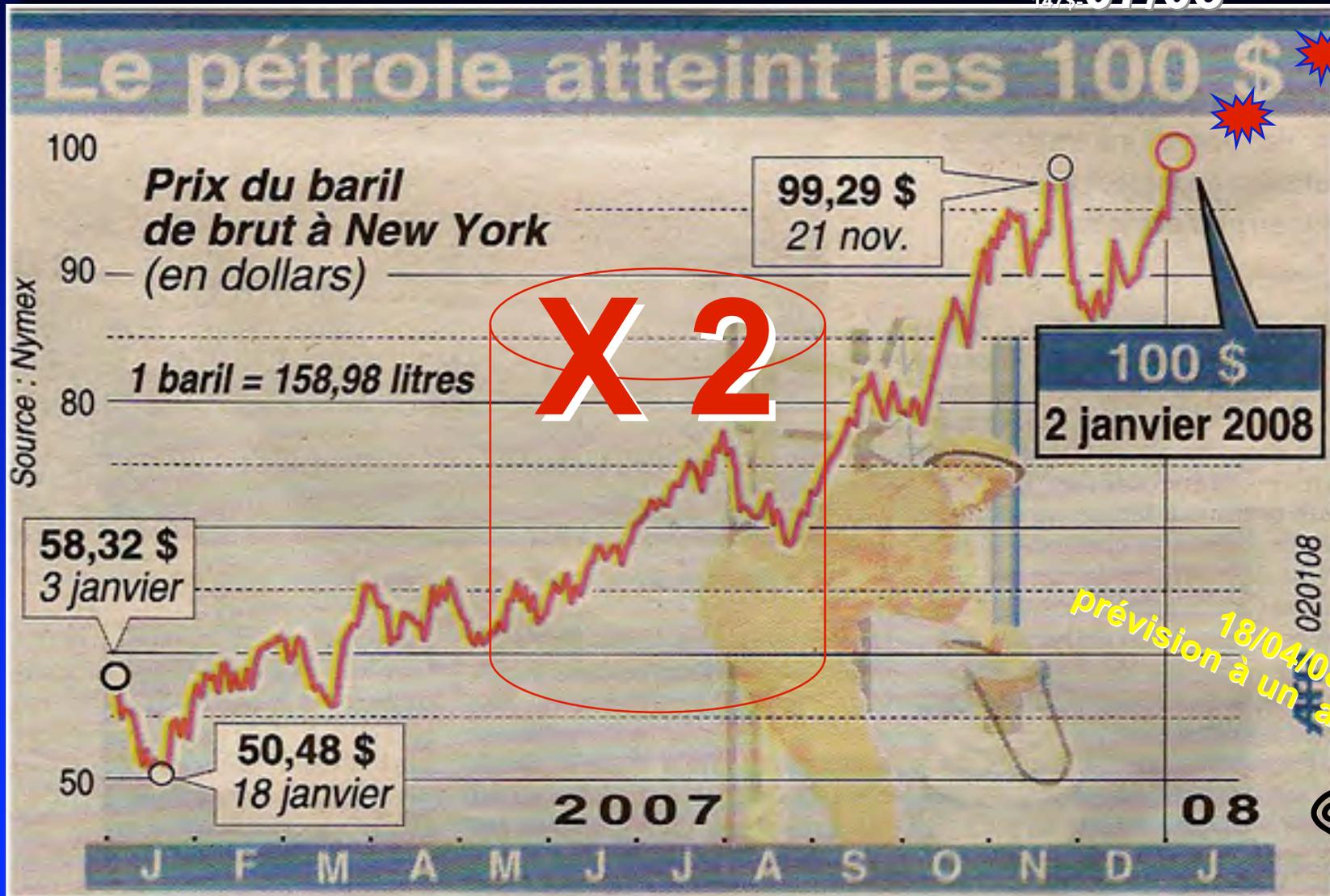
*Riches >< Pauvres*

Ex: en 2001, question à V Poutine  
« avec abolition des subventions sociales que deviendront  
tous les misérables (sic) empochant 30€/mois? »  
Rép: « Ils mourront, monsieur, ils mourront ...»

# 3 janv 2008

La Libre Belgique

07/08  
prévision à un an: 132 \$



18/04/08  
prévision à un an: 149 \$



# Le baril à 100 \$, l'or explose



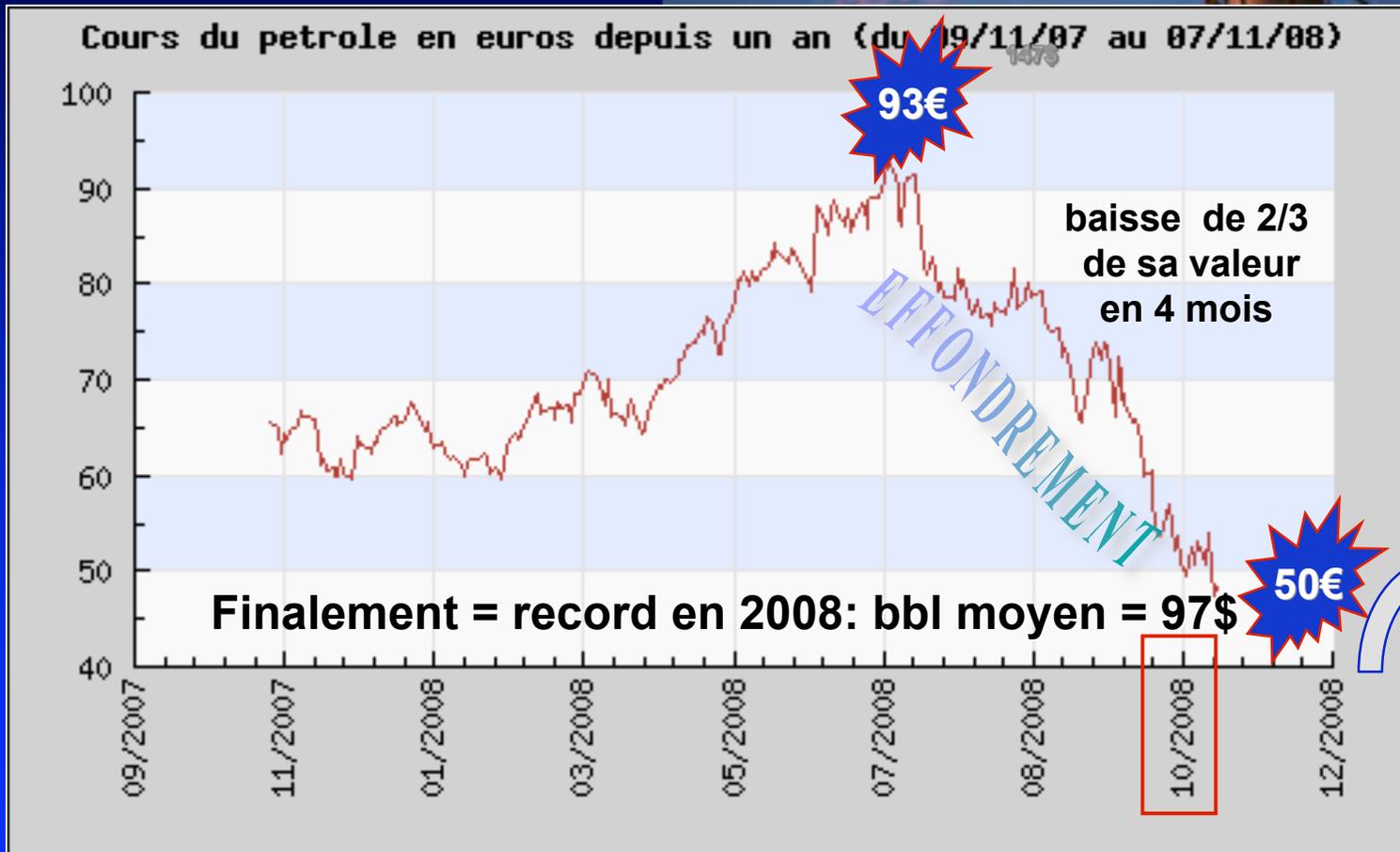
3 janv 2008

3 janvier 2008

- nouvelles violences Nigéria [premier producteur africain]
- Pakistan (assassinat Bhutto)
- Hiver froid USA (chute des stocks)
- Pas d'augmentation production OPEP [sinon diminution rentrées financières]



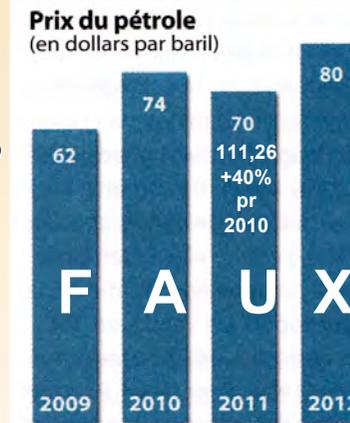
# Les prévisions du 3 janvier 2008 ... se sont avérées ... **ERRONEES...**



La demande de produits pétroliers a baissé de 7,1% aux Etats-Unis sur les quatre semaines (octobre) par rapport à l'année précédente

**OPEP: diminuer rapidement les quotas.... ?**

... fin 2009 = 'couloir' 80- ?100\$



The Economist-Trends déc 2009

début 2009  
'couloir' 35-50\$

(court terme 1-3 mois)



cela n'a pas perduré  
=> nouveau couloir  
80\$ à ?100\$  
+ spéculation:  
Déc 2008 1bbl = 33\$  
Nov 2009 = x2

**14 jan 2011 – 98,85\$** =? Hiver froid Eur-USA

**FIGARO**  
 "Sans la liberté de blâmer il n'est point d'éloge flatteur" Beaumarchais  
 En vente aujourd'hui au prix de 4,90 €

La Concorde: que va-t-il devenir? Hôtel de la Marine?

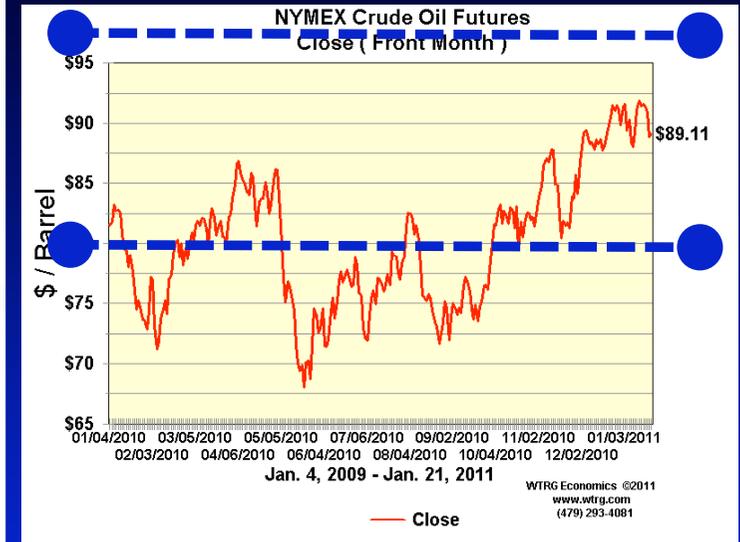
# Le baril de pétrole frôle les 100 dollars

La reprise mondiale stimule la demande de brut, dont le cours approche ses records de 2008.

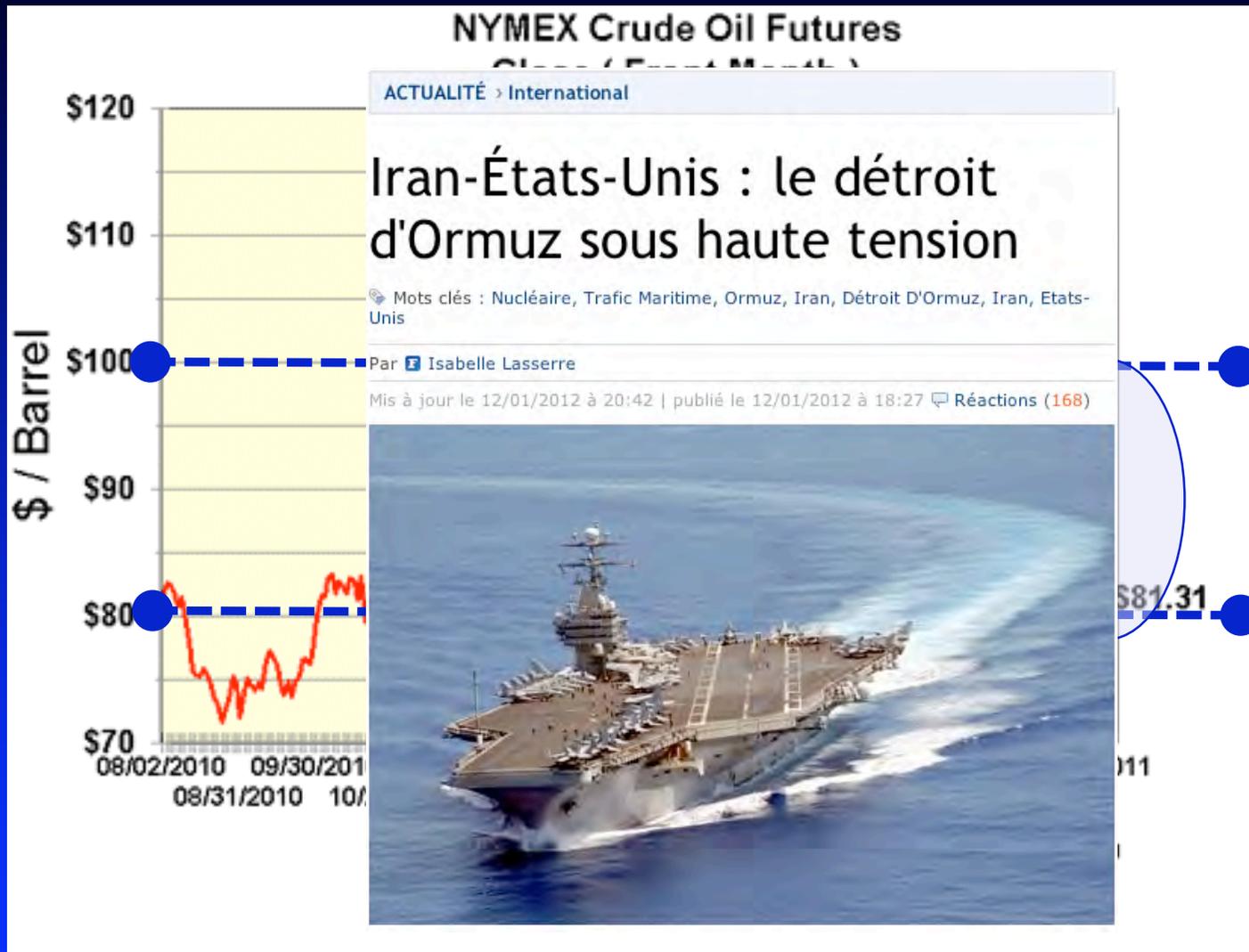
UN DÉBUT d'hiver froid en Europe et en Amérique du Nord, des changes nerveux et une demande asiatique insatiable forment un cocktail efficace pour pousser les cours du brut à près des 100 dollars le baril. Le phénomène se ré-

percute à la pompe, où le sans-plomb, en particulier, approche de ses records de 2008. Les chiffres de l'inflation s'en ressentent aussi, tant en France qu'en Europe, ce qui ne manque pas d'inquiéter la BCE. **PAGES 20 ET 23**

**Cours du Brent**  
 Source: Bloomberg  
 octobre 2008      janvier 2011  
 100 \$      98,12 \$

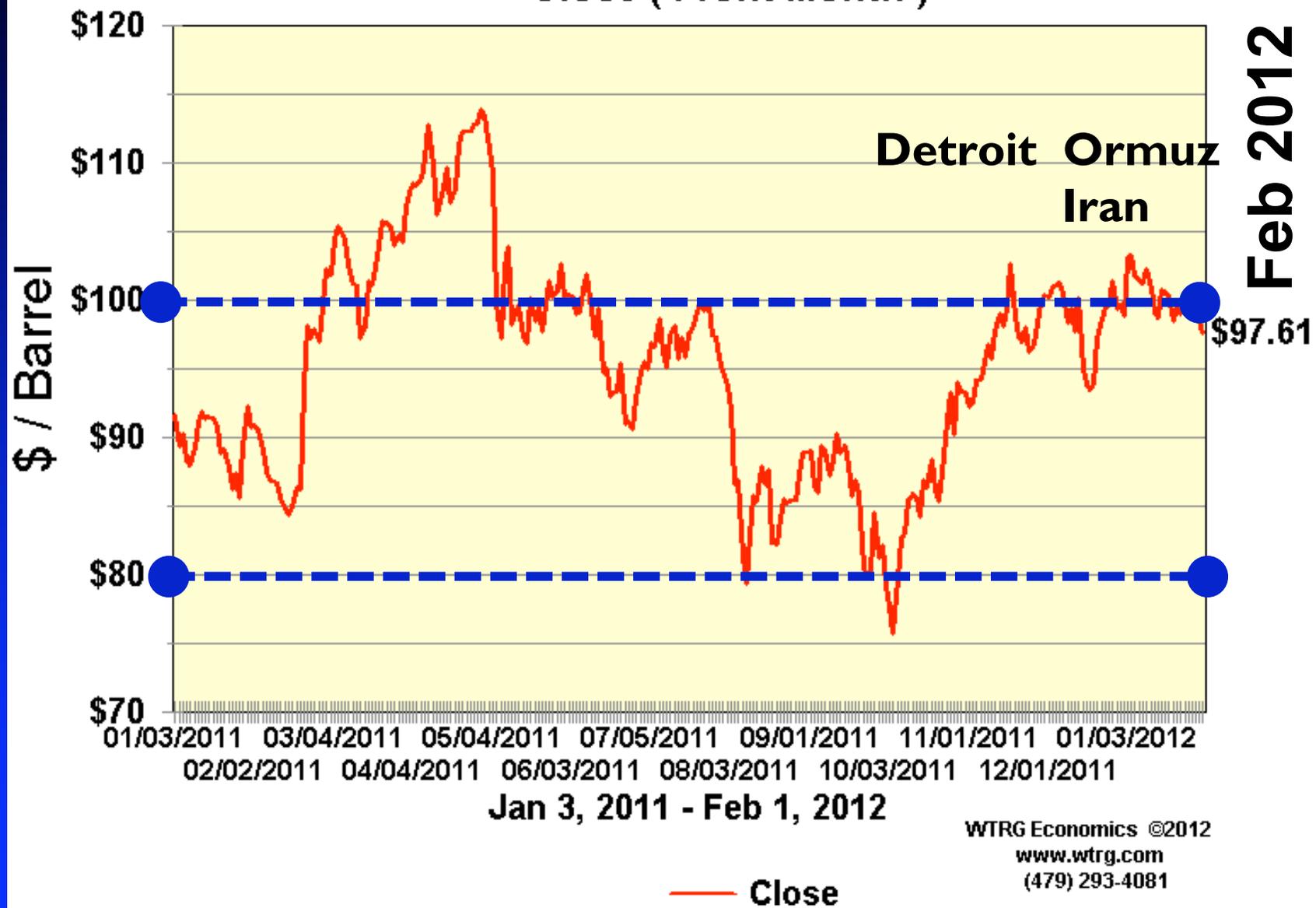


**3 fév 2011 – 101,93\$** =? Egypte, Golfe de Suez...



**Le bbl a perdu 20% en 15 jours => 'krach' boursier mondial (USA AAA =>AA+) => déficit de la dette des Etats => ?récession**

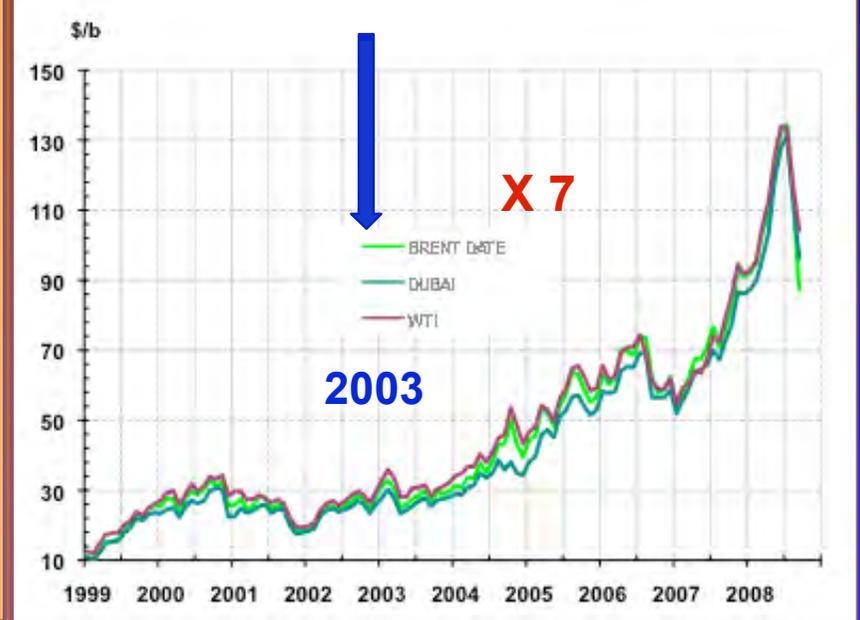
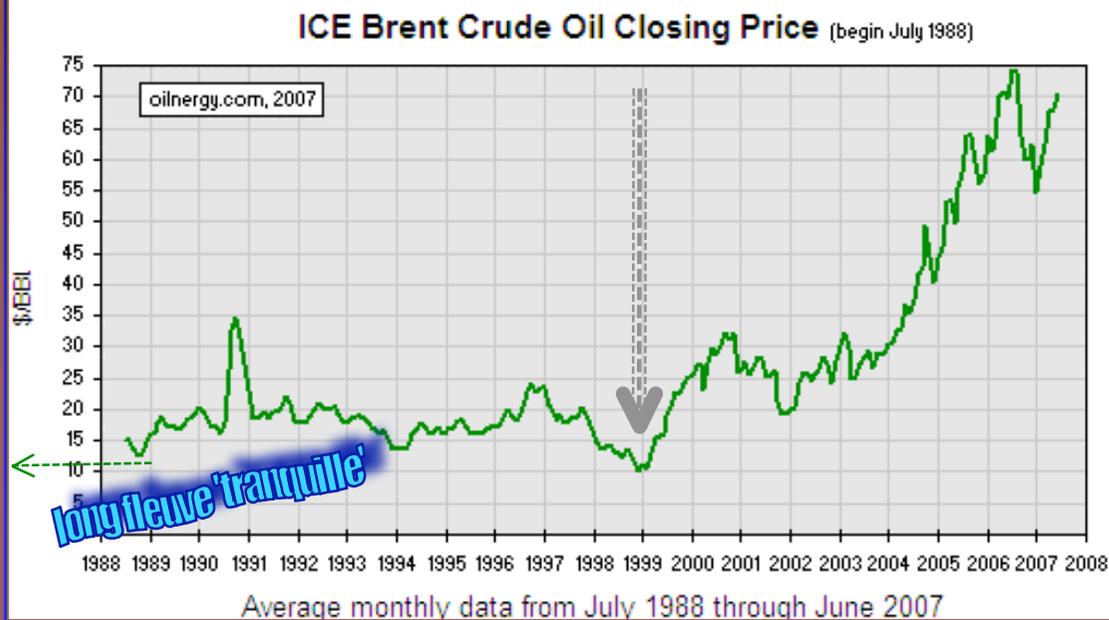
# NYMEX Crude Oil Futures Close ( Front Month )



WTRG Economics ©2012  
www.wtrg.com  
(479) 293-4081

**ULTIMES: 6000 (...) G bbl c et 7000 G bbl nc**  
avec ?280 Gt ou ± 2100 Gbbl [Rés P] **LE MAXIMUM DE PRODUCTION SERAIT ATTEINT VERS 2010-2020...?**

**Le pétrole 'bon marché' est fini**  
**Le monde sera ENCORE plus dépendant**  
**des pays producteurs du Moyen-Orient**

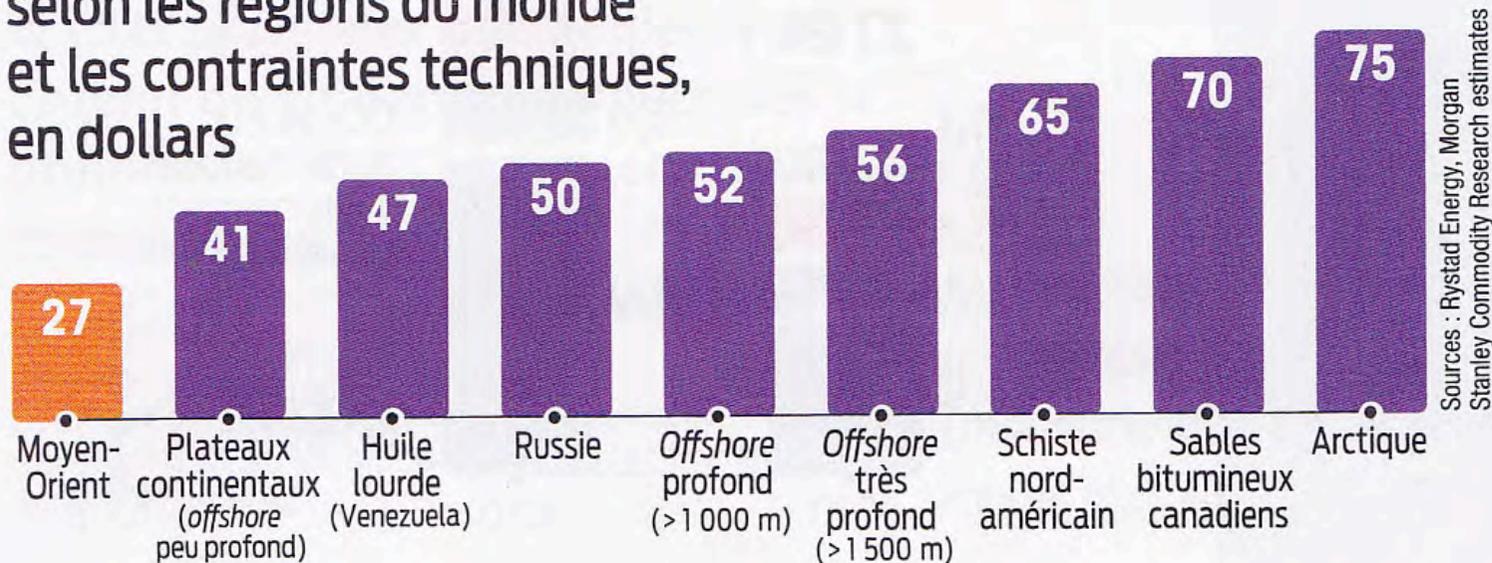


**Nb de 1859 à fin XXè s. : hausse de production moyenne annuelle = 2%**  
**Nb Coût du bbl en 1930 (pic découvertes onshore USA = 4 cents < eau potable)**

# L'Arabie Saoudite, reine du brut à faible coût

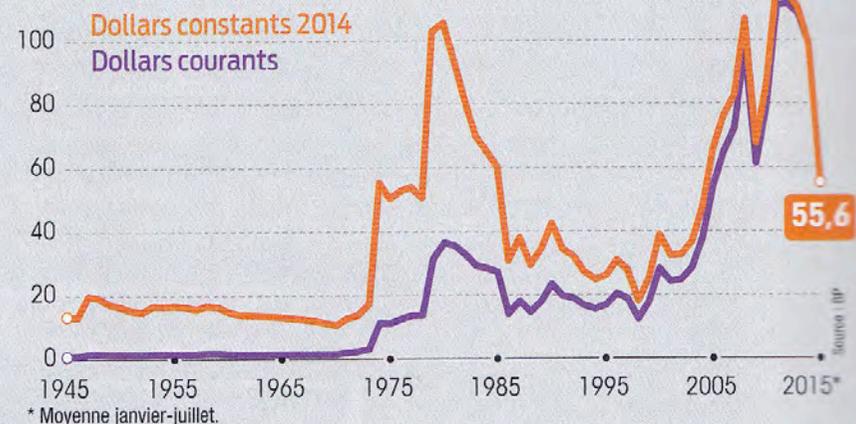
**Les pays du Golfe** possèdent un pétrole peu coûteux à extraire. Ils refusent de réduire leur production pour faire remonter les cours, ce qui avantagerait leurs concurrents. Reste à savoir combien de temps les pétromonarchies pourront tenir en poursuivant une telle stratégie. ||

Coût d'extraction d'un baril de pétrole  
selon les régions du monde  
et les contraintes techniques,  
en dollars



## Un contre-choc qui pourrait durer

Cours moyen du baril de brut depuis 1945, en dollars courants et constants 2014



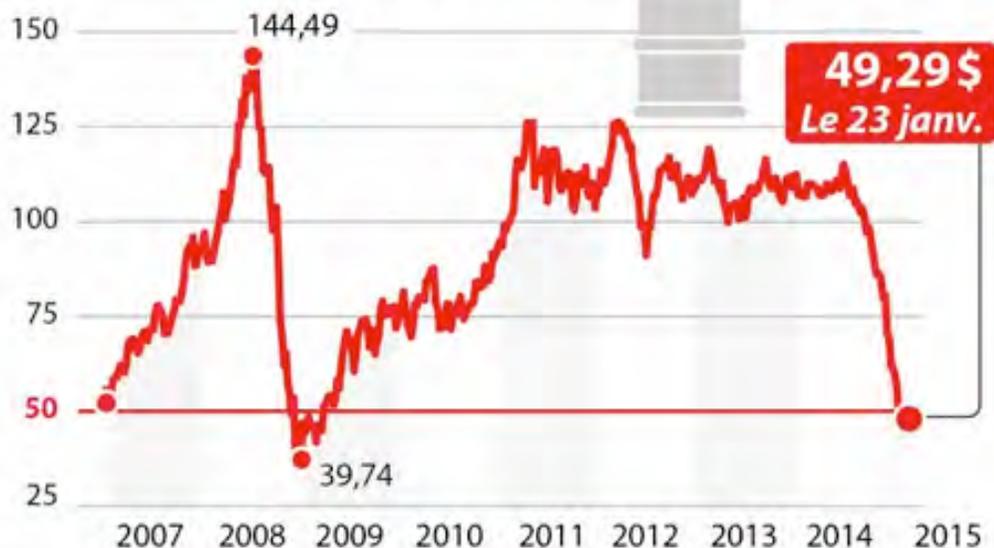
Après une longue période de stabilité, les premiers chocs pétroliers (1974 et 1978) et la fin du change fixe du dollar ont inauguré une ère de cours très volatiles. Avec la flambée des prix des années 2000, liée à la forte demande asiatique, l'exploitation des abondantes réserves dites non conventionnelles est devenue très rentable... au point d'entraîner aujourd'hui une situation de surproduction.

# 2015

## Peu d'experts avaient vu venir...

## Le baril de pétrole sous les 50 dollars

Prix du baril de brut, en dollars



IDE 2015

**CONTRE-CHOC** Les nouvelles techniques d'extraction ont permis l'exploitation des gaz de schiste, mais le ralentissement de la demande a fait plonger les cours du brut.

# Le pétrole vaut-il toujours de l'or ?

**L**es prix du brut semblaient devoir augmenter sans fin, suivant la règle selon laquelle ce qui est rare est cher. L'an dernier, l'or noir se négociait à 110 dollars en moyenne, un record histo-

Saoudite n'a pas baissé les armes et a contre-attaqué pour défendre ses parts de marché.

L'Organisation des pays expor-



**9 millions**

C'est le nombre de barils importés chaque jour en Europe de l'Ouest, soit près du quart du marché mondial.

lars début 2015. Les prix sont ensuite



# 90

# /



# 100

(07 Janv) 2010: 83\$ soit +80% en un an...



- froid (-1°C = 5% E)
- 'reprise économique'
- repli € vs \$

### **VOLATILITE DES PRIX : court terme**

1997 /1998 1bbl = 9\$

Fin 2007 1bbl = 100\$

Consommation x11?, Production :11?

**= spéculation** (transactions financières = 15x transactions physiques)

= crise asiatique (augm prod et baisse demande) >< hausse demande et menaces approvisionnements [Irak, difficultés loukos, instabilité Venezuela et Nigeria]

# Le Brut - "L'Or Noir"

## Le Pétrole fournit nos Besoins en Energie

Le 'pétrole' entre en composition essentielle dans près de 300 000 produits (pétrochimie = 8%)  
Le brut est exploité à partir d'environ 70 000 gisements d'hydrocarbures



**Light Texas Crude**  
Palo Pinto Field  
North Texas

**Heavy Texas Crude**  
Humble Oil Field  
Southwest Texas

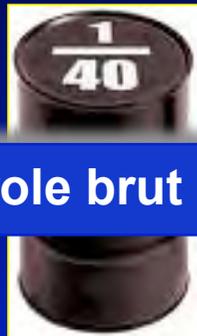


'léger'  
'moyen'

'lourd'  
'extra-lourd'

American Petroleum Institute, 1999

# Organigramme simplifié du raffinage du pétrole brut pour la production de carburants



Pétrole brut

→ épuration

→ distillation

Sels (qq g à qq kg/tonne)  
Sulfure...  
...

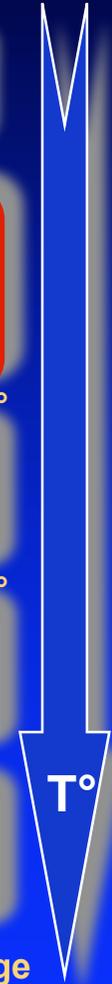
→ **Gaz**  
4%  
±180°

→ **Essences Solvant léger**  
46%  
±250°

→ **Kérosène**  
10%  
±360°

→ **Gazole**  
27%

→ **Résidus**  
>500°  
craquage



Dubois 2007

→ nb pétrochimie: 900 à 2000°C

*Les Etats producteurs exportateurs ne raffinent que très peu*

1. USA 20,1% mondial soit ±850 millions de tonnes (2004)
2. Chine 6,9%, 3 Russie 6,4%, ... 9. Arabie Saoudite 2,4%

*Les capacités de raffinage sont utilisées auj (2007) à leur maximum [92%] et ne suivent donc pas le rythme de la progression pétrolière 2003-2004: 0,8% >< 4,4%*  
 ==> ouragan Katrina en 2005 ...

*nb investissement raffinerie stoppée depuis 1976 aux USA!  
 [une raffinerie moderne de gde capacité = 2,5 milliards de \$]*

# Produits Pétroliers

Un baril d'huile brute produit:

**1 Baril (bbl)  
=  
159 l**

**=158,984 l ou 0,14 t**

**1t = 6,7 à 7,7 [moy 7,3 bbl]**

**1 litre de brut pèse entre  
800 et 950 g (moy)**

American Petroleum Institute, 1999



Gasoline - 73,8 l

Fuel Oil - 34,8 l

Jet Fuel - 15,5 l

Asphalte - 8,7 l

Kérosène - 0,8 l

Lubrifiants - 1,9 l

Pétrochimie,  
autres produits - 23,5 l

# Incertitudes Géopolitiques



## RAFFINAGE

Usa96%, Monde92% [2006]

## TRANSPORT MARITIME

- 7200 supertankers sous pavillons de complaisance [5 états possèdent en tonnage 50% de la flotte pétrolière mondiale]
- fort vieillissement de la flotte pétrolière
- ?pénurie des tankers vs demande pétrolière croissante



- En 2007-2008, l'écart entre la capacité de production et la demande est d'environ 2 %
  - > 'grain de sable' =cyclone, =troubles (au Nigéria...) etc.
- 85% de la production mondiale = **Compagnies NATIONALES**
- Refus d'investir ... car pas d'incitation (l'argent rentre de toute façon)
- 80 % plates-formes 'rouillées' (pas d'entretien quand le bbl était bas....)
- 500 rigs à refaire = investissement de 250 G\$ ....(+ prix du Fe)
- goulets d'étranglements transport maritime ('accident', crises...) = détroit Ormuz etc.

# Incertitudes Géopolitiques

## RAFFINAGE

Usa96%, Monde92% [2006]

## TRANSPORT MARITIME

• 7200 supertankers sous pavillons de



15 nov 2008: piraterie en Somalie-Yémen sur supertanker saoudien Sirius Star  
[Aramco, immatriculation Liberia]

- 2 millions bbl soit 250 millions US\$ (y compris prix tanker de 150M) = 1 journée consommation France  
un supertanker = 3X surface terrain football (=330 m L et 3x le poids porte-avion)

du 1/1 au 15/11/2008: 219 bateaux détournés

- allongement des routes maritimes et augmentation prix bbl

90% du pétrole importé  
par l'Europe passe par le  
détroit d'Ormuz  
Suez-EGYPTE fév2012

## **...courte synthèse...**

**Il y a 200 ans:** uniquement énergies renouvelables  
(bois, traction animale, chutes d'eau, vent)

**Au XIX<sup>e</sup> s:** charbon (invention machine à vapeur)

**Au XX<sup>e</sup> s:** pétrole, gaz, nucléaire

**En 2010:** pétrole, charbon, gaz = 80 à 90% des besoins  
(Am et Eur consommaient 51% de l'énergie mondiale)

**de 1900 à 2000:** la consommation d'énergie = X10 ou >

Reeves, 2003  
En 2003: consommation E mondiale = 12 TW  
[soit l'équivalent de 12 000 réacteurs de 1 GW]  
[ou équivalent de 10 milliards de tonnes de pétrole]  
Prévision pour 2050: 24 TW/an [= X2], stabilisation?

# ...courte synthèse...

En 2003: consommation E mondiale = 12 TW  
[soit l'équivalent de 12 000 réacteurs de 1 GW]  
Prévision pour 2050: 24 TW, stabilisation?



Pour comparer, les 'RESERVES' [ordre de grandeur...] [=prouvées]

Pétrole  $1200\text{TW}/24 = 40$  à 50 ans, Gaz  $1200\text{TW}/24 = 50$  à 70 ans  
Charbon  $4800\text{TW}/24 = 200$  ans

Nucléaire à neutrons lents ( $U^{235}$ ) =  $3000\text{TW}/24 = 40-50$  ans C. Steffens, 2010 (com. pers.)+Areva, EDF

Nucléaire à neutrons rapides ( $U^{238}$ ,  $Th^{232}$ ) =  $30\ 000\text{TW}/24 = 200-250$  ans

Fusion thermonucléaire deutérium-tritium: non maîtrisée, rentabilité?

quelques  $10^3$  ans, limitée par la quantité de lithium

Fusion thermonucléaire deutérium-deutérium: encore beaucoup plus difficile,

Utopique? [Il faut atteindre une  $T^\circ$  de 100 millions de  $d^\circ$ ...], quelques  $10^9$ ans!

*Nb l'E totale émise par les réacteurs a augmenté de moins de 6% pendant les 10 dernières années (soit  $< 1\%/an$ , en comptant à partir de 2003)*

Pour comparer, les 'Energies Renouvelables'

Hydraulique, Eolienne, Chauffage solaire, Photovoltaïque... =  $10^9$  ans

mais rendement énergétique ENCORE trop faible...

Reeves, 2003



## ***... courte prospective...***

**Scénario 2100: diversification à peu près égale des sources d'Énergie pour atteindre 24 TW/an**

### ***Réserves***

- ***Energies fossiles: largement épuisées (?effet de serre, réchauffement de qq d°)***
- ***Nucléaire à neutrons lents: sources épuisées***
- ***Nucléaire à neutrons rapides: 10 000 réacteurs [150 en France]***
- ***Eoliennes: 10 millions dans le monde [100 000 en France]***
- ***Chauffage solaire, cellule photovoltaïque: technologie maîtrisée***
- ***Panneaux dans l'espace: non maîtrisé***

Reeves, 2003

# ... En attendant = casse tête énergétique

## Les ER ne sont pas dépourvues d'inconvénients ...

- **l'hydraulique** est celle qui a le plus fait ses preuves : son potentiel est important dans les pays en voie de développement [la prod. d'électricité à partir de l'hydraulique est = dans TOUTE l'Afrique à celle de la France!], MAIS les gds barrages (Chine... TG=20RNu) sont critiqués : bouleversement écosystèmes, déplacement population, modifications climatiques locales...
- **la biomasse** est utilisée depuis des millénaires (combustion végétaux, déchets organiques, bois). Récemment = gazéification (biogaz ou carburant liquide), pour couvrir les besoins mondiaux assurés aujourd'hui par le pétrole et charbon, il faut exploiter 12 millions km<sup>2</sup> (soit 22XFrance). En 2004 l'ensemble des terres cultivées ne couvrent que 13 millions de km<sup>2</sup> ==> conflit entre besoins alimentaires et énergétiques ...
- **éolien** projets d'envergure = offshore, MAIS = toujours caractère intermittent et stockage de l'énergie ...
- **photovoltaïque** = son KWh en 2004 est 4X plus cher que le KWh nucléaire

*... courte prospective...*



**Scénario 4000: le nucléaire est largement épuisé  
(?sauf la fusion d-d)**

## **Réserves**

*... il ne reste plus que les énergies renouvelables...*

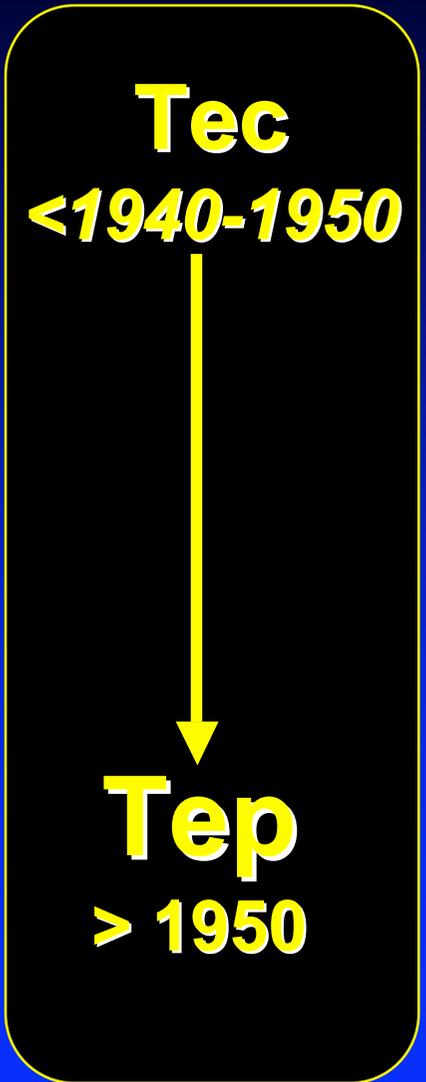
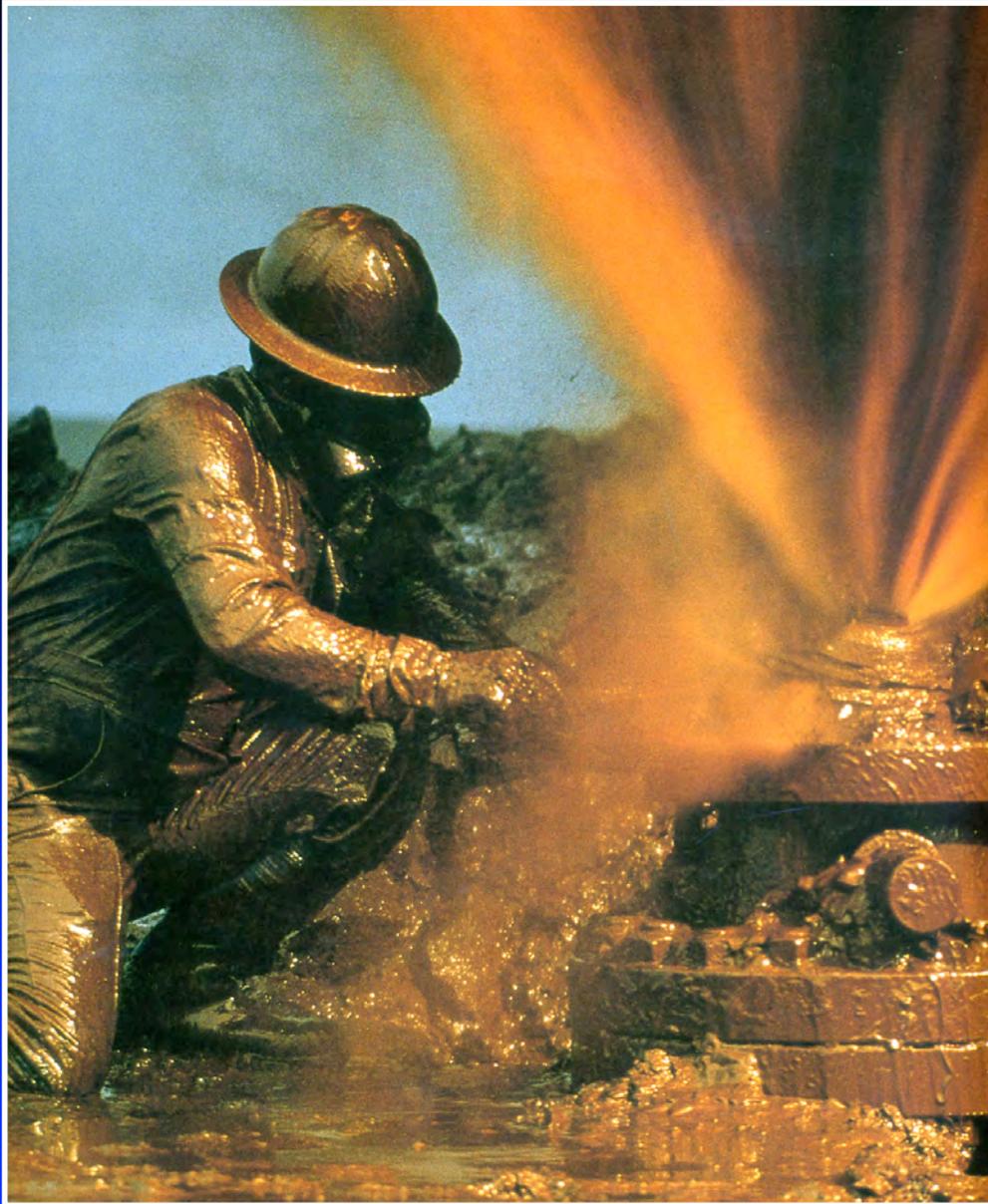
Reeves, 2003

*[la Terre reçoit et absorbe chaque année une E équivalente à 100 millions de réacteurs nucléaires, soit 10.000X à 15000X/j- la quantité requise pour les besoins actuels de l'humanité]*

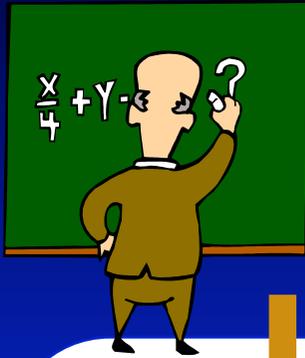
Scheer, 2004

# EQUIVALENCES UNITES...





# EQUIVALENCES (suite...)



Le pouvoir calorifique du pétrole brut varie légèrement d'un gisement à l'autre, il est également différent pour les produits pétroliers raffinés

1t essence = 1,048 tep

1t GPL = 1,095 tep

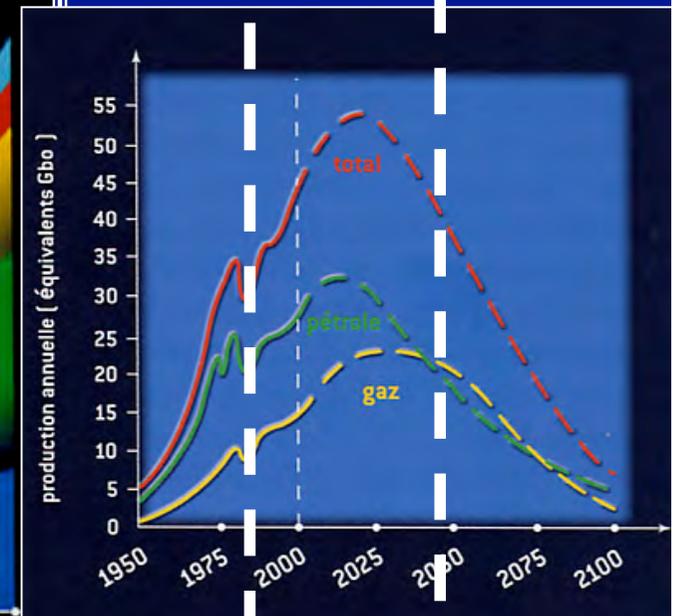
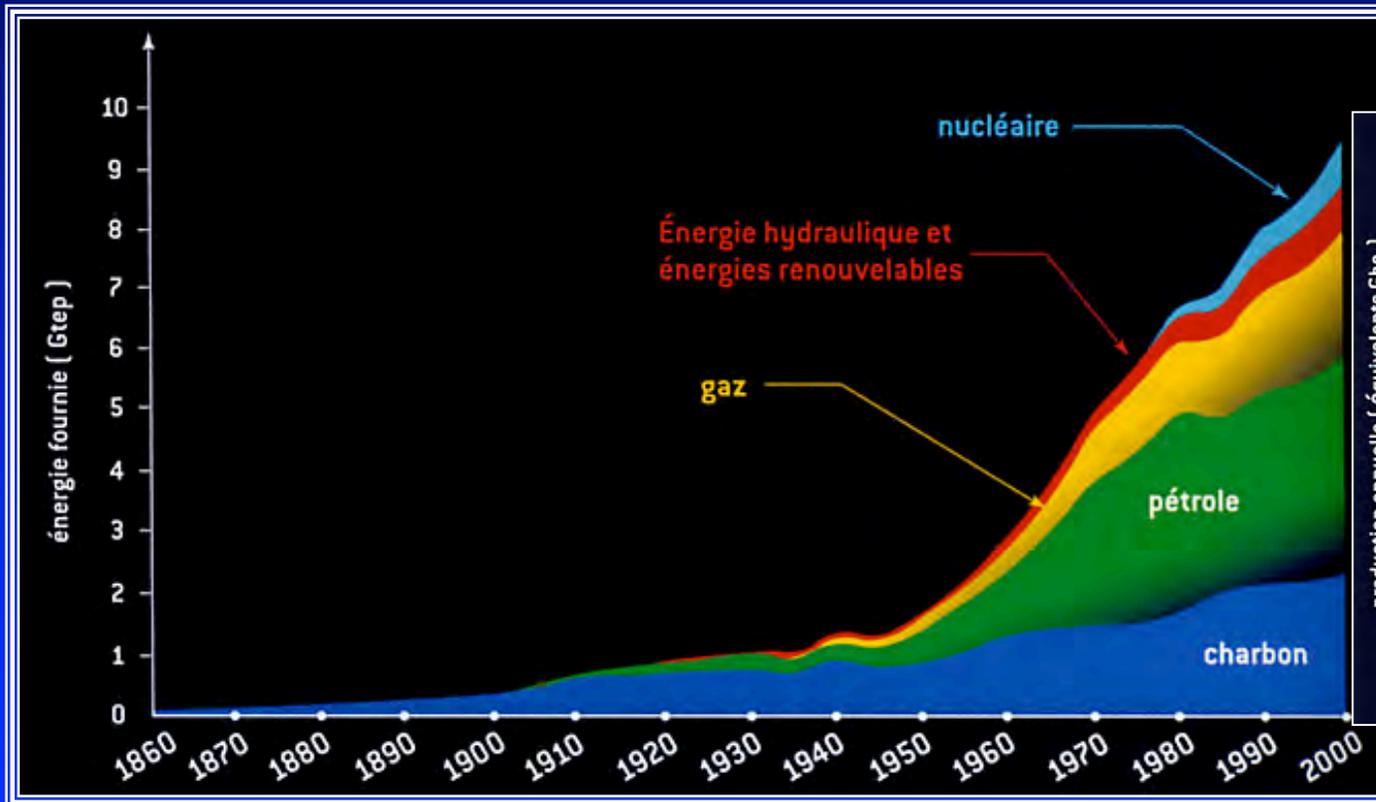
1t fioul lourd = 0,952 tep

1t charbon = 0,6 à 0,75 [vs houille, coke, anthracite ...]

**1tec = 0,697 tep**

--- rappel: 1 tep =  $10^{10}$  cal ---

# NATURE ET EVOLUTION DES SOURCES D'ENERGIE UTILISEES DANS LE MONDE DEPUIS 1860 (G = milliards)



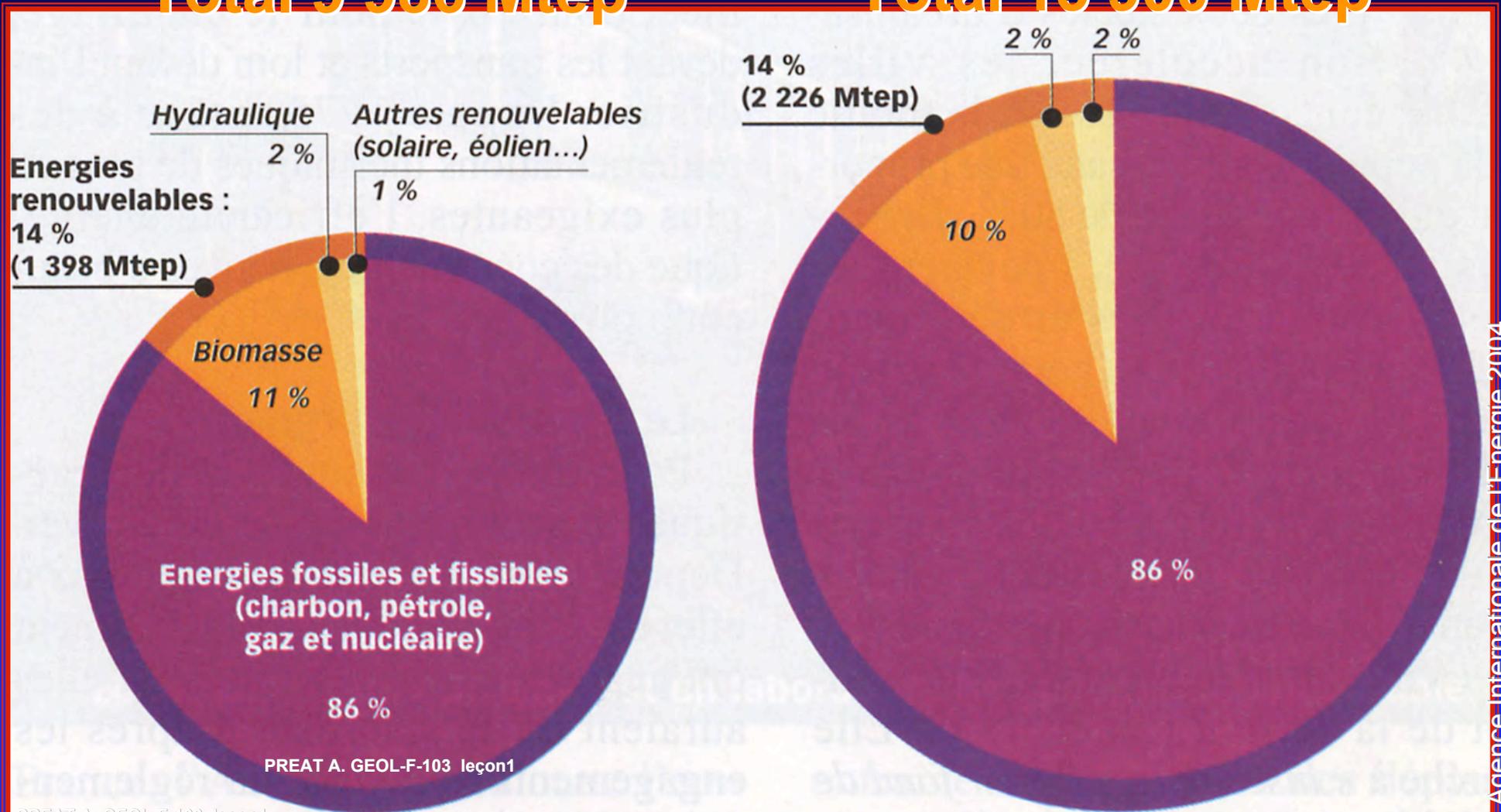
*Le pic de production MAX (....)  
du gaz est décalé par rapport au pétrole*

# La part des énergies renouvelables stagne

**2002** = 2,1% en 2011 'hors bois' **2030**

**Total 9 986 Mtep**

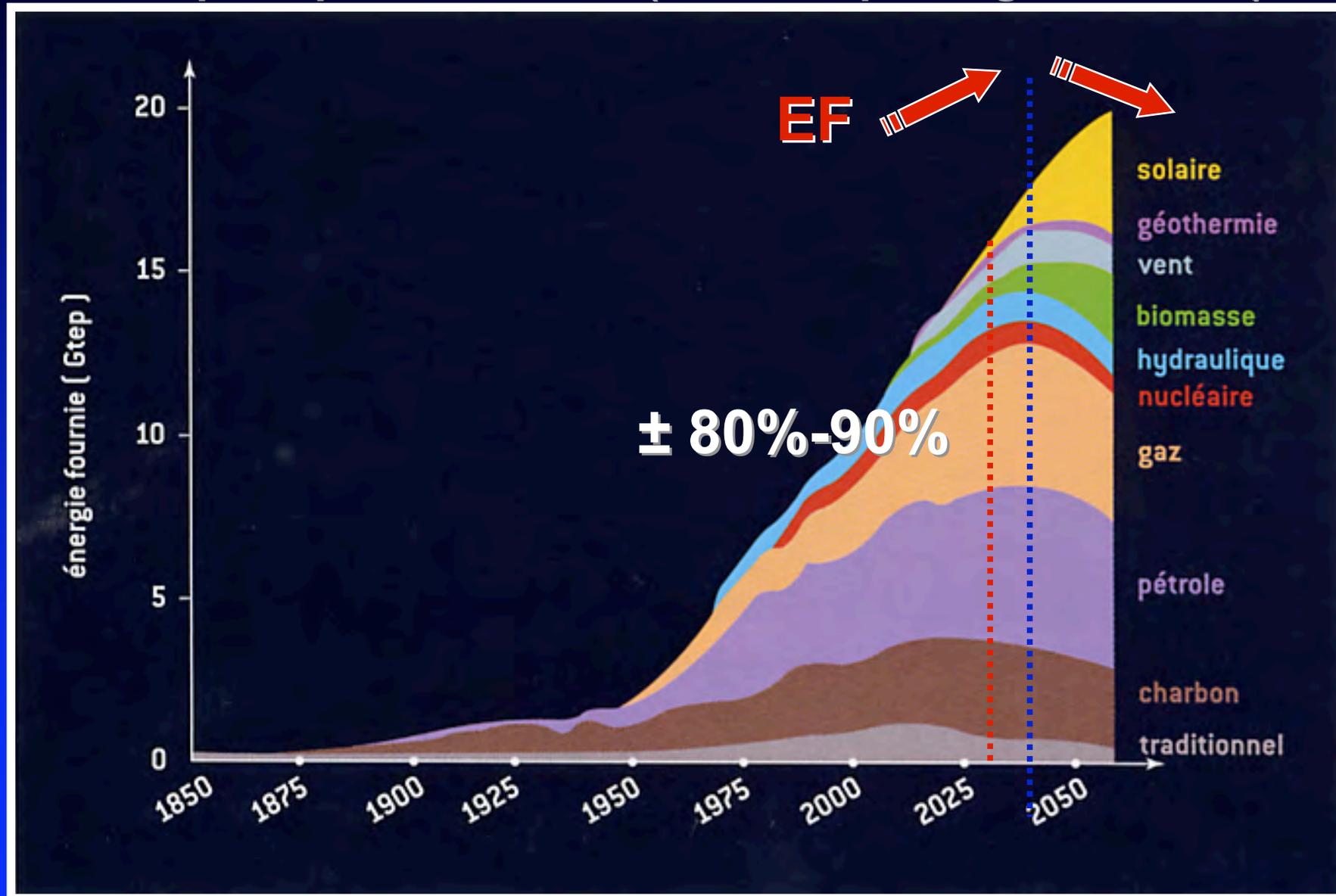
**Total 15 900 Mtep**



PREAT A. GEOL-F-103 leçon1

PREAT A. GEOL-F-103 leçon1

## Proposé par Shell, 2004 (scénario privilégiant les ER)



**90%** = effet de serre accru!

sans l'effet de serre, la  $T^{\circ}_{\text{moy}}$  de la Terre

serait de  $-18^{\circ}\text{C}$ . Grâce à ce phénomène **NATUREL** (= 'géologique'), elle est de  $15^{\circ}\text{C}$

... en 2100: réchauffement 'anthropique'  
de  $2^{\circ}$  à  $6^{\circ}\text{C}$ ?...

[ $\text{CO}_2$ ,  $\text{CH}_4$ ,  $\text{N}_2\text{O}$ ,  $\text{H}_2\text{O}$ ...]

**en 2100: réchauffement 'anthropique'**

**avec**

**montée niveau de la mer de 15cm - 95cm en 100ans**

**apparition de maladies tropicales...**

**disparition glaciers**

**fonte calottes...**

**perturbations météorologiques (cyclones,  
tornades...)**

**etc**

**etc**

**etc**

**...**



# GIEC [1988] Groupe Intergouvernemental sur l'Evolution du Climat

30 scientifiques élus... publiant un rapport tous les 6 ans, devant être approuvé à

l'unanimité de 170 Etats...

Prix Nobel de la Paix 2007

Prix Nobel de la Paix 2007

[www.ipcc.ch](http://www.ipcc.ch)

*Ce que dit le rapport 2001: le changement climatique est DEJA à l'oeuvre*

## **CONSTAT** validé en 2007

- augmentation de la T° moyenne terrestre de  $0,6 \pm 0,2$  °C,
- élévation du niveau des mers de 10 à 20 cm depuis le début du XX<sup>e</sup> siècle,
- décennie 1990 la plus chaude depuis que les relevés météos existent,
- recul de la couverture neigeuse de 10 % depuis les années soixante,
- *pour les experts du GIEC = forte augmentation des concentrations atm en gaz à effet de serre à l'oeuvre depuis la révolution industrielle*

## **PROSPECTIVE**

- poursuite élévation T° et niveau des mers au XXI<sup>e</sup> siècle:  
entre +1,4 et +5,8 °C pour 2100

*Conséquences multiples:* inondations et/ou sécheresses, pénurie eau potable, progression paludisme et choléra aux tropiques. A l'inverse, certaines régions des latitudes moyennes profiteront du réchauffement climatique, qui viendra améliorer la productivité agricole et diminuer les besoins énergétiques en hiver.

2013  
Seconde édition 2014

THE OYSTER CLUB  
**LA FAILLITE DU  
CLIMATISME**

LES BELLES-LETTRES

2015

texquis

**Climat: 15  
vérités qui  
dérangent**

Collectif sous la direction du Pr. István E. Markó

ISTVÁN E. MARKÓ et al.

## CLIMAT : 15 VÉRITÉS QUI DÉRANGENT

Le débat sur l'origine des changements climatiques est loin d'être clos.

Ces dernières années, les faits sont venus contredire les théories du Groupe intergouvernemental d'étude du climat (le GIEC). Pourquoi les températures n'ont-elles plus augmenté à la surface du globe depuis 1998, tandis que les émissions de CO<sub>2</sub> ne cessaient de croître ? Pourquoi le volume de glace en Antarctique ne diminue-t-il pas ? Pourquoi les scientifiques impliqués dans le « Climategate » refusent-ils de fournir les données sur lesquelles se basent leurs prévisions ? Et surtout, pourquoi les prédictions alarmistes proférées par ces scientifiques ne se sont-elles pas réalisées ?

Pour la première fois, des professionnels issus de différentes disciplines unissent leurs forces pour montrer que le débat sur le climat doit être rouvert. En dépit des pressions professionnelles qu'ils subissent, et du tsunami médiatique d'hostilité qu'ils rencontrent à chacune de leurs initiatives, les auteurs du présent ouvrage, chimistes, géologue, ingénieurs, journaliste, épistémologue, dont plusieurs scientifiques reconnus dans leurs disciplines respectives, estiment qu'il n'est plus possible de se taire.

Cet ouvrage, véritable bible du « climato-scepticisme », fait la synthèse des arguments qui réfutent les thèses dominantes dans le domaine climatique. Il est montré comment, depuis quinze ans, la réalité dément systématiquement les projections du groupe intergouvernemental sur le climat (GIEC) et de ses innombrables relais politiques et médiatiques.

Pour que triomphe la vérité scientifique.

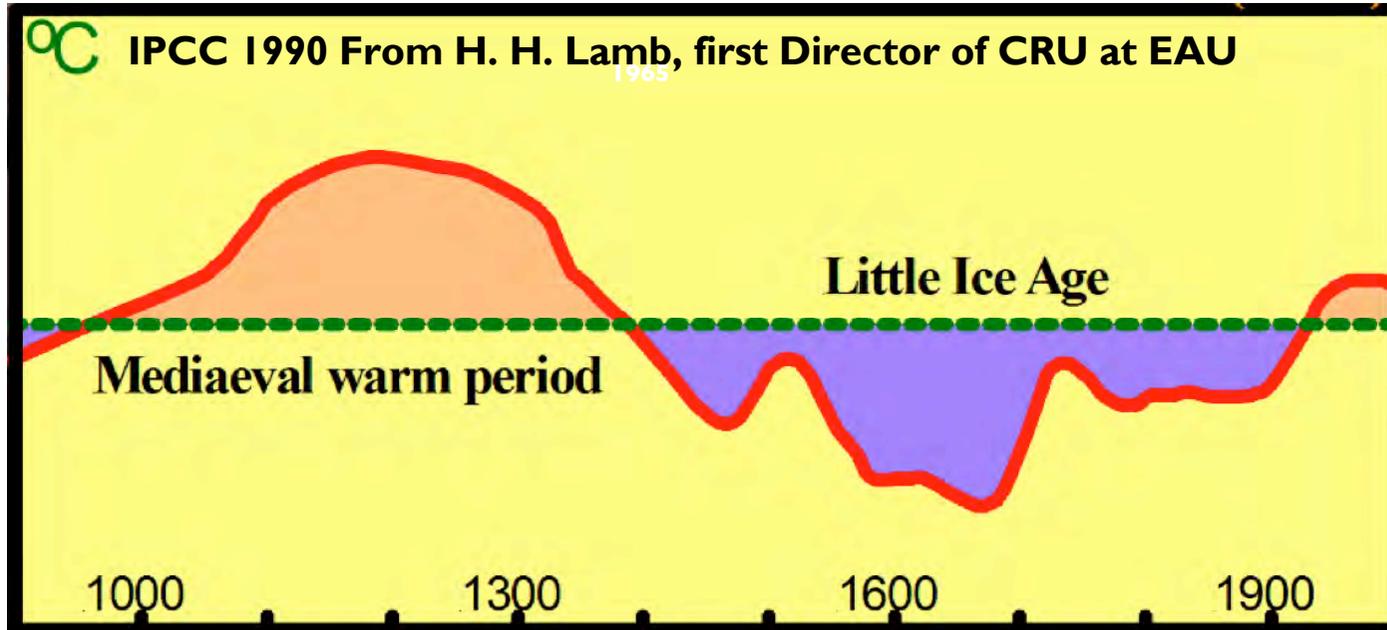
**Auteurs :**

Anne Debeil, Ludovic Delory, Samuel Furfari, Drieu Godefridi, Henri Masson, Lars Myren, Alain Prétat, sous la direction scientifique de ISTVÁN E. MARKÓ.

ISBN 978-2-930650-05-0

*formation de sols  
croissance des arbres*

*mis en évidence en 1939 dans Sierra Nevada<sup>a</sup>  
avancées glaciers alpins  
refroidissement 2-3° aux tropiques (coraux)<sup>b</sup>  
....+ changement système climatique, circulation  
océanique profonde, circulation atmosphérique ...<sup>d</sup>*

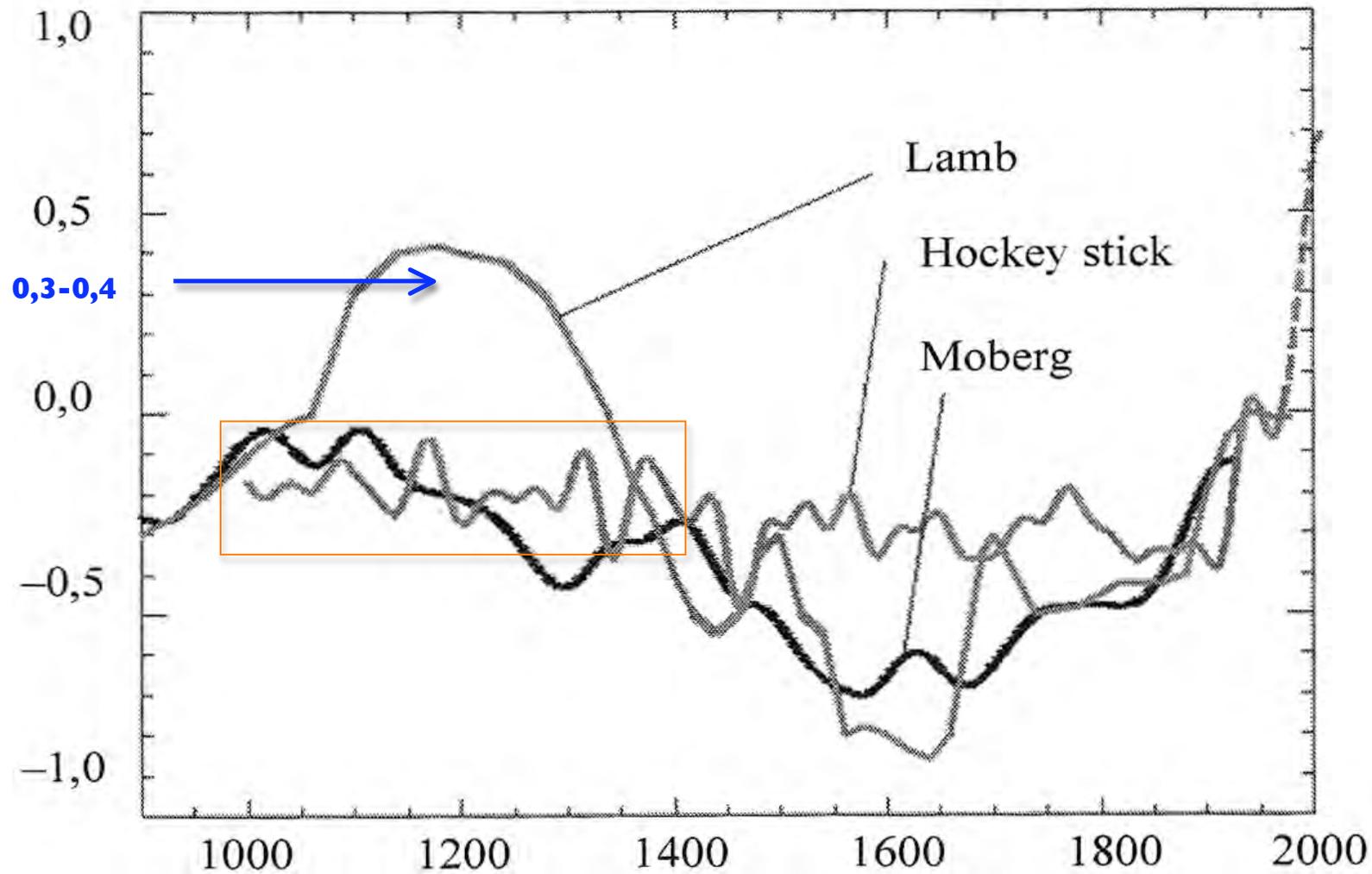


révolution  
industrielle?!

à partir de la dendrochronologie, sédiments lacustres, sédiments marins  
Mesures directes  $T^{\circ}$  150 ans (pour océans = 30-40 ans)  
Mesures directes  $p_{atm}$  et précipitations 30-100 ans  
Mesures directes glaces de mer 30-40 ans  
Mesures directes jauges de marée 50-60 [sauf quelques unes]  
Mesures directes satellites quelques 10' ans

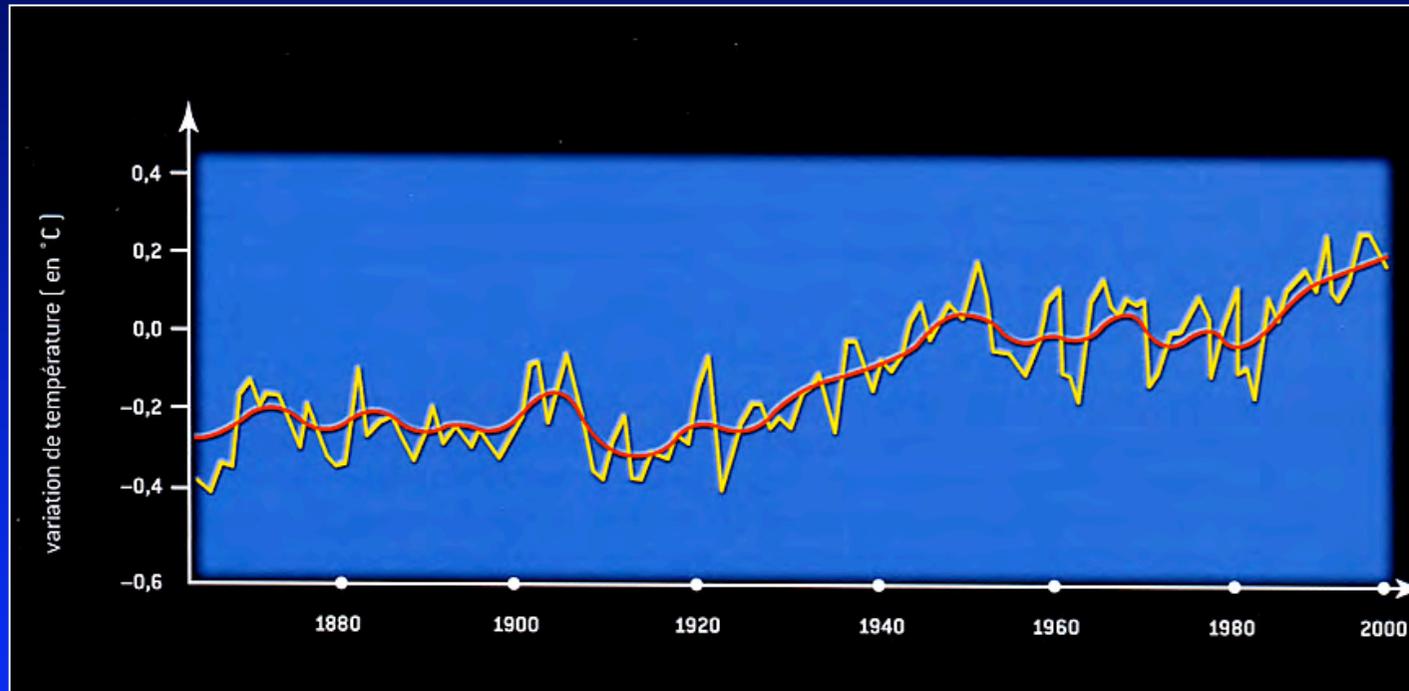
<sup>a</sup>Matthes 1939; <sup>b</sup>Winter et al 2000, Watanabe et al 2001, Newton et al 2006, Richey et al 2007; <sup>c</sup>Wanner et al 2008,

**Loehle (2007) élimine les marqueurs liés aux anneaux de croissance des arbres, privilégiés par Mann et al. 1999, et connus pour leur capacité à ATTENUER Les variations climatiques de GRANDE AMPLITUDE**



# Variations de la T° de l'air entre 1860-2000

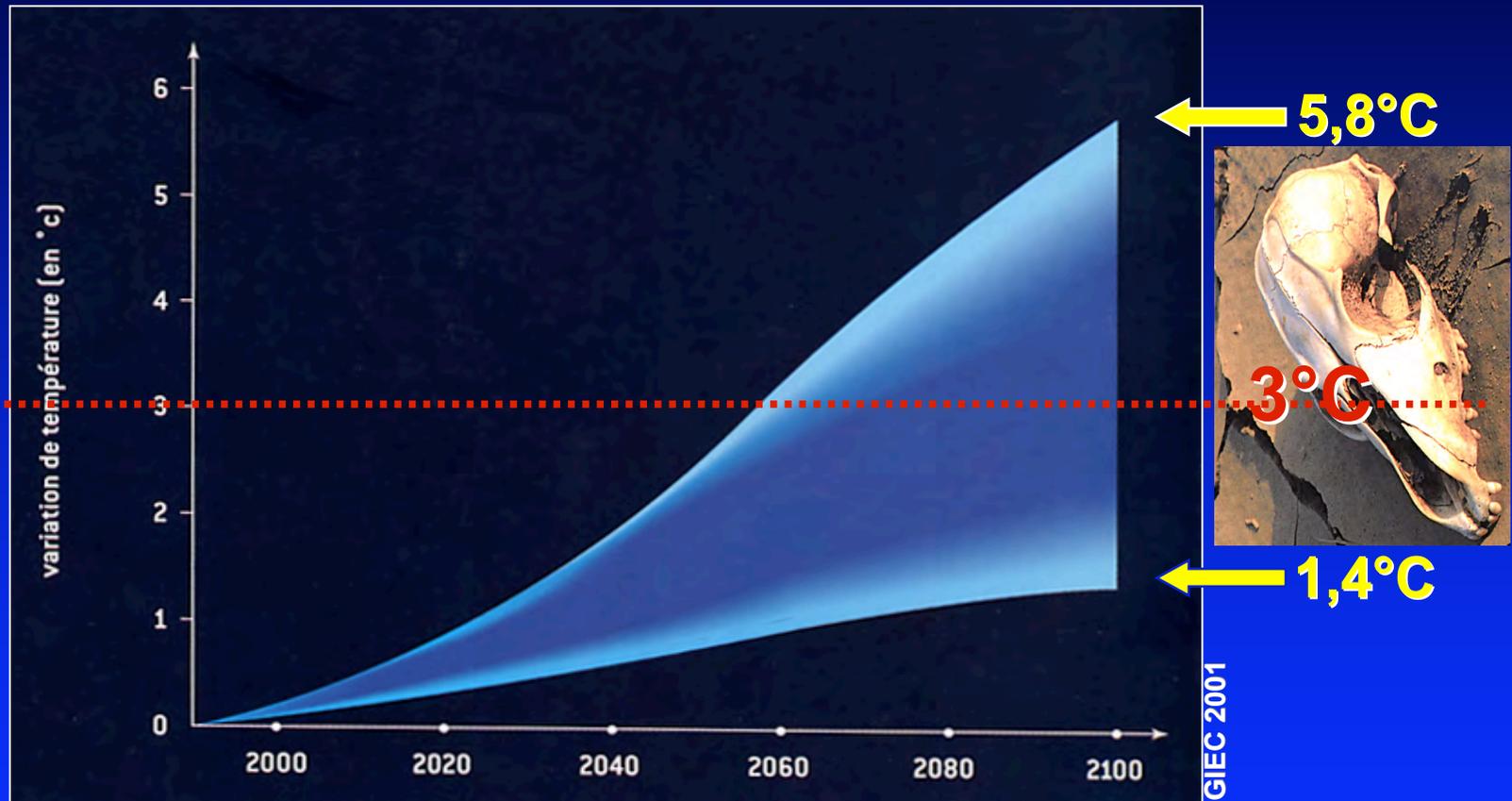
la référence (le zéro) correspond à la T° moyenne en entre 1961-1990



**Réchauffement modeste  
de 0,6 °C depuis le début du XX<sup>e</sup> siècle**

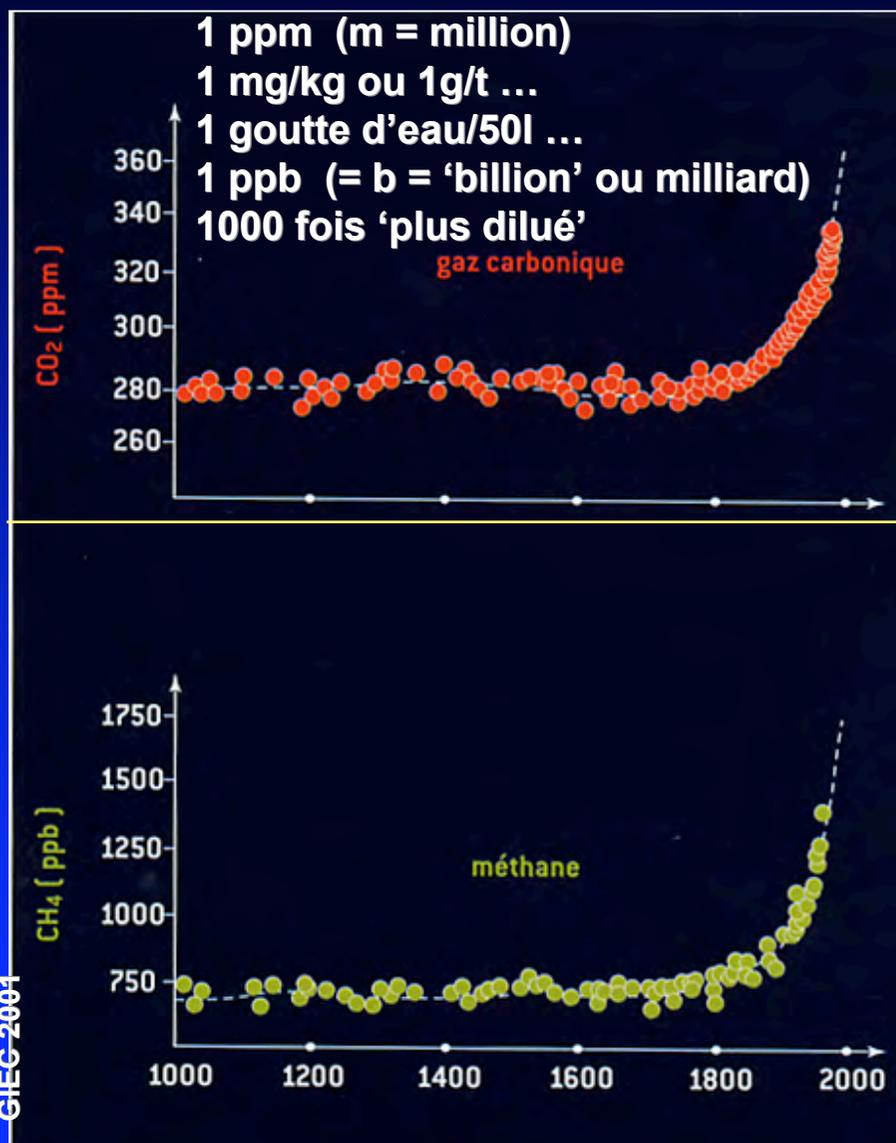
# Variations de la T° : FUTUR ?

basées sur les modèles construits par les climatologues



Prédiction de l'augmentation de la T° moyenne de l'air d'ici à 2100.  
Figure basée sur **7** modèles différents (cf hypothèses de base)

# Le dioxyde de carbone et le méthane



## CO<sub>2</sub>

- 390 ppm [0,039%, 0,39l/m<sup>3</sup> d'air [2012]
- grande capacité d'absorption du ray IR
- Dissolution des calcaires
- Combustion des forêts
- Respiration animale et végétale
- Emissions volcaniques
- Combustibles fossiles  
(charbon, pétrole, gaz naturel)
- = gaz stable, temps de résidence atm 200 ans?

## CH<sub>4</sub>

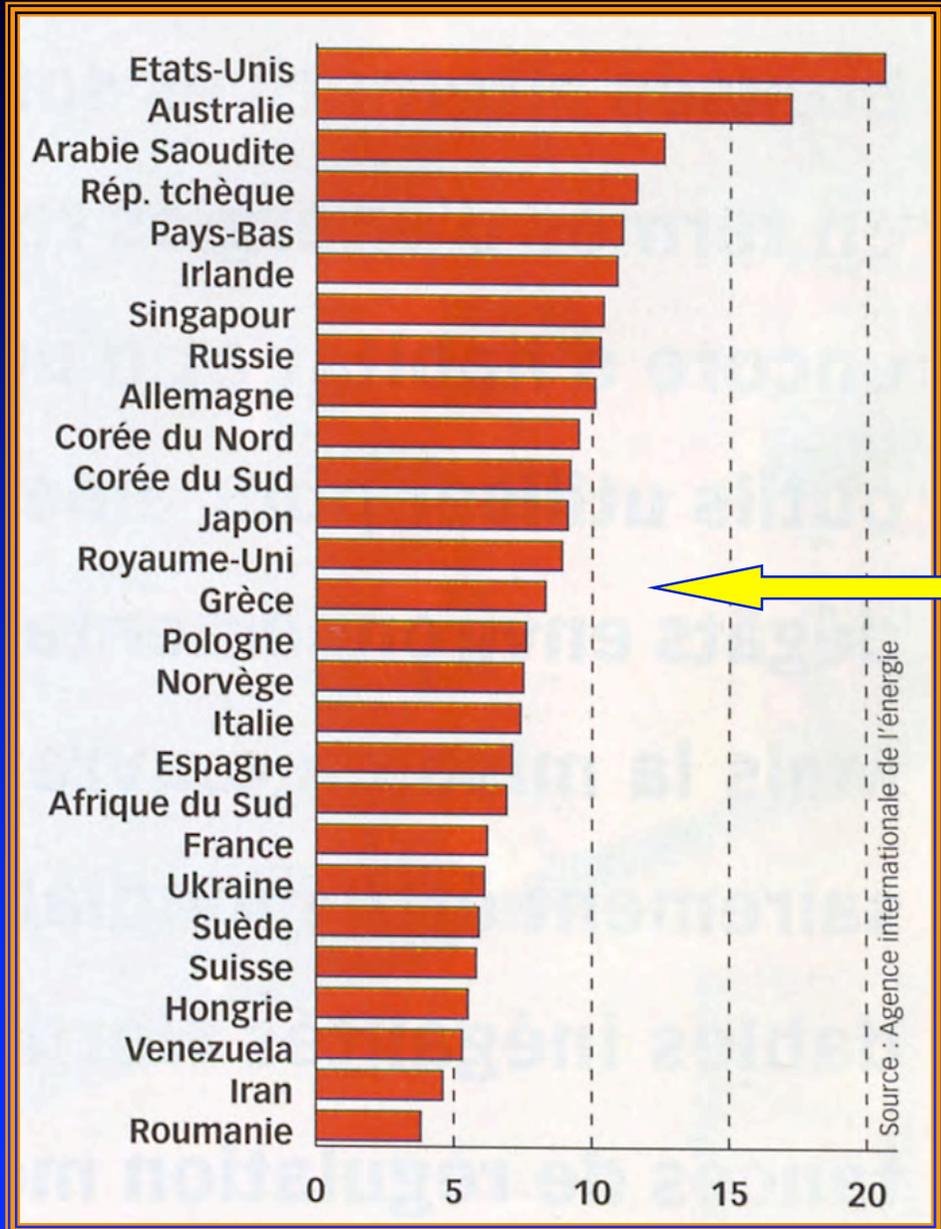
- 40X plus actif que CO<sub>2</sub>
- 1,8 ppm
- décomposition MO en milieu pauvre en O<sub>2</sub>
- Marais, rizières, flatulences des ruminants!,  
décharges ordures ménagères, fuite gaz naturel,  
grisou
- temps de résidence atm très court
- = 20% de l'effet de serre, largement d'origine  
anthropique, teneur augmente de 1 %/an,  
**SOIT LE TRIPLE DU CO<sub>2</sub>**
- + déstockage à partir clathrates?? Risque majeur

# CO<sub>2</sub> émis par personne en 2000 [t CO<sub>2</sub>/hab ]



**r a p p e l**  
**1997 - Kyoto**  
**Il faut réduire**  
**d'ici à 2012**  
**les émissions**  
**de 5,2%**  
**pr 1990**  
 ...  
**la Russie**  
**signe en 2004**  
 ...  
**pas les US et**  
**Australie**

**Entré en vigueur**  
**16-02-2005**  
**En 2006: 156 pays**  
**représentant 61%**  
**des émissions**

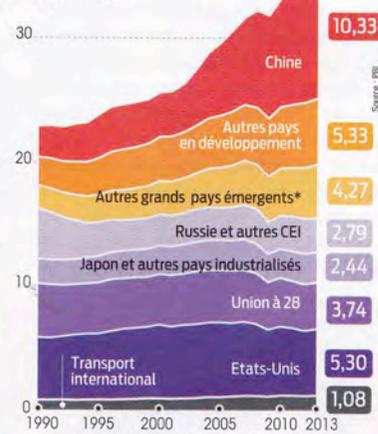


Soit 23,5 Gt en 2005  
 émis par activités humaines

13,5 Gt provenant  
 de 7887 sites industriels  
 ont été récupérés

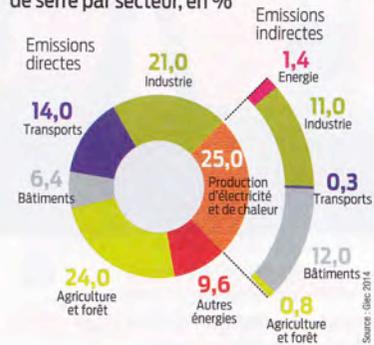
**Belgique**  
**+6,4%**  
**1990-2001**  
**?-7,5%**  
**2010**  
**(objectif)**

Emissions de CO<sub>2</sub> dues à la combustion de l'énergie par région, en gigatonnes

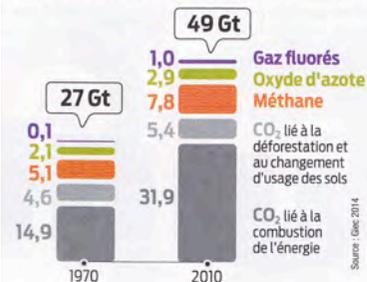


\* Inde, Brésil, Mexique, Iran, Arabie Saoudite, Afrique du Sud.

Répartition des émissions de gaz à effet de serre par secteur, en %

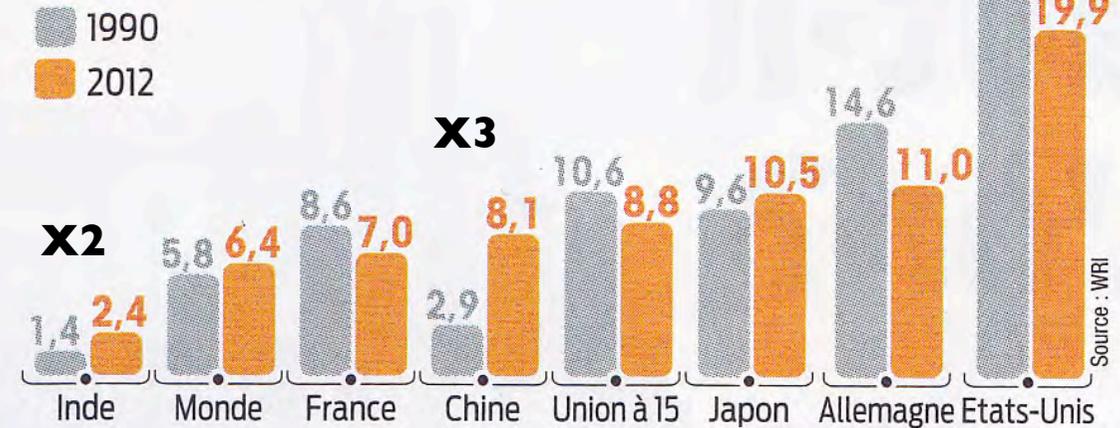


Contribution des différents types de gaz aux émissions totales, en gigatonnes éq. CO<sub>2</sub>



Première stagnation? en 2014  
La crise de 2008 n'est pratiquement pas perceptible

Emissions de gaz à effet de serre par habitant, en tonnes



# EMISSIONS DE GES

(les 6 gaz reconnus par le protocole de Kyoto)

En 2005, en tonnes d'équivalents CO <sub>2</sub>		* Les 6 gaz à effet de serre reconnus par le protocole de Kyoto	Part du pays dans les émissions mondiales	
RANG	Emissions par habitant		RANG	
5	Australie**	26,9 tonnes de GES	1,45 %	17
7	Etats-Unis	23,5	18,44 %	2
8	Canada	22,6	1,94 %	9
13	Arabie Saoudite	16,2	0,99 %	23
18	Russie	13,7	5,19 %	4
25	Allemagne	11,9	2,59 %	8
31	Corée du Sud	11,4	1,45 %	16
36	Royaume-Uni	10,6	1,69 %	10
37	Japon	10,5	3,56 %	6
39	UE à 27	10,3	13,37 %	3
40	Ukraine	10,3	1,28 %	18
41	Espagne	10,1	1,16 %	19
44	Pologne	9,8	0,99 %	22
45	Italie	9,7	1,50 %	14
47	France	9	1,46 %	15
48	Afrique du Sud	9	1,12 %	20
54	Iran	8,2	1,50 %	13
65	Mexique	6,1	1,67 %	11
72	Chine	5,5	19,12 %	1
74	Brésil	5,4	2,69 %	7
120	Inde	1,7	4,91 %	5

En réalité l'Australie est N°5, car dépassé par le QATAR et d'autres pays du Golfe

Courrier International 2009

# EMISSIONS CUMULEES DE CO<sub>2</sub> (1950-2005)

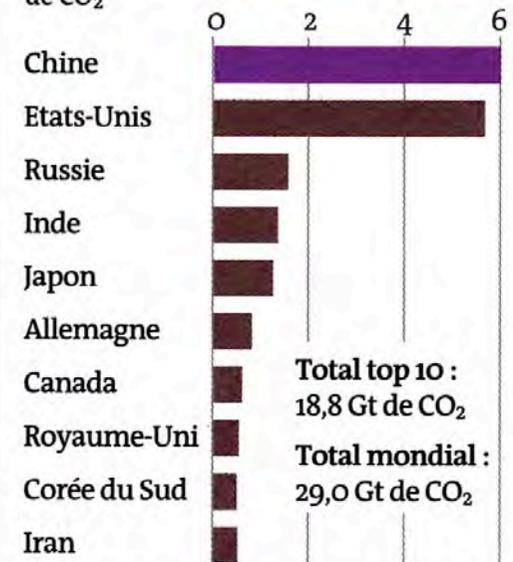
Entre 1950 et 2005, en tonnes

RANG	Emissions par habitant		Part du pays dans les émissions mondiales	RANG
2	Etats-Unis*	809,4 tonnes de CO <sub>2</sub>	26,53 %	1
6	Canada	625,4	2,23 %	11
7	Allemagne	612,1	5,58 %	5
11	Russie	586,5	9,28 %	4
13	Australie	530	1,20 %	16
14	Royaume-Uni	529,8	3,53 %	7
16	Ukraine	471,9	2,46 %	9
19	Pologne	443,8	1,87 %	12
24	UE à 27	413,3	22,39 %	2
33	France	337,5	2,27 %	10
34	Japon	334,5	4,73 %	6
40	Italie	286	1,85 %	13
43	Arabie Saoudite	258,8	0,66 %	26
49	Afrique du Sud	233,5	1,21 %	14
51	Espagne	213,3	1,02 %	17
57	Corée du Sud	189,2	1,01 %	19
76	Iran	108,6	0,83 %	21
79	Mexique	105,2	1,20 %	15
89	Chine	69,9	10,08 %	3
100	Brésil	47	0,97 %	20
125	Inde	21,7	2,63 %	8

\* Les Etats-Unis, 1<sup>er</sup> de notre liste, ne sont que 2<sup>es</sup> de ce classement, car ils sont dépassés par... le Luxembourg !

## Principaux pays émetteurs en 2007

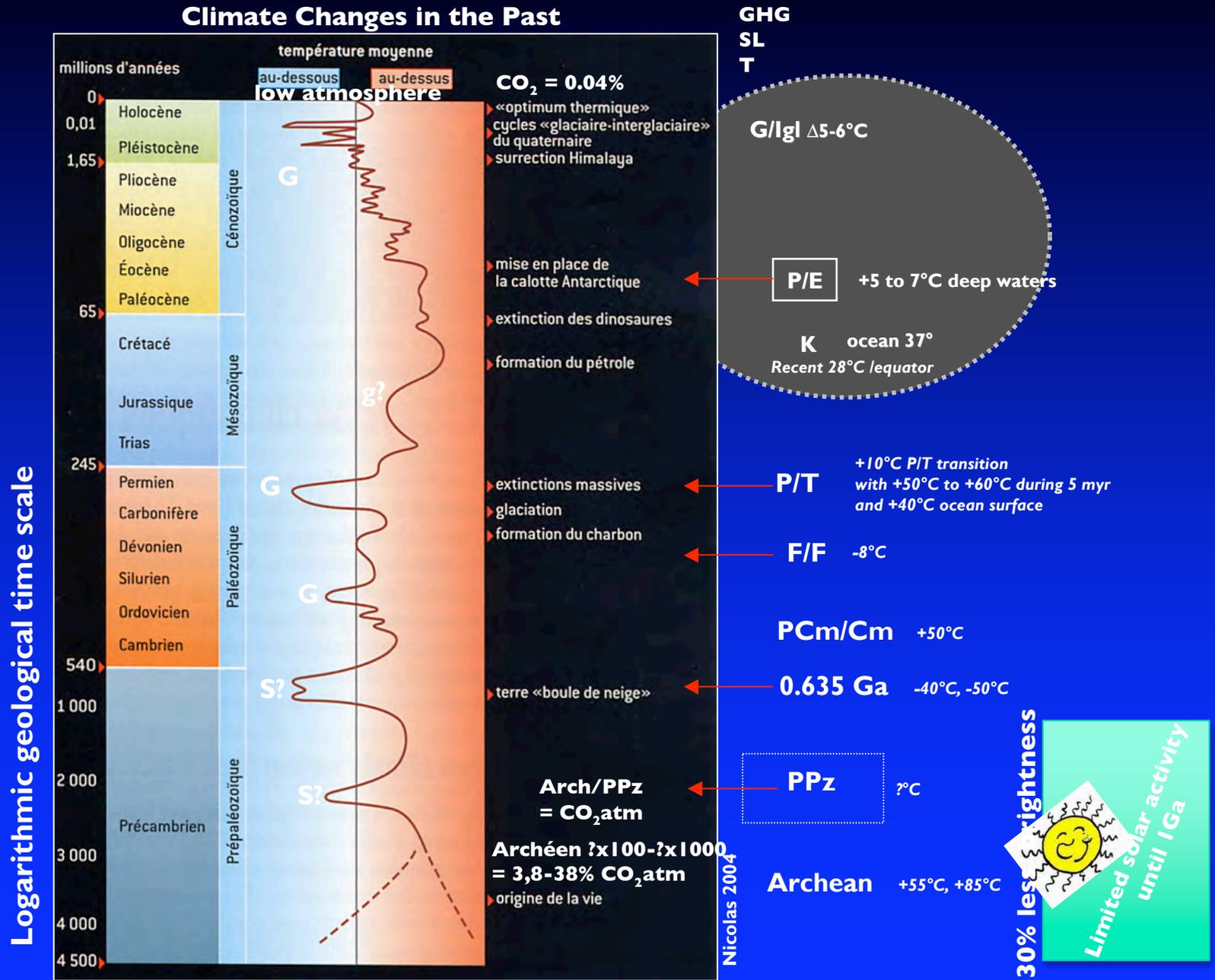
Top 10 des émetteurs, en gigatonnes de CO<sub>2</sub>



SOURCE : AGENCE INTERNATIONALE DE L'ÉNERGIE (AIE)

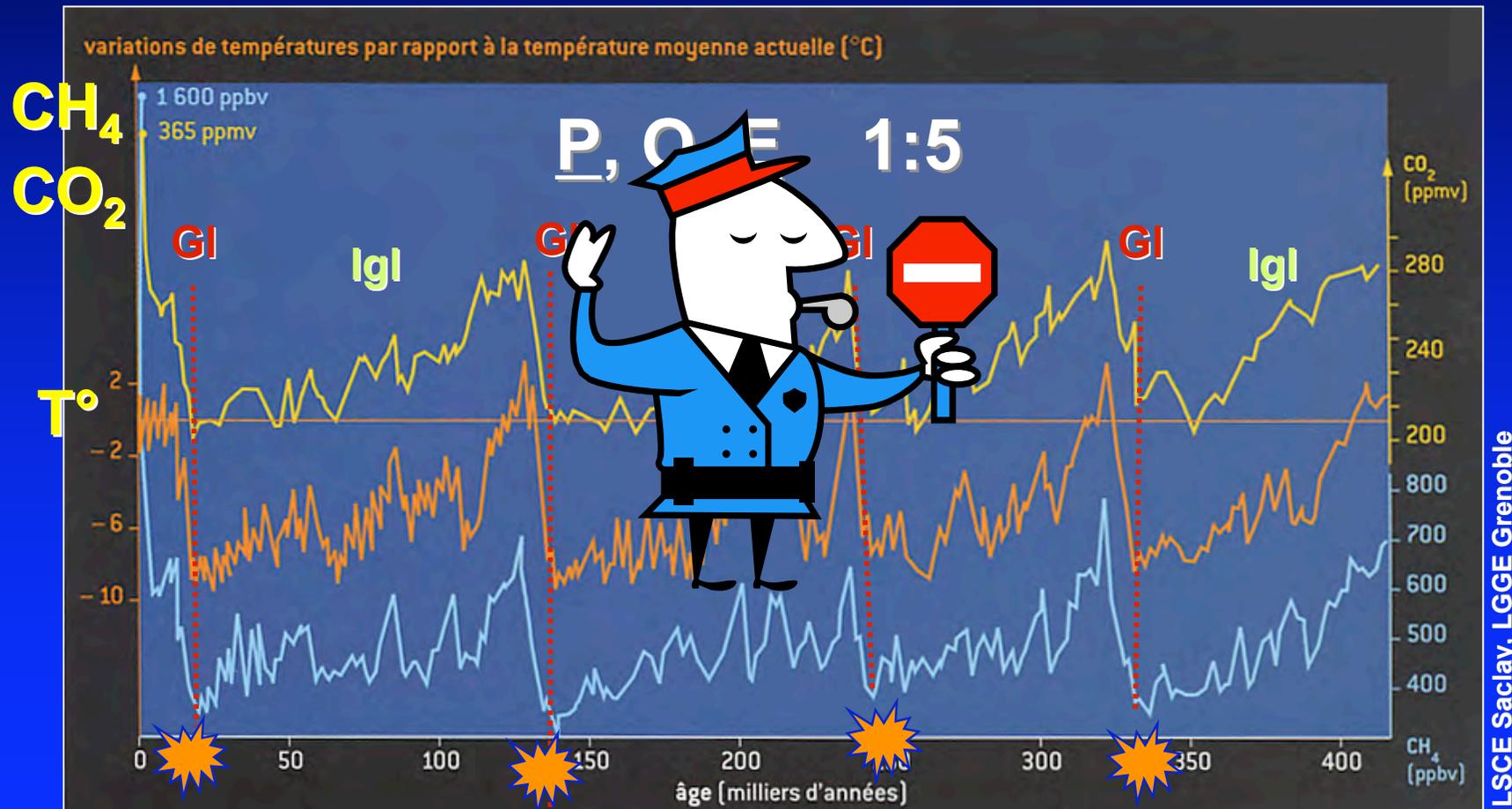
Emissions 2009 = -3% <== crise,  
Au lieu de la progression moyenne annuelle de +3%

# Variations of the average Earth Temperature Climate Changes in the Past



# Variations couplées T°, CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub> depuis 420 000 ans

Données très précises, carottes glaciaires forage VOSTOK, Antarctique  
= cycles réguliers de 'MILANKOVITCH' ou variations périodiques  
de l'ensoleillement de la Terre ==> RECHAUFFEMENT? ACTUEL?...



• Aujourd'hui on remonte à -740 000 années, forage EPICA 3140m, janv 2003  
= programme EPICA European Project for Ice Coring in Antarctica  
(analyse des isotopes et des bulles piégées dans la glace)

• A plus court terme, depuis 1850 période pré-industrielle:  
 $\text{CH}_4 = \times 2$  [700 à 1750 ppb] = 50% en plus pour l'effet de serre!  
 $\text{CO}_2 = < \times 2$  [280 à 385 ppm  $\implies$  PPM  $\neq$  ppb!], mais  $\text{CH}_4$  30X +absorbant que  $\text{CO}_2$

Augmentation méthane = anthropique exploitation gaz naturel, décharges,  
zones agricoles irriguées (rizières), bétail et ... plantes [2006, rhizosphère??]

## + HYDRATES DE METHANE ou CLATHRATES

molécules d'eau en 'cages' ayant piégé du méthane sous forme solide  
[intérêt pétrolier, cfr plus loin]

dans marges continentales, où l'eau est relativement froide,  
et la pression assez élevée, avec matière organique suffisante  
pour satisfaire les bactéries méthanogènes

**EXTREMEMENT INSTABLES**

$\implies \Delta T(+), \Delta P(-) \iff \Delta \text{climatiques, soulèvements tectoniques ou}$   
glissements sous-marins

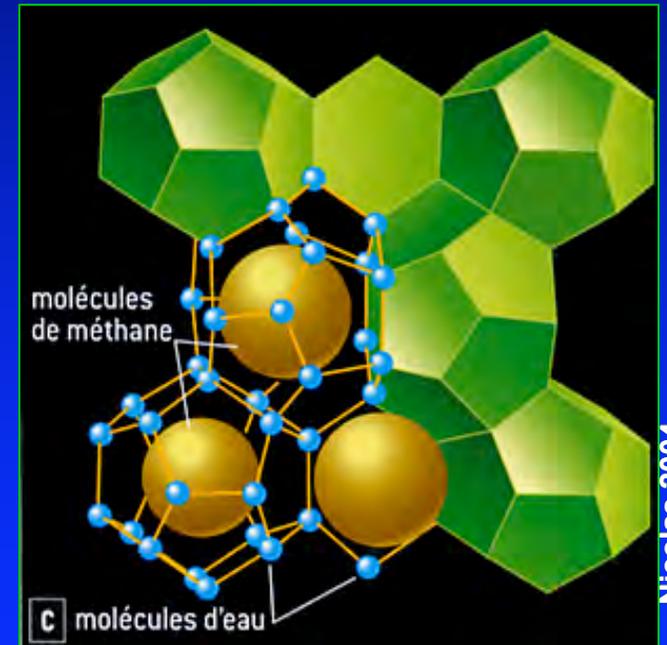
# les hydrates de méthane ou CLATHRATES

découverts dans les années 70' lors de forages marins  
danger = puits éruptifs .... ensuite = source d'E?

Ech naturels de clathrates,  
dragués en mer et  
se décomposant sur le pont

Chauffée dans les mains,  
la glace des clathrates  
fond, libérant de l'eau et  
du méthane ici enflammé

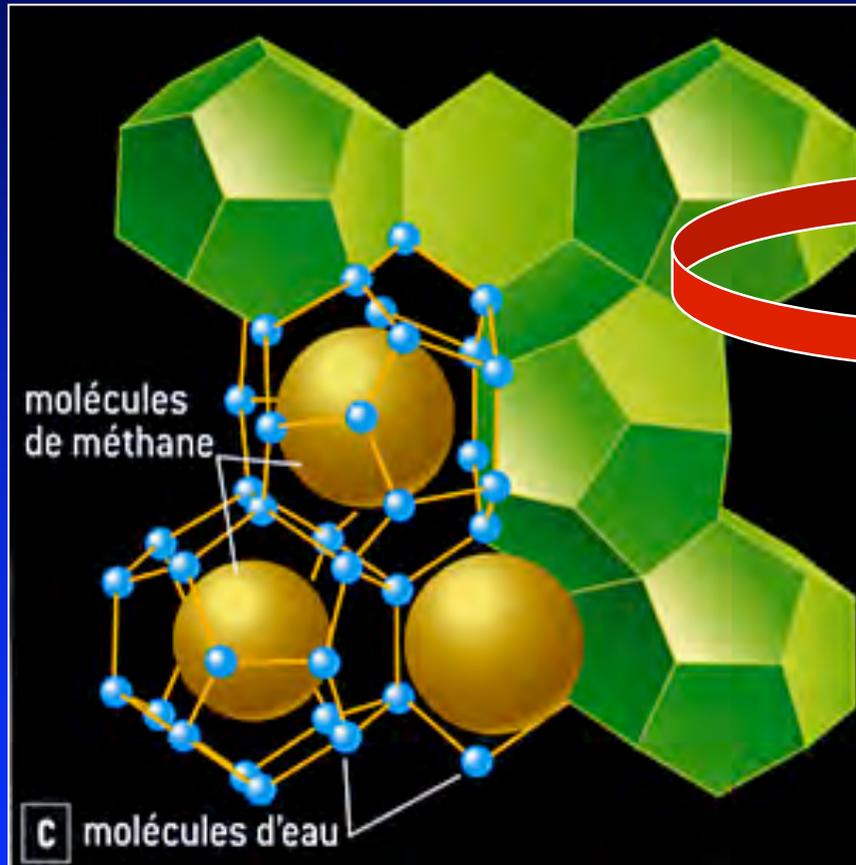
Structure cristalline des  
clathrates montrant  
l'empilement des polyèdres  
(en vert)



Les clathrates sont blancs  
et interstratifiés avec le  
sédiment

En écorché, les cages de  
molécules d'eau (en bleu)  
piégeant les molécules de méthane

# les hydrates de méthane ou CLATHRATES



=  
**piège très efficace,  
1 m<sup>3</sup> de clathrates peut contenir  
près de 170 m<sup>3</sup> de méthane gazeux**

◇ 'prisonniers' à 70m de pfdieur  
dans le permafrost sibérien,  
Ils s'échapperont dès que  
 $T^{\circ} = -5C^{\circ} \implies$  crise climatique?  
◇ + 'tsunamis' si exploités sur  
le talus

**Origine? Décomposition anaérobie de bactéries**  
**Connues au moins jusqu'à 1km de profondeur (forages océaniques)**

# les hydrates de méthane ou CLATHRATES

**années 80': transition Paléocène-Eocène [-55Ma]**

**On découvre que les rapports isotopiques du carbone avaient changé TRES RAPIDEMENT en moins d'un millénaire dans les océans profonds, sur Terre aux pôles ou aux tropiques**

**L'isotope le plus léger  $^{12}\text{C}$  a été favorisé aux dépens du  $^{13}\text{C}$**

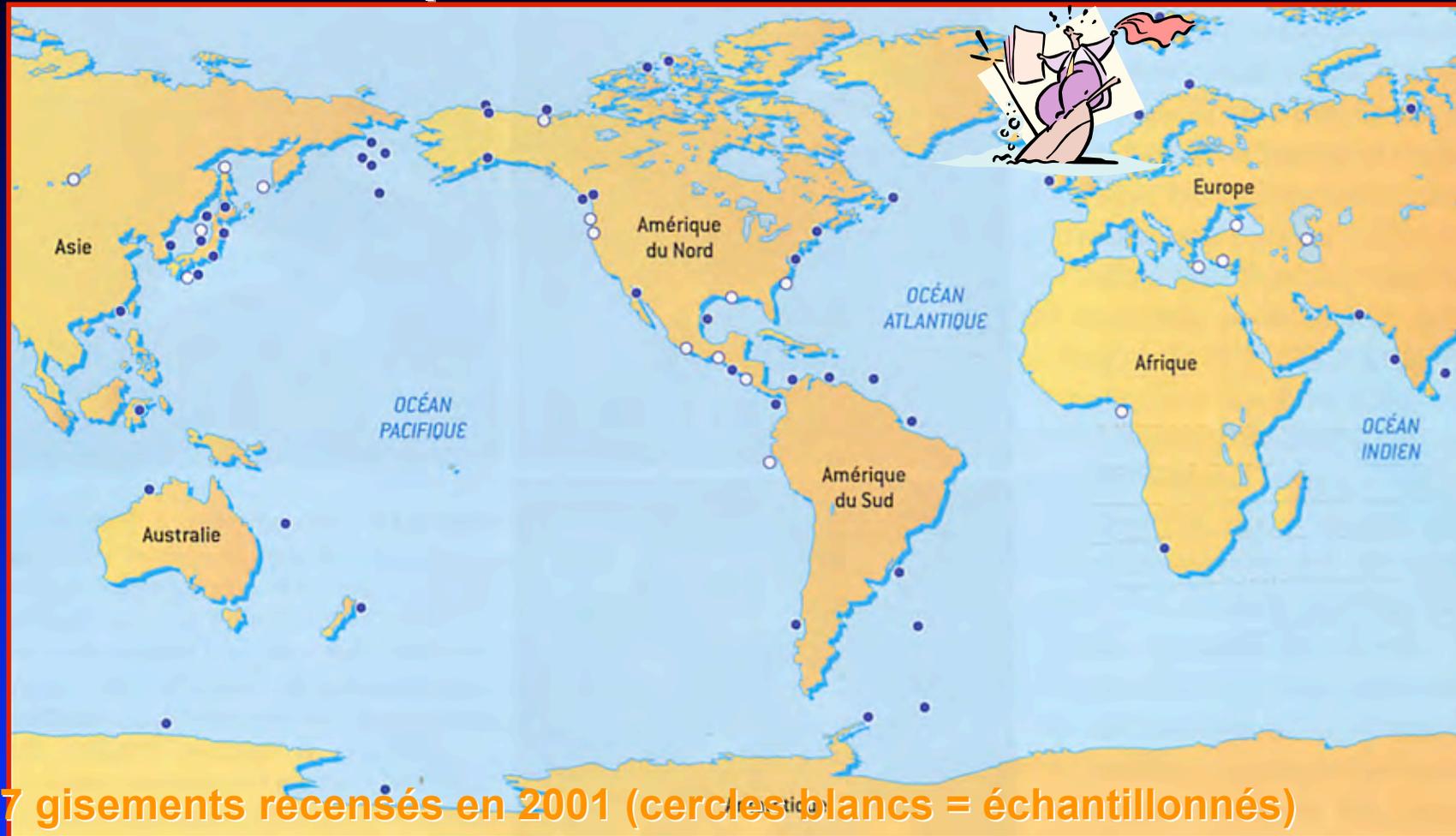
**Au même moment la Planète a connu un réchauffement  
T° moy = augmentation de 3 à 4°C, et plus aux hautes latitudes,  
du fond des océans pendant 10.000 ans. Retour 'à la normale' après  
200.000 ans (progressif par 'feed-back'...)**

**depuis lors: ? épisodes soudains au J, P/T et Pcm/Cm**

**Auj: le mécanisme déclencheur est (toujours) inconnu...**

**= possible modèle de catastrophe climatique**

# Le réchauffement peut-il induire une fusion des clathrates?

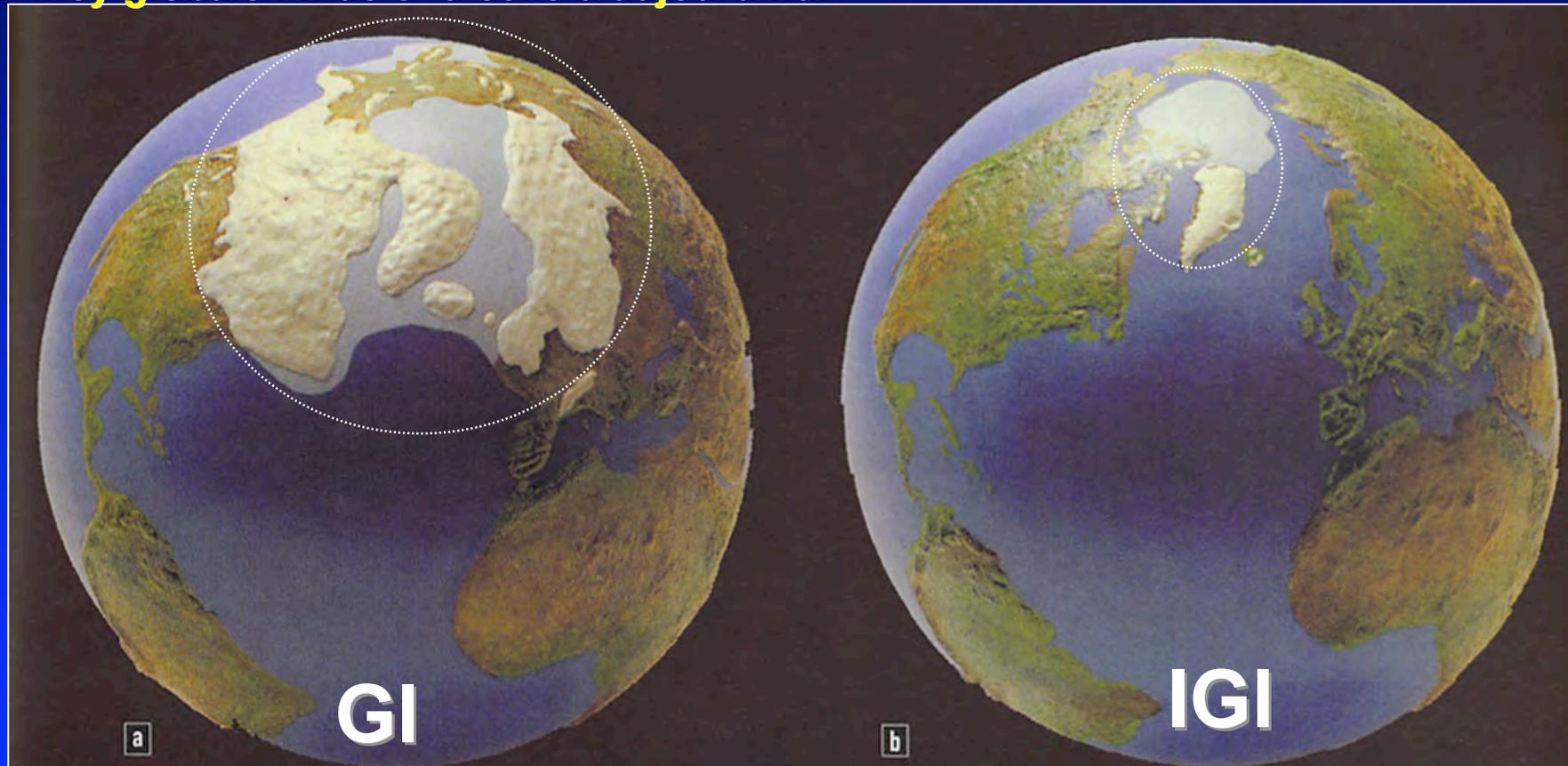


77 gisements recensés en 2001 (cercles blancs = échantillonnés)  
nb à la fin dernière GI ==> réchauffement de l'eau de qq d°  
==> fusion des clathrates dans les sédiments de la marge de Norvège  
(coussin eau-méthane) ==> gigantesque glissement sous-marin en  
Mer du Nord: 450 m (ép) X 800 km (raz-de-marée, tsunamis ...  
et dépôt de sédiments à + 4m en Ecosse [nb 26.12. 2004 -1030m==>-30m qq h!]

# Calotte glaciaire Arctique

**Dernière glaciation -24 000 ans  
couvrait une grande partie hémisphère Nord  
T° moy globale inf de 5° à celle d'aujourd'hui**

**Aujourd'hui = Interglaciaire  
(cf NM...)**



Actuellement on remonte à -1,7 Ma avec 17 cycles  
Soit 17 X 100 000 ans [excentricité, Milankovitch 1924]

Précession  
Obliquité  
Excentricité

$$\Delta T_{\text{air}} = 5-6^{\circ}\text{C}$$

**Aujourd'hui = Interglaciaire pour encore 50 000 ans**

Grâce à EPICA: 'court terme possible' = Dryas+Optimum Holocène

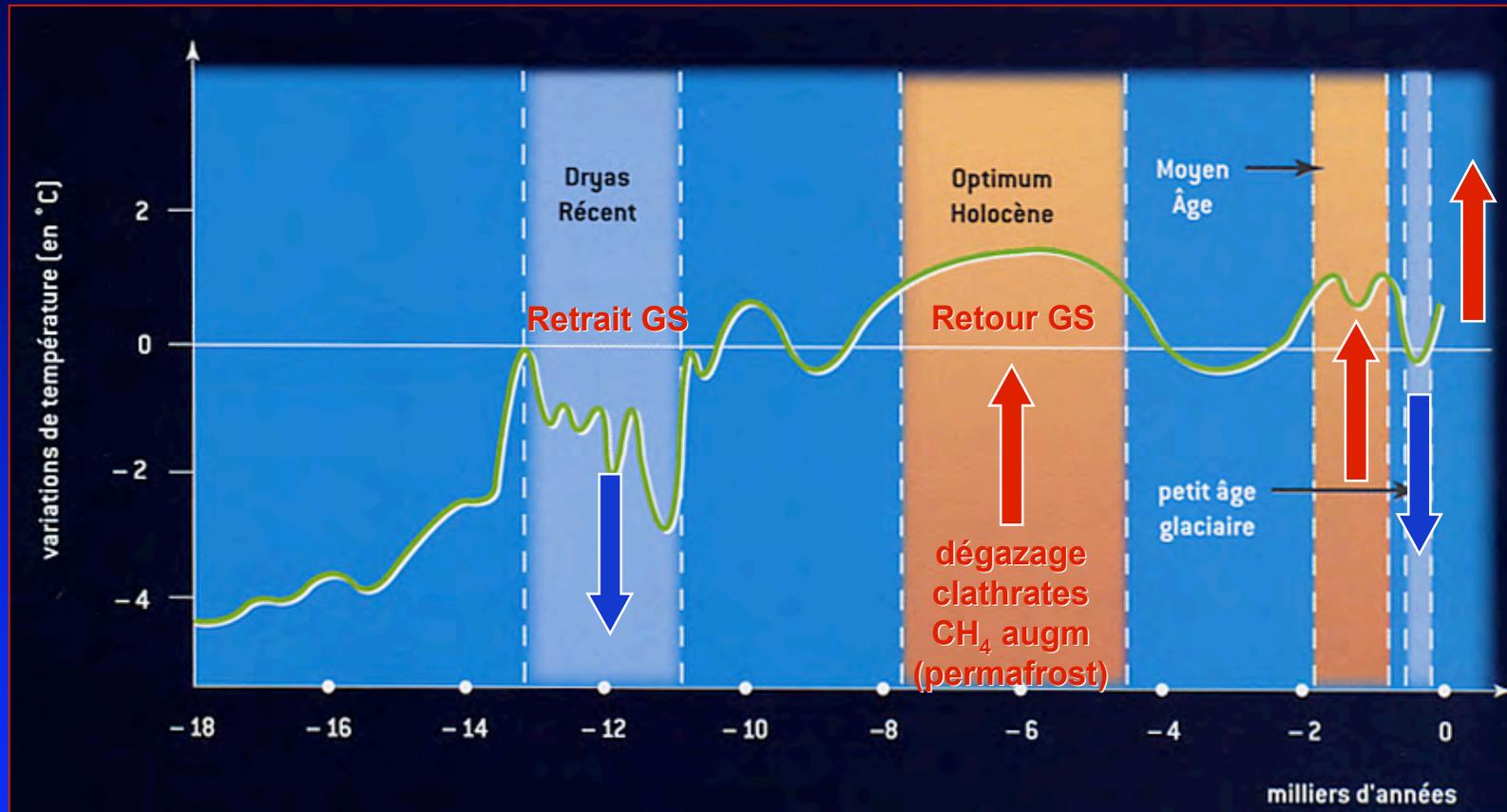
- *Dryas Récent*: refroidissement pdt 2000 ans [entre -14 et -12000 ans]  
cause: retrait du Gulf Stream
- *Optimum Holocène*: réchauffement de 2-3°C pdt 3500ans [-8 à -4500]  
cause: retour du Gulf Stream, Sahara = savane 'humide'...
- + *Moyen-Age (chaud)* avec Viking à la côte Sud '*Greenland*'
- + '*Petit âge glaciaire*' entre la Renaissance et ère industrielle (cf Brueghel)

a

b

# Variations de la T° depuis la fin de la dernière glaciation

fortes variations climatiques autour de la T° moyenne du XX<sup>e</sup> siècle

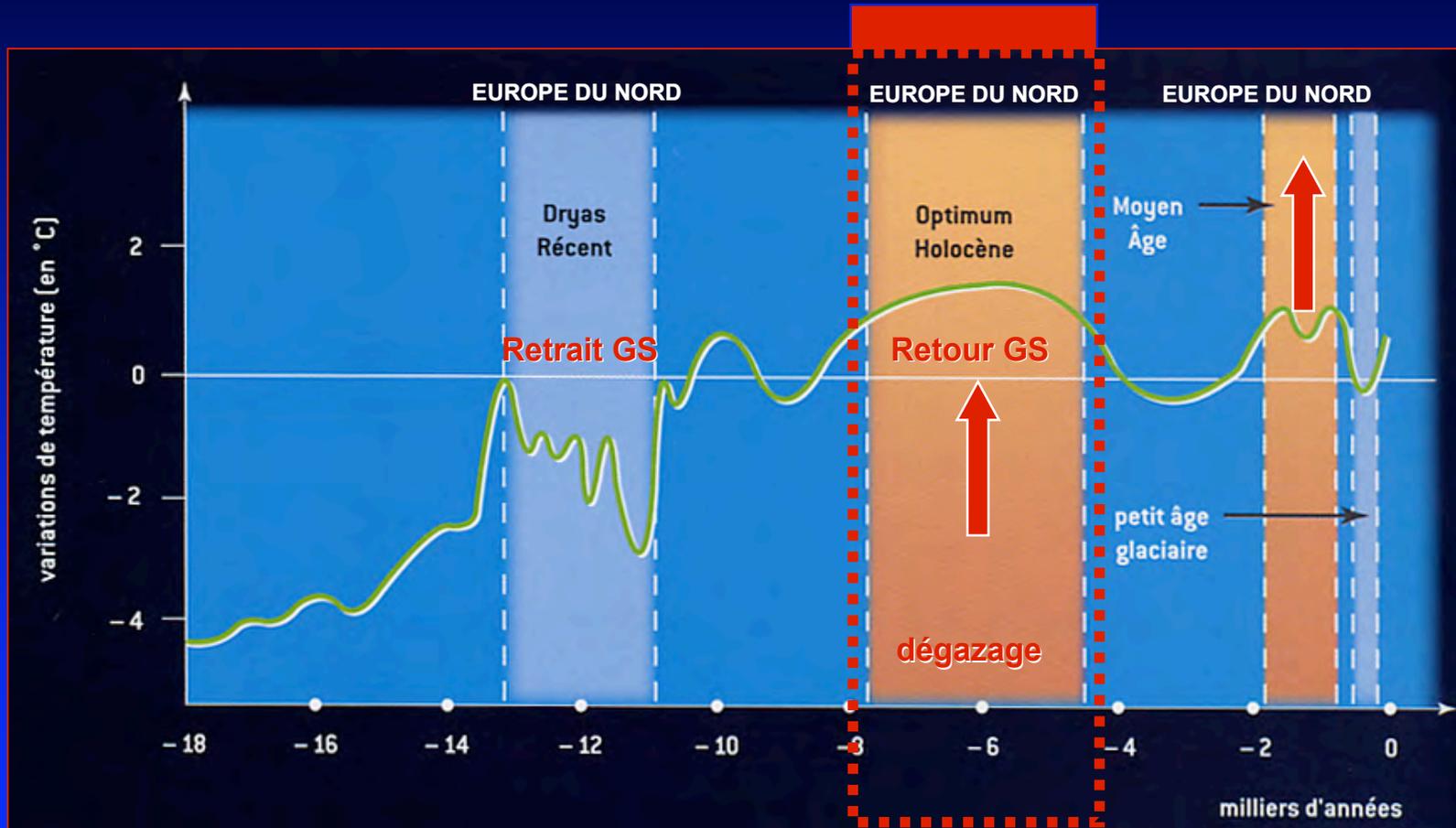


Depuis la fonte des glaciers et calottes polaires [-18 000 à -15 000ans],  
le NM est remonté (en trois phases) d'environ 120m

**Le réchauffement général fut interrompu vers -12 500 ans, par un millénaire  
froid = 'événement du DRYAS RECENT' lié au retrait du Gulf Stream**

# Variations de la T° depuis la fin de la dernière glaciation

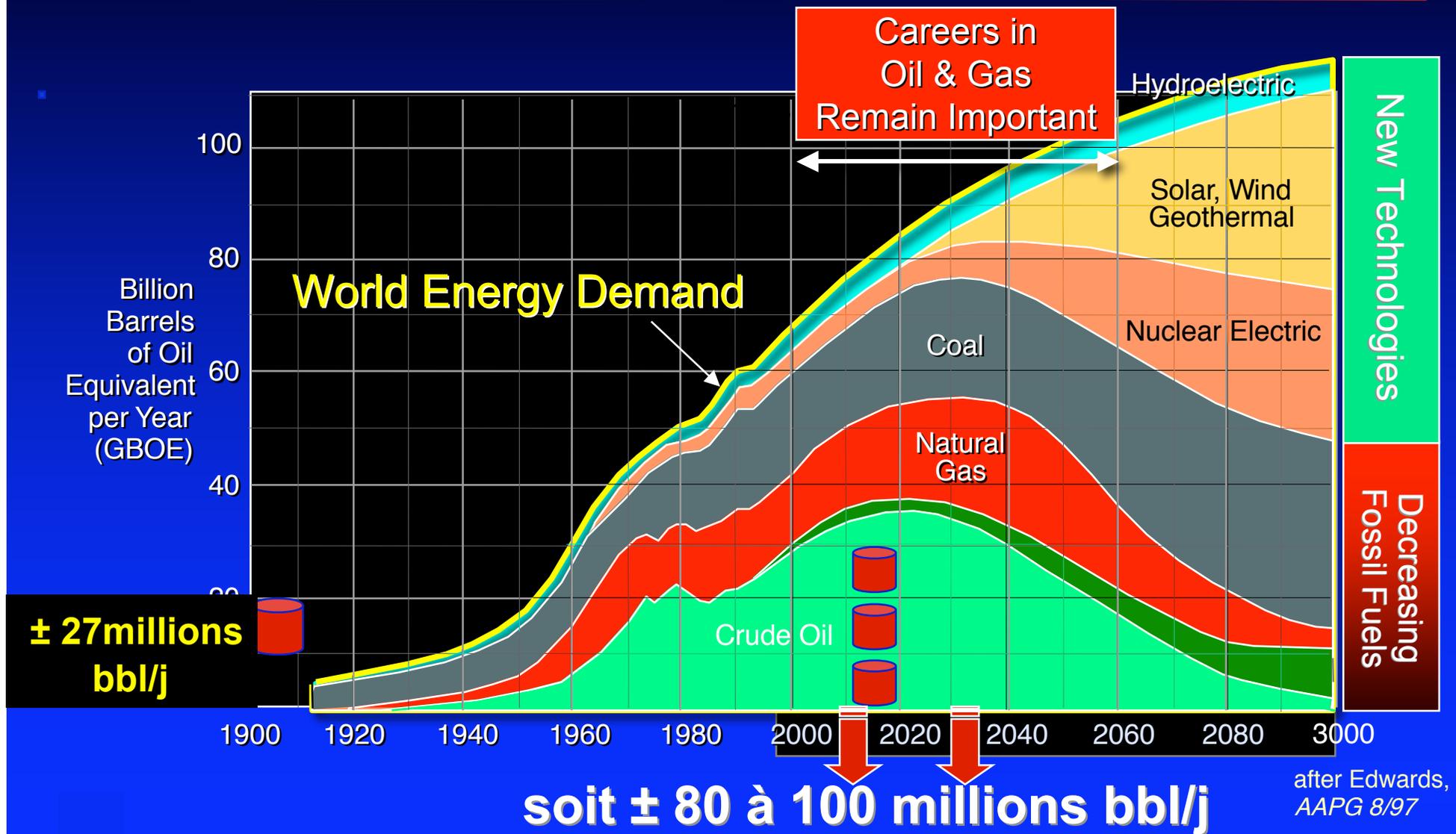
fortes variations climatiques autour de la T° moyenne du XX<sup>e</sup> siècle



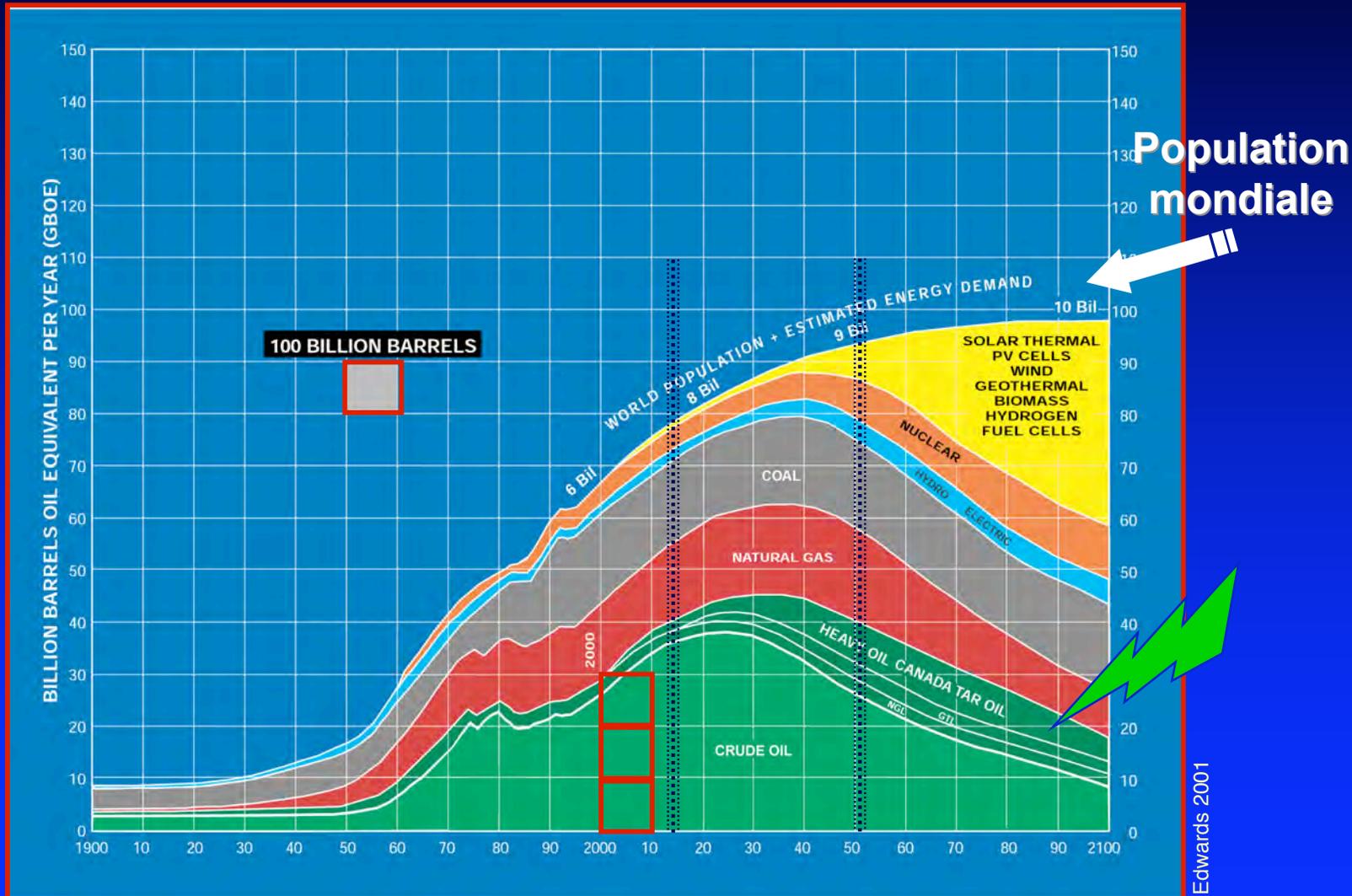
Effet de Serre?

=? situation fin 21<sup>e</sup> siècle [pour la Planète]

# Projected World Energy Supplies = Production

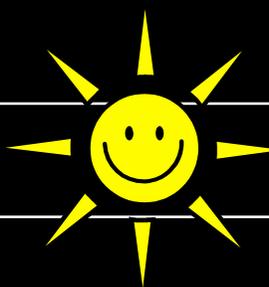


# Estimates of 21st Century World Energy Supplies



**> 30 milliards bbl/année**

**EMISSIONS DE CO<sub>2</sub>\* OU EQUIVALENT CO<sub>2</sub> EN g/kWh  
PAR SOURCE D'ENERGIE (2009)**

<b>NUCLEAIRE</b>		6
<b>HYDRAULIQUE</b>		4 à 7
<b>EOLIEN</b>		3 à 22*
<b>SOLAIRE</b> photovoltaïque		50 à 150**
<b>GAZ</b> cycle combiné	400	
<b>PETROLE</b> fioul lourd	850	
<b>CHARBON</b>	750 à 1100*	
<b>BIOMASSE</b> bois	0 à 1500***	

J.Ph Braly 2009 La Recherche

\* suivant technologie \*\* suivant lieu de fabrication \*\*\* si replantation ou pas

**plus un combustible contient de l'hydrogène dans sa molécule  
moins il rejette de gaz carbonique**

**plus un combustible contient de l'hydrogène dans sa molécule  
moins il rejette de gaz carbonique**



**100-200 g/km**

**ou**

**1 à 2 g/10m**

... ou encore 1 kg/ 5 à 10 km!