L'énergie au XXI° siècle

L'énergie au XXI° siècle

- Quelles **réponses** pour quels **besoins**
- Comment envisager un **MIX énergétique**
- Quelle place pour le **nucléaire**
- Et le **développement durable** ?
- Perspectives de la **COP21**…

1. Quels sont en général les besoins en énergie ?

L'énergie est indispensable à la vie et au développement économique

Elle se présente globalement sous trois formes :

- La **chaleur** (industriels ou particuliers ; production locale)
- **L'électricité** (consommation déportée de la zone de production)
- Les **transports** (bateaux, avions, voitures ; transportable)

Deux unités de mesure et de comparaison :

Le **KWh** (ou équivalent KWh pour le gaz par exemple)
La **Tep** (tonne équivalent pétrole, 11628 KWh)

Quelques données générales très contrastées..

L'être humain a besoin physiologiquement de 2.7KWh/j soit 1 GTep/an
Actuellement **seulement 0.6 GTep/an** en moyenne…

Allemagne : $500,07 / par semaine

L'espérance de vie en France est de 80 (homme) à 85 ans (femme)
Dans les PVD elle n'est que de 45 ans (homme) et 47 ans (femme)

Tchad : 1,62 $ / par semaine

Évolution de ces besoins globaux...

Deux chiffres clefs !

Dans le monde, la **consommation d'énergie primaire** a varié :

De 1900 à 2000, de 1 à 10 GTep/an soit **+ 2.35% par an**

La population a augmenté :

Jésus-Christ : 300 millions d'habitants environ

Napoléon, 1800 : moins de 1 milliard d'habitants

Jules Ferry, 1900 : 1.65 milliard

Nous... 2000 : 6 milliards soit **+1.4% par an**

Mais il existe de fortes disparités entre les pays…

Les pays développés consomment plus vite que leur population

Les pays en voie de développement c'est l'inverse…

Et les consommations individuelles sont très différentes !

Aujourd'hui : près de 7 milliards de terriens !

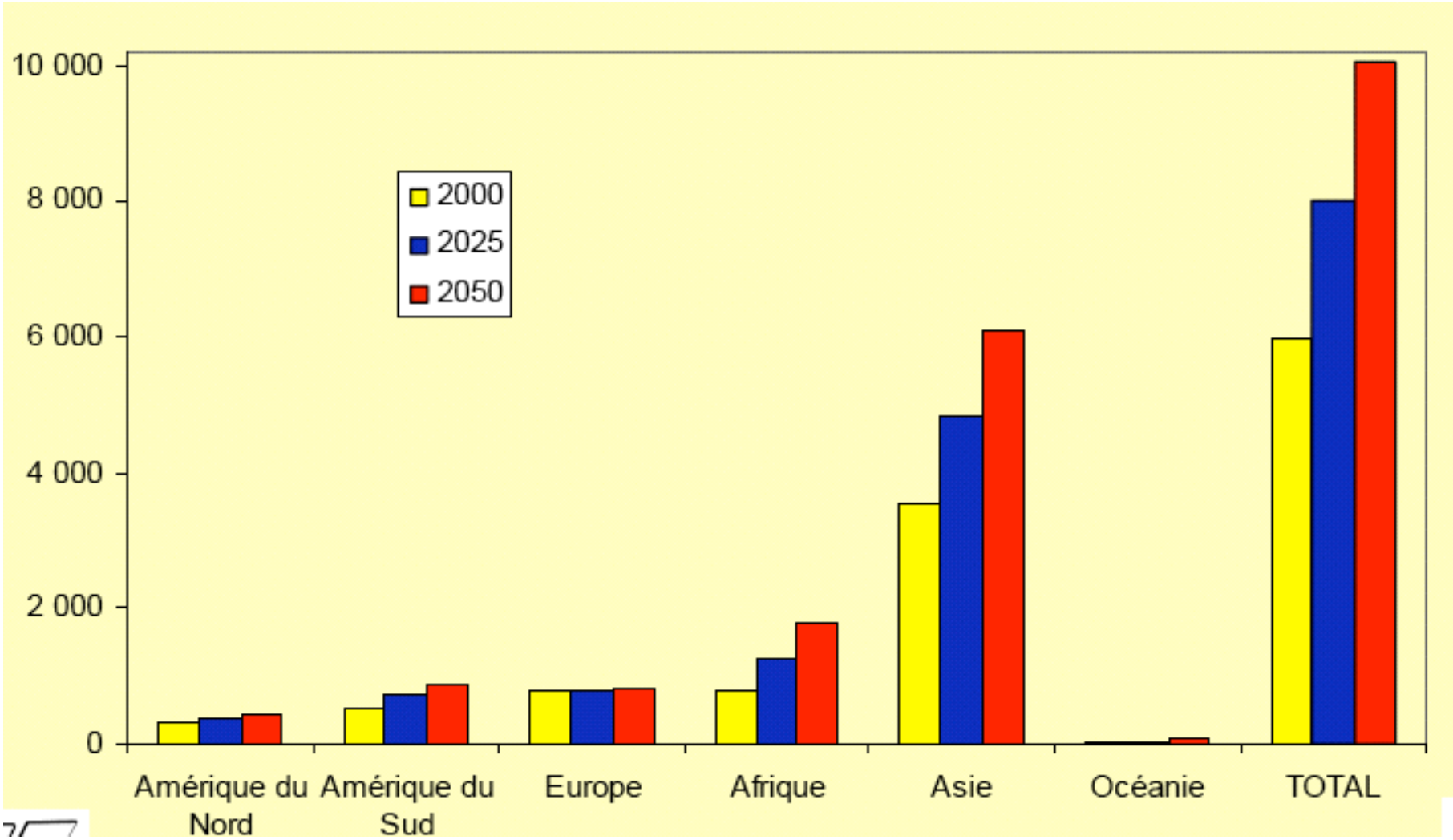
Chaque jour 220 000 de plus…

Chaque jour 365 000 naissances, soit 4 naissances à la seconde !

Pays	Asie	Afrique	Amérique latine	Europe	Amérique du nord	Océanie
Taux	**57 %**	**26 %**	9 %	**5 %**	**3 %**	0.8 %

Donc les besoins entre ces zones sont encore plus criants…

Comment sera répartie la population en 2050 (en millions) ?



Trois scénarii sont avancés :

A. Les **pays développés font des économies d'énergie** et les PVD parviennent au niveau de l'Europe…

B. Les **pays développés conservent une croissance à 2.35% par an**, mais certains PVD gardent un taux de croissance plus élevée pour rattraper le retard par rapport aux pays industrialisés (Chine, Inde par exemple).

Qu'est ce que cela implique sur la consommation totale d'énergie ?

	2000	2025	2050	2025	2050
Am. Nord	2880	1656	1935	5147	9200
Am. Sud	590	2809	3556	1573	4193
Europe	2965	3570	3638	5300	9472
Afrique	308	5794	8079	821	2189
Asie	3260	22905	28951	17693	31622
Océanie	178	229	295	318	570
	10181	36963	46454	30852	57246
		Hypothèse 1		**Hypothèse 2**	
		Économies d'énergie		**Peu de limite**	

C.Tout le monde maintient un **taux de croissance à +2.35%** par an
Soit un total de **32.5 GTep/an** en 2050
Ce qui impose un **effort considérable en économie d'énergie…**
Ce sont bien les PVD qui font s'envoler la consommation !

Au bilan on constate que selon les scenarii…

Hypothèse 1 : économies d'énergies, on passe de 10.2 à **46.4** GTep/an

Hypothèse 2 : limitation des PVD et frein sur la croissance : **57.2** GTep/an

Hypothèse 3 : frein sur la croissance, on passe de 10.2 à **32.5** GTep/an !

Entre la plus minimaliste et la plus réaliste,
L'augmentation varie du **simple** (**22.3** GTep/an) au **double** (**47** GTep/an)

Entre 1900 et 2000, l'accroissement des besoins a été de 9 GTep

Entre 2000 et 2050, il serait entre 20 et 50 GTep !

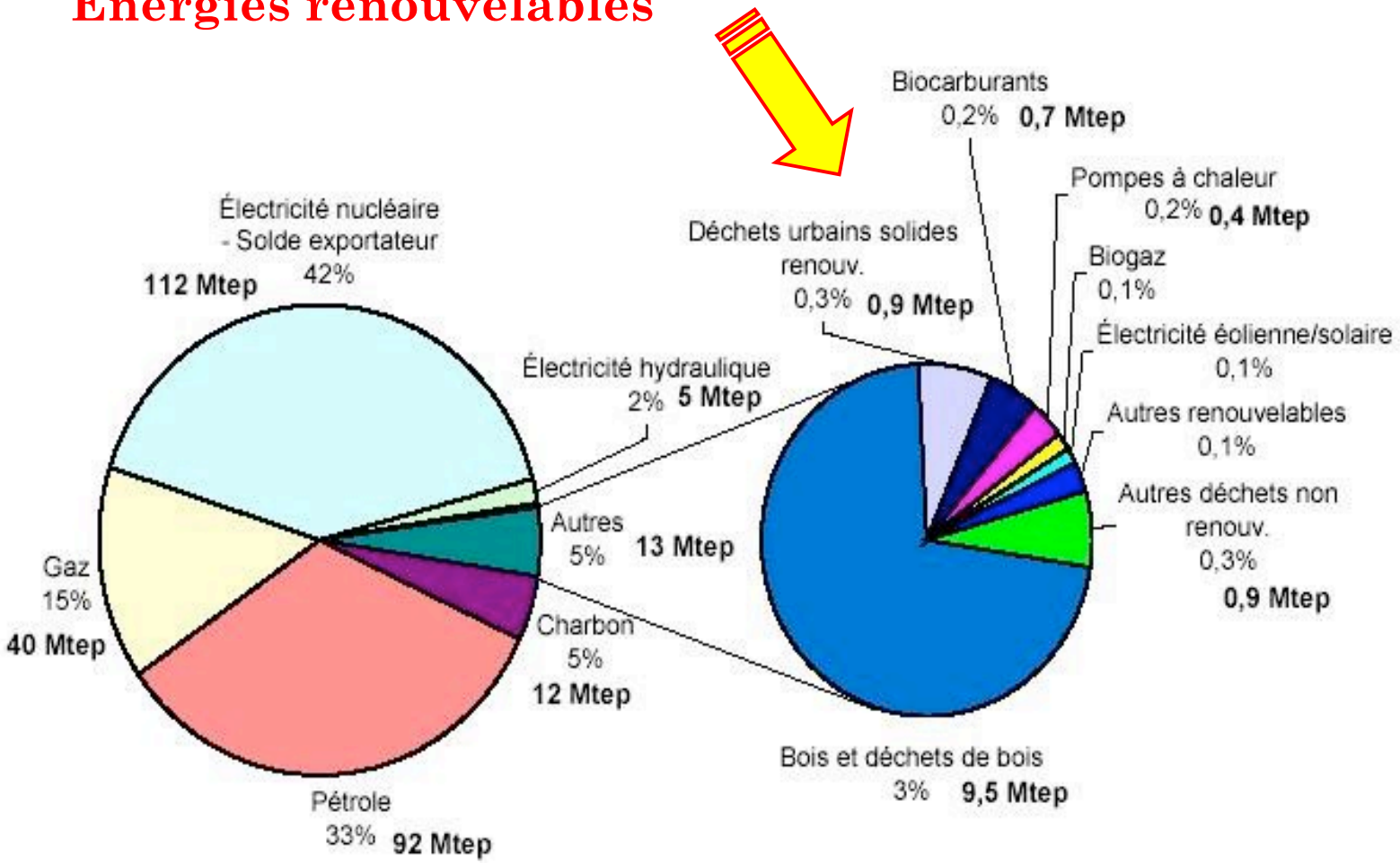
2. Quelles sont les différentes sources d'énergie ?

Eau	énergie hydraulique
Soleil	énergie solaire (chaleur, électricité)
Courants	énergie hydrolienne (Ecosse, Raz Blanchard)
Vents	énergie éolienne
Marée	énergie marémotrice (La Rance)
Biomasse	houille verte, déchets
Géothermie	forages (1° par 30 mètres)
Vapeur	charbon, pétrole et gaz (matières fossiles)
	nucléaire (fission, fusion)

Énergie musculaire…

Sources d'énergie (bouquet énergétique primaire en France 2010)

Energies renouvelables



Quelles utilisations et quelles contraintes ?

Pour la chaleur, elle doit être utilisée sur place :
Combustibles fossiles, géothermie, biomasse

Pour l'électricité, elle doit être **essentiellement distribuée**

Combustibles fossiles, solaire, eau, courants, éolien, marée…
Elle n'est **pas stockable en quantité** (batteries)
Elle est **peu convertible actuellement** (remontée d'eau en barrage, hydrogène).
Par contre elle est **très facilement modulable**.

Pour le **transport**, l'énergie est utilisée par le mobile lui-même

Il ne reste que **combustibles fossiles**, vent et énergie musculaire…
Le nucléaire est réservé à des cas particuliers.
Or le transport est une **part importante des besoins**… 32%

Combustibles fossiles : état des réserves (estimation)

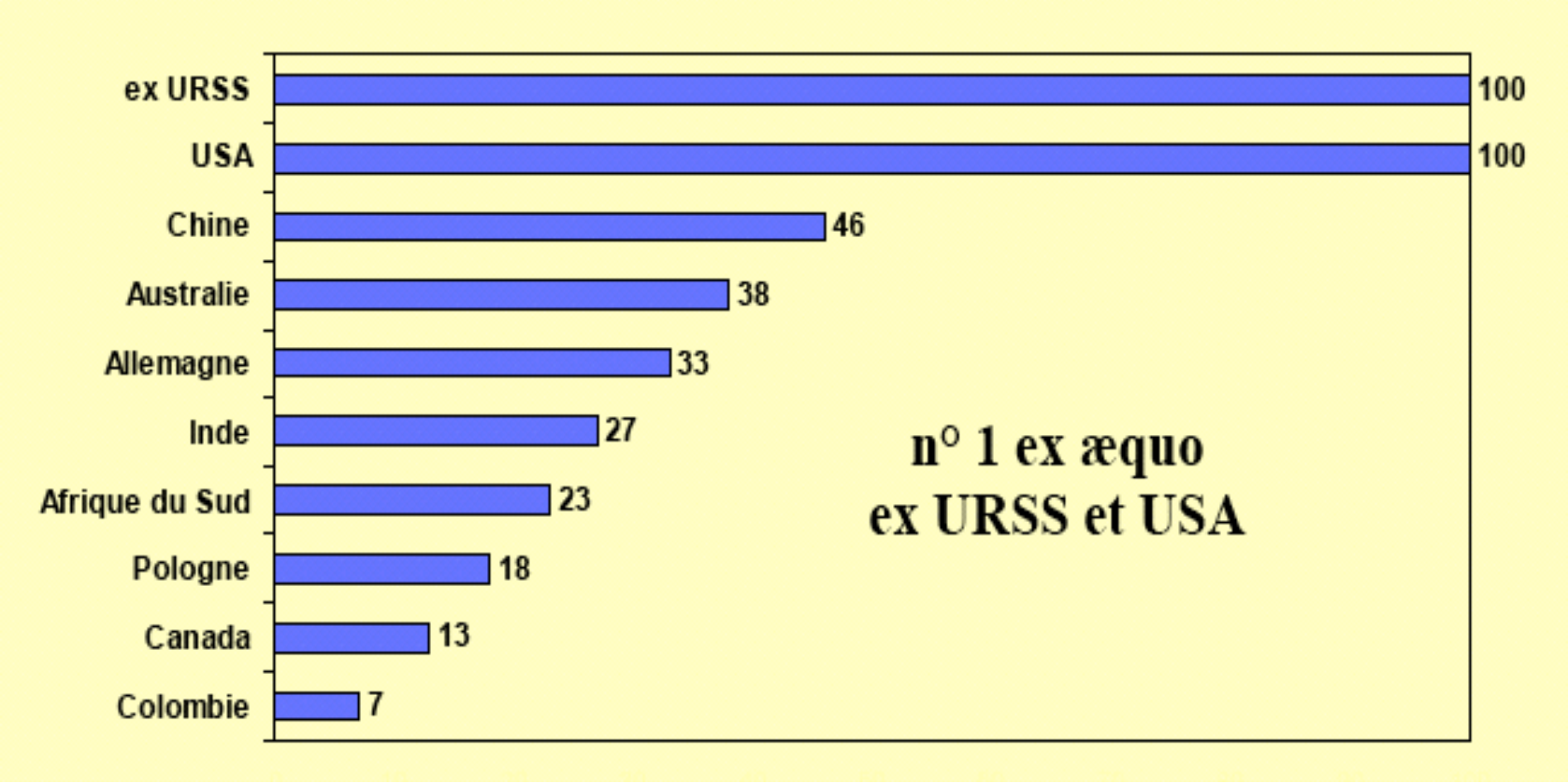
Charbon (houille et lignite)	1173 milliards de tonnes 752 GTep **420** ans au rythme actuel
Gaz (pas les gaz de schiste)	157 700 milliards de m3 130 GTep **65** ans de réserve au rythme actuel
Pétrole	139 milliards de tonnes (109 : OPEP) 139 GTep, **40** ans de réserve

Et les **gaz de schiste** (pas vraiment évalué mais importantes réserves)

Les bébés d'aujourd'hui verront la disparition du pétrole
Et pour chauffer leurs vieux os, à leur retraite, celle du gaz !

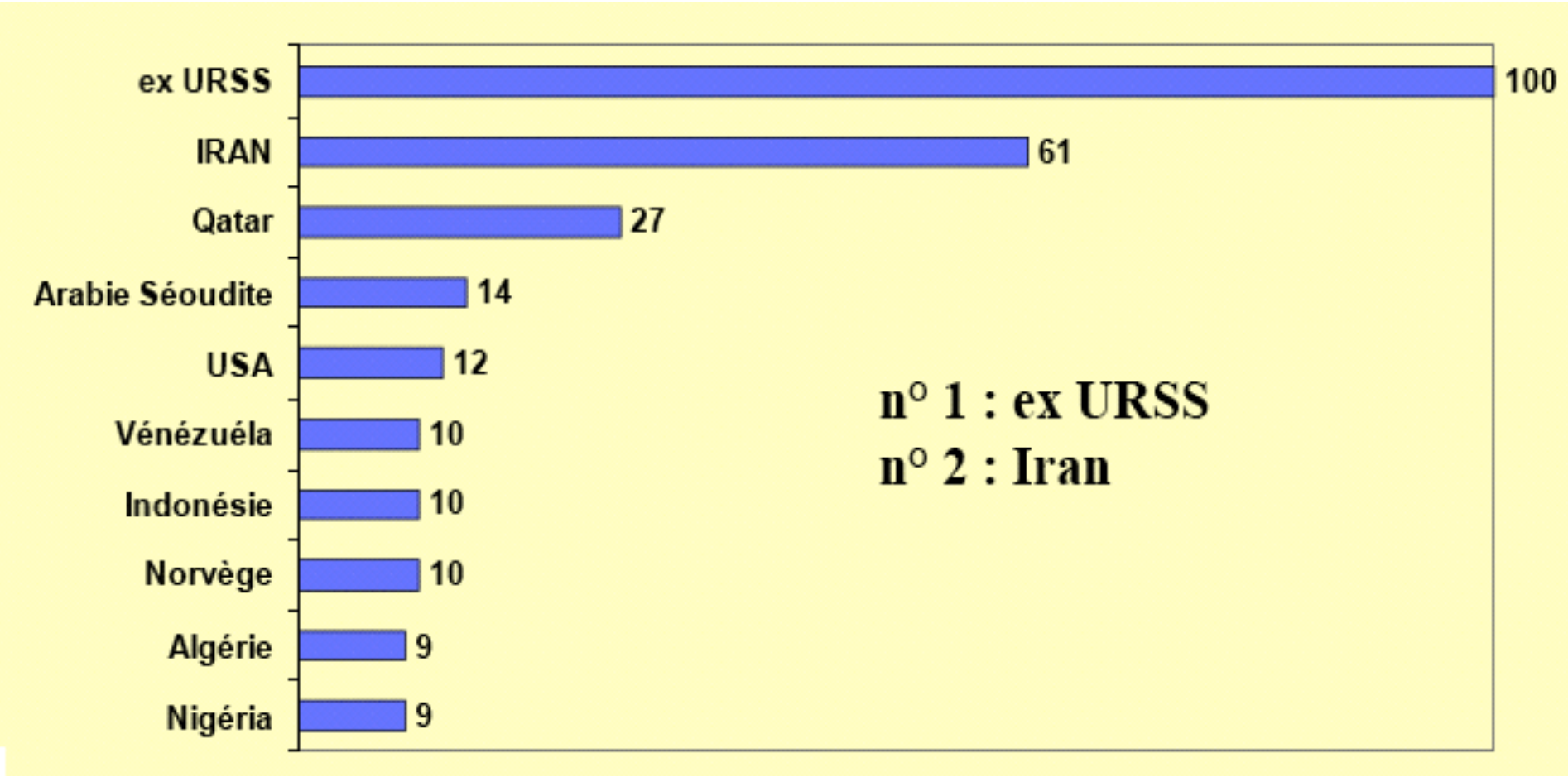
Distribution des réserves : des atouts stratégiques…

Charbon (houille et lignite) : 1 173 milliards de tonnes (782 GTep)
420 ans de réserve, pour…



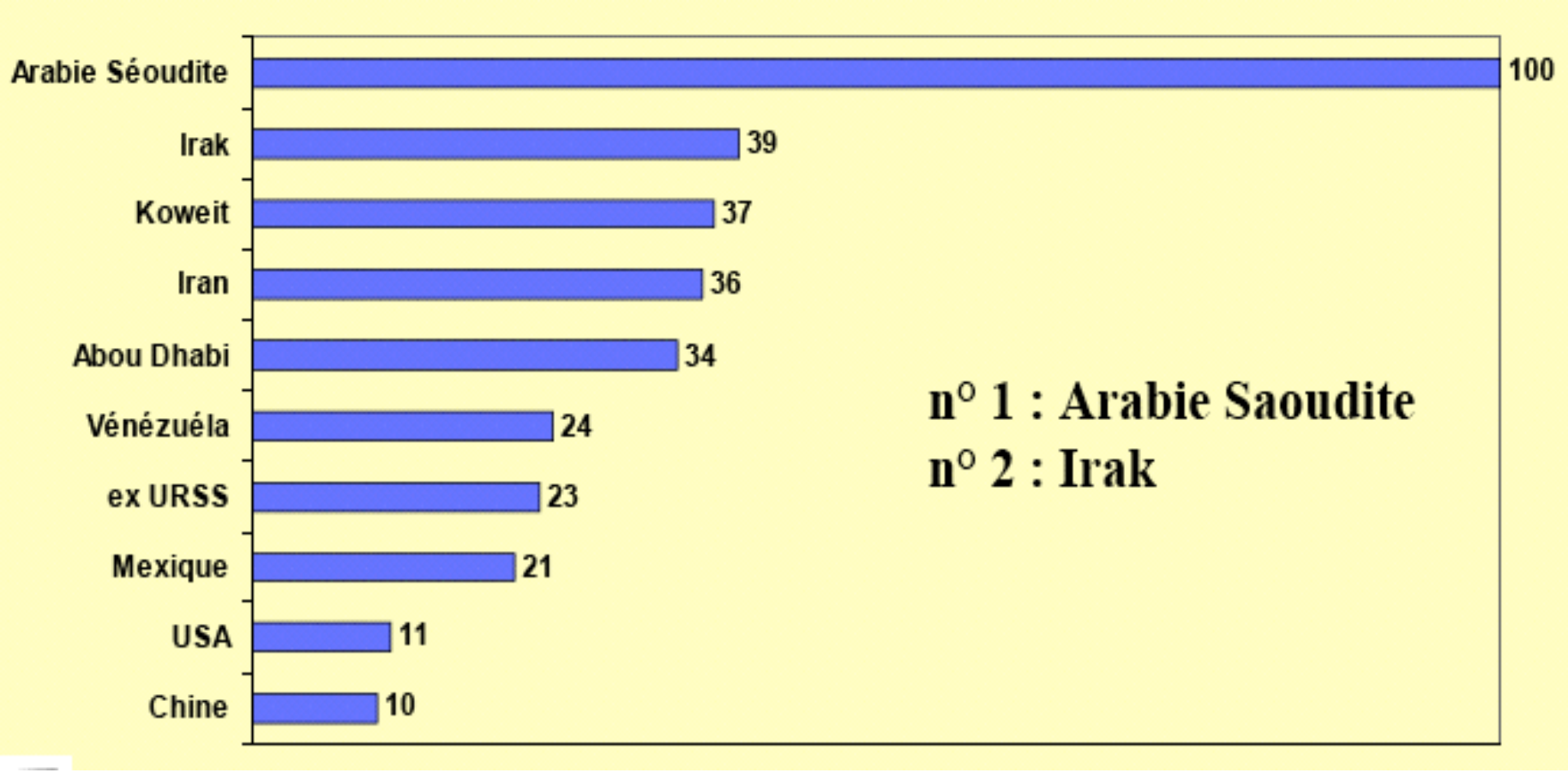
Distribution des réserves : des atouts stratégiques…

Gaz (sans les gaz de schiste) : 157 700 milliards de tonnes (130 GTep)
65 ans de réserve, pour…

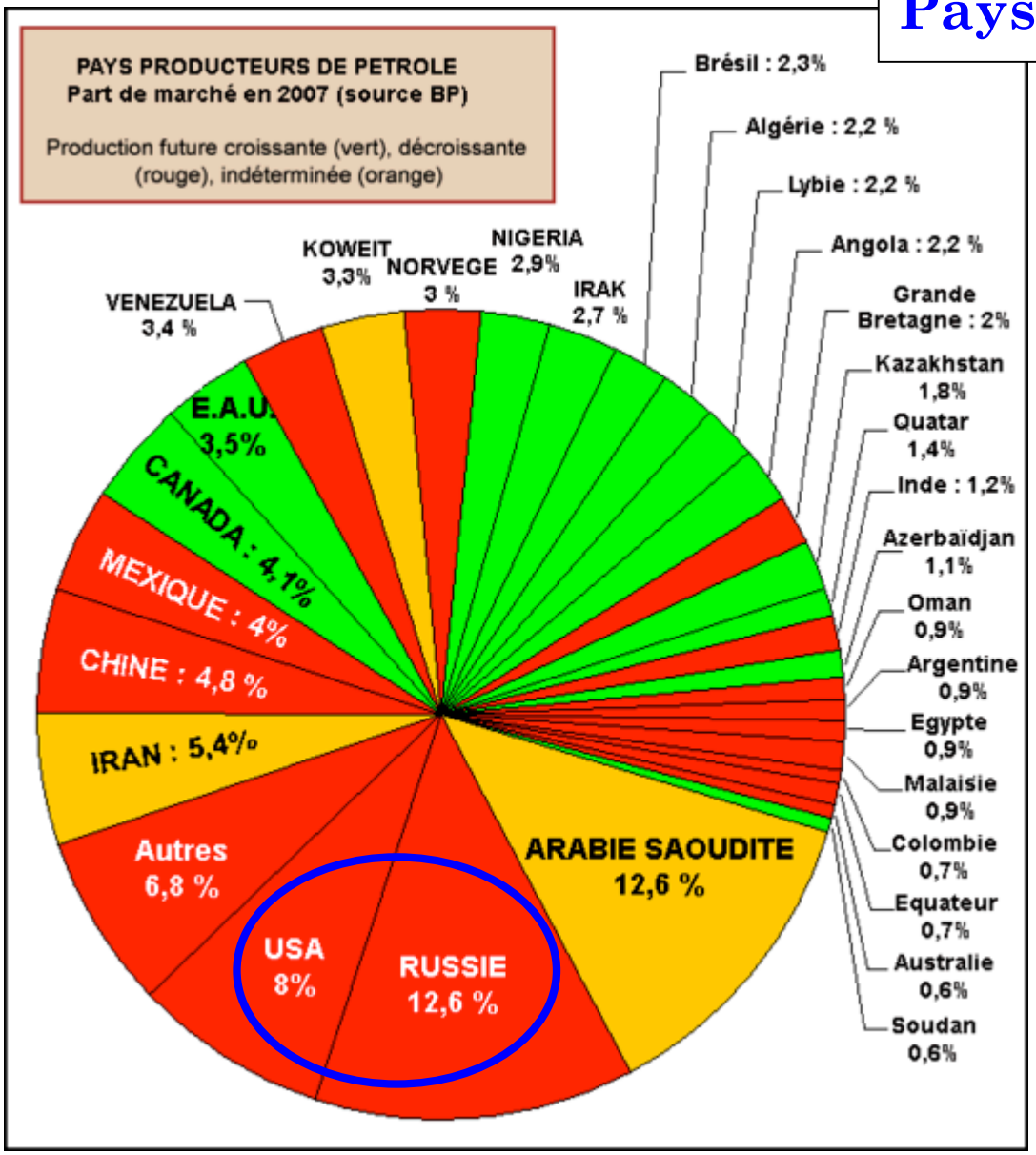


Distribution des réserves : des atouts stratégiques…

Pétrole : 139 milliards de tonnes (139 GTep)
40 ans de réserve au rythme actuel, pour…

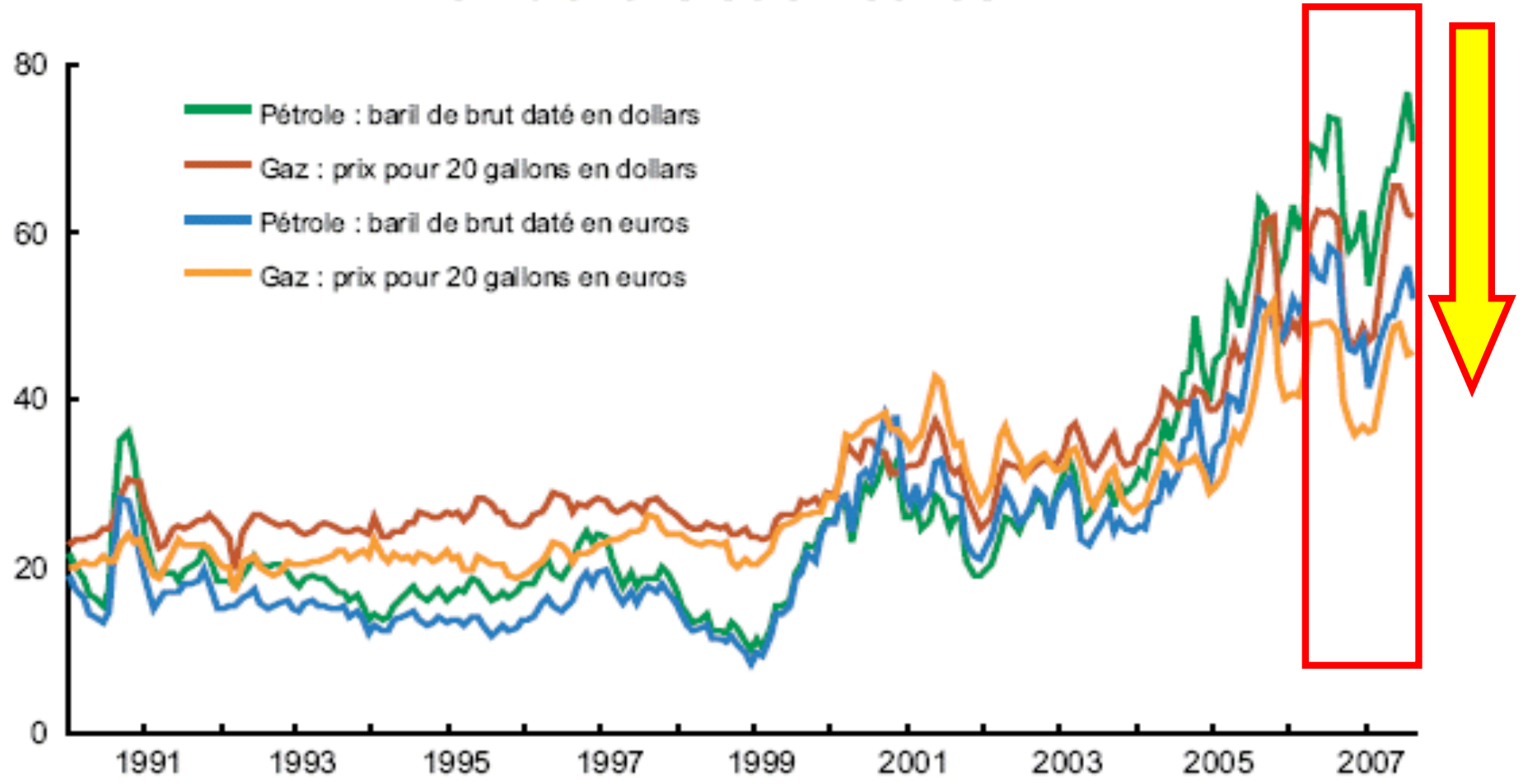


Pays producteurs de pétrole



Vers un rééquilibre programmé

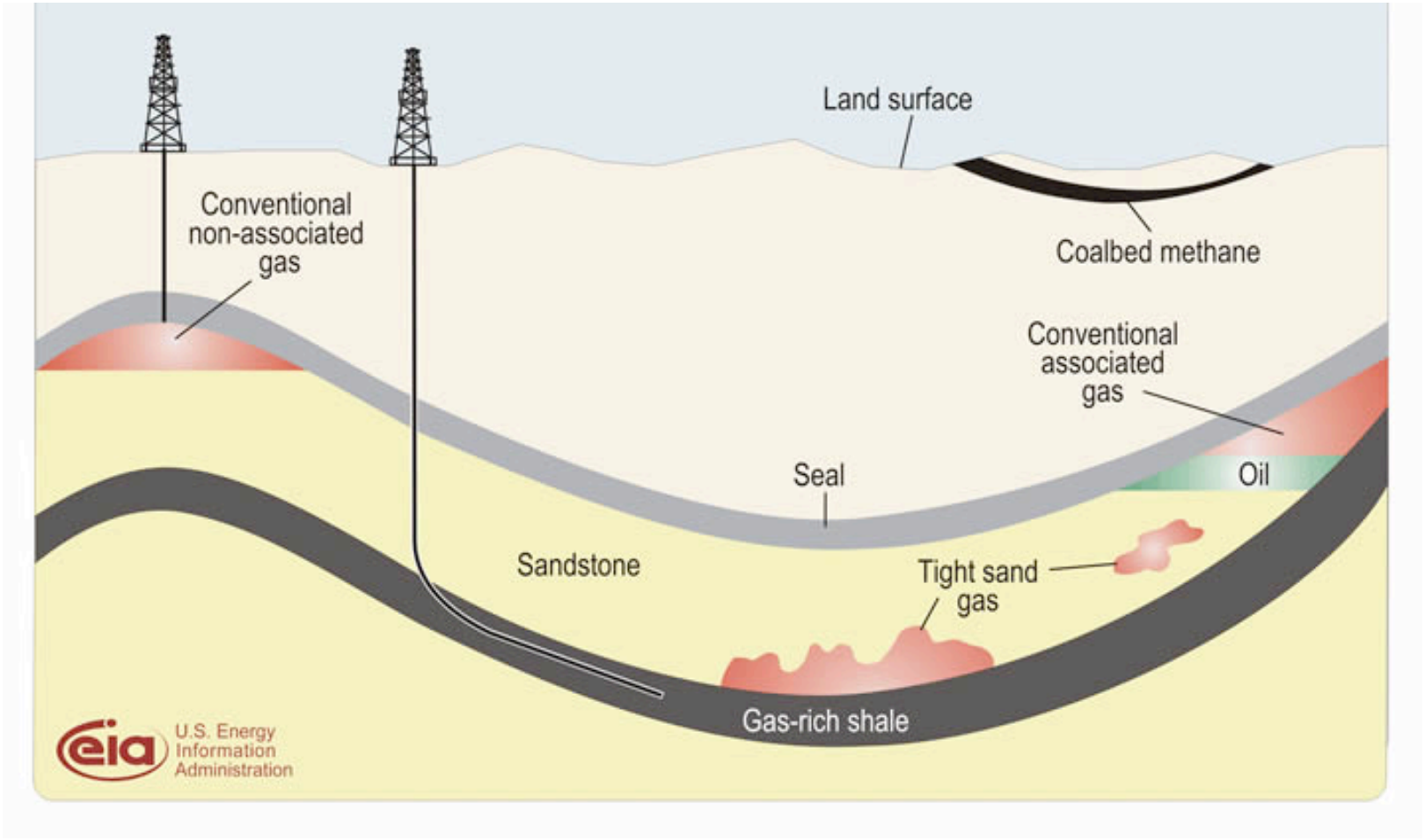
Évolution des prix du pétrole et du gaz en dollars et en euros

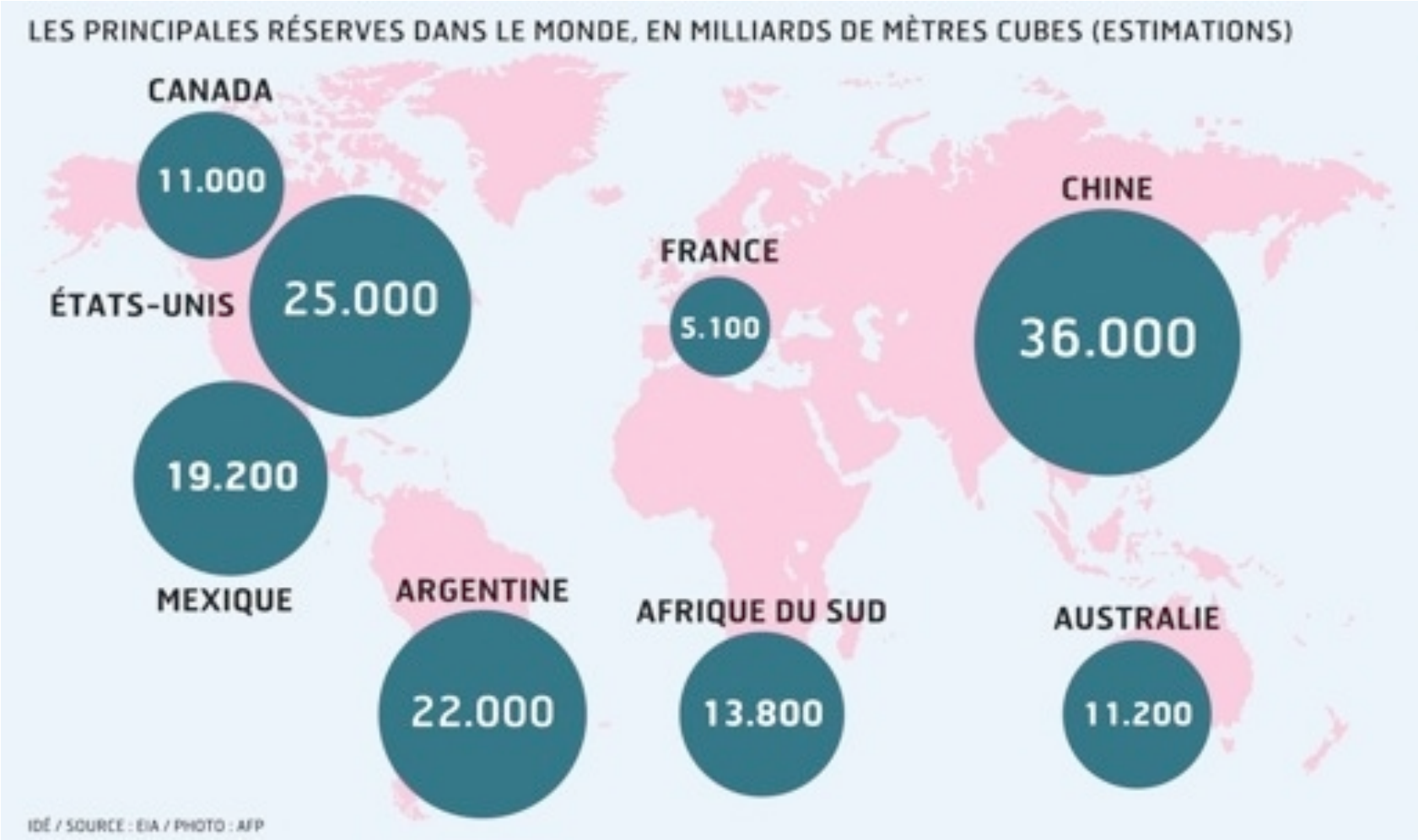


Source : DGEMP - Observatoire de l'énergie

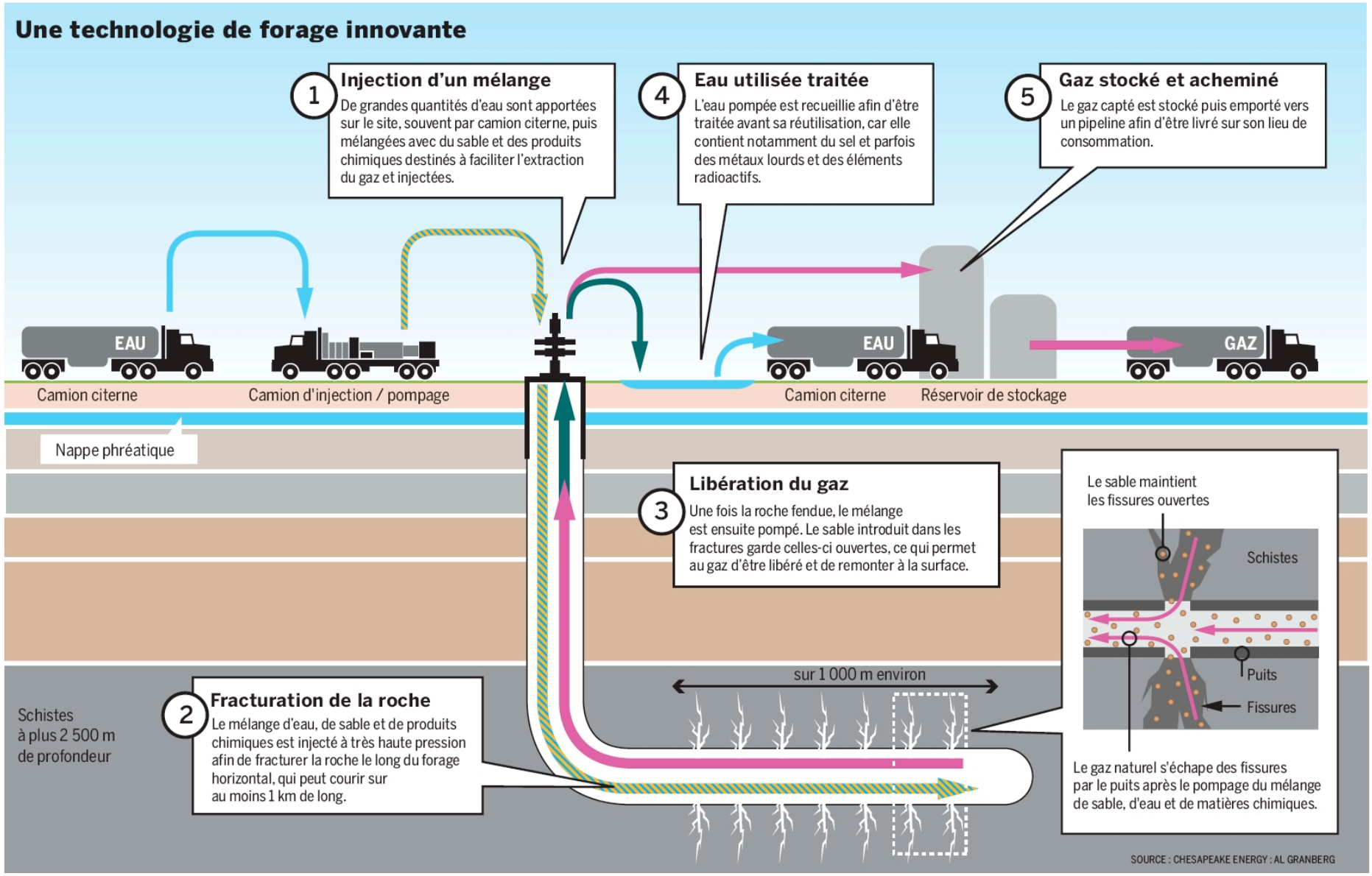
Les réserves ultimes en combustibles fossiles

Schistes bitumineux et sables asphaltiques

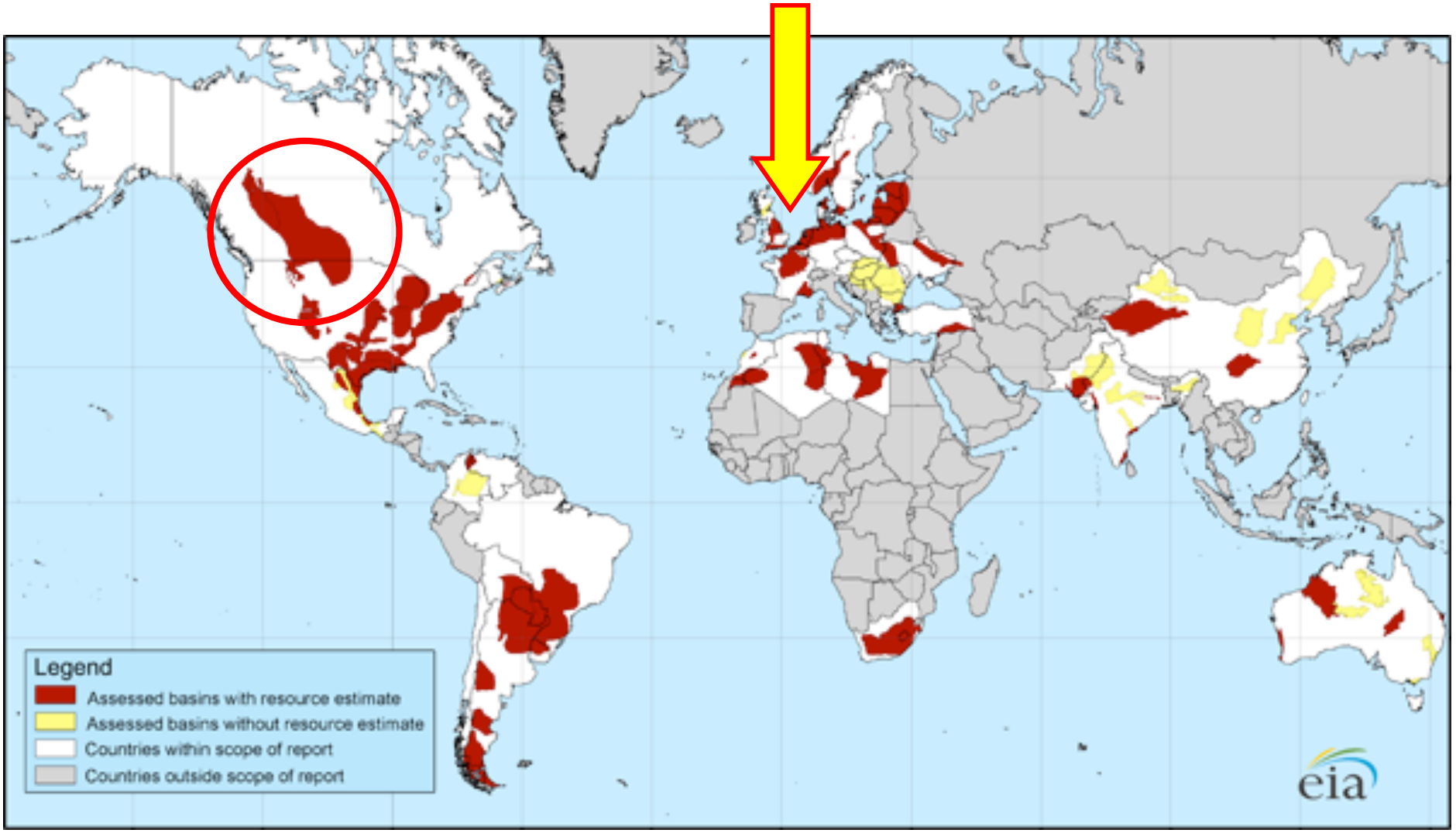




Plusieurs centaines de GTep, mais couteux en énergie et **très polluants** à exploiter : voir l'actualité récente sur les gaz de schiste


Une technologie de forage innovante
1
Injection d'un mélange
De grandes quantités d'eau sont apportées sur le site, souvent par camion citerne, puis mélangées avec du sable et des produits chimiques destinés à faciliter l'extraction du gaz et injectées.
4
Eau utilisée traitée
L'eau pompée est recueillie afin d'être traitée avant sa réutilisation, car elle contient notamment du sel et parfois des métaux lourds et des éléments radioactifs.
5
Gaz stocké et acheminé
Le gaz capté est stocké puis emporté vers un pipeline afin d'être livré sur son lieu de consommation.
EAU
EAU
GAZ
Camion citerne
Camion d'injection / pompage
Camion citerne
Réservoir de stockage
Nappe phréatique
3
Libération du gaz
Une fois la roche fendue, le mélange est ensuite pompé. Le sable introduit dans les fractures garde celles-ci ouvertes, ce qui permet au gaz d'être libéré et de remonter à la surface.
Le sable maintient les fissures ouvertes
Schistes
Puits
Fissures
Le gaz naturel s'échape des fissures par le puits après le pompage du mélange de sable, d'eau et de matières chimiques.
sur 1 000 m environ
Schistes à plus 2 500 m de profondeur
2
Fracturation de la roche
Le mélange d'eau, de sable et de produits chimiques est injecté à très haute pression afin de fracturer la roche le long du forage horizontal, qui peut courir sur au moins 1 km de long.
SOURCE : CHESAPEAKE ENERGY : AL GRANBERG

Emplacements des sites potentiels de gaz de schiste



Donc des prix très volatils

Compétition économique

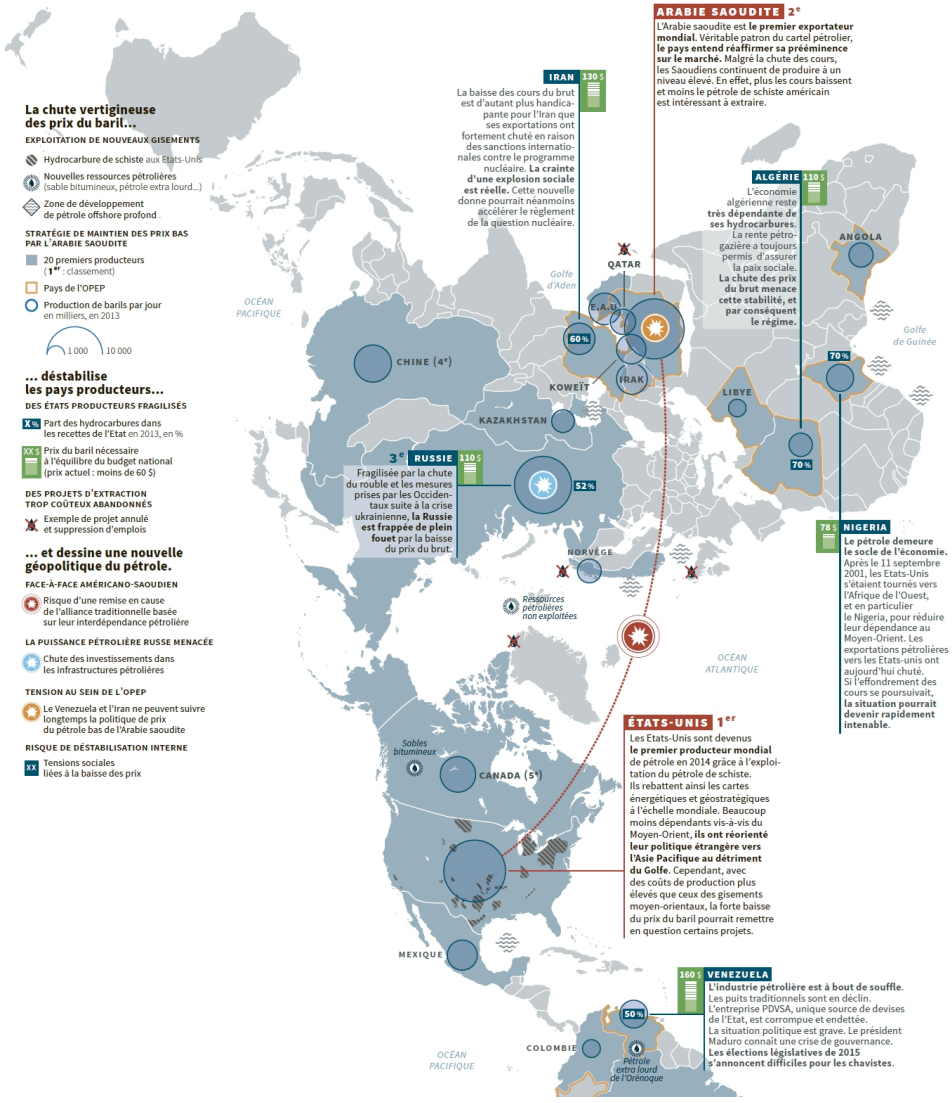
USA premiers producteurs...

Après l'arabie saoudite...

Puis l'URSS...

Fin des sites au Venezuela...

Émergence de l'arctique...



Deux événements importants de la fin du siècle dernier

La notion de **développement durable** :
la terre est "finie" et son exploitation donc limitée !

Deux notions déjà anciennes :

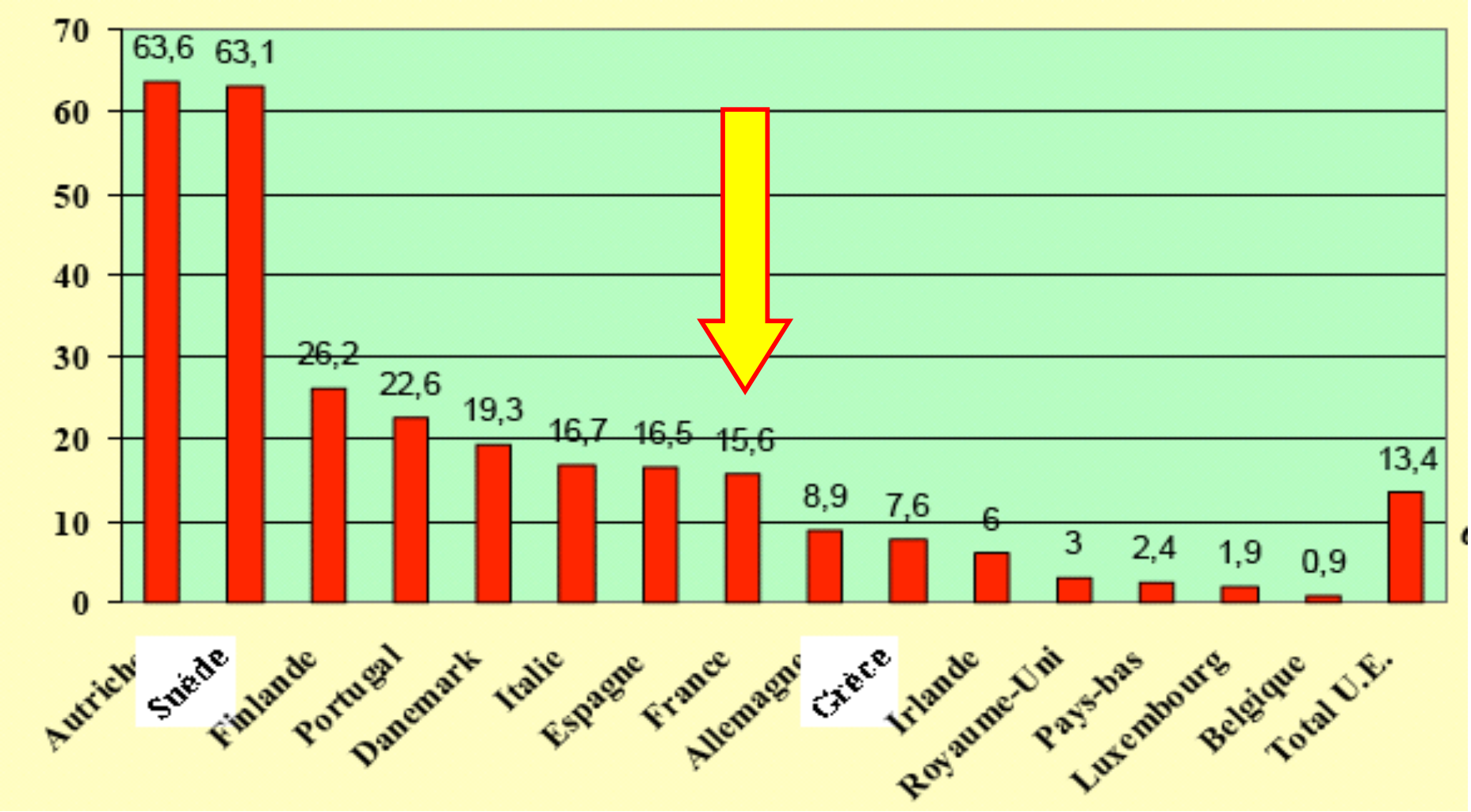
"*Nous n'héritons pas de la Terre de nos ancêtres, nous l'empruntons à nos enfants*" (Antoine de Saint-Exupéry, 1902-1940)

"*Il faut répondre aux besoins du présent sans compromettre la capacité des générations futures à satisfaire les leurs*" (Rapport Bruntland, 1987)

Le **Protocole de Kyoto** cherchait ainsi à réglementer, ou au moins à réguler la consommation des matières…

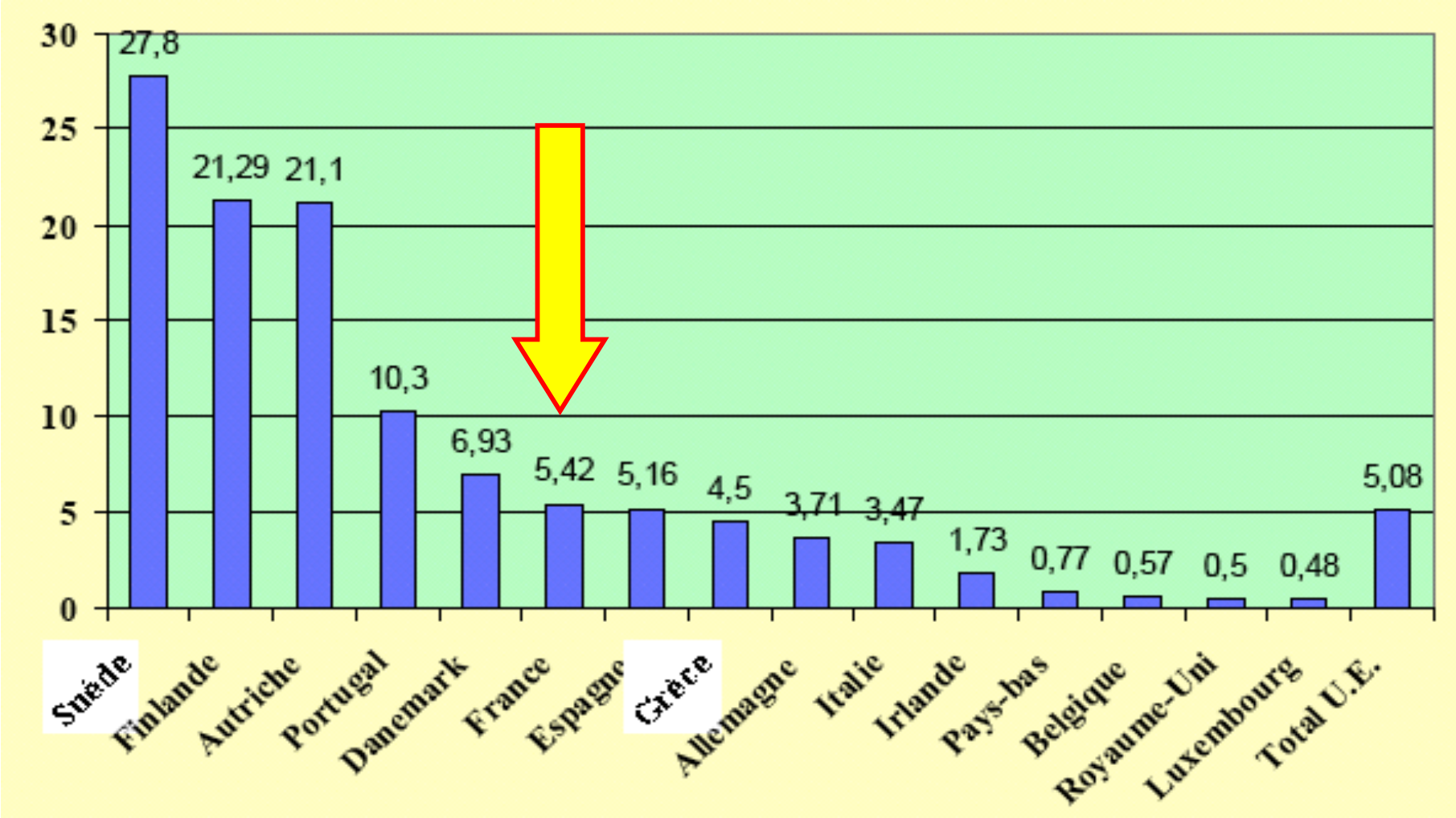
Développement durable : situation de l'Europe au début du XXI°

Part des énergies renouvelables / consommation d'énergie primaire



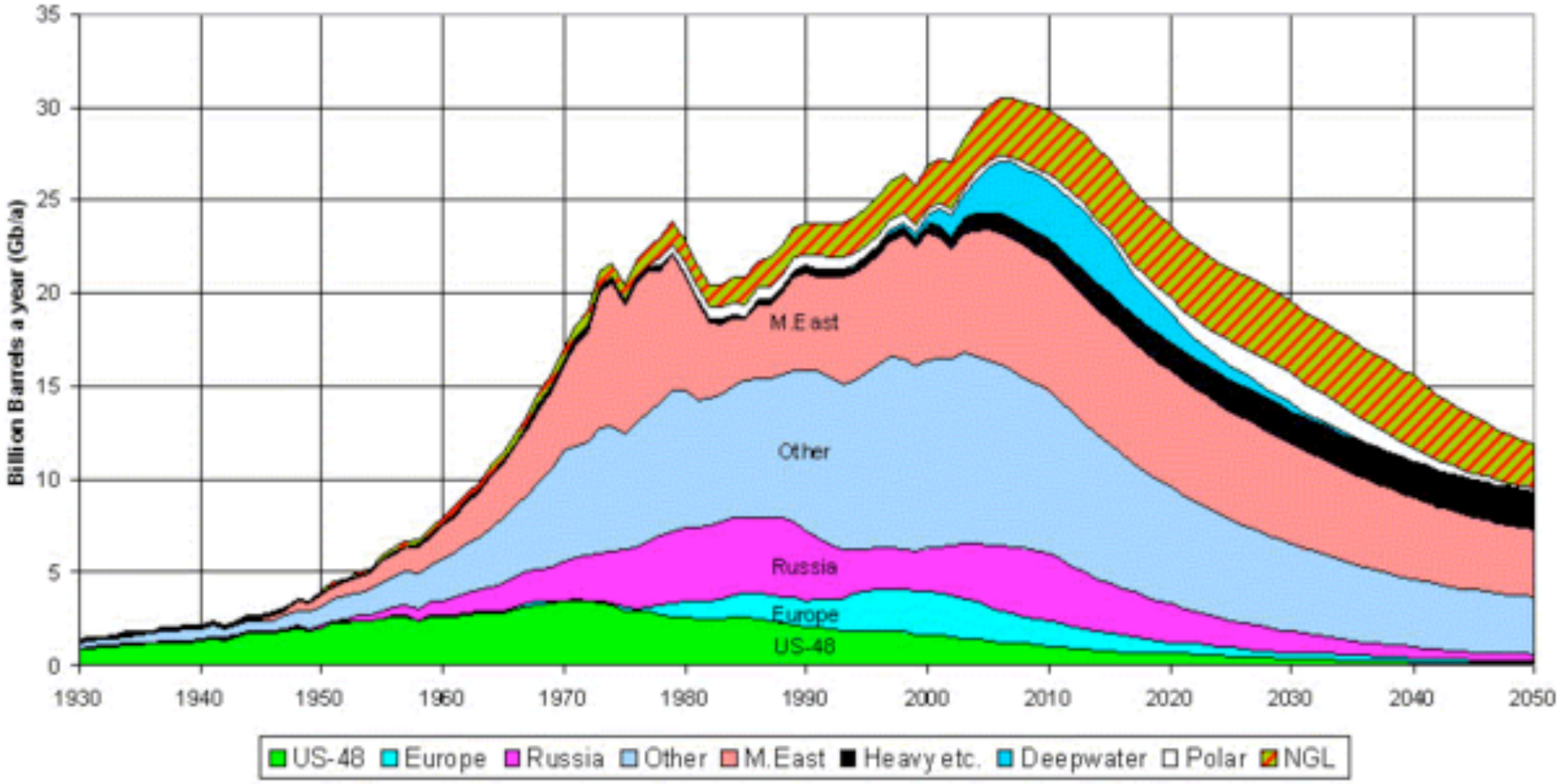
Développement durable : situation de l'Europe au début du XXI°

Part des énergies renouvelables / consommation d'électricité

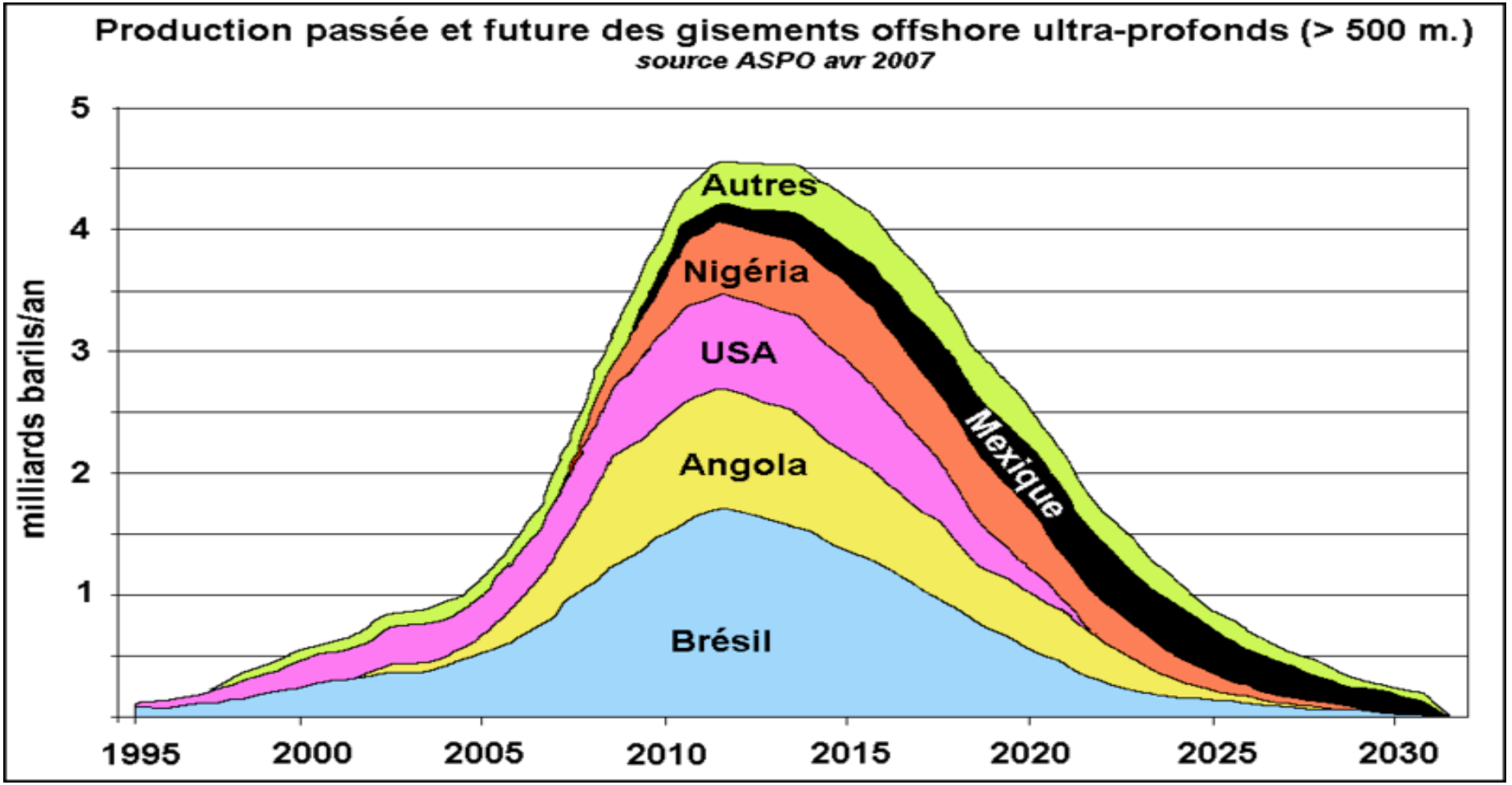


Quand serons-nous au pic des réserves non renouvelables ?

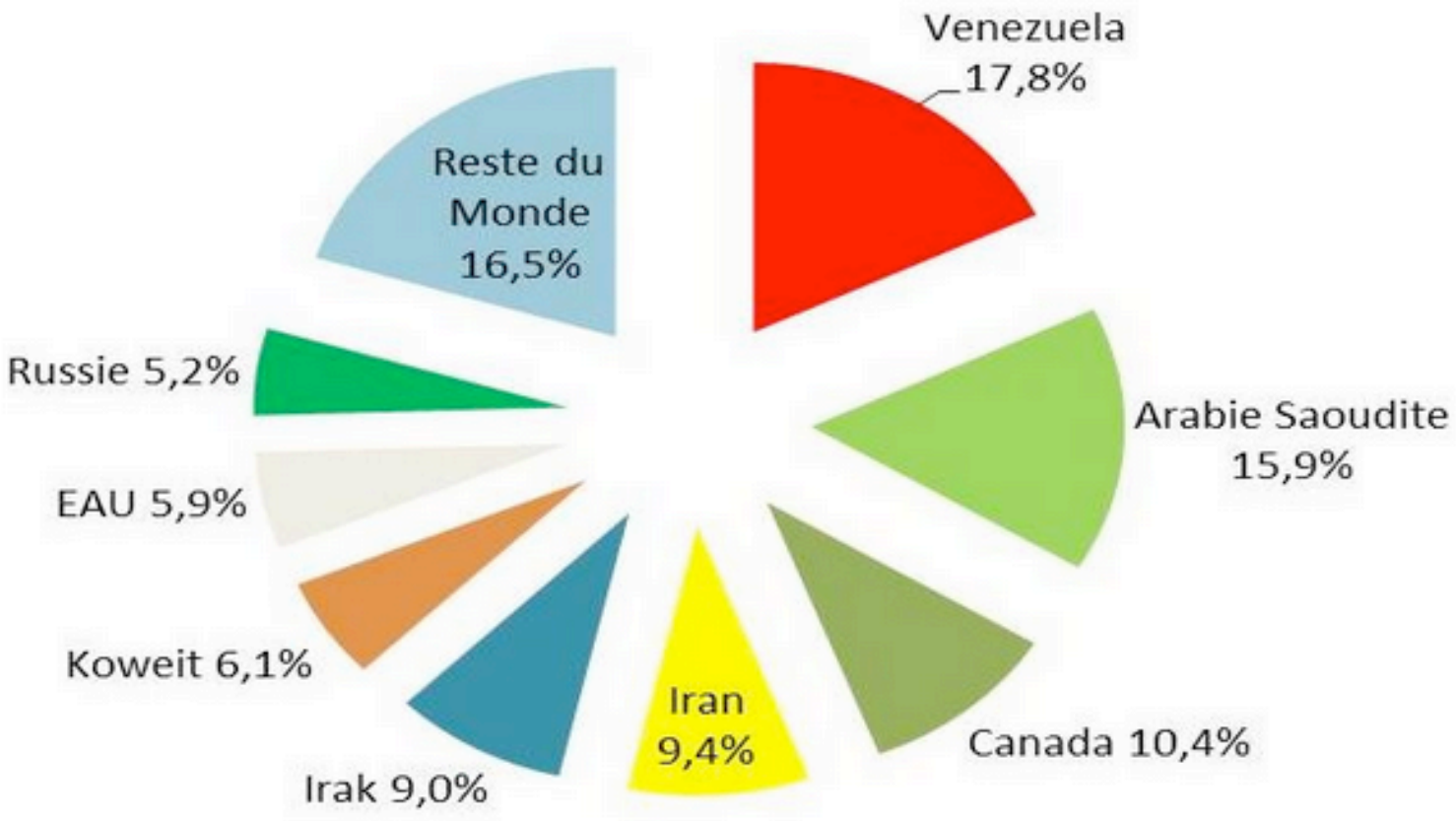
Nous y sommes sans doute…



Et même les réserves difficiles d'accès connues vont s'épuiser…



La répartition des réserves de pétrole



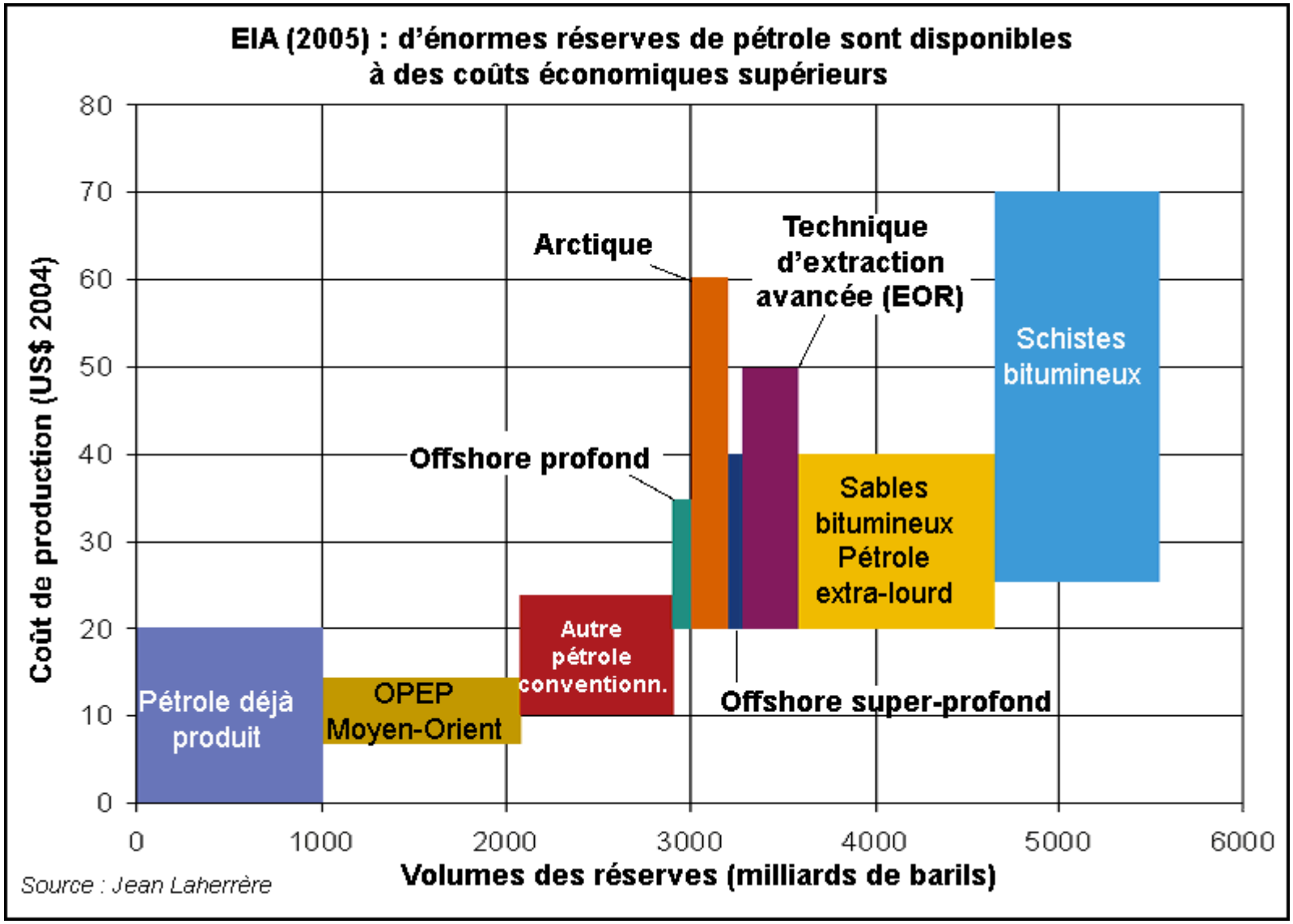
Source : BP Statistical Review

Et pourtant la consommation de pétrole augmente toujours…

Pays	Augmentation en **20 ans**
Corée du sud	**306%**
Inde	**240%**
Chine	**192%**
Brésil	88%
Canada	23%
USA	**16%**
Japon	**12%**
France	**-12% !**

Attention il faut associer tout cela aux augmentations de population
Et au **développement économique nécessaire**

Et pourtant la France a diminué sa consommation **grâce au nucléaire**


EIA (2005) : d'énormes réserves de pétrole sont disponibles
à des coûts économiques supérieurs
Coût de production (US$ 2004)
80
70
60
50
40
30
20
10
0
0
1000
2000
3000
4000
5000
6000
Volumes des réserves (milliards de barils)
Arctique
Technique d'extraction avancée (EOR)
Schistes bitumineux
Offshore profond
Sables bitumineux Pétrole extra-lourd
Autre pétrole conventionn.
Pétrole déjà produit
OPEP Moyen-Orient
Offshore super-profond
Source : Jean Laherrère

Le Protocole de Kyoto (décembre 1997)

Un certain nombre de pays (159 pays dits de "l'annexe 1") s'engagent à **réduire globalement les émissions de GES** entre 2008 et 2012 de 5%

Europe des 25	Biélorussie	Nouvelle Zélande
Russie	Canada	Turquie
USA	Suisse	Ukraine
Australie	Japon	

Cet engagement devait être mis en œuvre si 55% des pays représentant 55% du volume total des émissions de CO2 en 1990 signaient le protocole.

Les pays en voie de développement ne sont pas concernés
(Chine, Inde…)

Cela nécessite une prise de conscience des populations et des pouvoirs

Évolution des émissions de CO_2 entre 1971 et 1990...

Amérique du nord	+ 17%	dont USA	+ 13%
Amérique latine	+ 67%		
Europe des 15	+ 5%	dont **France**	**- 17%**
Ex-URSS	+ 50%		
Moyen-orient	**+ 360%**		
Afrique	**+ 146%**		
Asie	**+ 181%**	dont Chine et l'Inde	+ 176% + 196%
Japon Corée du sud	+ 17%		
Autre pays	+ 35%		

Total du monde **+ 44%** ...

La référence est en 1990...

Évolution des émissions de CO2 entre 1990 et 2002…

	Réalisé en %	Objectif de réduction
États unis	+ 16.7	-7
Europe des 15	+ 3	-8
Russie	**- 25.3**	0
Chine	+ 44.5	
Japon	+ 18.9	-6
Monde	**+ 16.4**	

Attention au contexte concernant la **Russie** (éclatement de l'URSS)
Et au développement extrême de la **Chine**
Non signataire du protocole de Kyoto

L'Europe et la France font tout de même figure de bons élèves…

Quelques ordres de grandeur : la notion de bilan carbone

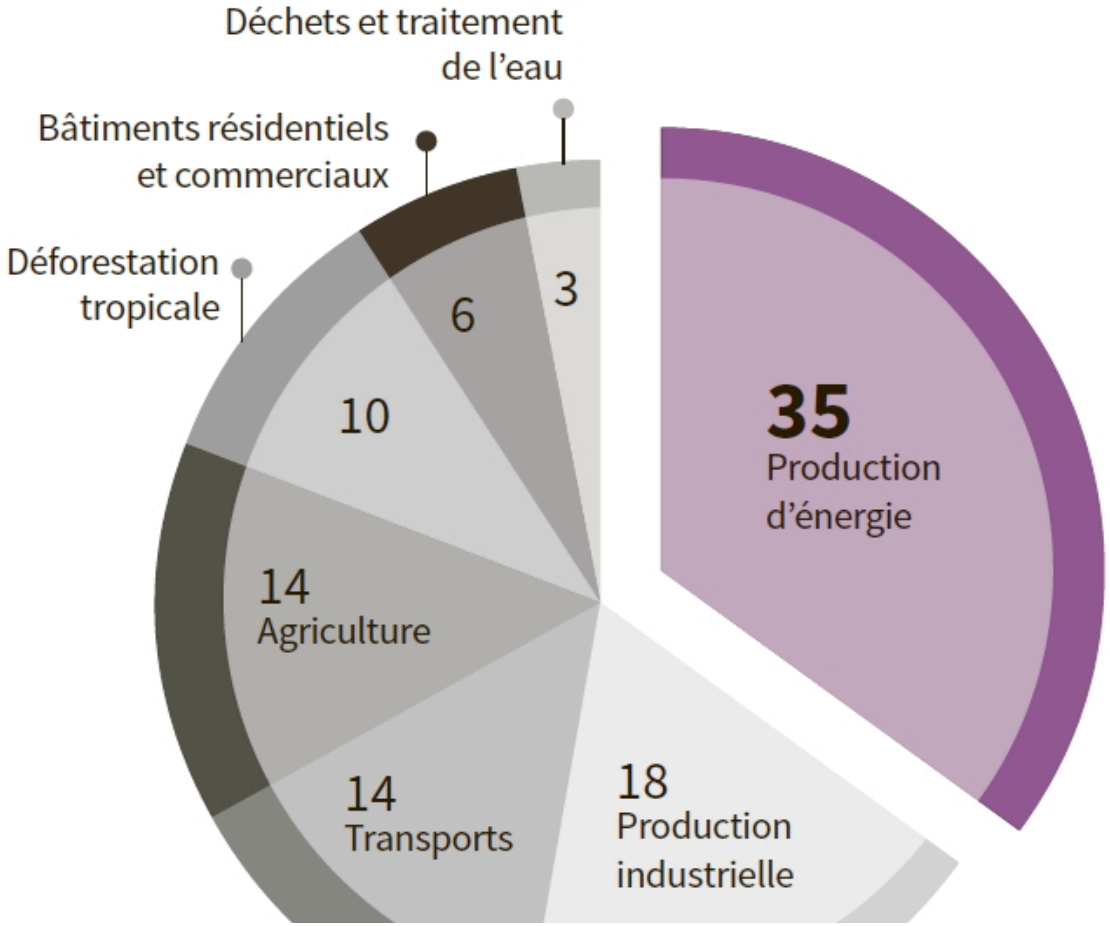
Quand on brûle 1g de carbone
On consomme 2,7 tonnes d'Oxygène
On rejette 3,7 tonnes de dioxyde de carbone
Soit **1900 m³** de CO_2

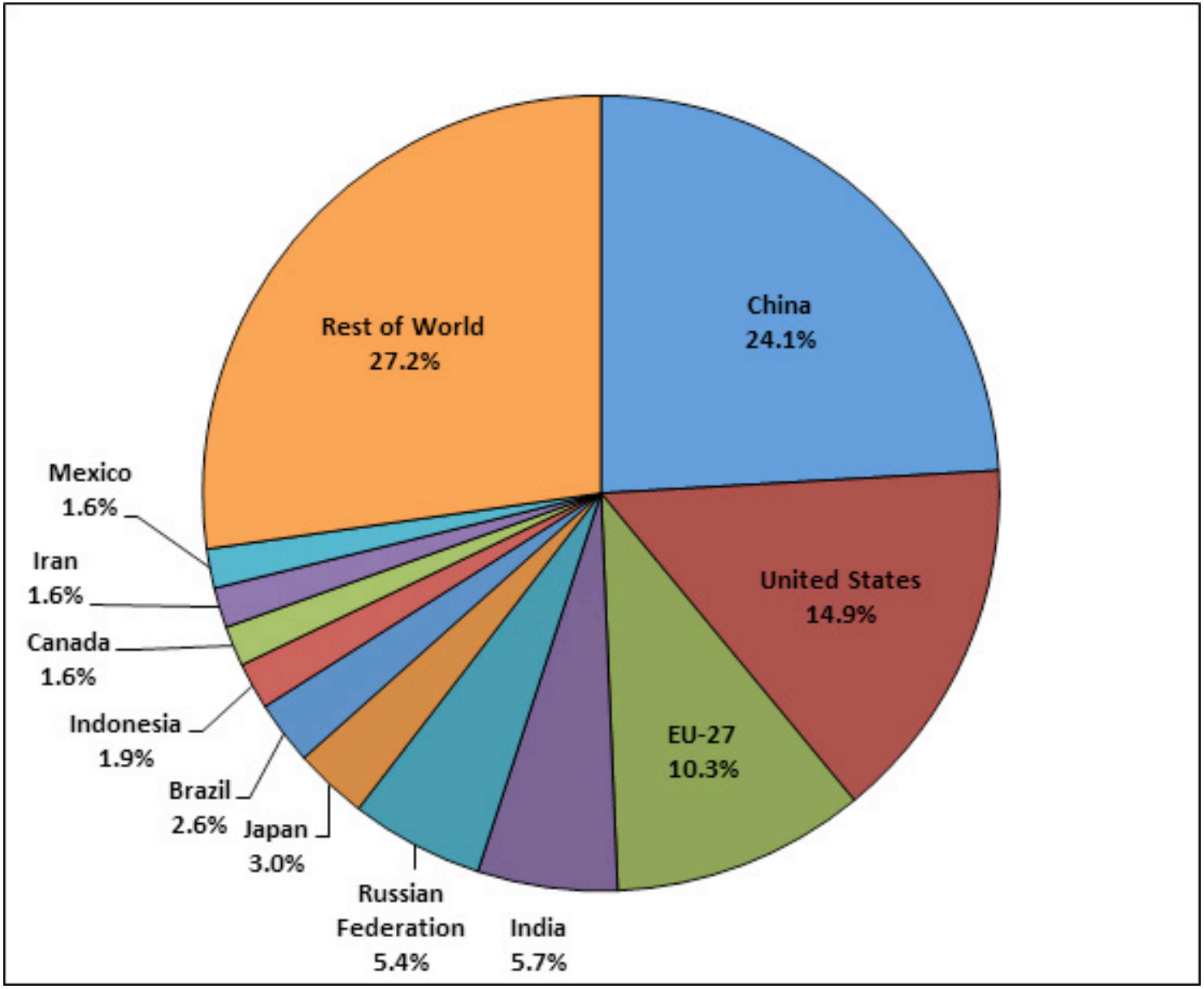
Plus les combustibles sont hydrogénés, moins ils émettent de CO_2
Charbon (1000) > gaz (750) > pétrole (500)

Un camion qui parcourt 150 000 km/an rejette 150 t de CO_2
Soit 75 000 m³ par an

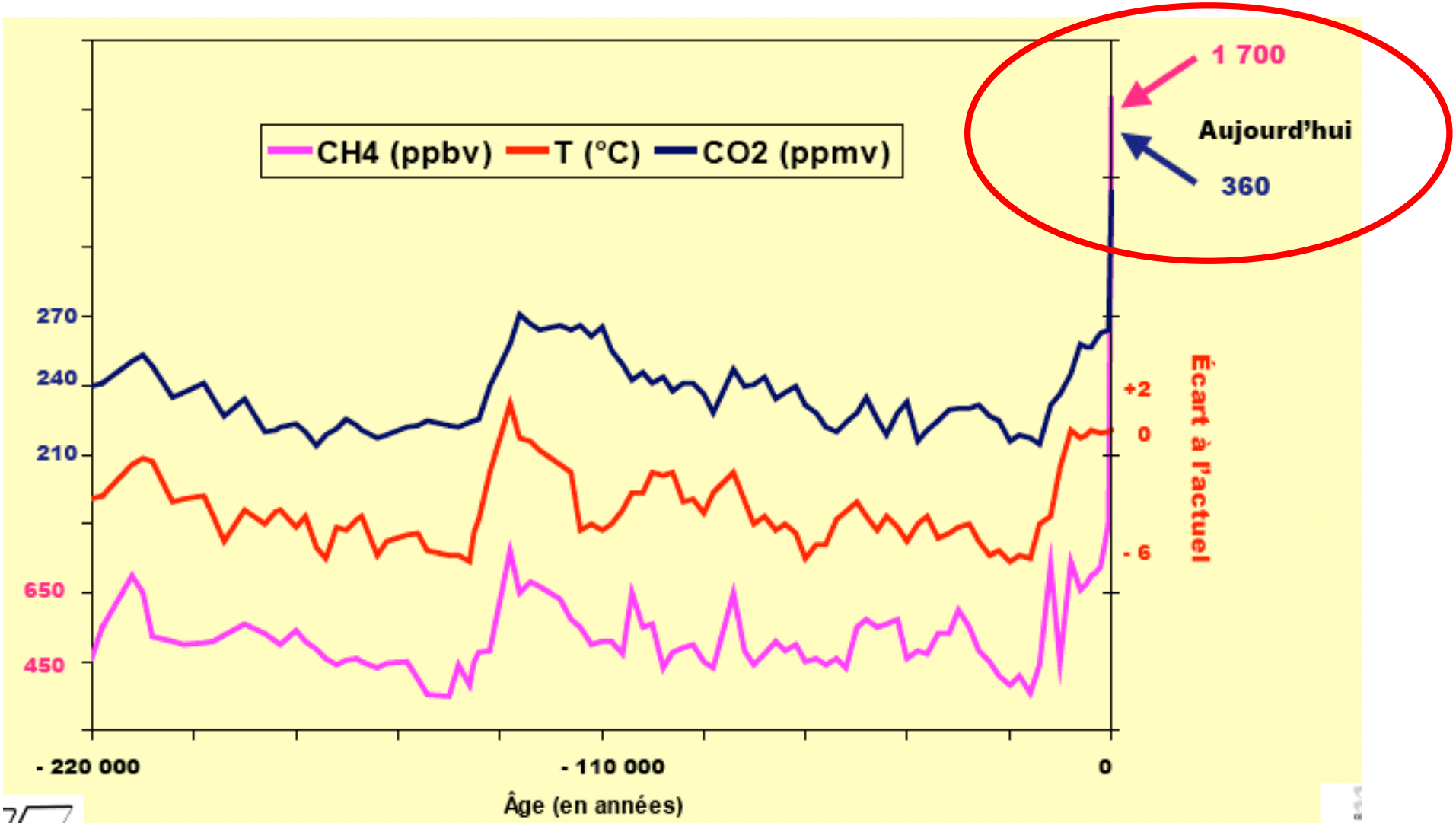
La **respiration humaine** produit 3 milliards de tonnes
Soit **1 500 milliards de m³** !
La végétation et les océans en absorbent l'essentiel
Ce gaz participe à l'effet de serre

Production de gaz à effet de serre dans le monde

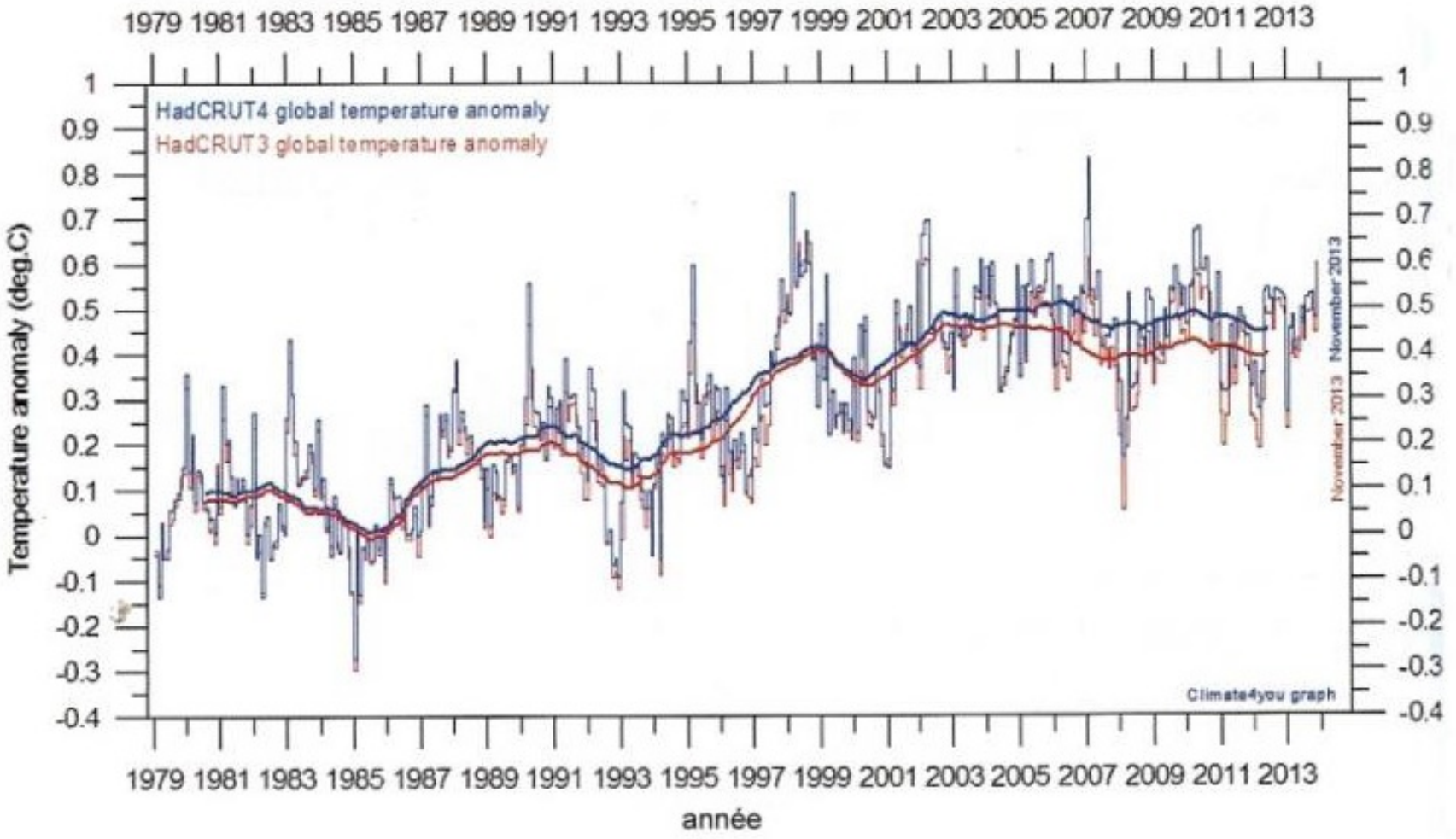



China
24.1%
United States
14.9%
EU-27
10.3%
India
5.7%
Russian
Federation
5.4%
Japan
3.0%
Brazil
2.6%
Indonesia
1.9%
Canada
1.6%
Iran
1.6%
Mexico
1.6%
Rest of World
27.2%

Évolution de la température avec les émissions à effet de serre

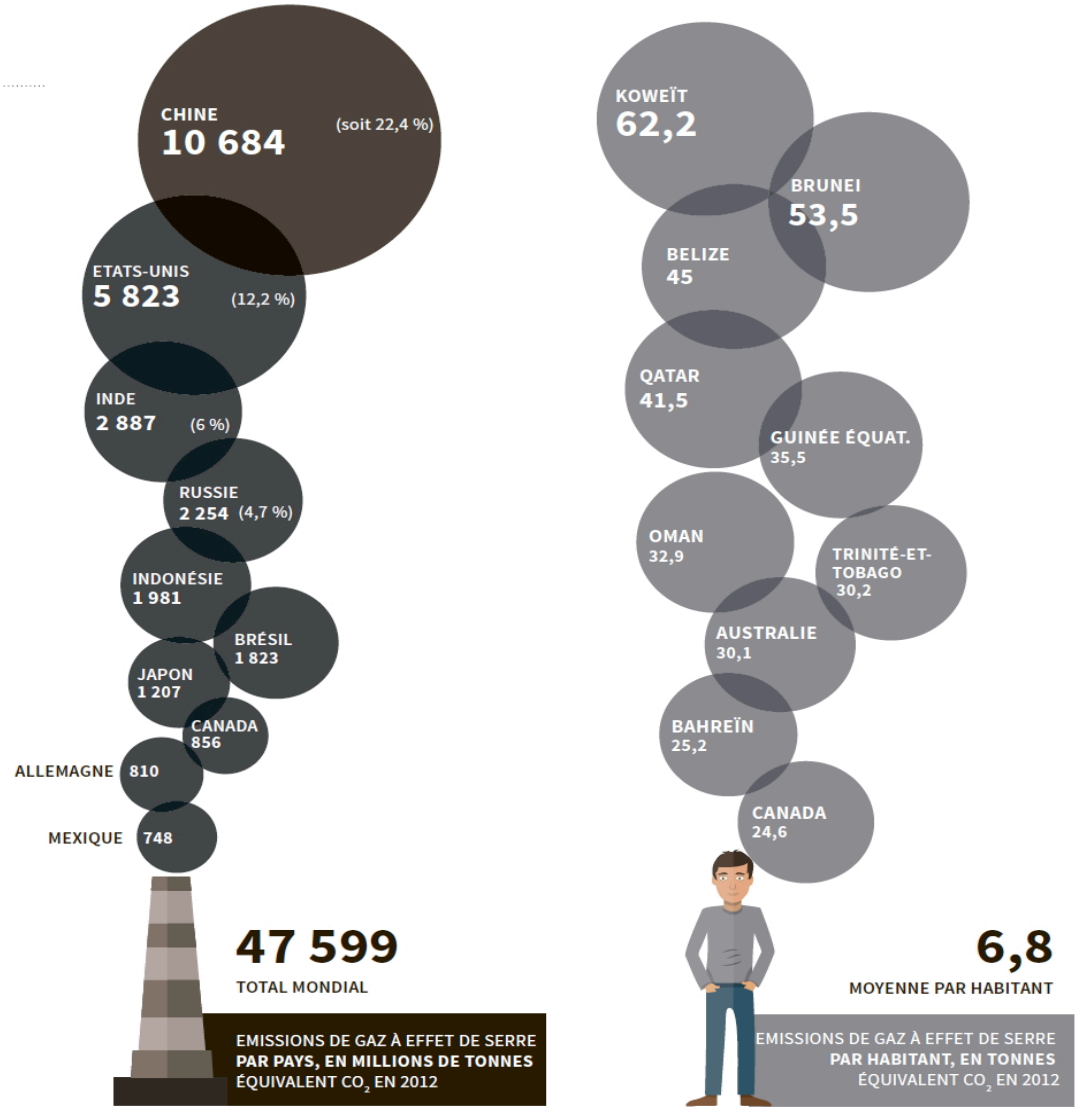


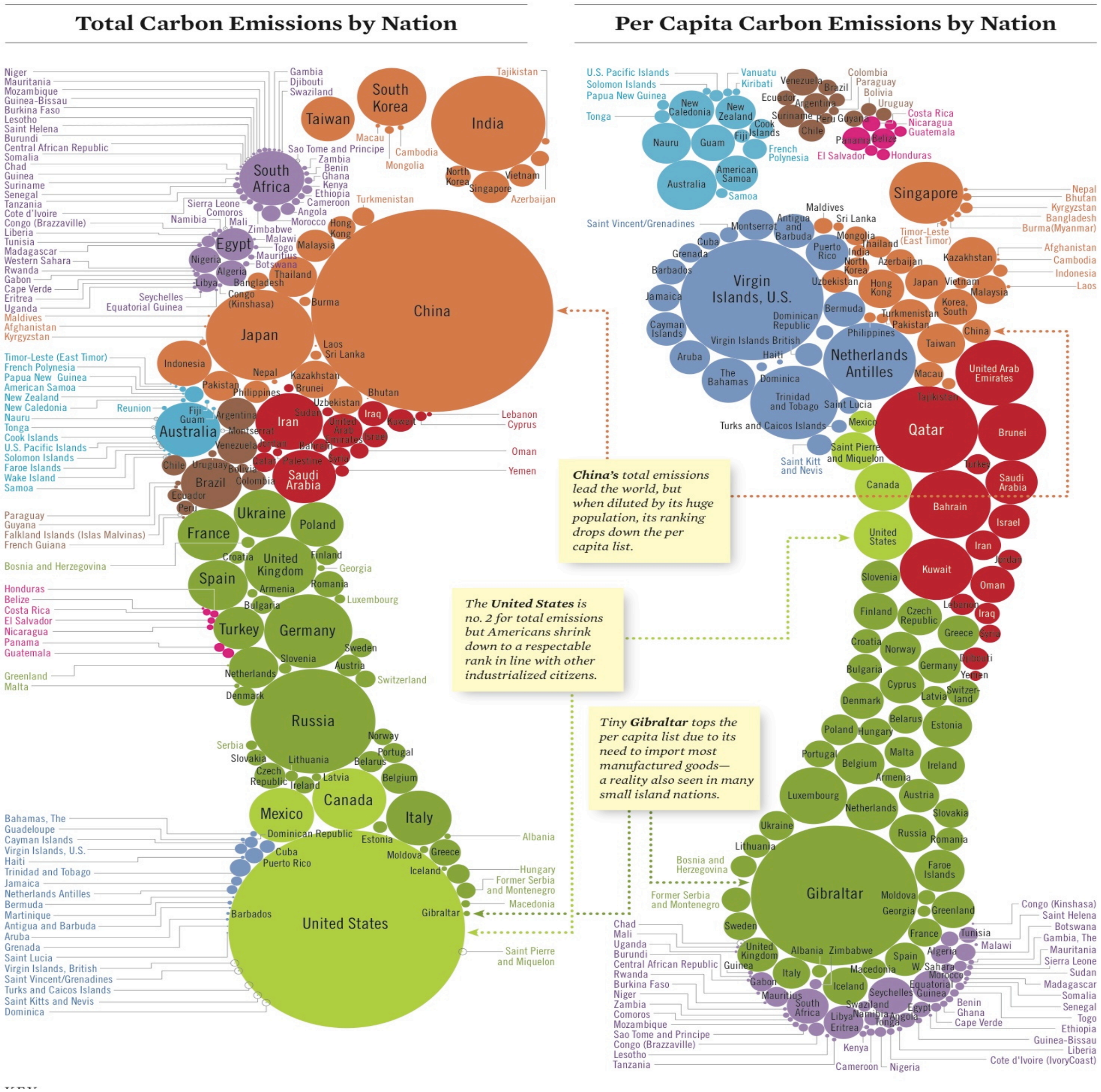
Attention aux effets d'échelle...



Variation de la température globale par rapport à la moyenne 1961-1990, mesurée par satellite (source NASA)

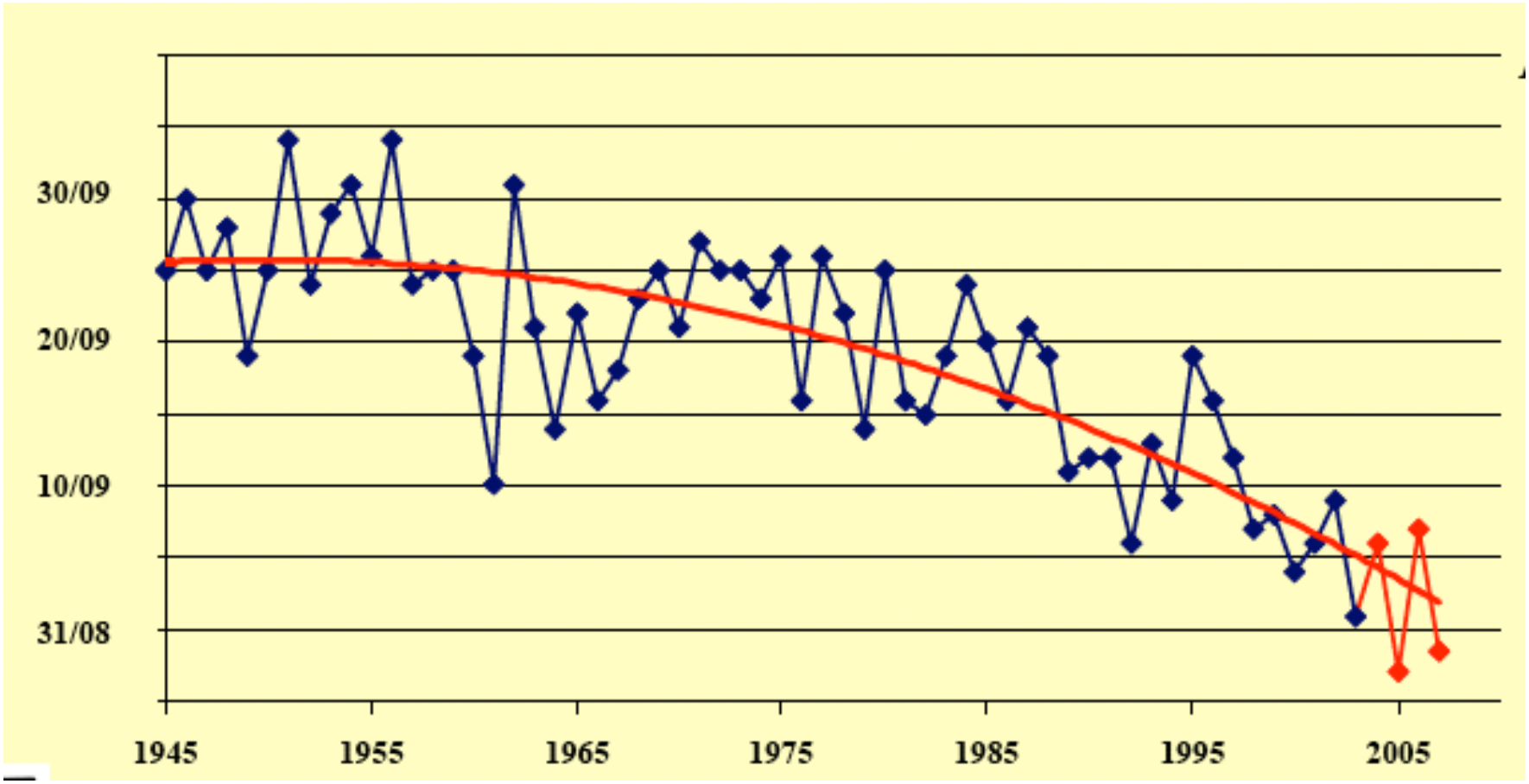
Production inégalement répartie selon les niveaux de vie




Total Carbon Emissions by Nation
Per Capita Carbon Emissions by Nation
China's total emissions lead the world, but when diluted by its huge population, its ranking drops down the per capita list.
The United States is no. 2 for total emissions but Americans shrink down to a respectable rank in line with other industrialized citizens.
Tiny Gibraltar tops the per capita list due to its need to import most manufactured goods— a reality also seen in many small island nations.
China
United States
India
Russia
Japan
Germany
South Korea
Taiwan
South Africa
Australia
Canada
Mexico
Italy
France
Ukraine
Iran
Saudi Arabia
Brazil
Gibraltar
Virgin Islands, U.S.
Netherlands Antilles
Qatar
Singapore
United Arab Emirates
Bahrain
Kuwait
Brunei

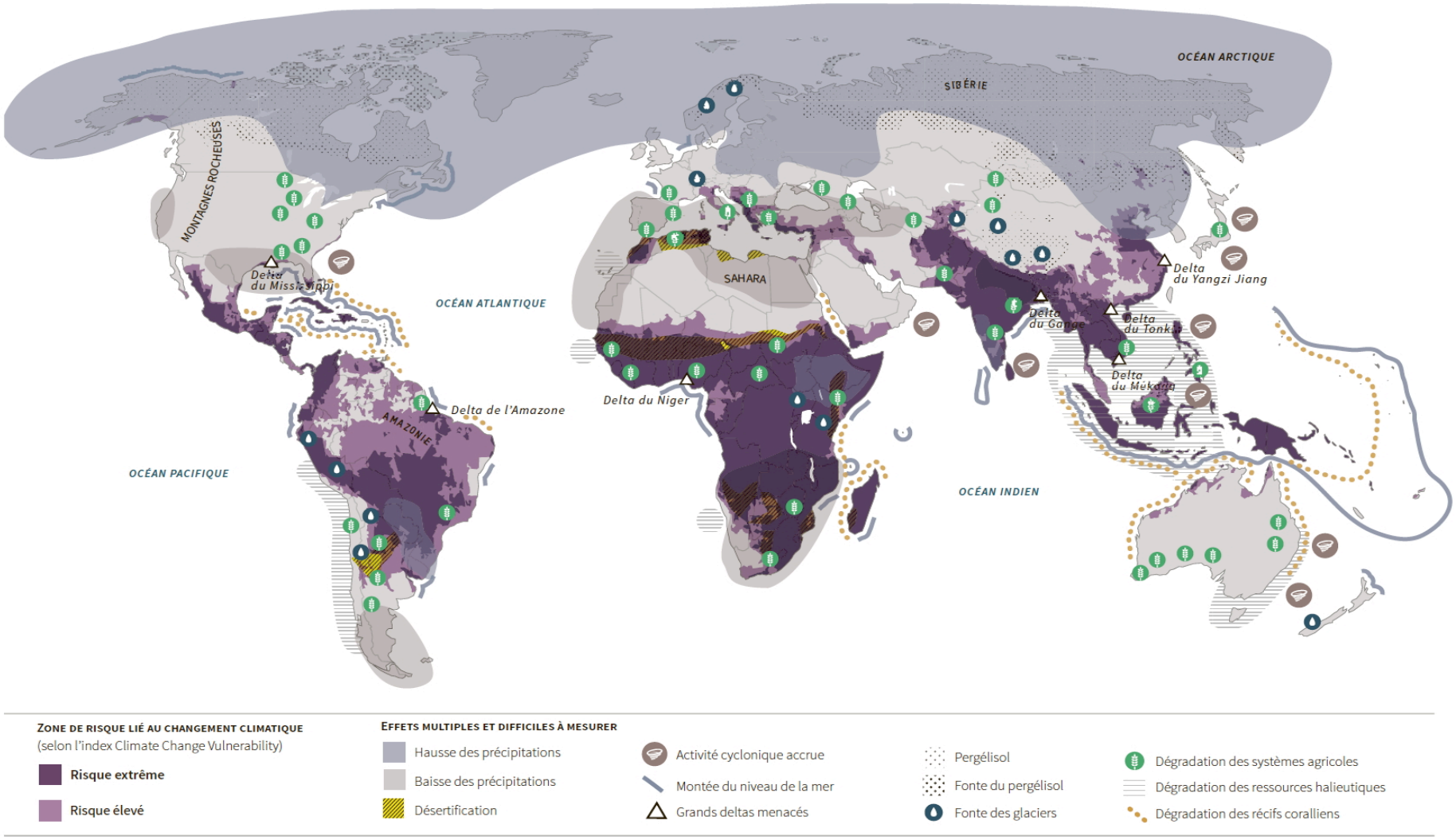
Les conséquences sont connues, fonte des glaces, effets météo :

Même les plus insolites…



Date de début des vendanges à Châteauneuf du Pape

et des prévisions très inégalement réparties…



2. Quelle part l'électricité a-t-elle dans la production de CO_2 ?

Emissions de CO_2 des différentes filières de production

Mode	Hydraulique	**Nucléaire**	Eolien	Photovoltaïque	Cycle gaz	Gaz	fuel
Emissions totales en g de CO_2/KWh	4	**6**	3 à 22	60 à 150	430	880	890

Emissions de CO_2 pour 1 KWh moyen annuel

Production en 1996	UE	USA	Japon	OCDE	Monde	**France**
Emissions totales en g de CO_z	472	638	536	543	539	**63**

Protocole de Kyoto : de fortes disparités explicables

Pays	Tonnes de CO_2 par habitants en 1997
USA	17,7
Australie	14,9
Canada	14,5
Allemagne	11,8
Belgique	10,6
UK	9,4
Japon	8,9
Italie	7,1
Suisse	6,6
Espagne	6,3
France	**5,8**

Energies renouvelables

Les énergies renouvelables sont **peu émettrices** de gaz à effets de serre
Elles sont donc à développer, d'autant que les énergies fossiles ont des réserves limitées comme on l'a déjà vu

Bon gré mal gré il faudra donc respecter le protocole de Kyoto, un jour…

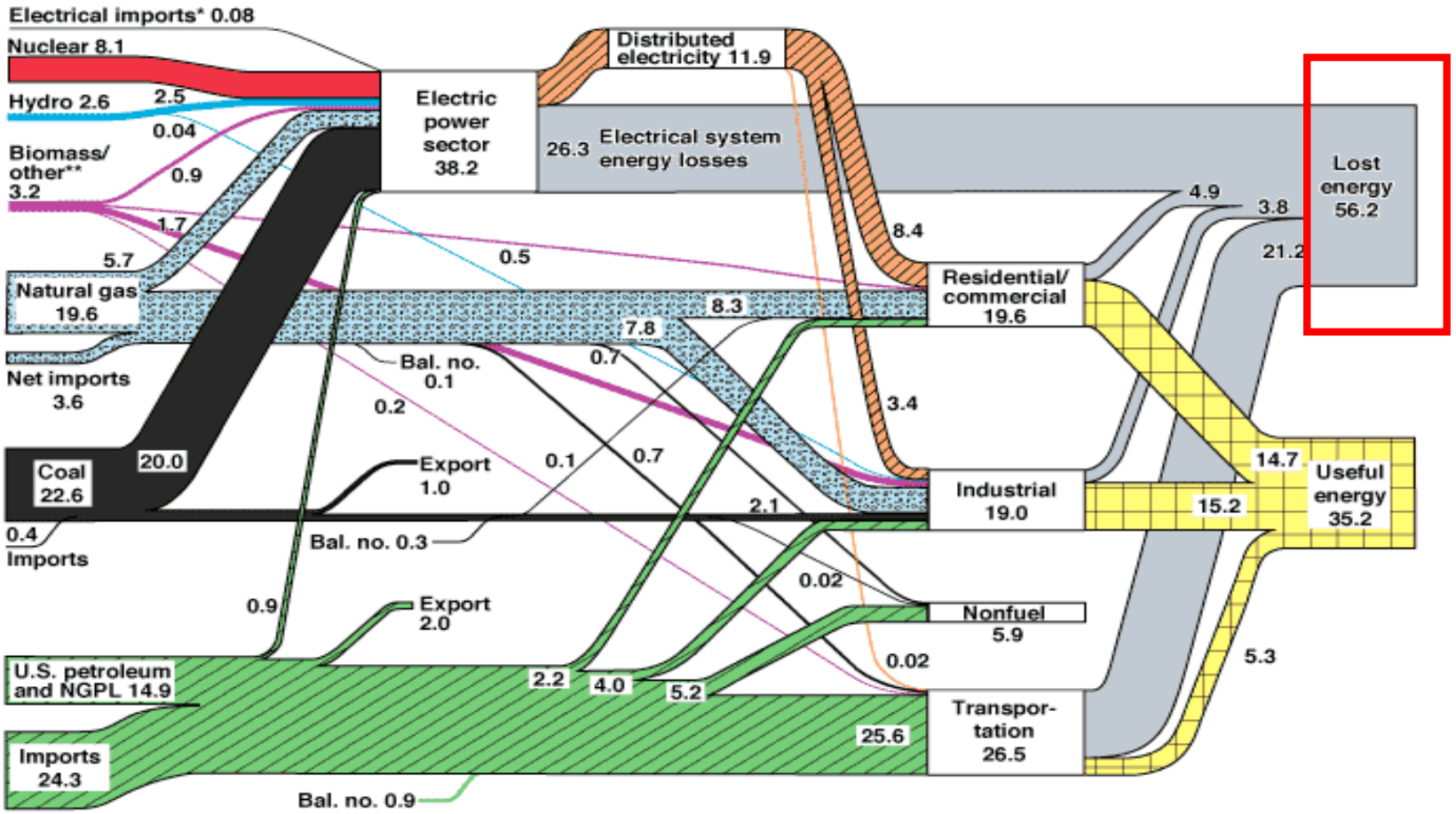
Les énergies renouvelables sont souvent déconcentrées

Le coût de l'énergie est élevé, mais il faut penser au transport de l'énergie

Ce critère n'est pas primordial dans les PVD, par contre si le réseau électrique est développé la comparaison leur est défavorable…

Les subventions versées aux PVD profitent plus aux industriels qu'aux populations.

U.S. Energy Flow Trends – 2002
Net Primary Resource Consumption ~97 Quads



Source: Production and end-use data from Energy Information Administration, *Annual Energy Review 2002*.
*Net fossil-fuel electrical imports.
**Biomass/other includes wood, waste, alcohol, geothermal, solar, and wind.

June 2004
Lawrence Livermore National Laboratory
http://eed.llnl.gov/flow

Importance des centrales thermiques électrogènes

Une ville d'un million d'habitants a besoin de 1GWe

Seul le thermique peut apporter actuellement une telle puissance
en occupant une **surface limitée** !

Thermique classique : combustible fossile (gaz, pétrole, charbon)
Thermique nucléaire : fission Uranium (minerai, eau de mer)
ou Plutonium (issu des centrales)
La fusion (Deutérium/Tritium) est encore à l'étude

Et les éoliennes ?

Très ancienne méthode exploitée déjà pour le pompage de l'eau
Ou recharger des accumulateurs électriques en Asie
La France est au 3° rang européen en 2006 (810 MW installés)

Avantages et inconvénients de l'énergie éolienne

Pas d'émissions de gaz à effet de serre
Déchets de démantèlement et de maintenance classique (déconstruction)
Matériaux de construction classiques

Quelques inconvénients dont beaucoup peuvent être atténués

MAIS le **couplage au réseau** est nécessaire si on veut développer la filière
Donc il faut **obligatoirement STOCKER l'énergie** !

Coût de fonctionnement élevé (rendement faible), et 80 Ha/MW

EdF achète de KWh éolien **8,4c** (5ans) puis 7,2c (15 ans)
EdF revend le KWh électrique autour de **1,5c** actuellement

Energie hydraulique : 230 MTep/an dans le monde

12,8% de la production électrique française

Coût de production élevé 1,8c par KWh selon la taille du barrage
Emprise au sol élevée : environ 30 Ha par MW
Barrage des trois gorges en Chine :

1 200 000 personnes déplacées
20 villes et 1000 villages engloutis

Accidents dramatiques :

Inde 15 000 morts en 1979
2 600 morts en Italie en 1963
423 morts à Malpasset (France) le 2 décembre 1959

Conséquences écologiques des grands barrages : Amazonie et Canada

Energie solaire : 1 MTep par an environ actuellement

Conversion thermique : chauffage solaire, chauffe-eau solaire

Conversion thermodynamique : four solaire, centrales thermosolaires

Prix du KWh de ces deux procédés : **3 euros** actuellement

Avantages aux pays en voie de développement ou en local

Conversion photovoltaïque (panneaux solaires)

En France, 1500 MW en 2000, près de 5000 actuellement

Moins d'un MTep

MAIS beaucoup d'énergie consommée pour fabriquer les panneaux

Matériaux sensibles importés et/ou fabriqué en Chine…

Coût élevé pour le réseau (10 fois le prix moyen)

Rentable uniquement en exploitation locale

Energie géothermique

La température de la terre augmente de 1°C par 30 mètres

Production de chaleur : pompes à chaleur

Réserves quasi inépuisables,
mais difficilement exploitables à grande échelle

15 GW thermiques installés chez les particuliers
ou des ensembles urbains. Soit 30 MTep par an

Production d'électricité :

Seulement 10 MW installés actuellement (20 MTep par an)
Usine de Bouillante en Guadeloupe par exemple
Pas de grandes centrales thermiques en France

Sources de chaleur à basse température

Récupération de chaleur (piscines, pisciculture)
150 MTep sur les 660 des centrales nucléaires

Production de chaleur par biomasse

Actuellement environ 1GTep par an

Combustion du bois, des pailles, ordures ménagères
Très utilisée malgré un rendement faible

Responsable de 1 500 morts pas jour selon l'OMS… surtout dans les PVD

Le bois n'est pas considéré comme source d'énergie renouvelable

Entre 1990 et 2010 la surface des forêts de notre planète a diminué de **40%**

Soit 690 000 km^2 par an (la France occupe 550 000 km^2 !)

Biomasse et transport : les biocarburants 70 MTep par an

Vieux système remis au goût du jour…
La Gobron-Brillé de 1903 avait atteint en 1903 le record de 177 km/h
Avec un moteur à éthanol agricole !!!
Et pendant la guerre, Renault avait développé des Gazogènes

2 filières **Huile de Colza ou de Tournesol**
Ethanol de blé ou de betterave

Le rendement est nécessairement faible car il faut produire des végétaux
- Carburants pour tracteur, engrais (très gourmand en énergie)
- Broyage et purification du produit
- Distillation pour la filière alcool

Dans le futur on imagine **10% de l'énergie des transports**

L'hydrogène : carburant de demain

« Je crois que l'eau sera employée comme combustible, que l'hydrogène et l'oxygène, utilisés séparément ou isolément, fourniront une source de chaleur et de lumière inépuisable… »

Jules Verne, l'île mystérieuse

L'hydrogène est présent partout… mais disponible nulle part !
L'hydrogène n'existe que combiné à d'autres éléments
Il faut donc fournir de l'énergie pour la produire…

On la produit par **décomposition de l'eau**
(électrolyse ou réaction thermique sur des hydrures)
A partir **d'énergies fossiles**
(méthane, gaz à l'eau, gazéification du charbon)

Coût de production = 10 fois celui des hydrocarbures
Coût de stockage : 100 fois plus que les hydrocarbures liquides

La pile à combustible (PAC)

Elle produit la réaction inverse de l'eau et donc libère de l'énergie

Différentes possibilités :

- Micro-PAC des téléphones portables
- PAC de 1 MW pour un immeuble collectif
- ou pile embarquée dans le domaine des transports

Le **premier moteur à explosion fonctionnant à l'hydrogène** a été inventé en **1805** par le suisse, Isaac de Rivaz !

La première voiture à **dépasser les 100 km/h est électrique** : la "Jamais Contente" de l'inventeur belge Camille Jenatzy, en 1899 !

L'Hydrogène comme carburant

C'est une option prometteuse, mais avec de nombreuses difficultés

> **Même à 700 bars de pression, il faut 4,6 litres pour fournir la même puissance qu'un litre d'essence**

C'est un gaz inflammable et même **explosif** (à faible teneur)

L'hydrogène **fragilise les métaux** par adsorption dans les structures

Il y a de nombreuses recherches mais qui nécessite aussi des **métaux rares** pour constituer des **batteries** ou des **piles à combustibles**

Il existe même des véhicules expérimentaux (BMW et aux USA)

Energie des mers

Trois voies :

- **Les usines marémotrices comme la Rance 240 MWe**
  Au total 25 MTep par an
- **L'énergie hydrolienne (énergie des courants)**
  Projets DCNS au raz Blanchard, expérimenté en Bretagne
- **L'énergie des vagues** (expérience en Ecosse et en Angleterre)
- Les **gradients thermiques** en mer (au large du Sénégal)

Alors il reste **l'énergie musculaire**… 0,2 MTep par an !
Probablement inépuisable… encore faut-il manger suffisamment

Les centrales thermiques

Le thermique classique produit 2,5 GTep par an

Plus…

- 2,2 millions de tonnes de poussières
- 56,5 millions tonnes de dioxyde de soufre (pluies acides)
- 30,7 millions de tonnes de dioxyde d'azote (idem)
- 10,4 milliards de tonnes de gaz carbonique (5300 milliard de m^3 !)

Le thermique nucléaire ne produit que 0,35 GTep par an…

Mais…

3. L'énergie nucléaire peut-elle (seule) répondre aux défis

Les atouts d'entrée :

- C'est la seule énergie issue du sol **non émettrice** de gaz à effet de serre
- Les réserves sont estimées à **4 siècles** (eau de mer, surgénération)

Les premiers obstacles :

Contrairement aux autres sources d'énergie, la technologie à employer est lourde, complexes et encore en développement, et peu transportable

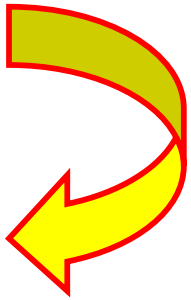
L'atout principal reste tout de même :

Le pouvoir énergétique par unité de masse est 2 millions de fois plus élevé que celui des matières fossiles !

Tableau comparatif des pouvoirs énergétiques

1 gramme de **Carbone**

33 mille joules (combustion)



Saut énorme !

1 gramme **d'Uranium 235**

82 milliards de joules (fission) soit x 2,5 millions

1 gramme de **Deutérium**

560 milliards de joules (fusion) soit x 7

1 gramme **matière/antimatière**

90 000 milliards de joules (annihilation) soit x 160

Plus jamais on ne fera un tel saut technologique !

Les réacteurs électrogènes REP

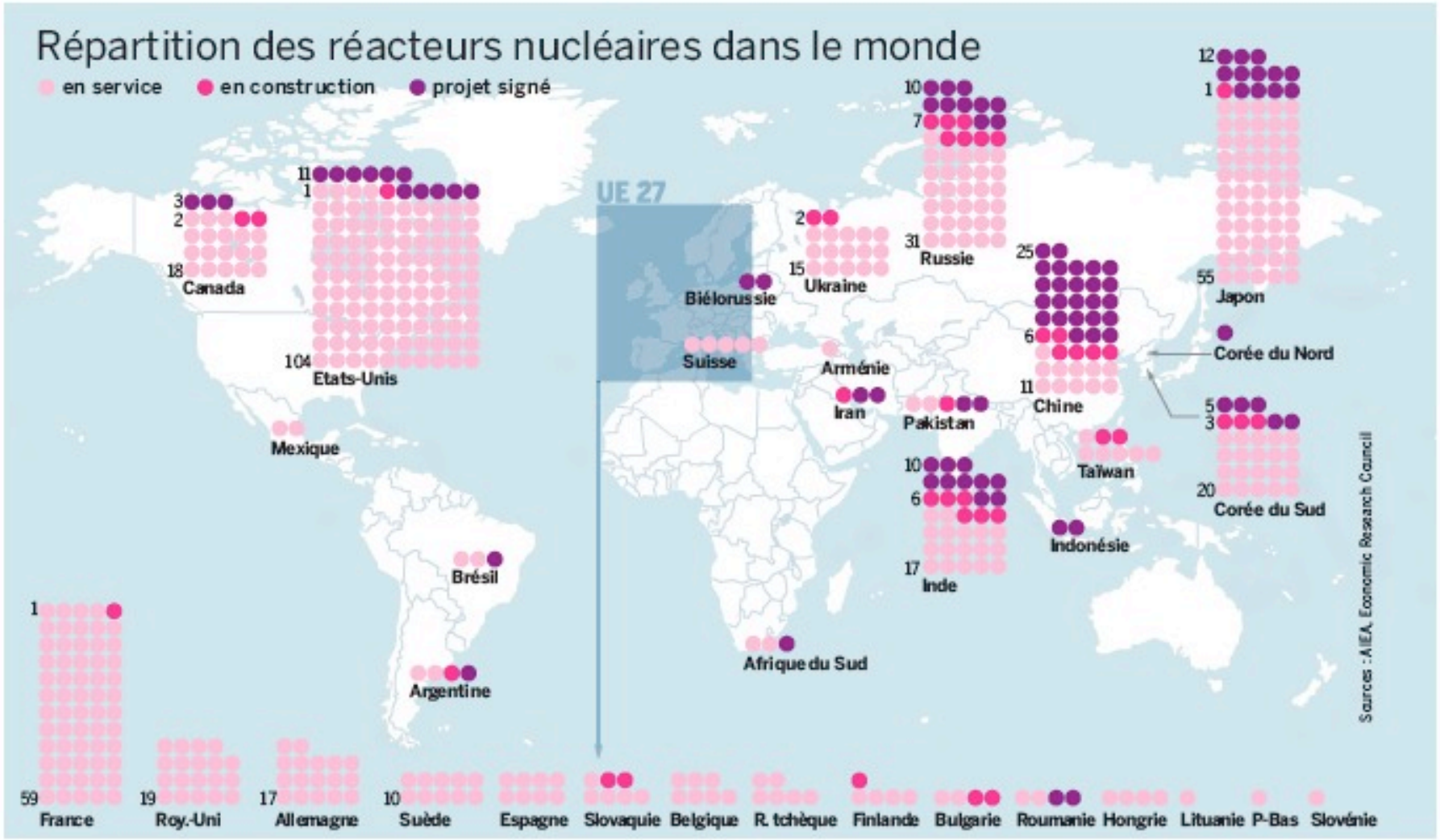
Il existe environ une dizaines de filières dans le monde dont les REP

- 59 unités installées en France
  63,13 GWe au 01/01/2005
- 78,1% de la puissance thermique (87,6%) utilisée en France
- 56,5 % du parc mondial des filières installées dans le monde

Un coût du combustible faible : de la mine au stockage ultime

0,6 c par KWh

Essentiellement parce que le pouvoir énergétique est très élevé
Donc ce faible coût a **très peu d'incidence sur le KWh livré** !


Répartition des réacteurs nucléaires dans le monde
en service
en construction
projet signé
UE 27
Canada
Etats-Unis
Mexique
Brésil
Argentine
Biélorussie
Suisse
Ukraine
Russie
Arménie
Iran
Pakistan
Chine
Taïwan
Indonésie
Inde
Afrique du Sud
Japon
Corée du Nord
Corée du Sud
France
Roy.-Uni
Allemagne
Suède
Espagne
Slovaquie
Belgique
R. tchèque
Finlande
Bulgarie
Roumanie
Hongrie
Lituanie
P-Bas
Slovénie
Source : AIEA, Economic Research Council

Les challenges du nucléaire

La sûreté des réacteurs : les conséquences d'un accident deviennent régionales, il faut donc prévoir au niveau mondial

La **gestion des déchets radioactifs** doit se faire dans une échelle de temps compatible avec « l'entendement humain »
Pour seulement 0,002% des déchets hautement toxiques

Et cela implique des dispositions à l'échelle des temps géologiques…

Les études sont donc complexes (possibilité de revenir en arrière, différents cycles ouverts ou fermés, etc.)

Beaucoup d'avantages

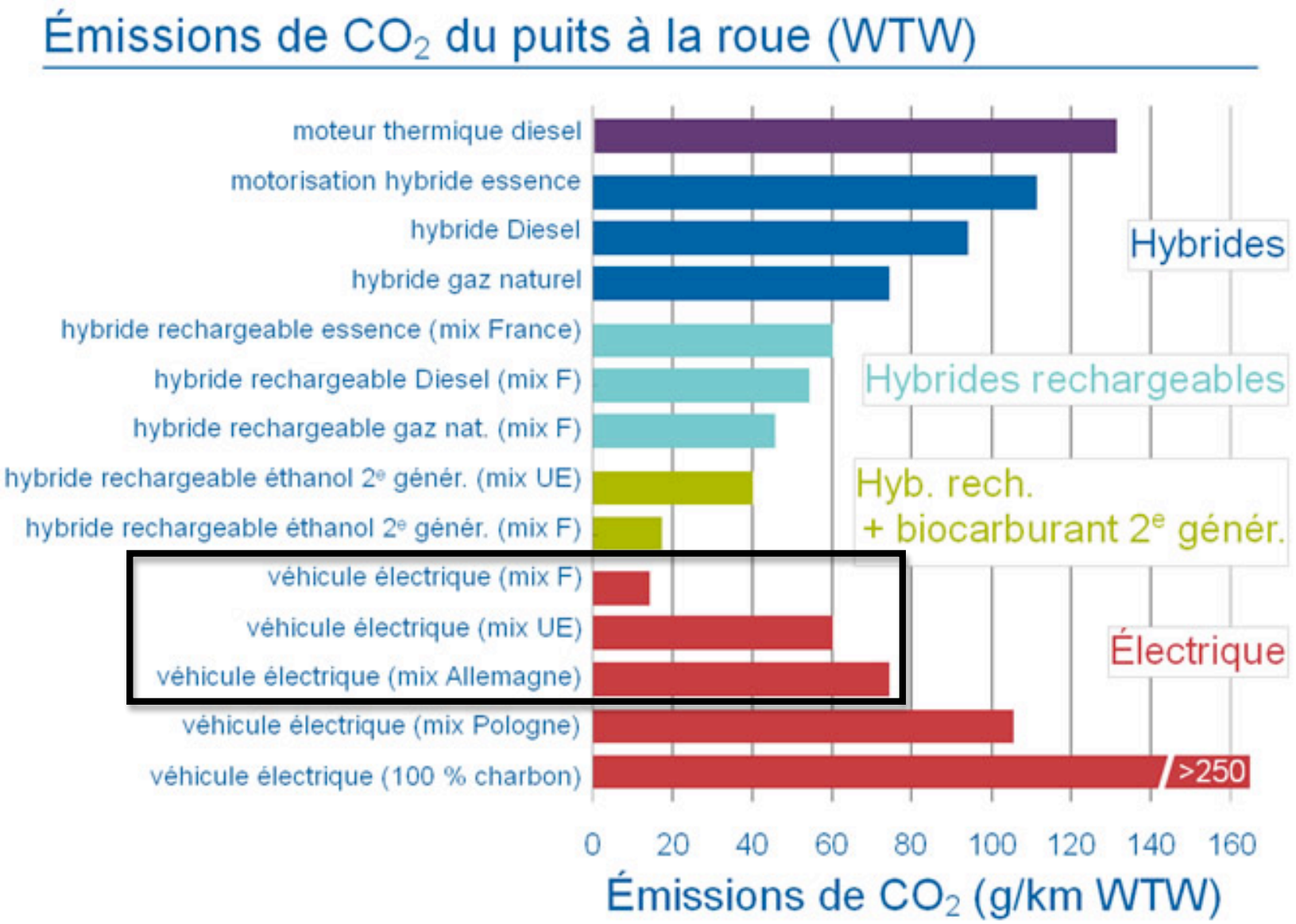
D'importantes réserves connues ou disponibles (eau de mer)
Pas de gaz à effets de serre (hormis les besoins en construction)

On économise en France sur un an (pour la même puissance fournie) :

- **88 000 tonnes de poussières**
- **2,3 millions de tonnes de dioxyde de soufre**

  (170% des rejets autorisés)
- **1,25 millions de tonnes de dioxyde d'azote**
- **425 millions de tonnes de dioxyde de carbone**

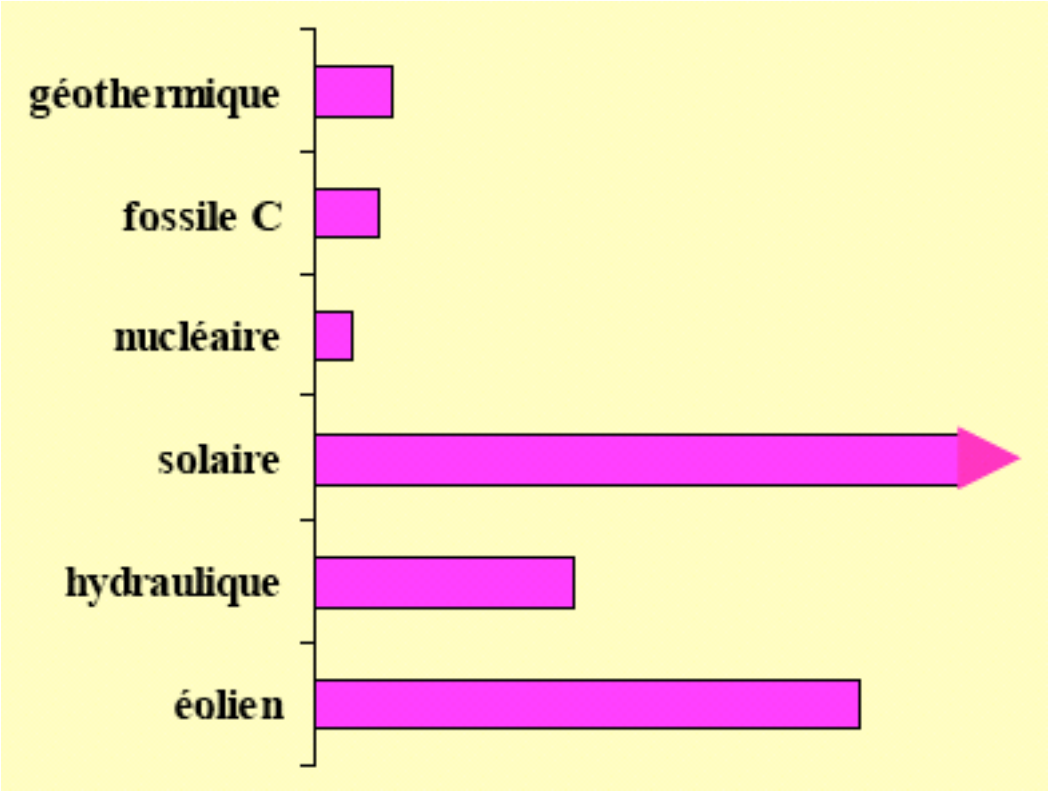
  soit 215 milliards de m^3


Émissions de CO_2 du puits à la roue (WTW)
moteur thermique diesel
motorisation hybride essence
hybride Diesel
hybride gaz naturel
hybride rechargeable essence (mix France)
hybride rechargeable Diesel (mix F)
hybride rechargeable gaz nat. (mix F)
hybride rechargeable éthanol 2e génér. (mix UE)
hybride rechargeable éthanol 2e génér. (mix F)
véhicule électrique (mix F)
véhicule électrique (mix UE)
véhicule électrique (mix Allemagne)
véhicule électrique (mix Pologne)
véhicule électrique (100 % charbon)
>250
Hybrides
Hybrides rechargeables
Hyb. rech.
+ biocarburant 2e génér.
Électrique
0 20 40 60 80 100 120 140 160
Émissions de CO_2 (g/km WTW)

Mais quels sont les problèmes alors ?

Les réserves restent tout de même limitées (comparable au charbon)
Ce n'est pas renouvelable, donc pas de développement durable

Pour un coût modéré..



Quel est le « tribut humain » que l'on paye à la fée électricité ?

Nombre de décès pour 100 TWh produits

Thermique classique	108
Hydraulique	88
Eolien	40
Thermique nucléaire	0,60 (0,05 immédiats)

Alors tout semble militer en faveur du nucléaire…

Et pourtant…

Les problèmes du nucléaire

Le mythe de Prométhée :

On ne craint pas ce que l'on voit
On craint ce qu'on ne voit pas

Hiroshima, Nagazaki ? pas tellement, on n'y croit pas vraiment

L'accident de **Tchernobyl** et celui de **Fukushima** : oui, on en parle
Et pourtant TMI, Tchelyabinsk, Winscalle…

Le manque de communication lié au secret industriel ou militaire ?
Le trop de communication des opposants ?

Il faut toujours s'informer et informer pour pouvoir choisir
Mais il faut toujours un contre-pouvoir bien informé

Les réacteurs de l'avenir… l'EPR et les réacteurs GEN IV

Les premières réponses aux **problèmes de la sûreté**

EPR (European pressurized water reactor)

Retour d'expérience de 1300 an-réacteurs

Prévu pour 60 à 70 ans de durée de vie (contre 40 actuellement)

La tête de série en Finlande, puis Flamanville et la Chine

Ensuite les études sur les **réacteurs du futur** privilégieront

- La sûreté bien sûr
- Le rendement thermique
- L'isogénération du combustible
- La non prolifération des matières fissiles
- La gestion des déchets en réacteurs pour limiter les rejets

Les filières de génération IV

- Refroidissement à gaz (haute température, rendement)
- Réacteurs rapides à caloporteur Plomb (idem)
- Réacteurs à sels fondus (plus petites unités et gestion déchets)
- Réacteurs à caloporteur sodium (expérience réacteurs)
- Réacteurs eau super-critique (retour d'expérience des REP)
- Réacteurs à très haute température (rendement)

Les filières à neutrons rapides feront passer les réserves de 67 ans (cycle dit ouvert) ou quelques siècles (régénération et MOX) à plusieurs dizaines de siècles (régénération)

Cela en ferait alors une énergie peut-être inépuisable

Il reste bien sur ITER et la fusion (projet de démonstrateur en cours)

Les réacteurs d'après-demain (la fusion)

C'est un vieux rêve mais il commence à être envisageable

Le prototype ITER est prévu pour 2050-2060

Ce serait alors une source d'énergie inépuisable à priori
Mais la technologie est encore plus lourde que la fission
Il n'y pas d'obstacle au génie humain, seulement le temps…

Et du côté des déchets, il y aura tout de même autant de Becquerels que pour la fission par KWh fourni, avec du Tritium et des produits d'activation (neutrons de 14 MeV)

Et les énergies inconnues ? on (doit) rêver…

Alors quelles énergies pour le XXI° siècle ?

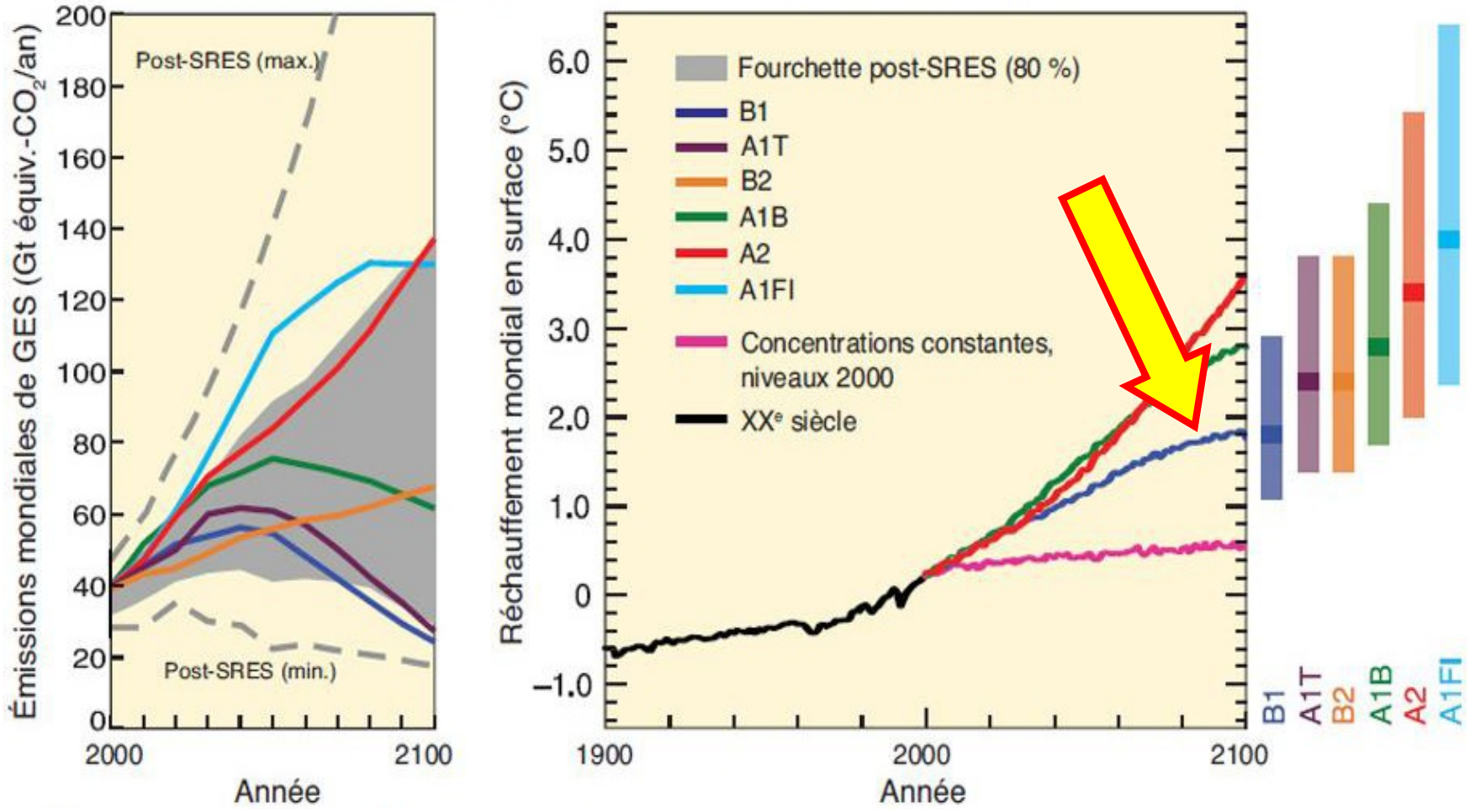
Faisons le point :

- Augmentation considérable de la **demande d'énergie**
- Augmentation raisonnable de la **population**
- **Disparition programmée** du gaz et du pétrole
- Diminution drastique de **l'utilisation du charbon** autant que possible, malgré des stocks importants (piégeage CO_2 ?)

Donc on commence par faire **des économies d'énergie**
(on gagne du temps)

Énergie 2050 : études prospectives sur différents scénarii

Scénarios d'émissions de GES pour la période 2000–2100 (en l'absence de politiques climatiques additionnelles) et projections relatives aux températures en surface



Exemples de scénarii pour la France

NEGATep	Plus de fossile, maintien du nucléaire
NEGAWatt	Réduction drastique et sorite nucléaire
"Grenelle"	ENR + limitation du nucléaire (différents ratio)
Global Chance	Sortie progressive du nucléaire, ENR et économies
AREVA	Développement EPR mais limitation % nucléaire
CEA	Investissements dans GEN4 et ENR
EdF et RTE	Développement ENR et maintien capacité de production avec prolongement des centrales sur 40 voire 60 ans

Quelles énergies dans le proche avenir ?

Tout d'abord des économies d'énergie

- **Matériaux isolants** pour l'habitat (part importante consommation)
- Amélioration du **rendement des moteurs** (voiture, combustions)
- **Changements d'habitudes de vie** : choc de civilisation
- Recherche poussée sur le **stockage de l'énergie**
- **Surveillance** des subventions et des financements internationaux

Hypothèse la plus basse : 2 GTep

Quelles énergies pour le milieu du XXI° siècle ?

Dans l'hypothèse basse on a trouvé 32,5 GTep/an
Dans l'hypothèse haute, 57,2% (la plus réaliste)

Pétrole	3,55	en 2000	**4**	en 2050
Gaz	2,05		**3**	
Charbon	2,30		**5**	
Hydraulique	**0,25**		**1,5**	
Eolien	**0,01**		**1,5**	
Biomasse	**1,00**		**4**	
Solaire	**0,01**		**1,5**	
géothermie	**0,03**		**1**	
TOTAL			**21,5 GTep**	

Seul le nucléaire peut apporte le complément quel qu'il soit !

Pour 9 GTep nécessaires au minimum en plus

Il faudrait alors **5600** réacteurs dans le monde

Dont la moitié pour le **transport** et les **Piles à Combustible**

Ce qui ferait 125 réacteurs à construire par an

en commençant la construction maintenant

tout en remplaçant les centrales en fin de vie (démantèlement)

Et encore on ne prend pas en compte le problème de l'eau…

Deux problèmes arrivent en même temps : le **besoin d'eau** et l'accroissement des **besoins en transports** (mondialisation des échanges)
Il faut donc aussi pouvoirs stocker l'énergie
Et tout ça coûte très cher

Finalement…

- On utilise toutes les sources d'énergie disponibles
  et on économise au maximum les énergies produites

- On ne tient pas (malheureusement) les promesses du Protocole de Kyoto

- On ne lésine pas sur le coût du KWh (ou de la MTep)

- On freine le développement, la croissance, les ambitions…

- **Et on ne pourra jamais construire 125 centrales par an !**

Donc on ne respecte même pas l'hypothèse la plus basse

Quelle solution ?

On n'échappera pas à un parc nucléaire conséquent au niveau mondial

Il faut s'y préparer et régler le problème actuel du nucléaire :

La gestion des déchets radioactifs

Trois autres challenges restent à relever :

- Le stockage de l'énergie pour **décentraliser** les sources d'énergie
- Assurer la **sûreté** du stockage de l'hydrogène
- Fournir de l'eau douce à tout le monde…