

Panorama sur les énergies

F. Ravelet

Laboratoire DynFluid, Arts et Métiers-ParisTech

19 février 2014

Qu'est-ce que l'énergie ?

« Grandeur caractérisant un système physique, gardant la même valeur au cours de toutes les transformations internes du système (loi de conservation) et exprimant sa capacité à modifier l'état d'autres systèmes avec lesquels il entre en interaction. (Unité SI le joule.) »^a

- « C'est un fait [...] La loi est appelée *conservation de l'énergie*. Elle affirme qu'il y a une certaine quantité que nous appelons énergie, qui ne change pas dans les multiples modifications que peut subir la nature. »^b
- C'est donc *la grandeur physique qui se conserve lors de toute transformation d'un système physique fermé*.
- Autrement dit, c'est la "monnaie" échangée lorsqu'un phénomène en provoque un autre.
- Énergie sous forme cinétique, potentielle mécanique ou chimique, thermique, ...
- Étymologie : du grec ενεργεια, « force en action ».
- Travail d'une force $\delta W = \vec{F} \cdot d\vec{u}$.

a. Définition du Larousse.

b. Cours de physique de Feynman, *mécanique 1*, chap. 4 (1963, trad. 1979). [Invariance par translation dans le temps \$\Rightarrow\$ conservation de l'énergie.](#)

Unités

- Système International : le Joule (J) : travail d'une force de 1 Newton dans un déplacement de 1 mètre, ou travail d'une puissance de 1 Watt pendant 1 seconde.
- Unité très petite (soulever une charge de 100 grammes sur 1 mètre \approx 1 Joule).
- Autres unités :

<i>Unité</i>	<i>Symbole</i>	<i>Valeur</i>	<i>Remarque</i>
Calorie	kcal	4.182×10^3 J	Capacité calorifique de l'eau ^a
Tonne-Equivalent Pétrole	tep	41.86×10^9 J 11.6×10^3 kWh	P.C.I. ^b moyen du pétrole
Kilowattheure	kWh	3.6×10^6 J 1 MWh \approx 0.086 tep	Unité pratique électrique

a. Certains utilisent aussi la British Thermal Unit (BTU), énergie pour élever une pound d'eau d'un degré Fahrenheit, 1 BTU \approx 1 kJ.

b. Pouvoir Calorifique Inférieur

Ordres de grandeur

- Un humain sédentaire : 2000 Calories par jour soit 2.3 kWh (puissance \approx 100 W).
- Une pelletée de sable (4 kg) soulevée d'un mètre toutes les 10 s pendant 10 h : \approx 0.04 kWh.
- Puissance absorbée pendant l'effort : 500 W. Energie dépensée : 5 kWh (\approx 6.4 kWh / jour).

\Rightarrow rendement travail humain ridicule (\approx 1% avec les bras, 5 – 10% avec les jambes). Travail mécanique productible par an par un travailleur (de force) : \lesssim 150 kWh.

- Un litre d'essence : 11.6 kWh, avec moteur à combustion interne de rendement 30% : on récupère 3.5 kWh.
- Un cycliste entraîné^a fourni environ 0.18 kWh par heure (mais tient au maximum 4h).
- Pour même travail utile fourni 1 litre essence \iff 20 cycliste-heures \iff 8.5 travailleur-jours.

Et l'essence est chère ?

- Consommation quotidienne d'énergie primaire par tête, 2010^b :
Monde : 59 kWh (5 litres) ; OCDE : 139 kWh (12 litres) ; Chine : 59 kWh (5 litres) ; USA : 228 kWh (20 litres) ; Reste du monde : 36 kWh (3 litres).

a. J.-P. Mariot, *Mechanics of cycling*, Rev. Phys. Appl. **19**, 349-357 (1984).

b. Source : Key World Energy Statistics 2012, [IEA](#).

Energie primaire vs. énergie finale

Attention aux conclusions hâtives à partir des chiffres précédents ! Il faut en effet tenir compte :

- De l'usage de l'énergie et des différents rendements de conversion.
- Des notions d'*énergie primaire* et d'*énergie finale*.
 - **Energie primaire**^a : issue d'une ressource naturelle ou brute (combustible fossile, matière fissile, rayonnement solaire).
 - **Energie finale** : forme commercialisée (essence à la pompe, électricité livrée).

a. Source : H. Ben Ahmed *et al.*, *Consommation d'énergie, ressources énergétiques et place de l'électricité*, Techniques de l'ingénieur, D3900 (2011).

Conventions pour le décompte de l'énergie primaire

- Problème : comment compter l'énergie primaire équivalente entre différents usages de l'énergie finale ?
- Convention [IEA](#) : 1 MWh = 0.086 tep (hydro-électricité) ; 0.26 tep (nucléaire) ou 0.86 tep (géothermie).
- "Méthode de substitution" ([Statistical Review of World Energy](#)) : rapporté à une centrale thermique moyenne ($\eta = 0.38$), 1 MWh = 0.226 tep.

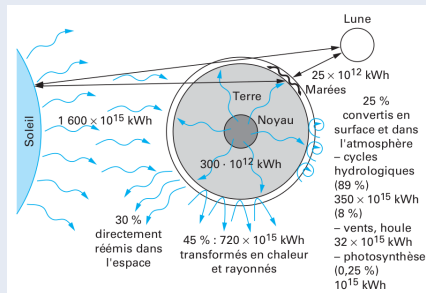
⇒ Toujours vérifier les facteurs de conversions employés !

Ressources énergétiques de la planète

- Non renouvelables :
 - Combustibles fossiles (hydrocarbures : charbon, pétrole, gaz naturel).
 - Minerai d'Uranium.
- Renouvelables :
 - "Energies renouvelables à haute enthalpie"
 - hydro-électricité
 - éolienne
 - solaire photovoltaïque
 - "Energies renouvelables thermiques"
 - biomasse
 - géothermie
 - déchets
 - solaire thermique

Tout est d'origine Nucléaire ! (fusion dans soleil, Uranium produit par nucléosynthèse dans les supernovae)

Ressources énergétiques de la planète



- Consommation annuelle : $\approx 150 \times 10^{12}$ kWh
- Ressources fossiles prouvées ($\times 10^{12}$ kWh) :

Pétrole	2700
Charbon	6500
Gaz	2200
Uranium	400

- Estim. ress. supplémentaires : $\times 2 - 3$.
- ENR "exploitables" ($\times 10^{12}$ kWh) :

Biomasse	15-140
Eolien	20-160
Hydraulique	14
Solaire	10-1000
Marées	2-50
Géoth.	30-80
Total	90-1600
Exploité (2012)	4.7 + 12.5

Special Report on Renewable Energy (2013), [IPCC](#).

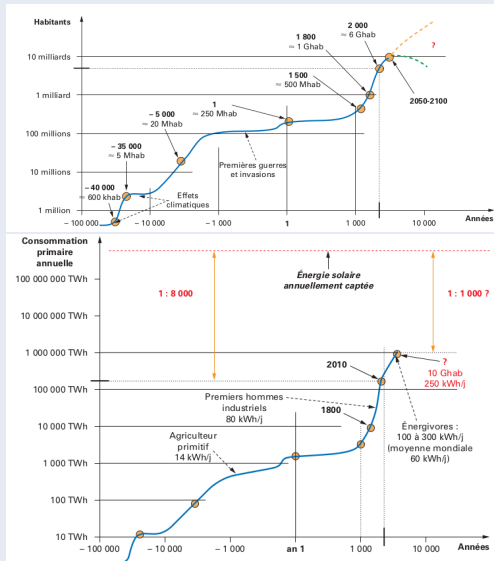
Sources d'énergie et histoire de l'humanité

« La vie, les activités de l'homme dépendent des sources d'énergie dont il dispose. Faute d'énergie, pas de vie, pas d'activités créatrices.

Certes l'énergie n'est pas le seul facteur en jeu : l'eau, certaines matières premières, le sol fertile, les possibilités de communication, l'existence d'un climat supportable, voire un milieu social et culturel dynamique et favorable — ce sont là d'autres éléments, et tous essentiels. Mais les disponibilités d'énergie représentent la base nécessaire à l'organisation de la matière et à tout développement de l'histoire des hommes.

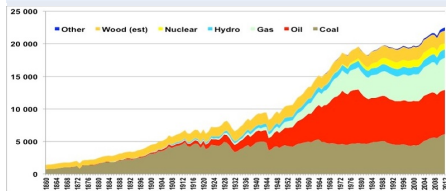
Ceci dit, je voudrais démontrer rapidement que l'utilisation des différentes formes d'énergie représente, en fait, le fil conducteur d'une histoire matérielle de l'Humanité et que les deux grands tournants de cette longue histoire, la Révolution Néolithique (que j'appellerais plutôt agricole) et la Révolution Industrielle, sont mieux expliqués et définis par ce nouvel aperçu^a ».

a. C. M. Cipolla, *Sources d'énergie et histoire de l'humanité*, Annales Économies, Sociétés, Civilisations **16**, 521-534 (1961).

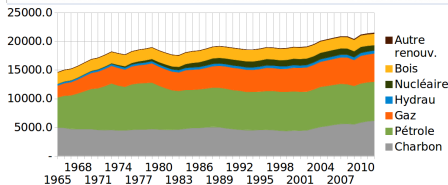


Consommation primaire^a par habitant (kWh)

a. Avec convention IEA

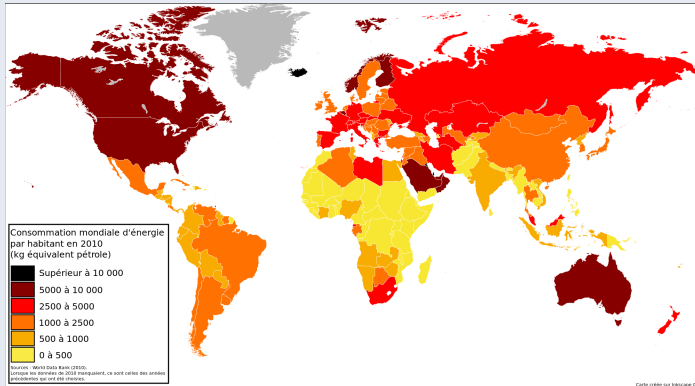


source : ([Site Manicore](#))



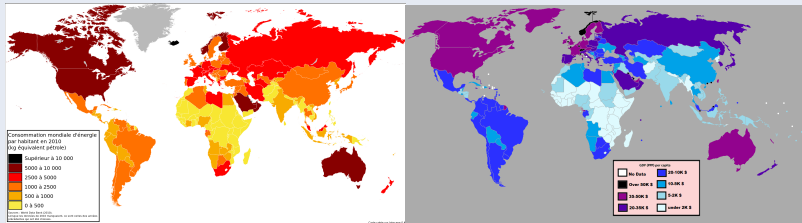
source : ([Statistical Review of World Energy](#))

Consommation mondiale et indicateurs de développement



- Contraintes climatiques ;
- Mode de vie et richesse : Consommation fortement corrélée au PIB ;
- Notion d'intensité énergétique.

Consommation mondiale et indicateurs de développement

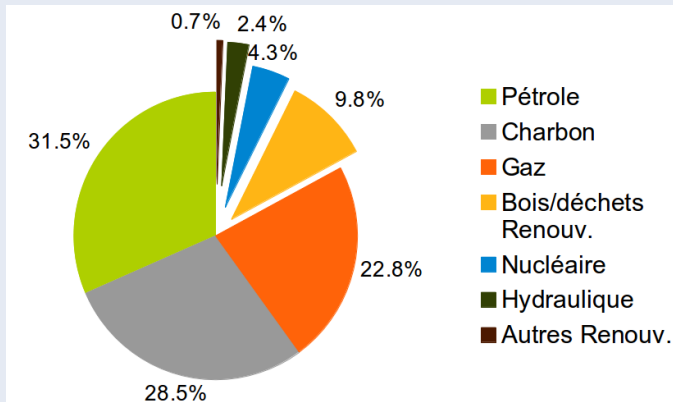


Monde	3.0
OCDE	2.4
Chine	4.1
France	2.1
US	2.4
Reste du monde	4.8

Intensité énergétique (2012), en kWh/€

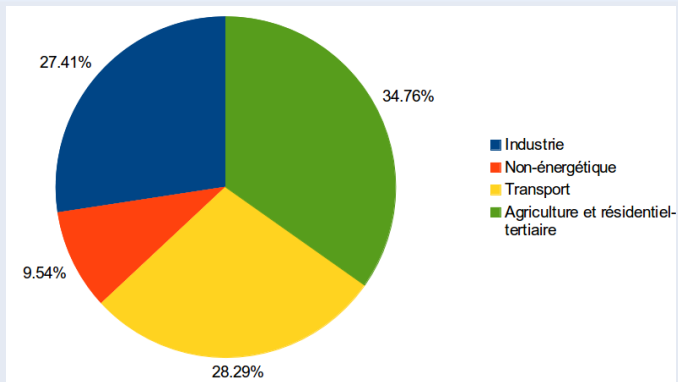
Source : Key World Energy Statistics 2012, [IEA](#)

Répartition d'énergie primaire par source (2012)

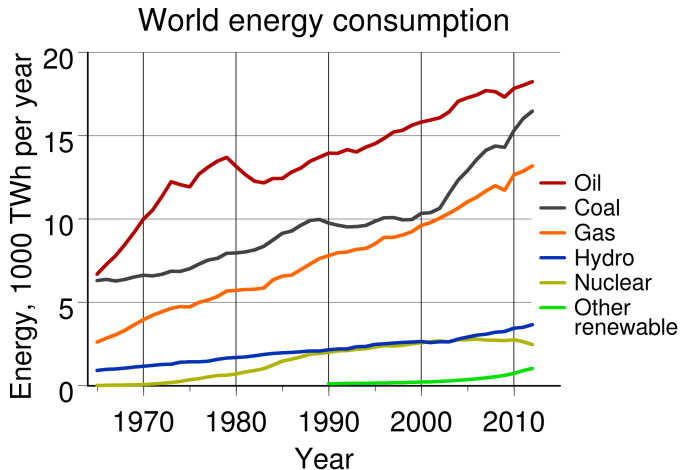


source : ([Statistical Review of World Energy](#))

Energie finale par secteur (2012)

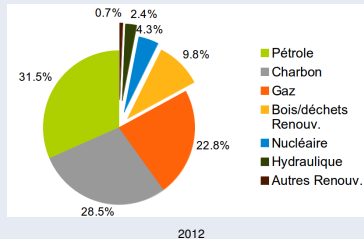
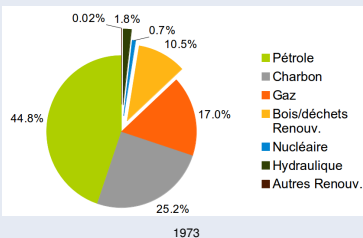


source : Key World Energy Statistics 2012, [IEA](#)



Total 2012 : 150 000 TWh

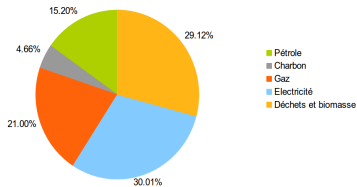
Répartition d'énergie primaire par source (1973-2012)



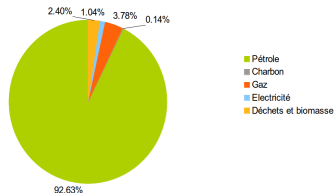
source : ([Statistical Review of World Energy](#))

Répartition d'énergie primaire par source (1973-2012)

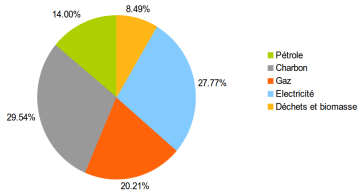
Résidentiel-Tertiaire



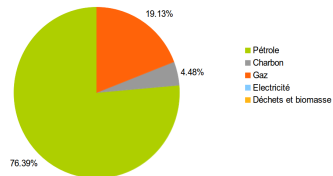
Transports



Industrie



Usage Non énergétique

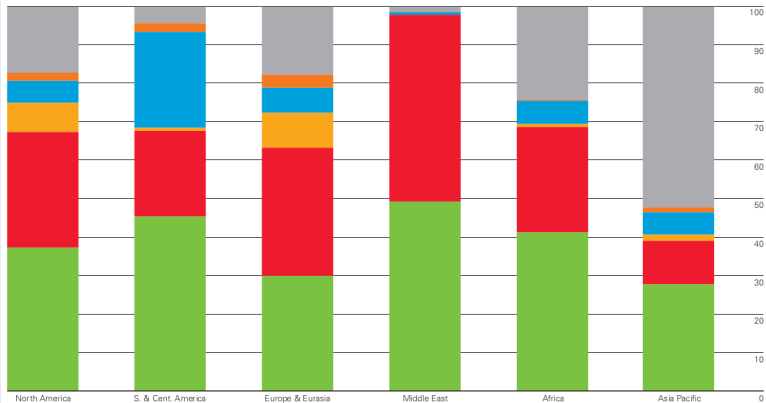


source : Key World Energy Statistics 2012, [IEA](#)

Mix énergétiques régionaux 2012

Regional consumption pattern 2012

Percentage



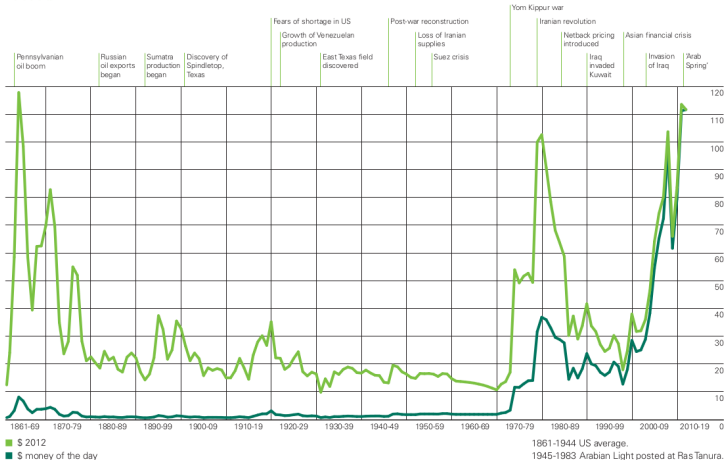
The Asia Pacific region accounted for a record 40% of global energy consumption and 69.9% of global coal consumption in 2012; the region also leads in oil and hydroelectric generation. Europe & Eurasia is the leading region for consumption of natural gas, nuclear power, and renewables. Coal is the dominant fuel in the Asia Pacific region, the only region dependent on a single fuel for more than 50% of total primary energy consumption. Natural gas is dominant in Europe & Eurasia, and oil is dominant in other regions.

source : [\(Statistical Review of World Energy\)](#)

Prix du pétrole et évènements historiques

Crude oil prices 1861-2012

US dollars per barrel
World events

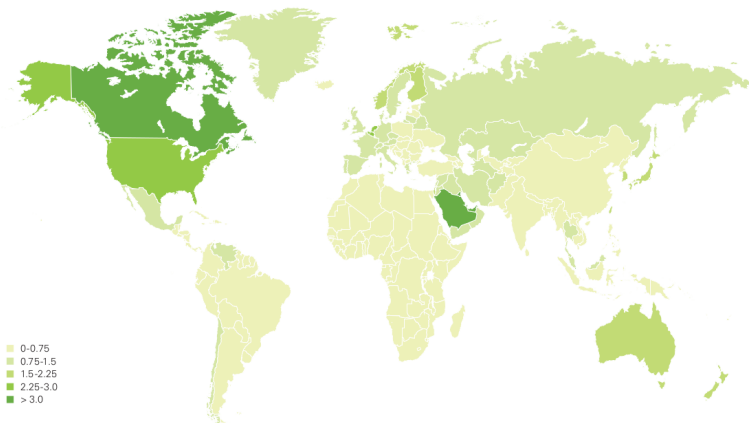


source : [\(Statistical Review of World Energy\)](#)

Dépendance régionale au pétrole

Consommation per capita 2012

Tonnes



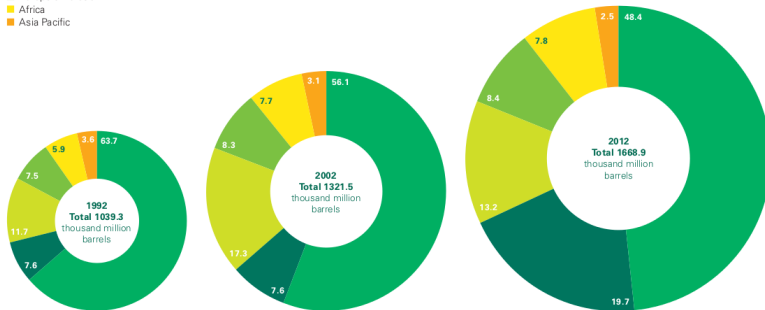
source : ([Statistical Review of World Energy](#))

Transferts régionaux des réserves de pétrole

Distribution of proved reserves in 1992, 2002 and 2012

Percentage

- Middle East
- S. & Cent. America
- North America
- Europe & Eurasia
- Africa
- Asia Pacific



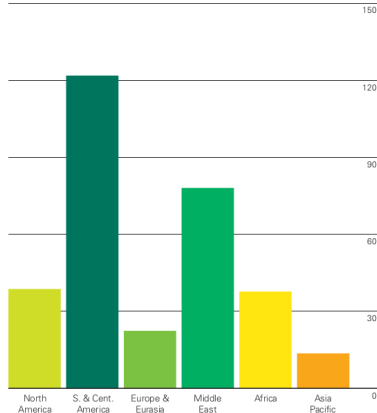
source : [\(Statistical Review of World Energy\)](#)

Espérance de vie des réserves régionales

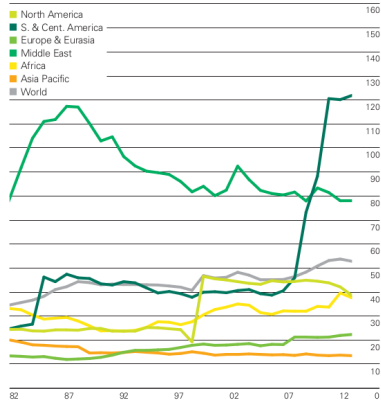
Reserves-to-production (R/P) ratios

Years

2012 by region



History

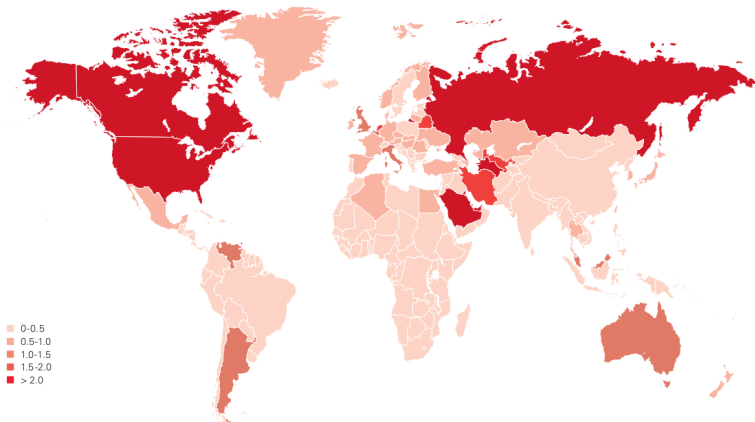


source : [\(Statistical Review of World Energy\)](#)

Dépendance régionale au gaz

Consumption per capita 2012

Tonnes ol équivalent



Source: Includes data from Cedigaz.

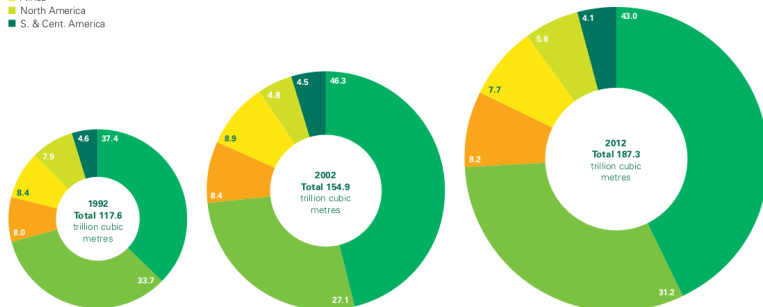
source : ([Statistical Review of World Energy](#))

Etat des réserves régionales de gaz

Distribution of proved reserves in 1992, 2002 and 2012

Percentage

- Middle East
- Europe & Eurasia
- Asia Pacific
- Africa
- North America
- S. & Cent. America



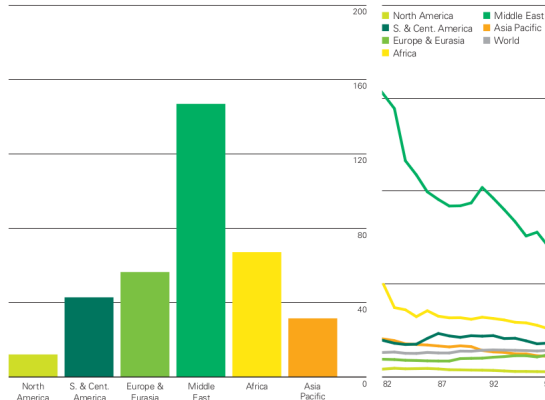
source : ([Statistical Review of World Energy](#))

Espérance de vie des réserves régionales

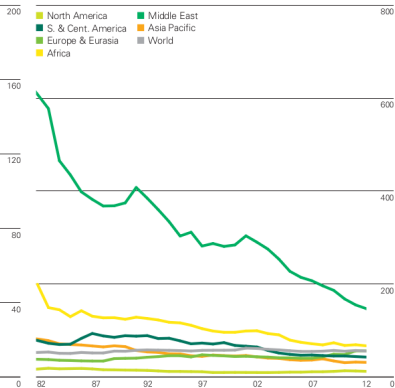
Reserves-to-production (R/P) ratios

Years

2012 by region



History



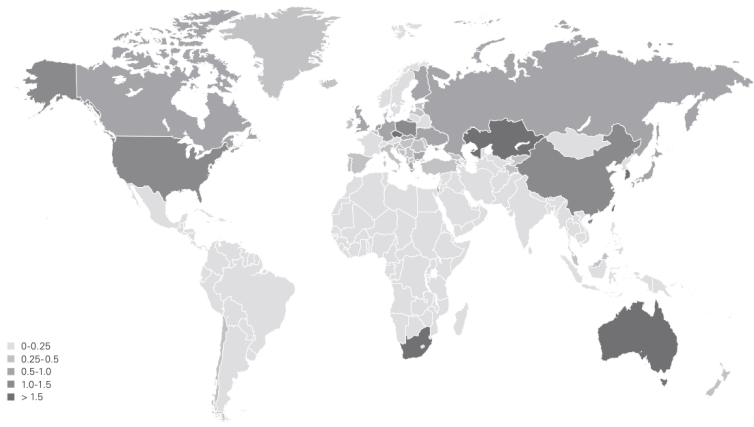
World proved natural gas reserves at end-2012 stood at 187.3 trillion cubic metres, sufficient to meet 55.7 years of global production. Proved reserves declined by 0.3% relative to end-2011 data, the first annual decline in our data set. Revisions were made to the earlier published estimates for proved reserves in the Former Soviet Union (FSU) countries, which lowered the FSU R/P ratio to 71 years, from 96.3 years at end-2011 in last year's edition.

source : [\(Statistical Review of World Energy\)](#)

Dépendance régionale au charbon

Consommation per capita 2012

Tonnes oil équivalent

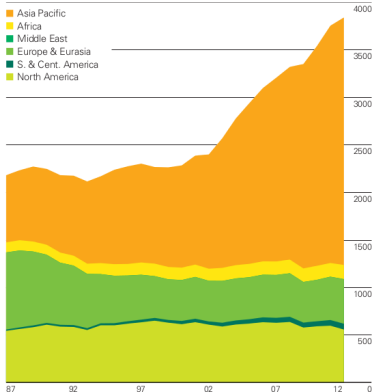


source : ([Statistical Review of World Energy](#))

Le charbon : une énergie "locale"

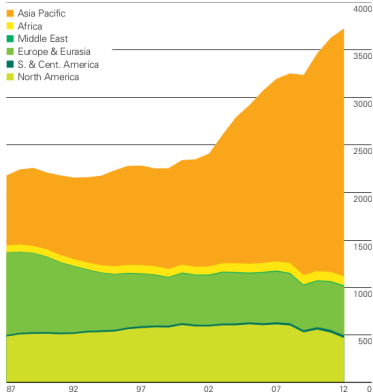
Production by region

Million tonnes of equivalent



Consumption by region

Million tonnes oil equivalent



Global coal production grew by 2%. The Asia Pacific region accounted for all of the net increase, offsetting a large decline in the US. The Asia Pacific region now accounts for more than two-thirds of global output. Coal consumption increased by a below-average 2.5%. The Asia Pacific region was also responsible for all of the net growth in global consumption. A second consecutive large decline in North America (-11.3%) more than offset growth in other regions; EU consumption grew for a third consecutive year.

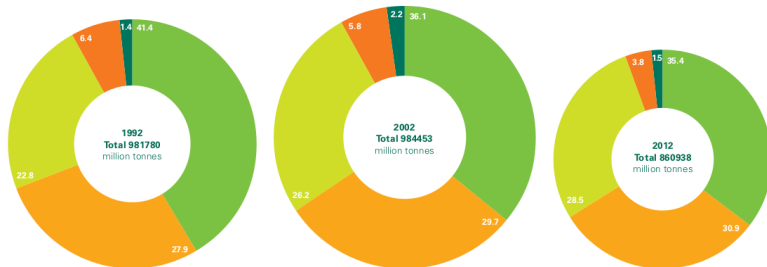
source : ([Statistical Review of World Energy](#))

Réserves de charbon

Distribution of proved reserves in 1992, 2002 and 2012

Percentage

- Europe & Eurasia
- Asia Pacific
- North America
- Middle East & Africa
- S. & Cent. America



Source: Survey of Energy Resources 2010, World Energy Council.

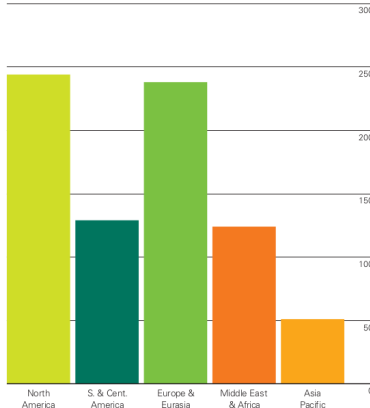
source : [\(Statistical Review of World Energy\)](#)

Espérance de vie des réserves régionales

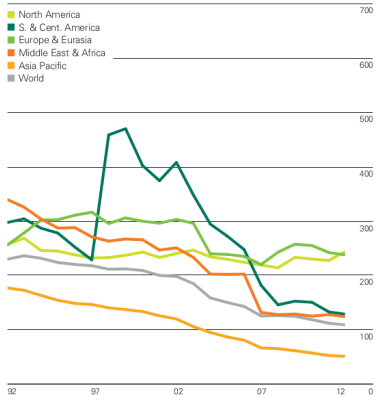
Reserves-to-production (R/P) ratios

Years

2012 by region



History



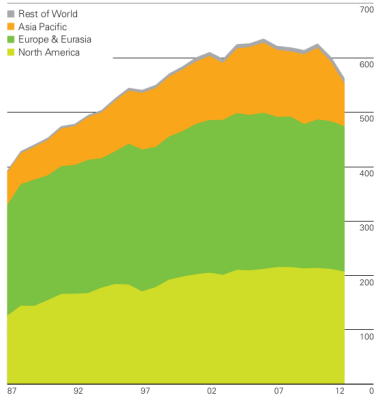
World proved reserves of coal in 2012 were sufficient to meet 109 years of global production, by far the largest R/P ratio for any fossil fuel. Europe & Eurasia holds the largest regional reserves while North America has the highest R/P ratio. The US holds the largest individual reserves, followed by Russia and China.

source : [\(Statistical Review of World Energy\)](#)

Hydraulique et Nucléaire

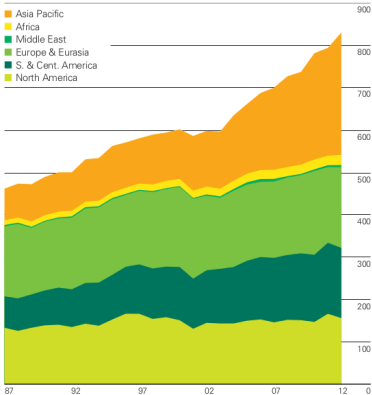
Nuclear energy consumption by region

Million tonnes oil equivalent



Hydroelectricity consumption by region

Million tonnes oil equivalent



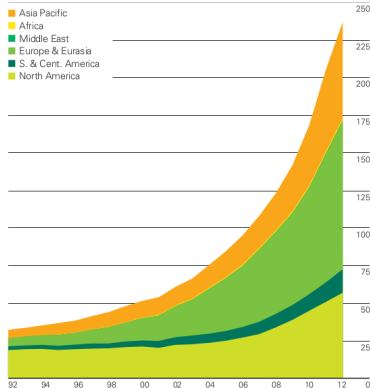
World nuclear power generation declined by 6.9%, the largest decline on record for a second consecutive year. Japanese nuclear output fell by 89%. Nuclear's share of global primary energy was the lowest since 1984. Global hydroelectric output grew by an above-average 4.3%. China accounted for all of the net increase, recording the largest national annual increment in our data set.

source : ([Statistical Review of World Energy](#))

Autres renouvelables

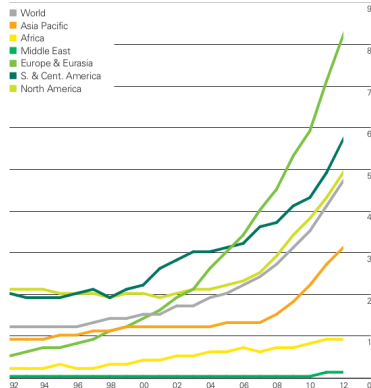
Other renewables consumption by region

Milion tonnes oil equivalent



Other renewables share of power generation by region

Percentage



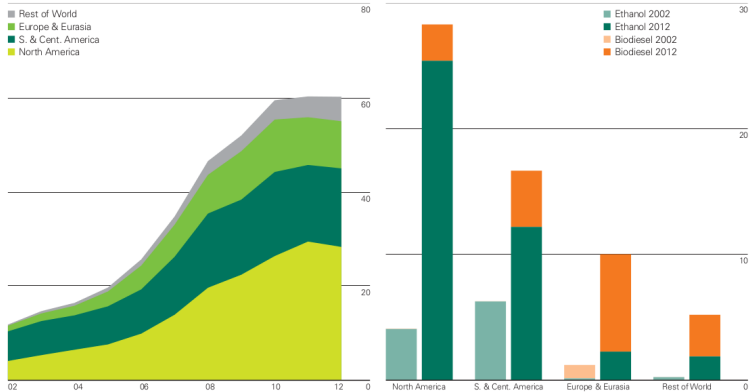
Renewable energy in power generation grew by an above-average 15.2%. Europe & Eurasia delivered the largest growth increment and continues to hold the largest regional share of the global total (accounting for 41.7% of the world total). Renewable energy accounted for a record 4.7% of global power generation, with an 8.2% share in Europe & Eurasia.

source : [\(Statistical Review of World Energy\)](#)

Biocarburants

World biofuels production

Million tonnes oil equivalent



World biofuels production declined by 0.4% in 2012, the first decline since 2000. Increased output in South America and Asia Pacific was outweighed by declines in North America and Europe. Global ethanol output declined by 1.7%, the second straight annual decline. Biodiesel production grew by 2.7% and has doubled in the last five years and now makes up 31% of total biofuel supply.

source : ([Statistical Review of World Energy](#))