



« Vers une économie décarbonée : avec ou sans fission nucléaire ? »

Académie Royale de Belgique - Collège Belgique

Palais provincial de Namur (Place Saint-Aubain)

mardi 13 mars 2018

* Responsibility for the
information and views set out
in this Collège Belgique course
lies entirely with the author *

* Reproduction of the texts of
this course is authorised
provided the source is
acknowledged *

Georges Van Goethem (Dr. Ir.)
Royal Academy for Overseas Sciences of Belgium
ex- EC DG Research and Innovation / Dir. Energy /
(email : georges.m.vangoethem@gmail.com)

Vers une économie décarbonée : le mix énergétique idéal ?



www.asterix.com © 2010 LES EDITIONS ALBERT RENÉ / GOSCINNY - UPERIZO

sécurité énergétique et accès aux ressources :
facteurs-clé du développement d'un pays



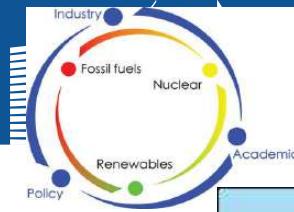
Réflexion sur l'avenir de notre approvisionnement énergétique



Sicurezza e cultura - “Un miliardo per la sicurezza e uno per la cultura. La bellezza sarà più forte della barbarie”
“Per ogni euro in cybersecurity, uno in start-up; per ogni mezzo blindato in più, un campo di calcetto”.

Matteo Renzi, Président du Conseil Italien, 24 novembre 2015

L'énergie, c'est le pré-requis à tous les actes de développement



« L'énergie, c'est
le pré-requis à tous les actes de développement,
c'est le pré-requis

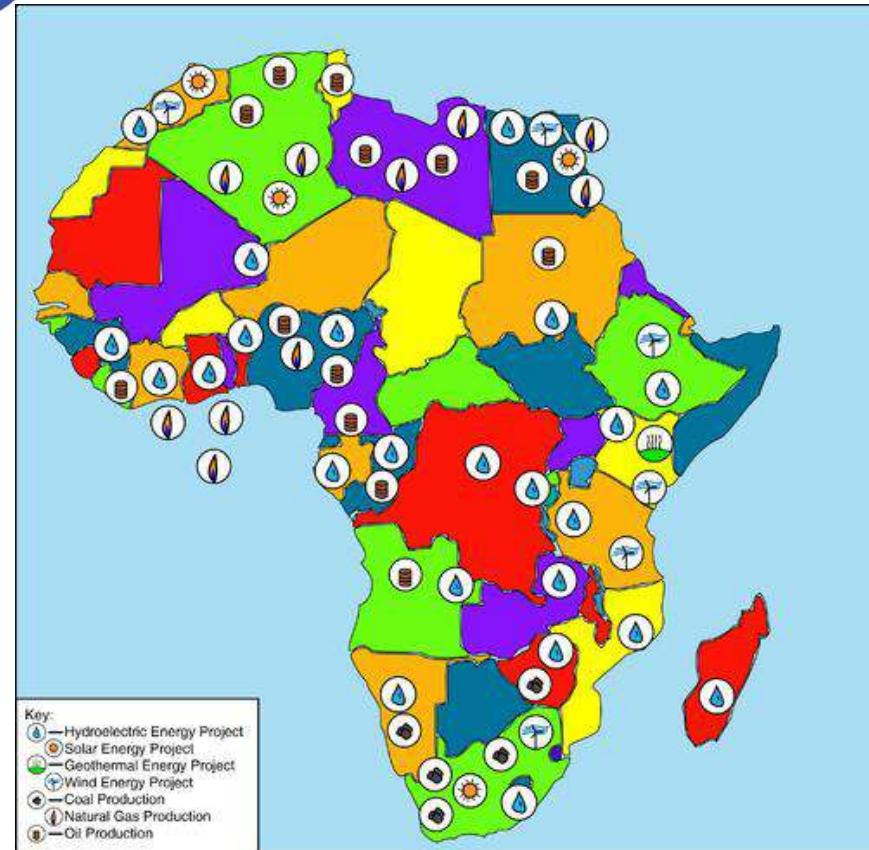
- à l'éducation,
- à la santé,
- à une agriculture performante,
- à l'industrie alimentaire,
- à une chaîne de froid,
- à l'équilibre des territoires, de l'emploi, des services,
- à la valeur ajoutée en Afrique »,

« Le sujet central pour le développement de l'Afrique,
c'est l'énergie »

L'urgence d'agir

*“Si la croissance des pays africains passe de 5 %
à 15 % par an, cela accroîtra la nôtre de 2 %.*

*L'Afrique est, pour l'Europe en particulier,
un relais de croissance formidable.”*



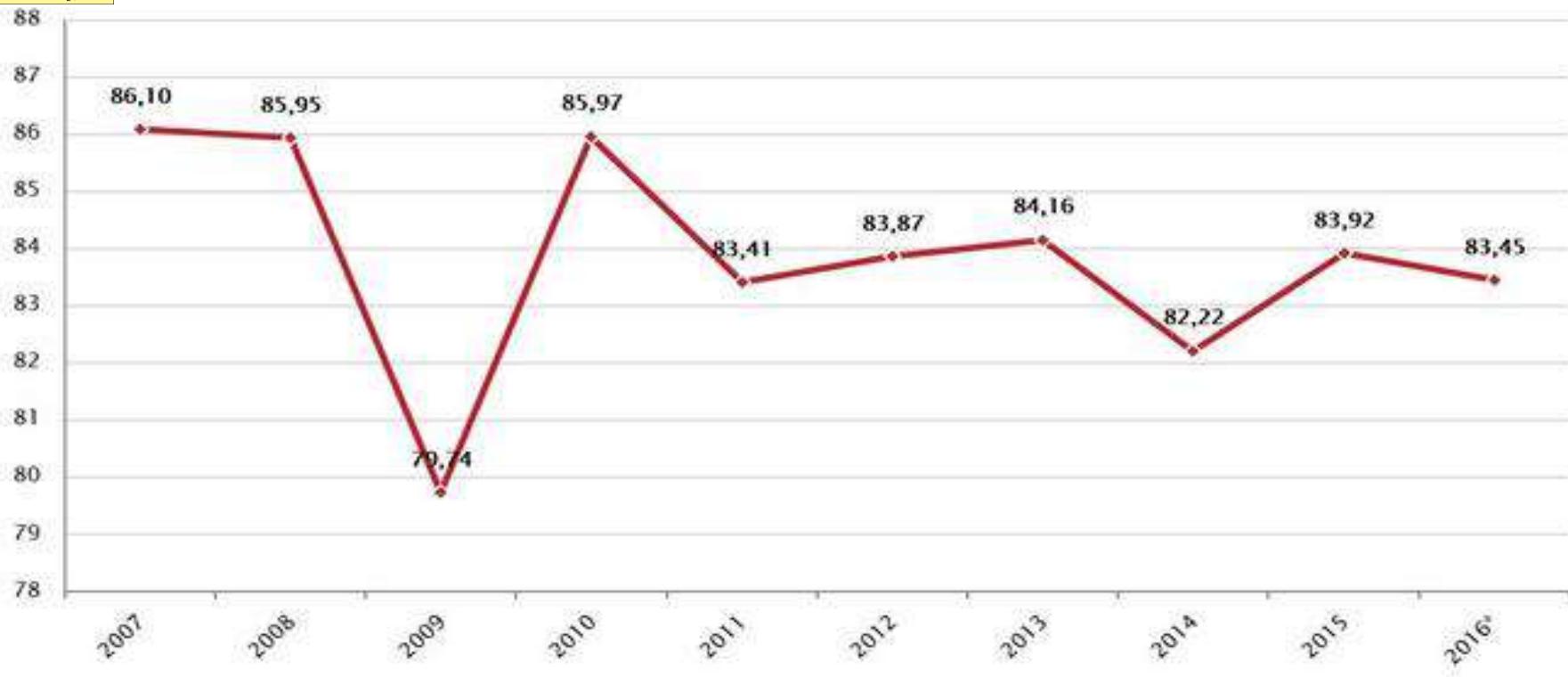
605 terawatt-hours (TWh) in 2012
*electricity demand in Africa, with North Africa
accounting for around 40% of the total*

- https://en.wikipedia.org/wiki/Energy_in_Africa
- https://www.iea.org/publications/freepublications/publication/WEO2014_AfricaEnergyOutlook.pdf

Consommation nette d'électricité en Belgique => environ 100 TWh / an en 2040



Total calculated electricity consumption in Belgium (TWh) 2006–2015



NB: lorsque * est indiqué,
il s'agit de chiffres provisoires

La consommation calculée est définie comme suit: Production nette - consommation d'électricité pour le pompage-turbinage - pertes réseaux + importation - exportation.
La consommation du secteur énergétique (raffinerie etc.) est reprise dans cet indicateur.

Source: « Statistiques électricité - Production, consommation et capacités de production d'électricité en Belgique », 2016
- FEBEG asbl (Fédération Belge des Entreprises Électriques et Gazières)
<https://www.febeg.be/fr/statistiques-electricite>

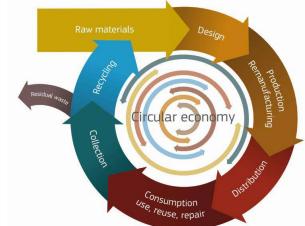
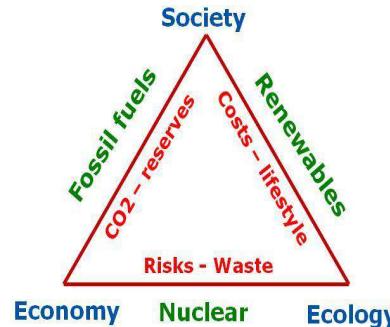
Messages clés à emporter

Nécessité de garder un mix énergétique complet (renouvelables, fossiles, nucléaire)



(1) Problème énergétique à résoudre

**Besoin total d' électricité en Belgique en 2040
= 100 TWh_e (= 100 milliards de kilowattheures_e)**



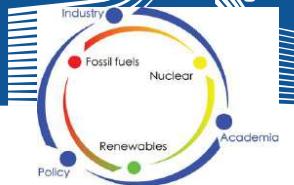
**(3) Invariants : sciences de la nature
(réseau électrique et « empreinte »)
et sciences de l'homme**

Par ex. dans le monde : évolution démographique, changement climatique => électrification massive

(5) « Incertitudes » : défis de type technologique et humain

E.g. 4-rth industrial revolution : towards integrated energy, transport and ICT systems ? + new paradigm “producer < = > consumer” ?

Le mix énergétique idéal ?



(2) « Contraintes » :

transition vers une économie compétitive, sûre et sobre en carbone

⇒ le futur système économique et industriel doit être sobre non seulement en carbone, mais également en ressources énergétiques et naturelles (économie circulaire)

(3) « Invariants » : sciences de la nature et sciences de l'homme

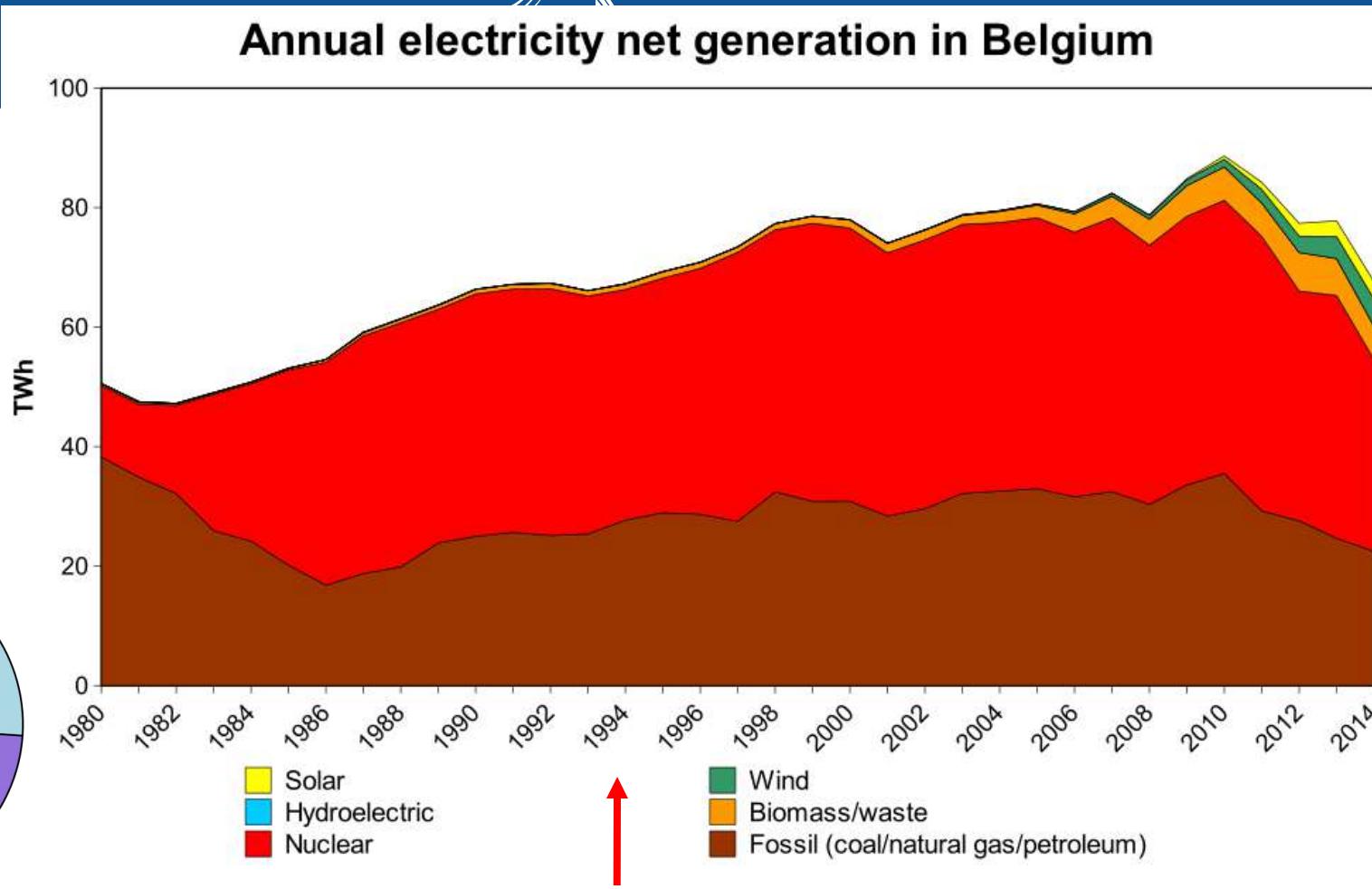
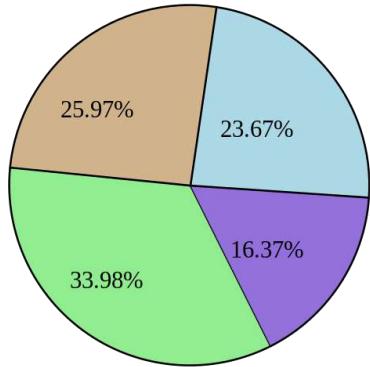
(4) La réalité des faits et des chiffres : deux domaines de « quasi-certitude »

1. L'accroissement de la population mondiale restera massif (+ nouveaux besoins d'énergie)
2. Changement climatique et pollution de l'air en ville: impacts majeurs sur environnement et économie

(5) Les défis de type technologique et humain : trois domaines d'incertitudes

1. La « grande transition » : 4-rth industrial revolution, i.e. : towards integrated energy, transport and ICT (information and communications technology) systems ?
2. Le stockage de l'énergie électrique, le chaînon manquant de la transition énergétique ?
3. Le comportement humain (nouvelle gouvernance de l'énergie - initiatives d'énergie citoyenne ?)

Annual electricity net generation in Belgium 1980 - 2014



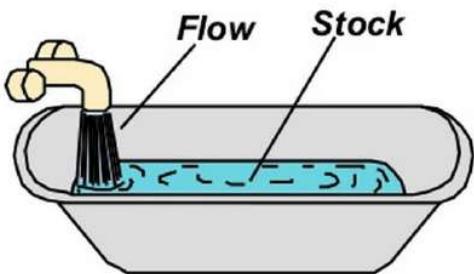
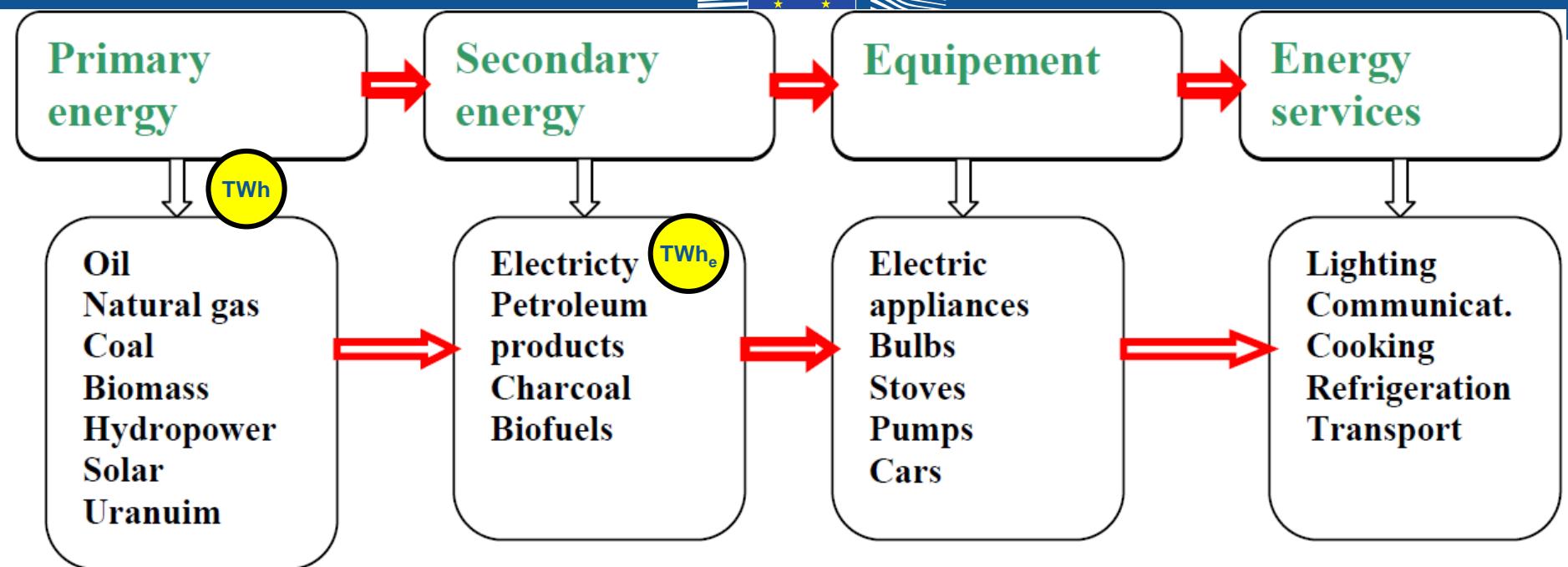
Energy in Belgium (1980 - 2014) – report November 2017

https://en.wikipedia.org/wiki/Energy_in_Belgium

Final energy consumption by sector (2010)

In 2010 the largest share (34%) of final energy was for domestic use (this includes: households, service sector, commerce, and agriculture). Transport and industrial sector both consumed about a quarter. Fossil fuels are also used as raw material in several manufacturing processes, this non-energetic use accounts for the remainder of the final energy. Most recent data (2015) : http://economie.fgov.be/en/binaries/Key_data_2015_energy_tcm327-282790.pdf

The energy value chain from energy sources to energy services – a “natural monopoly” ?

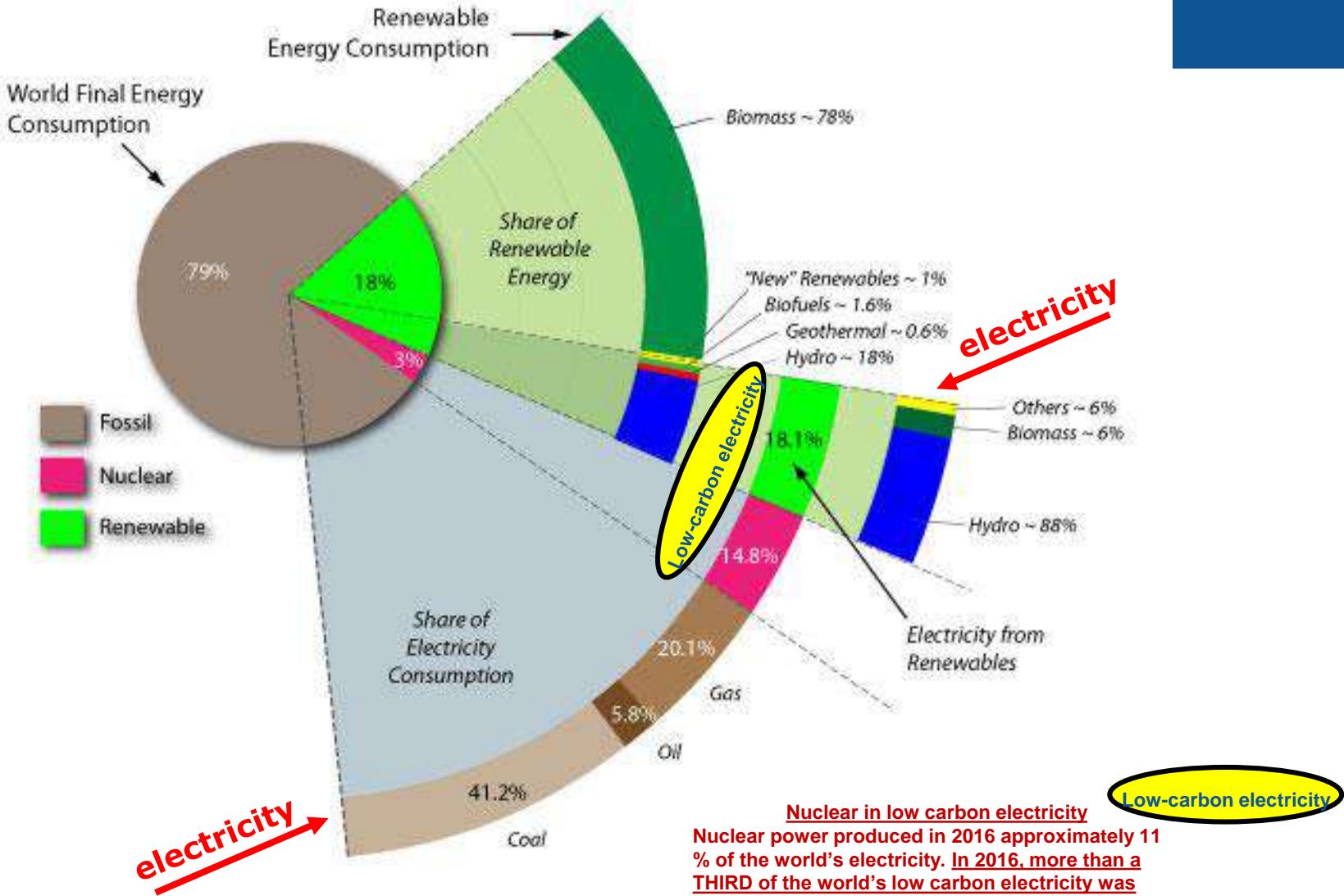


A natural monopoly occurs when the most efficient number of firms in the industry is one. A natural monopoly will typically have very high fixed costs meaning that it is impractical to have more than one firm producing the good.

An example of a natural monopoly is tap water. It makes sense to have just one company providing a network of water pipes and sewage systems because there are very high capital costs involved in setting up a national network of pipes and sewage systems.

Other examples of natural monopolies : gas network ; electricity grid ; railway infrastructure - <https://www.economicshelp.org/blog/glossary/natural-monopoly/>

About 20 % of the world's energy is consumed in the form of electricity



Structure of Global Energy (2007) : "About 20 % of the world's energy is consumed in the form of electricity"

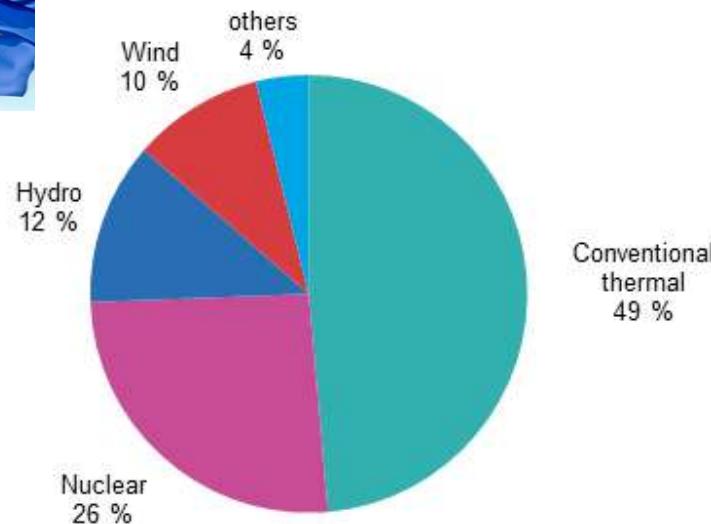
NB: electricity more than doubling its share in final energy demand by 2050 (large-scale electrification of the economy)

Source :

Eurostat - Renewable energy statistics - http://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php/Renewable_energy_statistics

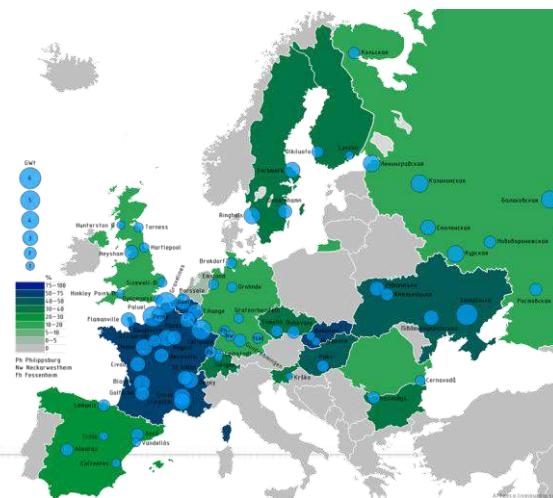
Worldwide statistics - http://www.greenrhinoenergy.com/renewable/context/uses_and_sources.php

Electricity generation in nuclear power plants in the EU-28 (2016)



EU-28 Electricity production by source, 2016 (in %)

[http://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php/File:EU-28_Electricity_production_by_source,_2016_\(in_%25\)-F2.png](http://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php/File:EU-28_Electricity_production_by_source,_2016_(in_%25)-F2.png)



NPPs in Europe (February 2017 -
https://www.redd.it/com/r/MapPower/plants_in_europe_1400x1250/

Gross electricity generation in nuclear power plants in the EU, GWh (history 1990 - 2016)

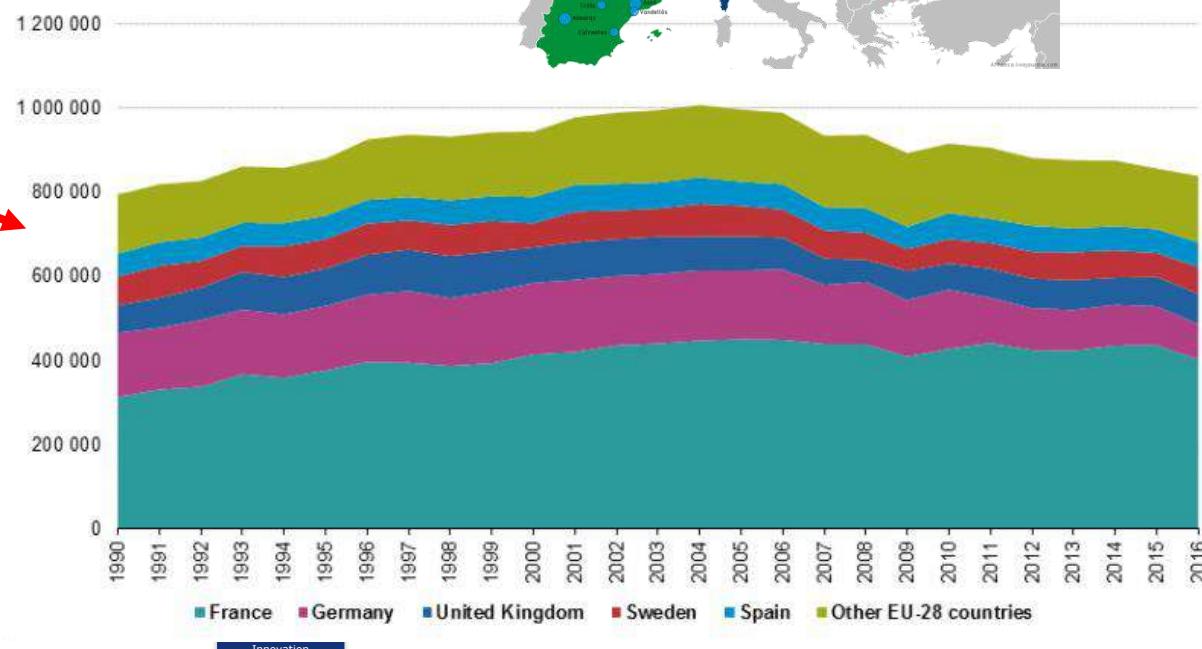
EU nuclear generation capacity in 2016.

The 128 nuclear power reactors (119 GWe) operating in 14 of the 28 EU member states account for over one-quarter of the electricity generated in the whole of the EU.

The largest producer of nuclear power within the EU-28 in 2016 was, by far, France, with a 48 % share of the EU total, followed by Germany (10 %), the United Kingdom (8.5 %), Sweden (7.5 %) and Spain (7 %). These five Member States account for more than 81 % of the total amount of electricity generated in nuclear facilities in the EU-28.

(“Nuclear energy statistics”, Eurostat, February 2018)

<http://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php/File:Figure1-Grosselectricityproductionnuclear-2016.png>

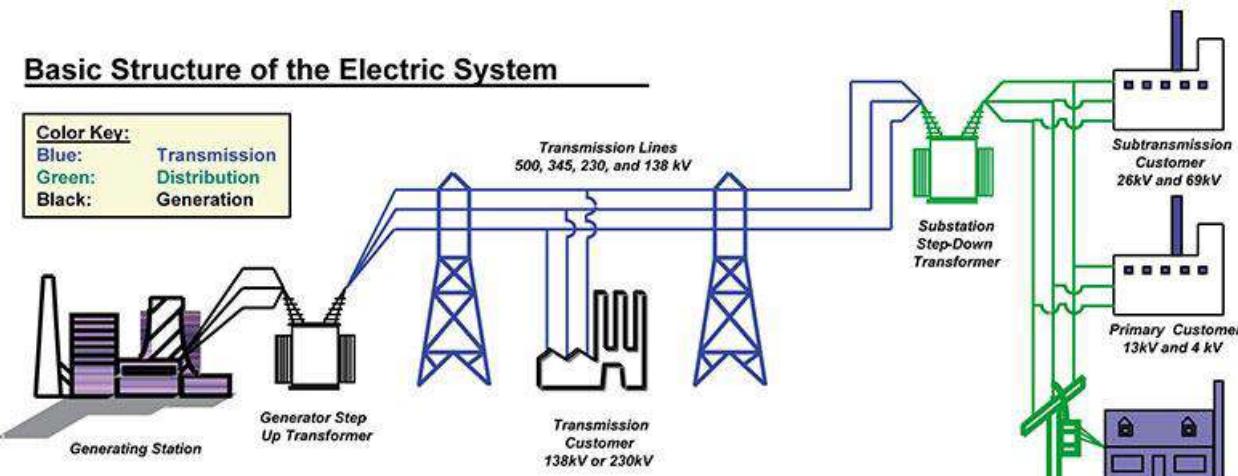


Traditional power grid and future smart grid: paradigm change - from linear to more complex power generation

Today

Traditional centralized model of linear power generation and delivery through limited market or monopoly conditions

Basic Structure of the Electric System

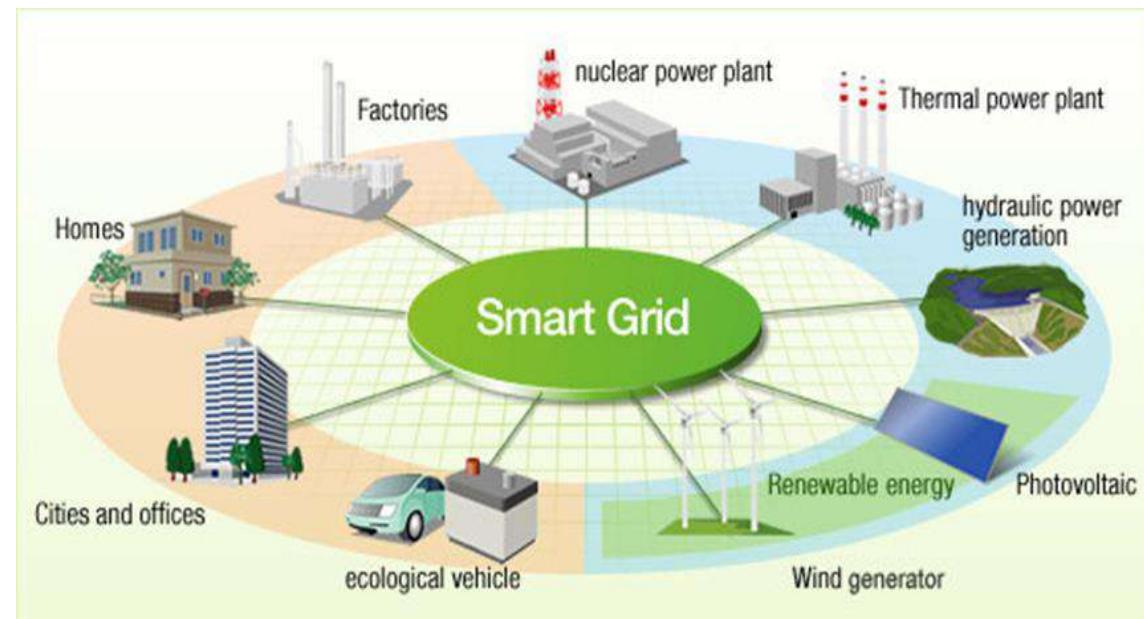


Linear :
from "generation"
=> "transmission"
=> "distribution"

Tomorrow ?

A more diverse, dynamic and complex system with multiple actors and multilayered energy, information and money flows ?

Complex system with paradigm change :
from "supply follows load"
to "load follows supply"
(users become "prosumers"
= PROducer - CONSUMER)





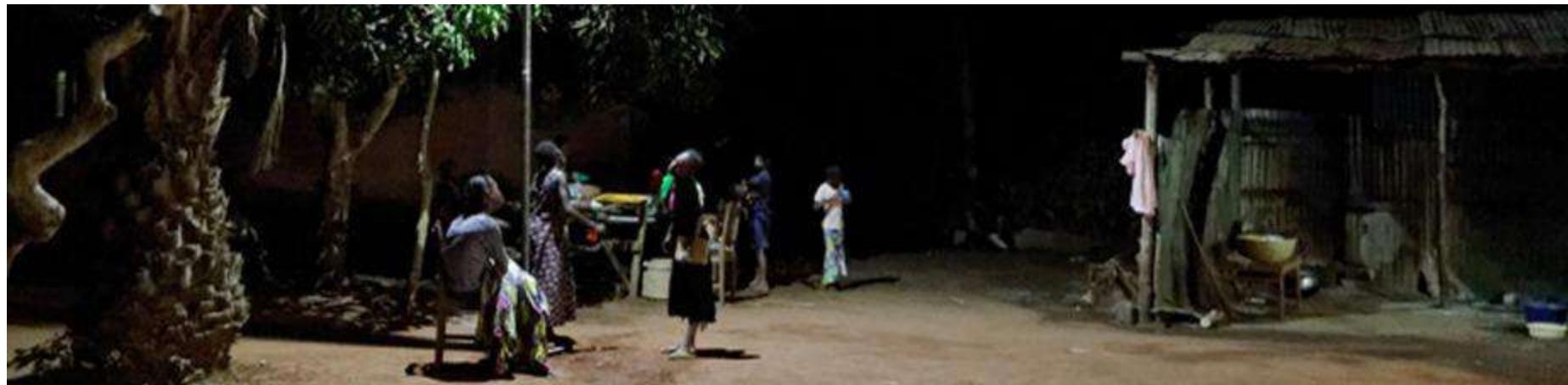
?

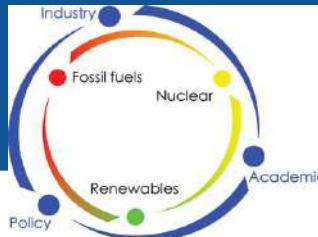
« Si les besoins en investissements dans toutes les énergies et dans les réseaux concernent tous les pays, il est remarquable que deux tiers d'entre eux auront lieu hors OCDE »

Pierre Gadonneix, président du Conseil Mondial de l'Energie, Académie des Sciences Morales et Politiques, Paris, 23 janvier 2012

https://www.asmp.fr/travaux/communications/2012_01_23_gadonneix.htm

?





« Vers une économie décarbonée »

1 – Brève histoire : du feu primitif à l'électricité

2 – Le cap : UN-Agenda 2030 et «triangle énergétique européen»

3 – Invariants (sciences de la nature) et contraintes (EU Triangle)

4 - Faits et chiffres : démographie, climat, politiques énergétiques

5 - Défis technologiques et humains (incertitudes) : stockage, etc

6 – Conclusion : recherche, innovation et formation

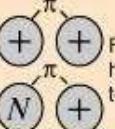
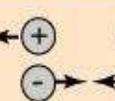
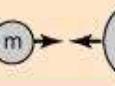
* Responsibility for the information and views set out in this Collège Belgique course lies entirely with the author *

* Reproduction of the texts of this course is authorised provided the source is acknowledged *

Histoire de l'homme <=> évolution des sources d'énergie libre utilisées

L'histoire de l'homme a été substantiellement marquée par l'évolution des sources d'énergie libre qu'il a su ou pu utiliser.

NB: Le travail de l'homme consiste à capter l'énergie (libre ! seule l'énergie libre est utilisable – seconde loi de la thermodynamique). Que faites-vous avec un baril de pétrole brut ? Rien. L'énergie libre d'un système représente le travail maximal que ce système peut fournir à l'extérieur, lors de transformations isothermes.

Fundamental Forces				
Strong	 Force which holds nucleus together.	Strength 1	Range (m) 10^{-15} (diameter of a medium sized nucleus)	Particle gluons, π (nucleons)
Electro-magnetic		Strength $\frac{1}{137}$	Range (m) Infinite	Particle photon mass = 0 spin = 1
Weak	 neutrino interaction induces beta decay	Strength 10^{-6}	Range (m) 10^{-18} (0.1% of the diameter of a proton)	Particle Intermediate vector bosons W^+ , W^- , Z_0 , mass > 80 GeV spin = 1
Gravity		Strength 6×10^{-39}	Range (m) Infinite	Particle graviton ? mass = 0 spin = 2

Jusqu'à il y a environ 500 000 ans, la seule énergie libre à la disposition de l'homme était sa propre énergie.

En maîtrisant le feu pour chauffer, cuire, éclairer ou travailler les métaux, il a franchi la première marche de son apprentissage énergétique.

Sont venues ensuite l'utilisation de l'énergie animale domestiquée, hydraulique, éolienne, thermique à cycles, chimique, électrique, nucléaire, solaire, etc.

Chacune de ces étapes a été l'occasion d'une évolution le plus souvent majeure des structures des sociétés humaines.



Early ability of primitive human beings to create fire

- Terra Amata near Nice (France) : 380 000 years ago
- Zhoukoudian near Beijing (China) : 550 000 years ago

Heat from fire: first energy source used by humans



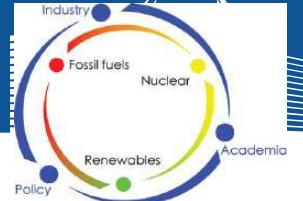
"Tackle the biggest questions of history and of the modern world"
JARED DIAMOND

Yuval Noah
Harari

Sapiens
A Brief
History of
Humankind

"A spectacular integration of history,
paleontology, anthropology and
sociology" (494 pages, 2012)

Evolution énergétique (1/6) : muscle animal et esclavage



Dans l'Antiquité, muscle animal et esclavage => énergie mécanique



Evolution énergétique (2/6) : moulins à eau et à vent (interaction fondamentale : gravitationnelle)

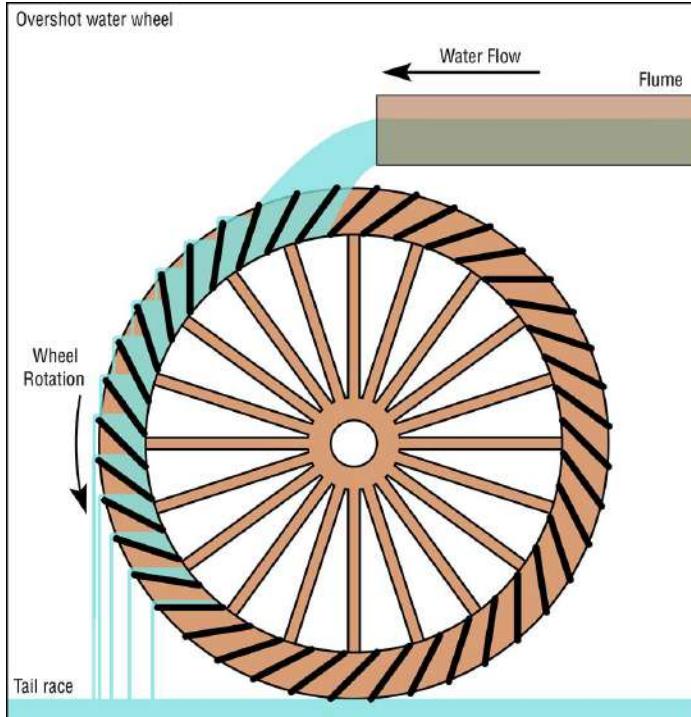


Moulins pour énergie mécanique:

substitution partielle à la force humaine et animale, rare, coûteuse et peu efficace

NB : * water-lifting wheels had appeared in ancient Egypt by the 4th century BC

* the first practical windmills were in use in Iran at least by the 9th century AD



Interaction (fondamentale) gravitationnelle ou autres forces mécaniques : quelques dizaines de tonnes de matière
(par ex. 10 tonnes d'eau à une hauteur de 40 mètres => 1 kWh d'énergie électrique dans une usine hydroélectrique)

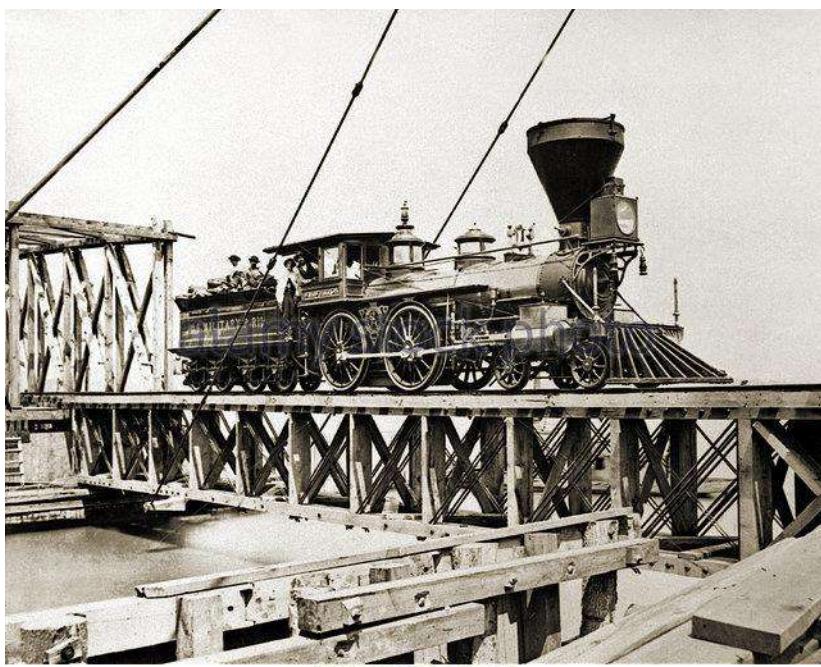
NB: The gravitational force, described systematically by Isaac Newton in the 17th century, acts between all objects having mass.

Evolution énergétique (3/6) : énergie chimique (machine à vapeur dès le XVIII^e siècle) (interaction fondamentale électromagnétique)



Faire du mouvement avec de la chaleur

La machine à vapeur brûlant, d'abord du bois (et des forêts entières) et ensuite du charbon, a permis de transformer l'énergie thermique en énergie mécanique, surtout à partir du XVIII^e siècle.



www.alamy.com - FE17BP

Faire de l'électricité avec de la chaleur

BROWETT, LINDLEY & CO. (1899), LTD.
PATRICKROFT,
MANCHESTER.

High Speed
Self-Lubricating
Double Acting
STEAM .
ENGINES
for Electric
Lighting &
Traction .
From 50 to
2.000 h.p. .

From photograph of two 400 h.p. Engines built for the British Electric Traction Co. in 1900.
The order for two 750 h.p. Engines just received for extensions of this station.

Interaction (fondamentale) électromagnétique : quelques kilogrammes de matière
(par ex. combustion de 0.1 kg de carburant => 1 kWh de chaleur / semblable pour énergie biologique ou calorifique)

NB : The electromagnetic force, given scientific definition by James Clerk Maxwell in the 19th century, is responsible for the repulsion of like and the attraction of unlike electric charges; it also explains the chemical behaviour of matter and the properties of light.

Evolution énergétique (4/6) : « LA FÉE ÉLECTRICITÉ » au XXe siècle (Dufy, Paris, 1937)



Les grandes dates de l'électricité 1600 – 2030 (EDF)
<https://www.edf.fr/groupe-edf/espaces-dedies/l-energie-de-a-a-z/les-grandes-dates-de-l-electricite>



1937 Paris - LA FRESCHE « LA FÉE ÉLECTRICITÉ »

« Mettre en valeur le rôle de l'électricité dans la vie nationale et dégager notamment le rôle social de premier plan joué par la lumière électrique »

D'une surface de 625 m² ce tableau, parmi les plus grands du monde, est aujourd'hui exposé au Musée d'Art moderne de la Ville de Paris.

* Electricité = Lampe à filament (Thomas Edison).

* Electricité utilisé pour l'éclairage, transport et usage domestique.

* Dynamo Zenobe Gramme (1826 – 1901) => moteur électrique.

* Barrage hydro électrique.

* Siemens et AEG => les tramways électrique.

* Londres => Metro.

* Electrométallurgie et électrochimie. (Électricité remplace charbon).

Evolution énergétique (5/6) : pétrole et gaz (XXe siècle)

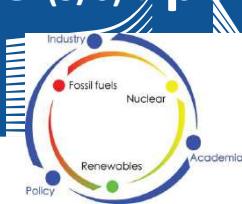


Figure 1. Real oil price movements since 1970 mapped to global events



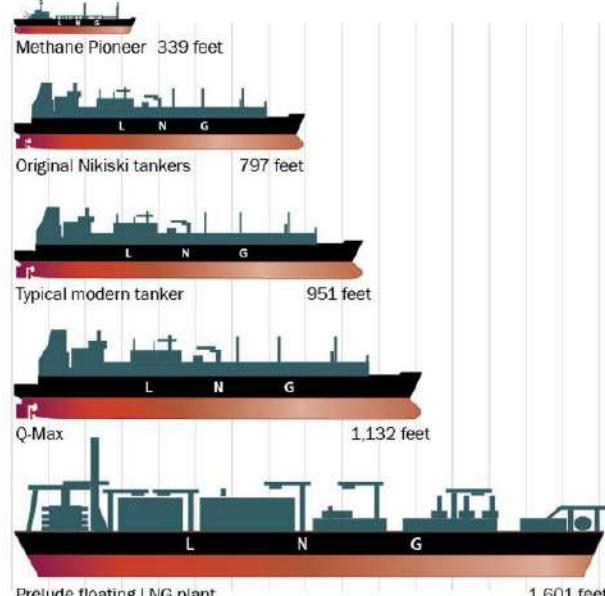
Note: Monthly average imported crude oil price, nominal deflated by the US consumer price index. The grey bars refer to the economic recessions in the United States.

Source: Energy Information Administration, June 2016.

Graphic: Deloitte University Press | DUPress.com

Wide fluctuations in oil prices have played an important role in driving economies into recession and even regimes collapsing—which is why movements in oil prices are closely watched by economists, investors, and policymakers globally.

LNG tankers grow in size

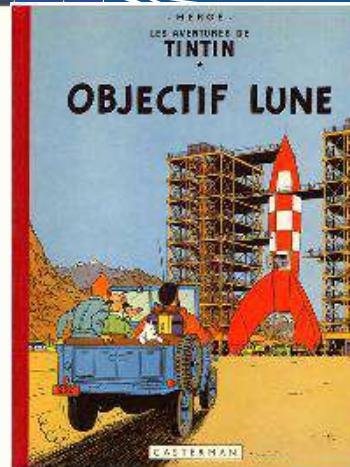
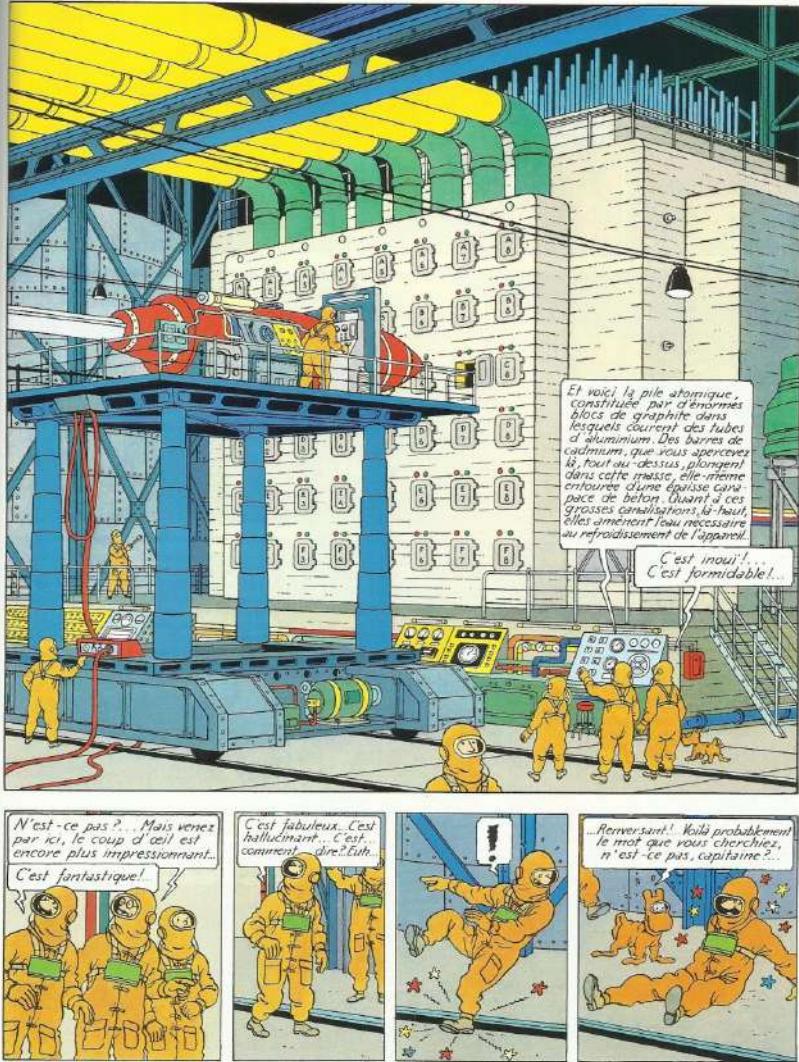


Oil Prices Relate to Many Uncertain Factors



Source: EIA.

Evolution énergétique (6/6) : fission nucléaire (XXe siècle) (interaction fondamentale : nucléaire forte)



"Objectif Lune",
Hergé, 1953

Interaction (fondamentale)
nucléaire forte
⇒ 1 kWh de chaleur

- Réaction de fission : 10 mg Uranium naturel (il contient 0,71 % U-235)
- Réaction de fusion (par ex. D-T dans un tokamak) : 1 mg de combustible



NB : The strong and weak nuclear forces were discovered by physicists in the 20th century when they finally probed into the core of the atom. In 1933, Enrico Fermi proposed the first theory of the weak interaction, known as Fermi's interaction (responsible for the radioactive decay, specifically the beta decay neutrino interaction). In the 1970's, a strong attractive force was postulated to explain how the atomic nucleus was bound despite the protons' mutual electromagnetic repulsion. This hypothesized force was called the strong nuclear force.

Le premier congrès Solvay, 1911, « The theory of radiation and the quanta » (Planck's discovery of energy quanta seemed to fundamentally overshadow classical physics)



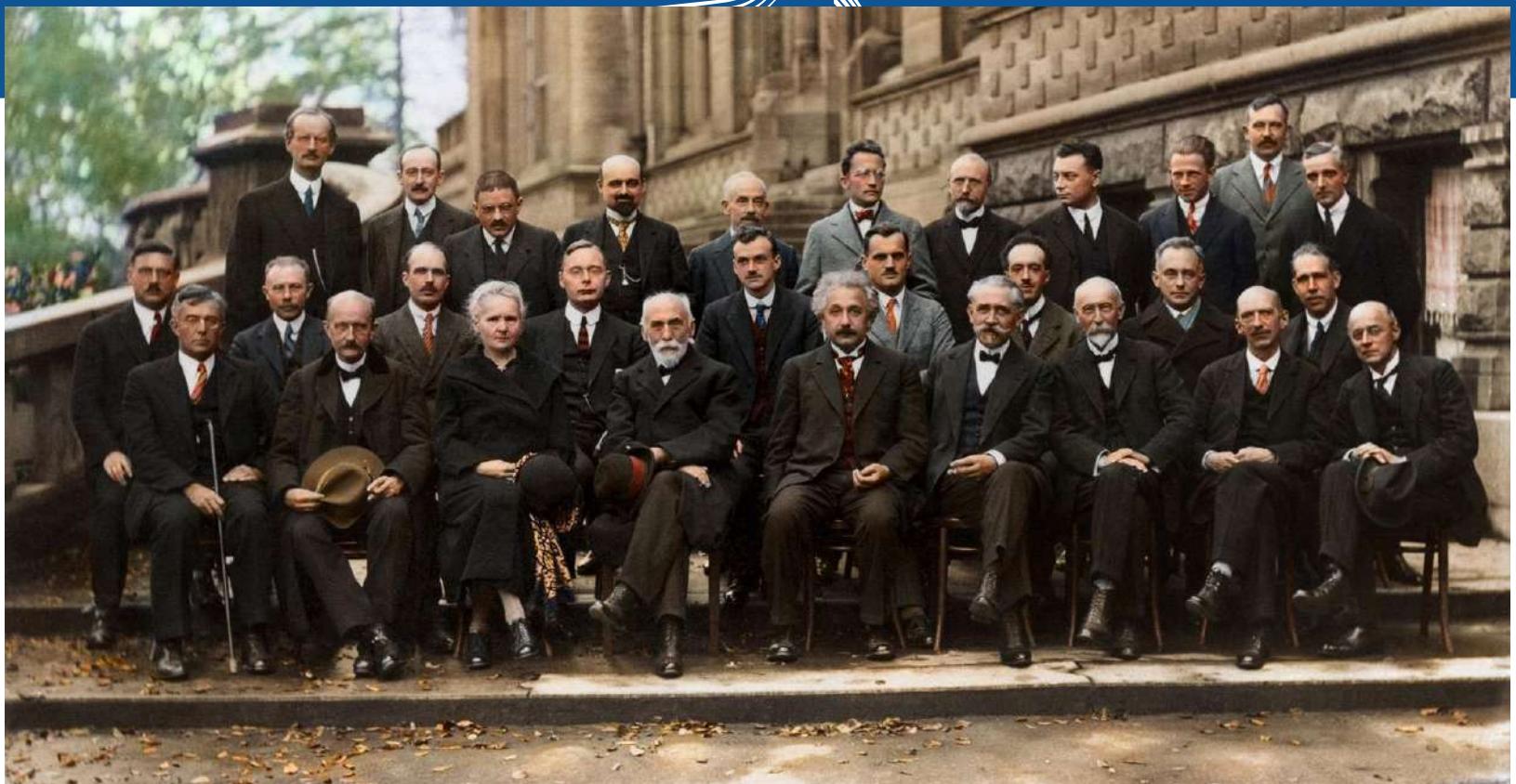
Grand Hôtel Métropole, Bruxelles - October 1911 (chaired by 1902 Nobel Laureate Hendrik A. Lorentz)

Assis : Walther Nernst, Marcel Brillouin, Ernest Solvay, Hendrik Lorentz, Emil Warburg, Jean Baptiste Perrin, Wilhelm Wien, Marie Curie et Henri Poincaré.

Debout : Robert Goldschmidt, Max Planck, Heinrich Rubens, Arnold Sommerfeld, Frederick Lindemann, Maurice de Broglie, Martin Knudsen, Friedrich Hasenöhrl, Georges Hostelet, Édouard Herzen, James Jeans, Ernest Rutherford, Heike Kamerlingh Onnes, Albert Einstein, et Paul Langevin.

("On the first Solvay Congress in 1911", Norbert Straumann – Zürich, 2011 - <https://arxiv.org/pdf/1109.3785.pdf>)

The Fifth Solvay Conference, 1927, probably the most intelligent picture ever taken (Leopold park, Bruxelles - October 1927 - "Electrons and Photons")



SOLVAY CONFERENCE 1927

colourized by pastincolour.com

A. PICARD	E. HENRIOT	P. EHRENFEST	Ed. HERSEN	Th. DE DONDER	E. SCHRÖDINGER	E. VERSCHAFFELT	W. PAULI	W. HEISENBERG	R.H FOWLER	L. BRILLOUIN
P. DEBYE	M. KNUDSEN	W.L. BRAGG	H.A. KRAMERS	P.A.M. DIRAC	A.H. COMPTON	L. de BROGLIE	M. BORN	N. BOHR		
I. LANGMUIR	M. PLANCK	Mme CURIE	H.A. LORENTZ	A. EINSTEIN	P. LANGEVIN	Ch.E. GUYE	C.T.R. WILSON	O.W. RICHARDSON		

Absents : Sir W.H. BRAGG, H. DESLANDRES et E. VAN AUBEL

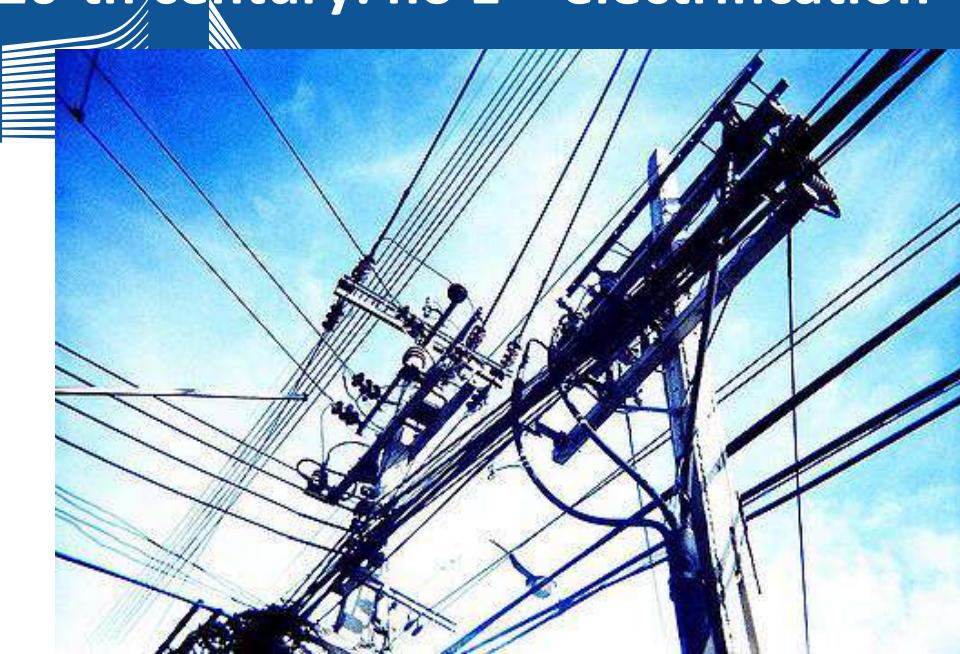
The Solvay Conference, founded by the Belgian industrialist Ernest Solvay in 1911, was considered a turning point in the world of physics. Located in Brussels, the conferences were devoted to outstanding preeminent open problems in both physics and chemistry. The most famous conference was the October 1927 Fifth Solvay International Conference on Electrons and Photons, where the world's most notable physicists met to discuss the newly formulated quantum theory. The leading figures were Albert Einstein and Niels Bohr. Also present : Curie, Lorentz, Planck, Schrödinger, Pauli, Heisenberg, Piccard, Dirac, Born, de Broglie.

Einstein, disenchanted with Heisenberg's uncertainty principle, remarked "God does not play dice". Bohr replied, "Einstein, stop telling God what to do". 17 of the 29 attendees were or became Nobel Prize winners, including Marie Curie, who alone among them, had won Nobel Prizes in two separate scientific disciplines. (<http://physicsdatabase.com/2012/11/17/the-most-iconic-science-photos-of-all-time/>) (<https://www.youtube.com/watch?v=8GZdZUouzBY>)

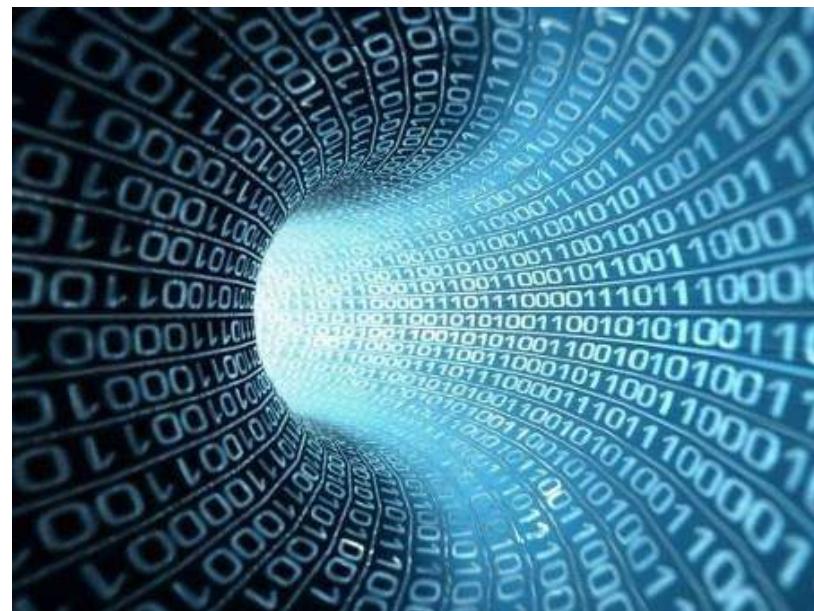
Technical miracles of the 20-th century: no 1 = electrification

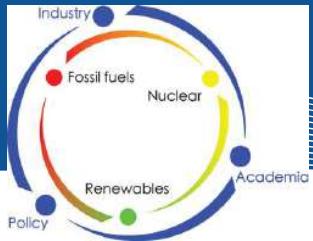
Technical miracles of the 20-th century

- 1. Electrification**
- 2. Automobile**
- 3. Airplane**
- 4. Safe and Abundant Water**
- 5. Electronics**
- 6. Radio and Television**
- 7. Agricultural Mechanization**
- 8. Computers**
- 9. Telephone**
- 10. Air Conditioning and Refrigeration**
- 11. Interstate Highways**
- 12. Space Exploration**
- 13. Internet**
- 14. Imaging Technologies**
- 15. Household Appliances**
- 16. Health Technologies**
- 17. Petroleum and Gas Technologies**
- 18. Laser and Fiber Optics**
- 19. Nuclear Technologies**
- 20. High Performance Materials**



21-th century: Technical miracle no 1 = digitalization ?





« Vers une économie décarbonée »

1 – Brève histoire : du feu primitif à l'électricité

2 – Le cap : UN-Agenda 2030

et «triangle énergétique européen»

3 – Invariants (sciences de la nature) et contraintes (EU Triangle)

4 - Faits et chiffres : démographie, climat, politiques énergétiques

5 - Défis technologiques et humains (incertitudes) : stockage, etc

6 – Conclusion : recherche, innovation et formation

* Responsibility for the information and views set out in this Collège Belgique course lies entirely with the author *

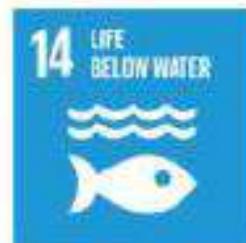
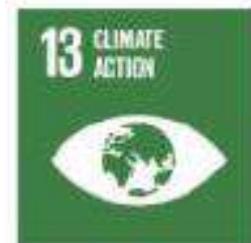
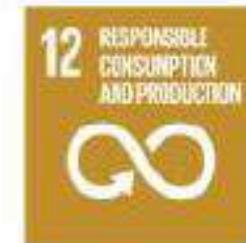
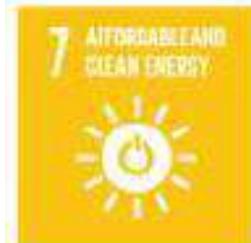
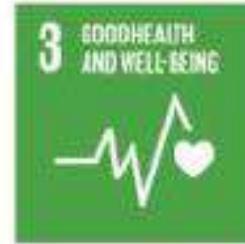
* Reproduction of the texts of this course is authorised provided the source is acknowledged *

UN Agenda-2030 : 17 “Sustainable Development Goals” (Sept 2015)



SUSTAINABLE DEVELOPMENT GOALS

17 GOALS TO TRANSFORM OUR WORLD



« Small Smurfs – Big Goals » (UN campaign for SDGs, Febr 2017)



Clean Energy



Technology and Innovation

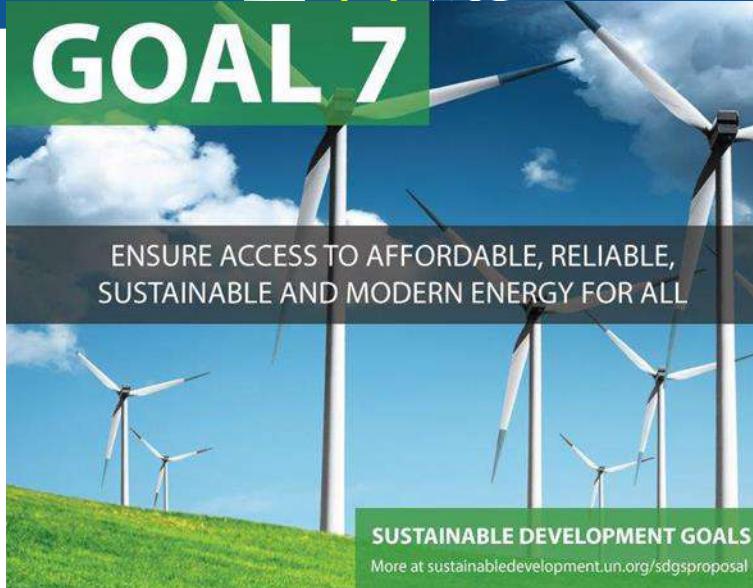


Great schools

Source: campaign launched by the United Nations and UNICEF, New York, NY, 15 February 2017

- "Smurfs team up with United Nations in 2017 for a happier, more peaceful and equitable world" (NB: SDGs = Sustainable Development Goals)
- <http://www.smallsmurfsbiggoals.com/> and "Smurfs for the SDGs!", 20 February 2017 - <https://www.youtube.com/watch?v=V-qw-kTrA>

Goal 7 of UN Agenda-2030 : ensure access to affordable, reliable, sustainable and modern energy for all



Energy is central to nearly every major challenge and opportunity the world faces today. Be it for jobs, security, climate change, food production or increasing incomes, access to energy for all is essential.

Facts and figures

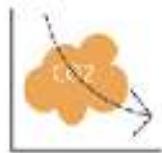
- One in five people still lacks access to modern electricity
- 3 billion people rely on wood, coal, charcoal or animal waste for cooking and heating
- Energy is the dominant contributor to climate change, accounting for around 60 per cent of total global greenhouse gas emissions
- Reducing the carbon intensity of energy is a key objective in long-term climate goals.

THE KEY ELEMENTS OF THE PARIS AGREEMENT

A text with universal scope, adopted by 195 countries



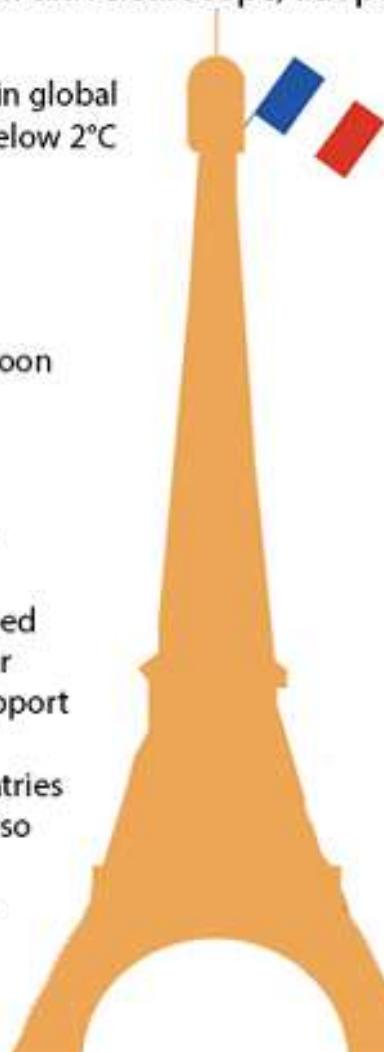
The aim: to keep the increase in global average temperature to well below 2°C and to 1.5°C if possible.



The objective: to level off greenhouse gas emissions as soon as possible.



The principal: to differentiate between developed and developing countries. Developed countries must lead the way for reduction of emissions and support developing countries in implementing this. Other countries with the ability to do so may also contribute their support on a voluntary basis to achieve this target.



The means: Countries must submit Intended Nationally Determined Contributions (INDCs) which are revised upwards every 5 years. The 1st report is due in 2023. North-South technology transfer.



The financing: from 2020, rich countries must contribute at least \$100 billion per year. This amount will be reviewed in 2025.



The new mechanism: loss and damage. Measures must be taken to avert, minimize and address the concrete effects of climate change, in order to help the most vulnerable countries.



Entry into force: 2020 if the Agreement is ratified by 55 countries accounting for 55% of global greenhouse gas emissions.

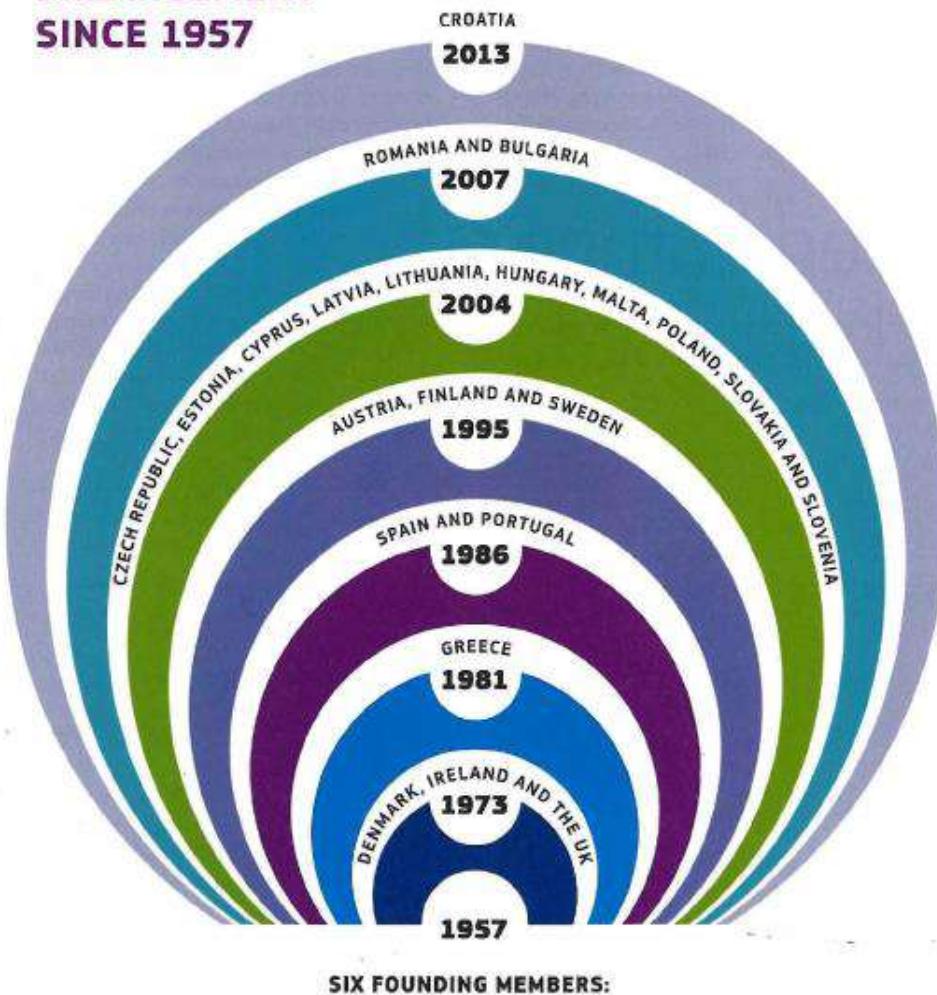


As of October 2016, 191 UNFCCC members signed the treaty, 76 of which ratified it.

On 5 October 2016, the threshold for entry into force of the Paris Agreement was achieved. The Paris Agreement entered into force on 4 November 2016. As of February 2018, 175 Parties have ratified - http://unfccc.int/paris_agreement/items/9444.php



EU
ENLARGEMENT
SINCE 1957



60
ROME



Energy has been at the heart of the European project from the start (ECSC 1952 and Euratom 1957)

- (1) "European Coal and Steel Community" (ECSC),
18 July 1952, Luxembourg
- (2) The two Treaties of Rome:
EEC ("Common Market Agreement")
and "European Atomic Energy Community" (EAEC or Euratom),
25 March 1957

Jean Monnet making the opening speech of the ECSC (European Coal and Steel Community), July 18, 1952, Luxembourg



During the first meeting of the member countries (i.e. *Belgium, France, West Germany, Italy, the Netherlands and Luxembourg*) of the “European Coal and Steel Community”,

Jean Monnet, who had been named president of the High Authority of this economic pool, gives the opening speech.

The ECSC began functioning on July 18, 1952, in Luxembourg.

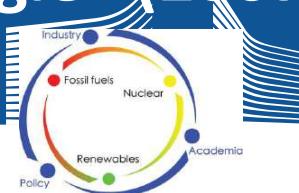
In 2002 the related Treaty expired and all the ECSC activities and resources were absorbed by the European Community.



The signing of the Treaties of Rome: EEC and Euratom (Capitole, 25th March 1957)

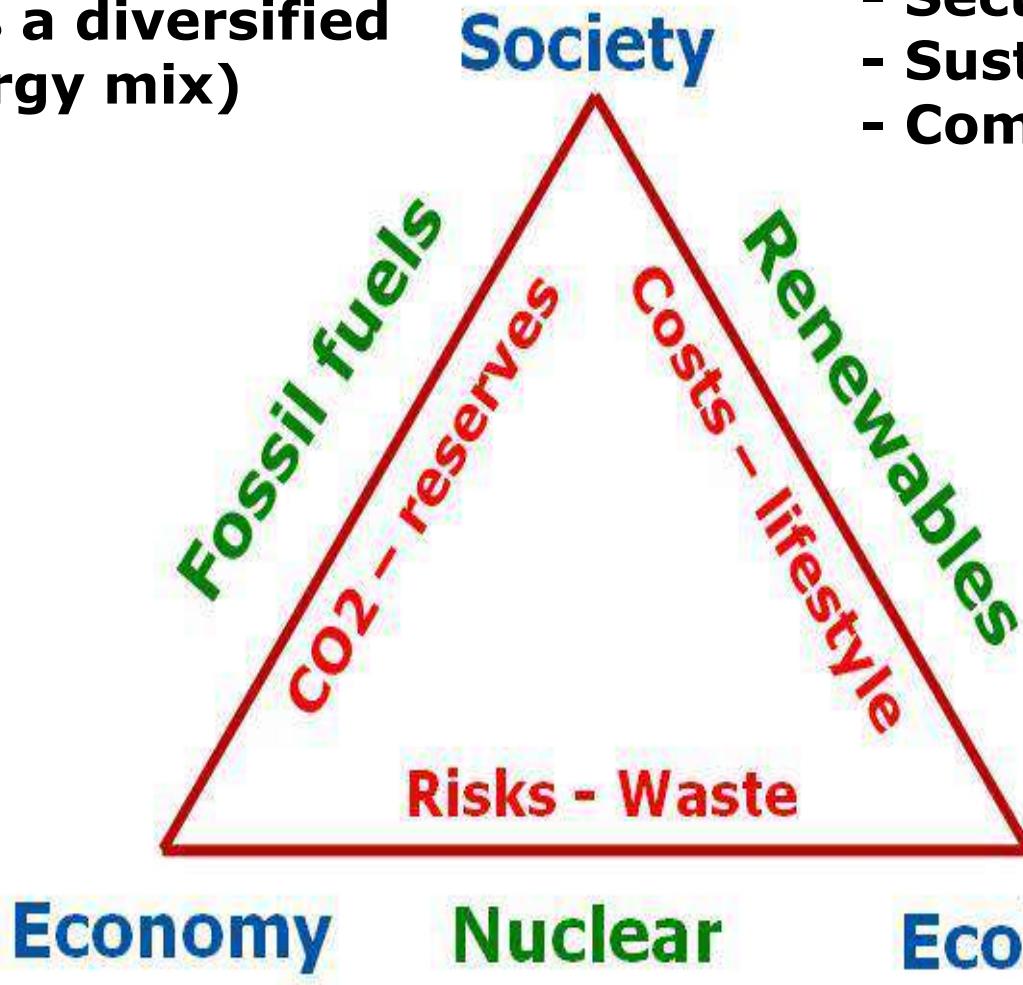


“EU Energy Triangle” (2007 Spring Council)



Triangle of sustainable energy

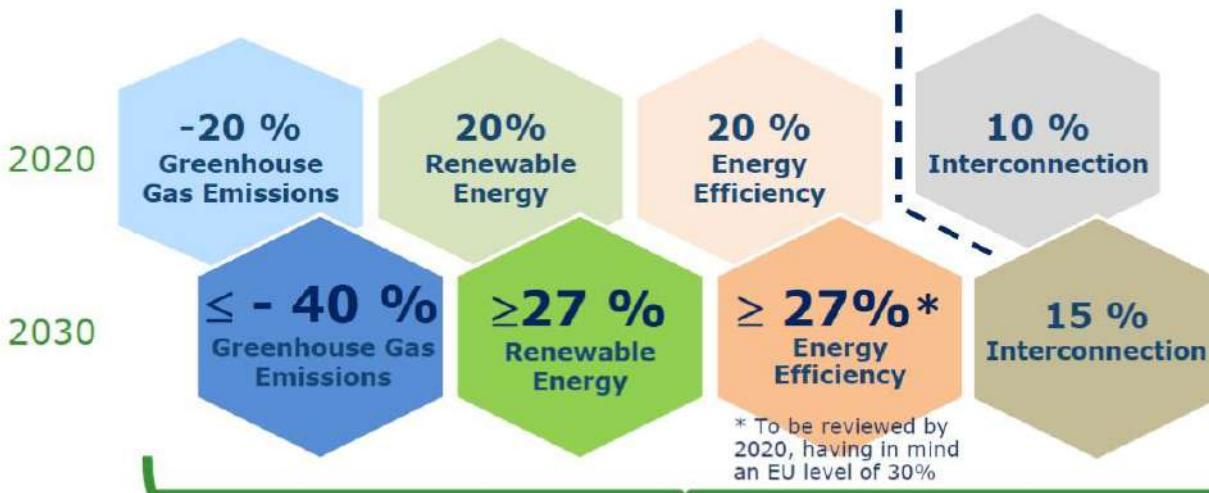
(towards a diversified energy mix)



- Security of supply
- Sustainability
- Competitiveness

Cadre UE pour le climat et l'énergie à l'horizon 2030

Agreed headline targets 2030 Framework for Climate and Energy



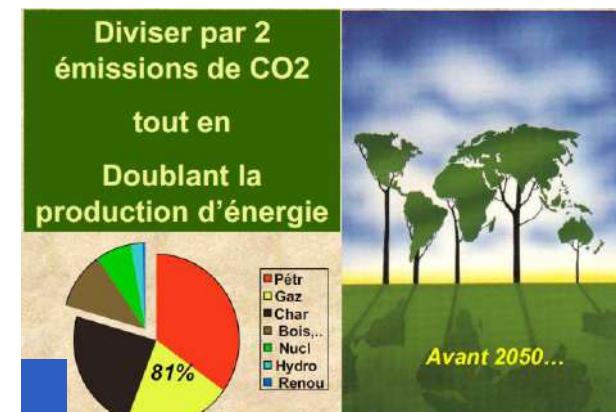
Paquet énergie et climat UE 2030

« 20-20-20 » deviennent « 40-27-27-10 »

NB Les quatre objectifs « 40-27-27-10 » sont Européens (çàd : non traduits à l'échelle des pays membres).

Les deux premiers objectifs sont contraignants, çàd : dès ratification, ils seront transposés en législation nationale par les signataires.

Le défi 2050 posé par la menace climatique : “facteur 4”



Le cadre 2030 pour le climat et l'énergie à l'horizon fixe trois grands objectifs pour 2030:

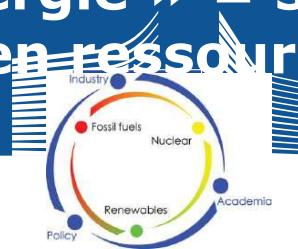
- réduire les émissions de gaz à effet de serre (GES) d'au moins 40 % (p.r. à 1990)
- porter la part des énergies renouvelables (REN) à au moins 27 % dans l'énergie finale consommée au sein de l'UE
- améliorer l'efficacité énergétique d'au moins 27 %
- + atteindre un minimum de 10 % de capacité d'interconnexion par Etat membre
(après évaluation, cet objectif pourrait passer à 15% pour 2030).

Le cadre 2030 a été adopté par le Conseil de l'UE en octobre 2014 pour la COP-21. Il s'inscrit dans le prolongement du paquet sur le climat et l'énergie à l'horizon 2020. Il est également conforme à la perspective à long terme définie dans la feuille de route vers une économie compétitive à faible intensité de carbone à l'horizon 2050, la feuille de route pour l'énergie à l'horizon 2050 et le livre blanc sur les transports.

NB : le cadre 2020 avait été adopté par l'UE en décembre 2018 pour la COP-15.

https://ec.europa.eu/clima/policies/strategies/2030_fr

UE : « union de l'énergie » = sobriété en carbone, en énergie et en ressources naturelles



Le système économique et industriel doit être d'une part sobre en carbone et en énergie et d'autre part sobre en ressources naturelles (économie circulaire)

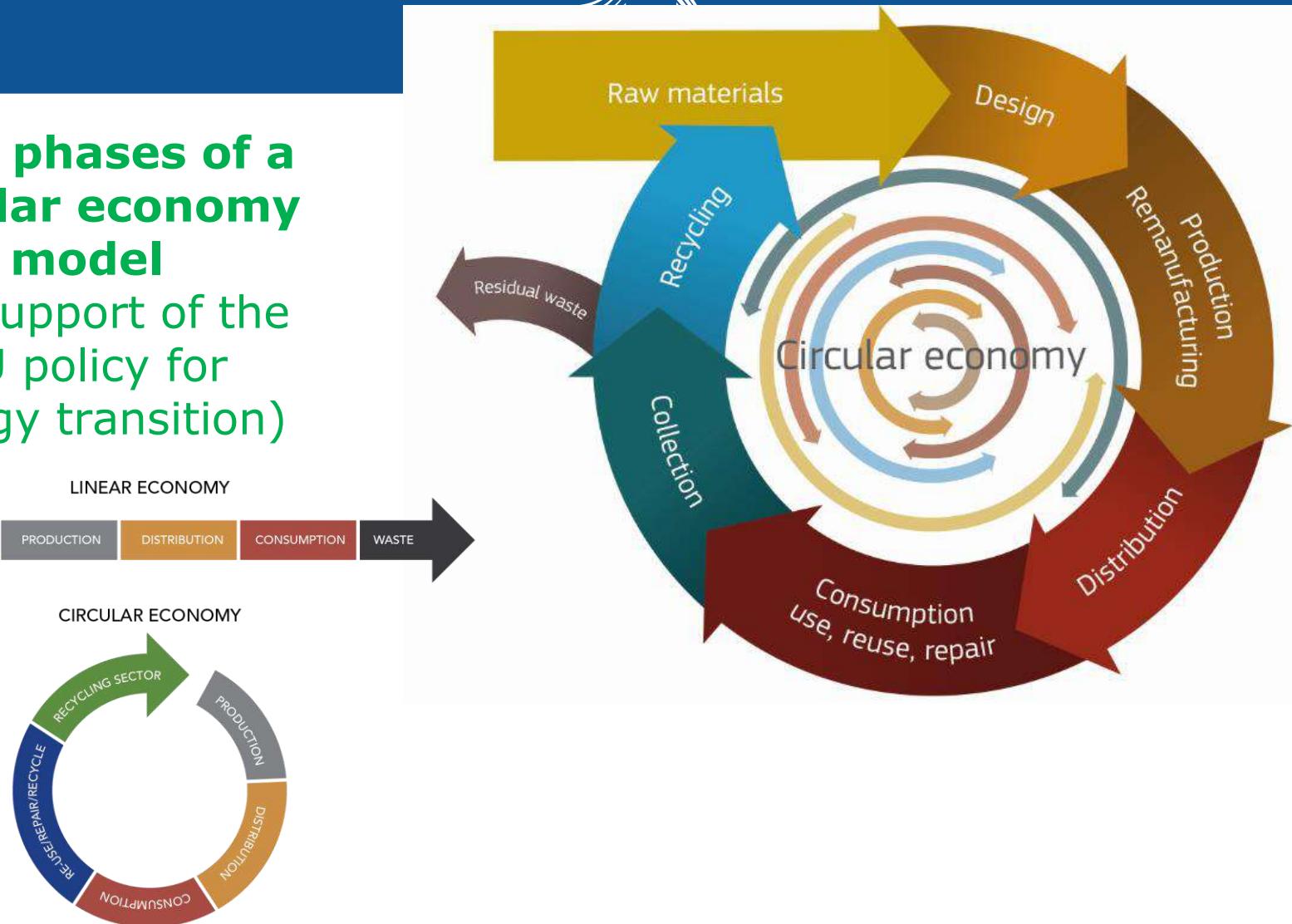
- Pour assurer à l'UE une croissance durable, nous devons utiliser nos ressources de manière plus intelligente, plus durable. C'est la fin du modèle linéaire de croissance économique consistant à « prélever-fabriquer-jeter ». De nombreuses ressources naturelles étant limitées, nous devons trouver un mode d'utilisation durable tant sur le plan économique que sur le plan environnemental.
- Dans une économie circulaire, les produits et les matières conservent leur valeur le plus longtemps possible ; les déchets et l'utilisation des ressources sont réduits au minimum. Grâce à l'économie circulaire, les consommations de matières et d'énergies deviennent de plus en plus efficaces, sans gaspillage (selon le principe du recyclage au meilleur coût).
- L'efficacité énergétique est le moyen le plus efficace de combiner décarbonation de l'économie et amélioration de la sécurité énergétique de l'Union Européenne. Elle a progressé dans tous les domaines. On remarque même que la consommation d'énergie dans le monde n'est plus proportionnelle au PIB depuis plusieurs décennies.

Source : Commission européenne :

- (1) Paquet «économie circulaire», Bruxelles, 2 décembre 2015 / « Économie circulaire: la Commission tient ses promesses » (http://europa.eu/rapid/press-release_MEMO-17-105_fr.htm)
- (2) « Une stratégie européenne pour une énergie sûre, compétitive et durable », Livre vert de la Commission (8 mars 2006) (<http://eur-lex.europa.eu/legal-content/FR/TXT/?uri=URISERV%3AI27062>)

Towards a circular economy in the EU

Main phases of a circular economy model (in support of the EU policy for energy transition)



Each phase presents opportunities in terms of reducing costs and dependence on natural resources, boosting growth and jobs, as well as limiting waste and harmful emissions to the environment. The phases are interlinked, as materials can be used in a cascading way. The aim is to minimise the resources escaping from the circle so that the system functions in an optimal way.
⇒ Modernising waste policy and targets: waste as a resource - http://ec.europa.eu/environment/circular-economy/index_en.htm

Circular economy in nuclear fission : Generation IV

(1) Generation II and III reactors
= once-through fuel cycle

(2) Once-through recycling - Pu recycling
(e.g. France) through MOX fuel

« En Finlande, le premier cimetière de déchets radioactifs au monde »

En novembre 2015, la compagnie finlandaise POSIVA, créée en 1995 pour gérer les déchets radioactifs dans le sud-est du pays, a obtenu le feu vert du gouvernement pour la construction du site définitif d'enfouissement nucléaire, dans la prolongation du laboratoire édifié en 2004.

Il faut souligner que cela se fait sans protestation : le porte-parole de Greenpeace Finlande, Mr Juha Aromaa, a même déclaré publiquement :

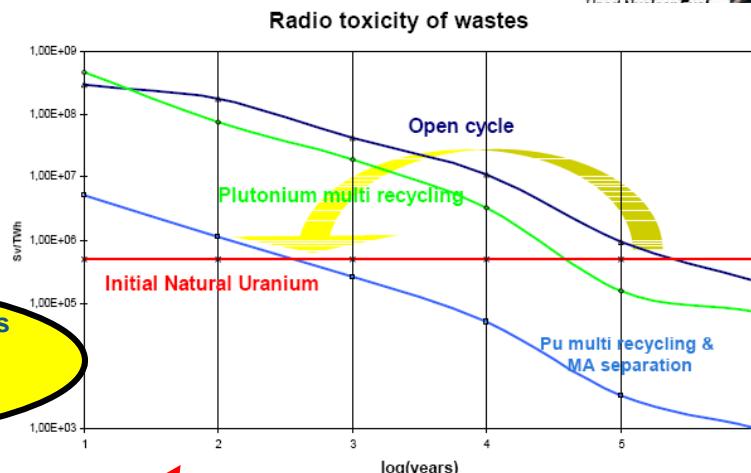
« la pire option serait de ne rien faire et de laisser les combustibles usés à la surface ».

Source : LE MONDE | 27.12.2017 à 11h22

http://www.lemonde.fr/energies/article/2017/12/27/en-finlande-le-premier-cimetiere-de-dechets-radioactifs-au-monde_5234897_1653054.html#DUufuF2wkYq8c5Ue.99

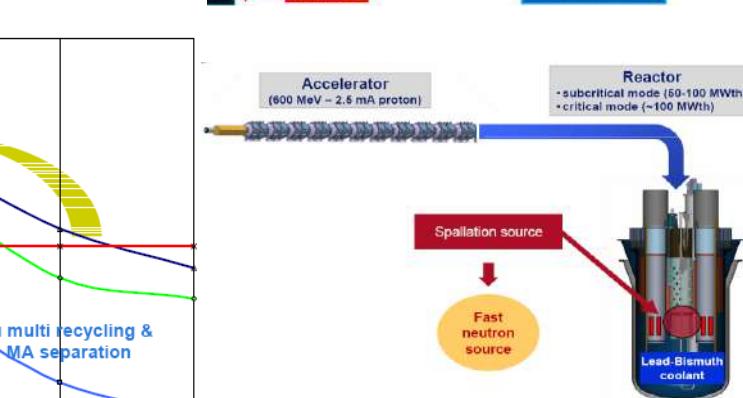
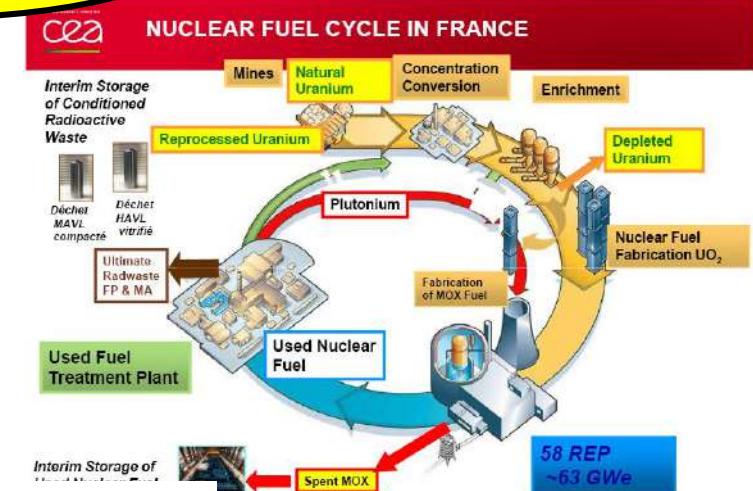


(3) Optimum use of natural resources and “full actinide” recycling in Generation IV systems



Generation IV : a technological breakthrough

- Safety (notably: thermal inertia, low pressure)
- Long-term approaches for enhancing proliferation resistance
- Optimum use of Uranium resource (96% vs. 4 %) through "breeding" of fissile plutonium (Pu-239) from fertile uranium (U-238)
- Drastic reduction of ultimate radioactive waste in volume, heat content and radio toxicity through recycling (transmutation of minor actinides)



MYRRHA at SCK-CEN, Mol, Belgium, to replace BR2
= sub-critical Accelerator Driven System (ADS) – fast neutron spectrum - waste minimization through transmutation
Full actinide recycle can reduce waste radiotoxicity to ~ 500 years.
("Multi-purpose hyBRid Research Reactor for High-tech Applications")
- <http://myrrha.sckcen.be/>

Comparatif des tarifs d'énergie en Belgique en 2017

Consommation annuelle (électricité & gaz) d'un ménage belge



Consommation annuelle d'un ménage belge en 2017 :
3.500 kWh en électricité et 23.560 kWh en gaz naturel

Calcul Electricité & Gaz

Électricité	1 x	773,1€	=	773,1€
Gaz naturel	1 x	1.183,25€	=	1.183,25€
Electricité & Gaz				€ 1.956,35

La facture d'électricité en Belgique est composée de différents éléments (3 au total):

- énergie (= environ 30 % de votre facture),
- réseau (çàd transport et distribution) (= environ 15 % et 35 %, resp., de votre facture),
- taxes diverses (= environ 20 % de votre facture).

Source: « Comparatif des tarifs d'énergie (Juillet 2017) »
<https://www.mesfournisseurs.be/energie/gaz-electricite>

Mix énergétique belge 2016 pour l'électricité y compris les importations (décarboné à 62 %)

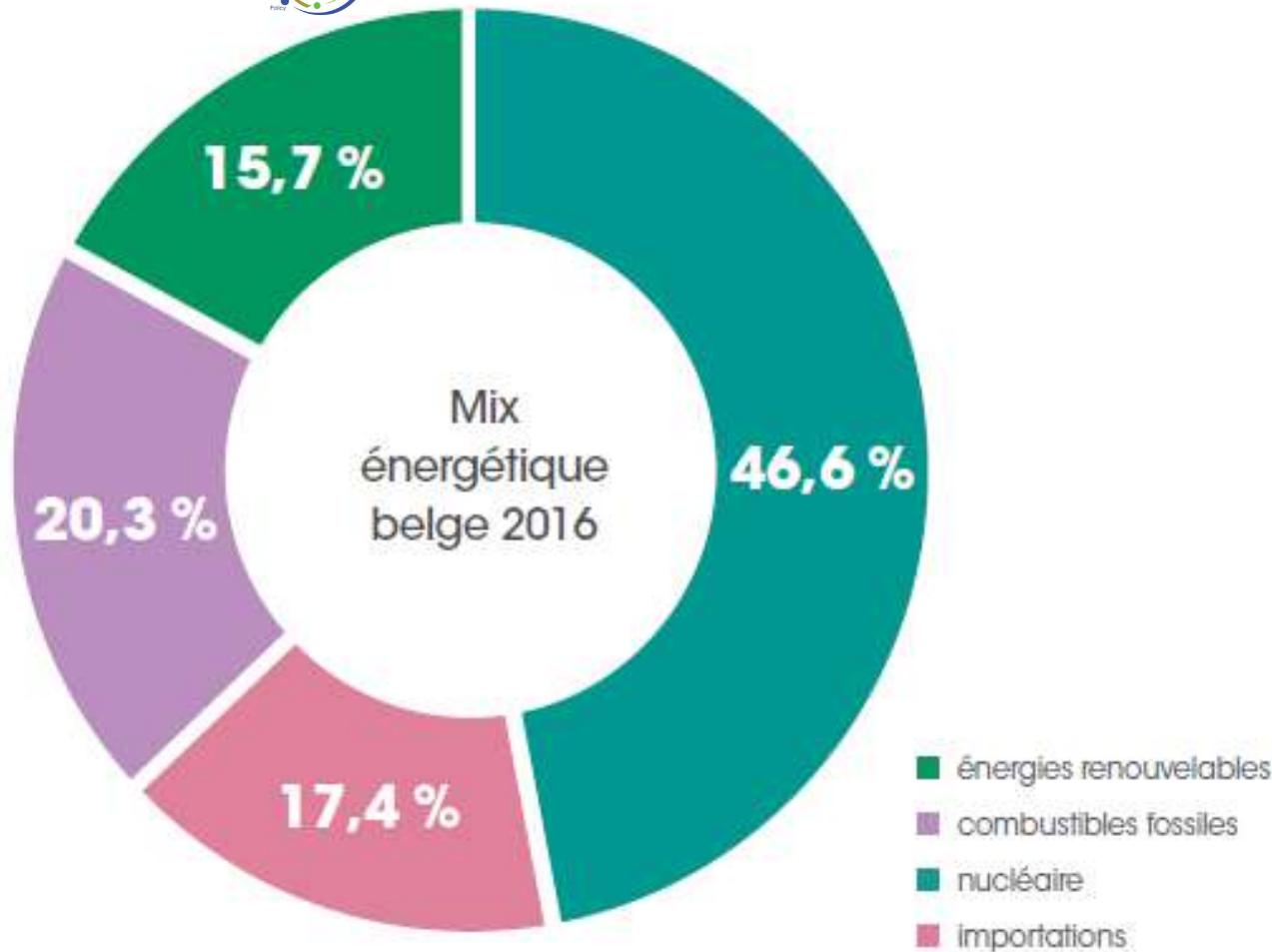


En 2016, la Belgique avait un mix énergétique pour la production d'électricité composé de:

- 46,6 % de nucléaire,
- 15,7 % d'énergies renouvelables,
- 20,3 % de combustibles fossiles
- et recours aux importations à hauteur de 17,4 % ;

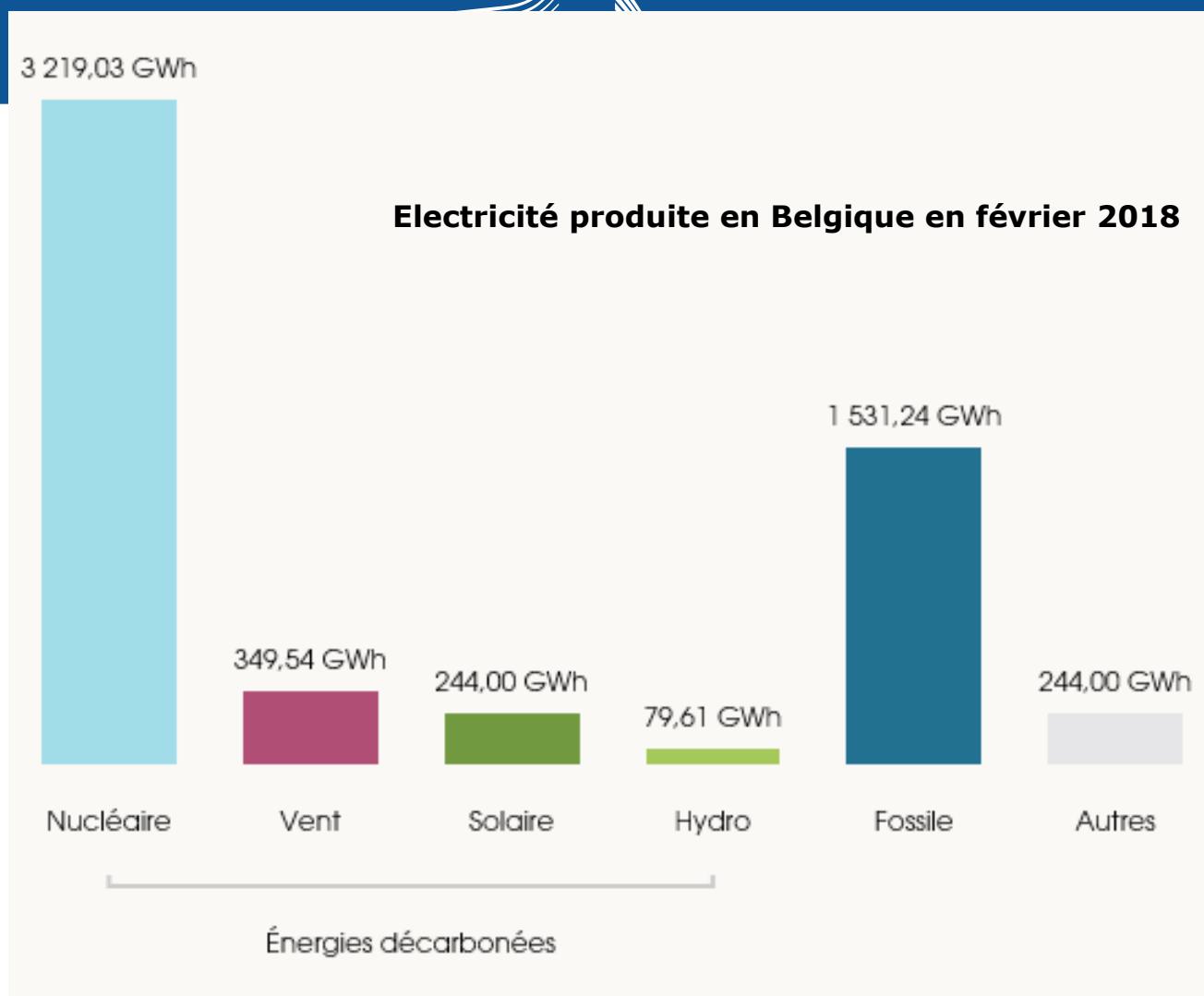
soit un mix décarboné à 62,3 %.

(Source: ELIA)



Production d'électricité par source d'énergie en Belgique en février 2018

**Total Belgique
5 667,41 GWh**

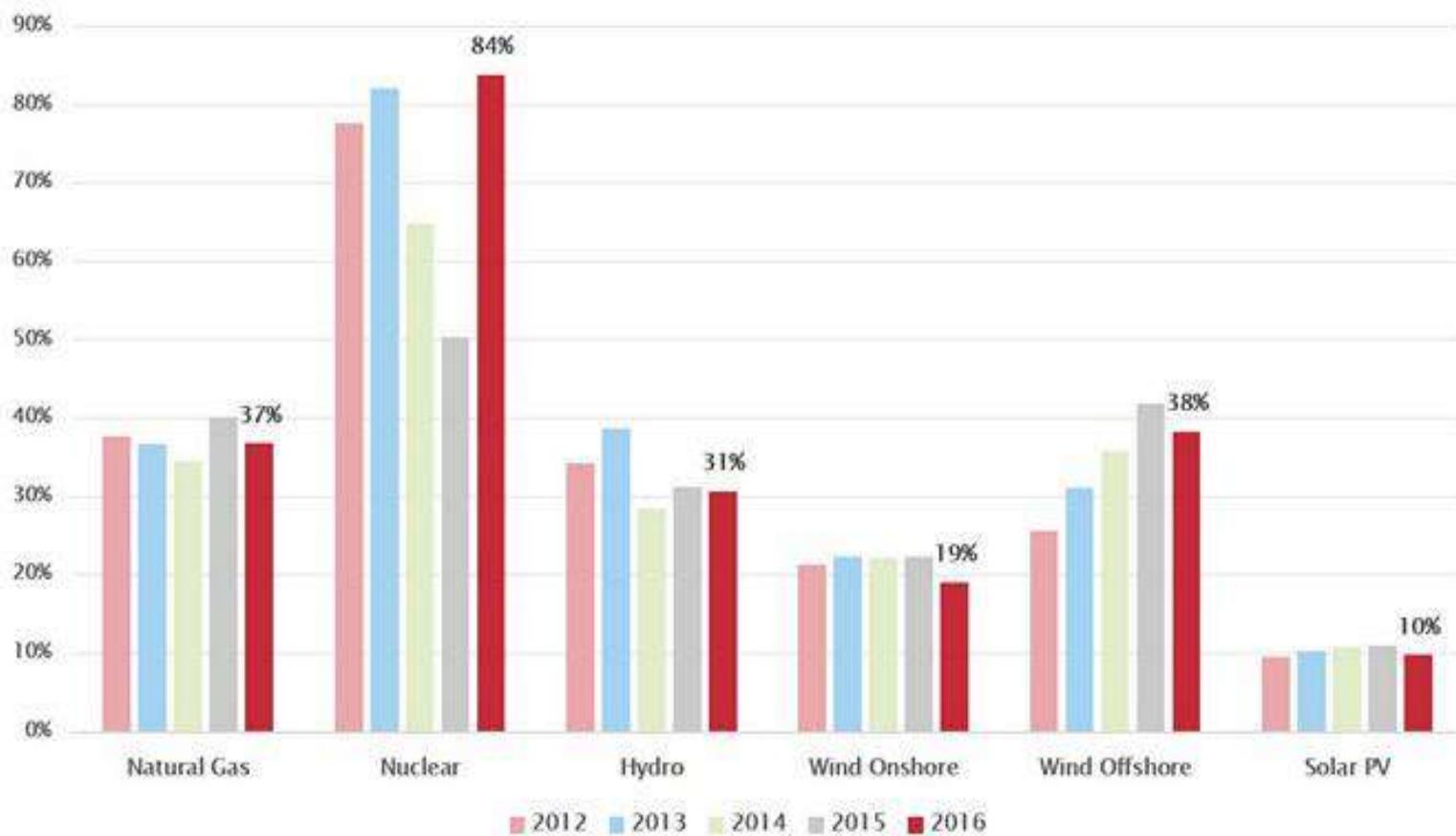


L'énergie nucléaire n'émet pratiquement pas de CO₂. Ses émissions sont comparables à celles des éoliennes et de l'énergie solaire (chiffres basés sur le cycle de vie complet, GIEC). Les énergies renouvelables ne suffisent pas encore pour satisfaire toute la demande en électricité dans notre pays. Une combinaison d'énergies renouvelables et d'énergie nucléaire constitue par conséquent une solution efficace pour un avenir faiblement carboné.

Source : <https://www.forumnucleaire.be/la-production-delectricite-et-les-emissions-de-co2-en-belgique>

« Load factor » (facteur de charge pour différentes technologies)

Load factor: percentage of total number of hours per year when production assets are in operation in Belgium (equivalent full load hours capacity)



La facteur de charge s'obtient en calculant le rapport entre l'électricité effectivement produite et celle qui aurait été produite sur la même période si l'outil de production analysé avait fonctionné continuellement à sa capacité nominale (pleine capacité).

Dans l'exemple ci-dessous nous illustrons le facteur de charge exprimé en pourcents pour quelques technologies en Belgique pour l'ensemble de l'année 2016 et pour les 4 années précédentes.

Belgium : available production capacity vs peak demand for electricity

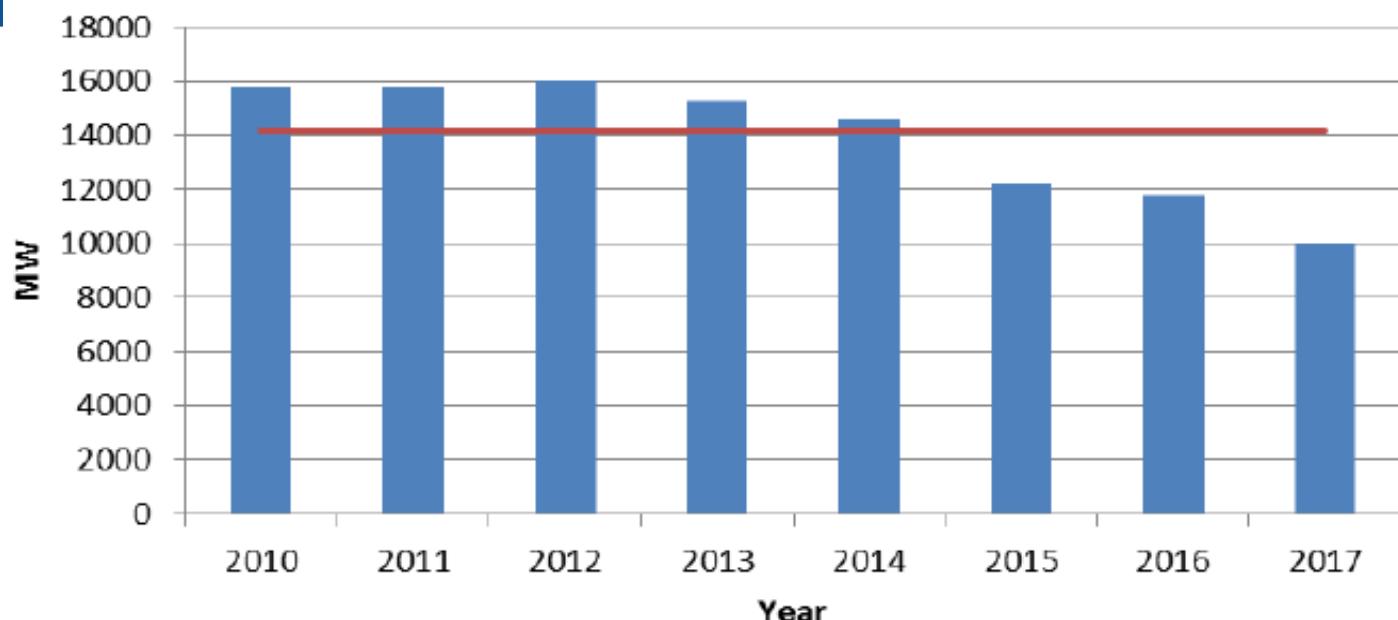
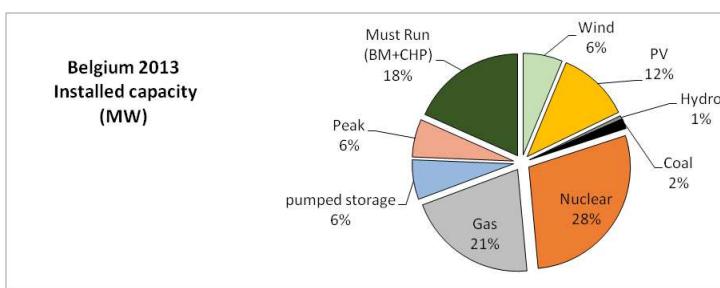


Figure 1: Evolution of the available production capacity, compared to the peak power demand during the winter 2012



Source: J Albrecht, R Laleman (2015) Policy trade-offs for the Belgian electricity system

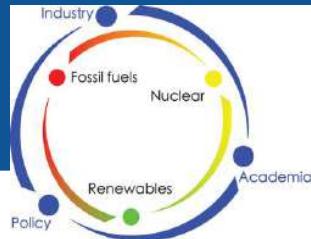
- <http://www.ispionline.it/it/energy-watch/nuclear-power-belgium-bumpy-road-13907>
- [http://www.ceem.ugent.be/publications/Online%20Versie%20Belgian%20Case%20Study%20\(2\).pdf](http://www.ceem.ugent.be/publications/Online%20Versie%20Belgian%20Case%20Study%20(2).pdf)

(BM: Biomass – including biogas, PV: Photovoltaic)

« Flexibility, Capacity and Carbon Pricing to Keep the Lights”, 2015, Nicolas Meerts, ULB
- http://www.elia.be/~media/files/News/SYF_Meerts_NicolasArticleUpdated.pdf



En Belgique, le dernier véritable black-out remonte à 1982 (4 août 1982).
The cause of the blackout was long-term voltage instability after a period
of 4.5 minutes - <https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-00352414/document>



« Vers une économie décarbonée »

1 – Brève histoire : du feu primitif à l'électricité

2 – Le cap : UN-Agenda 2030 et «triangle énergétique européen»

**3 – Invariants (sciences de la nature)
et contraintes (EU Triangle)**

4 - Faits et chiffres : démographie, climat, politiques énergétiques

5 - Défis technologiques et humains (incertitudes) : stockage, etc

6 – Conclusion : recherche, innovation et formation

* Responsibility for the information and views set out in this Collège Belgique course lies entirely with the author *

* Reproduction of the texts of this course is authorised provided the source is acknowledged *

Le tableau de Mendeleïev: « Une merveille de l'esprit humain »

Le tableau de Mendeleïev

1	H	Hydrogène
2	Be	Bérylum.
3	Li	Lithium
4	Mg	Magnésium
5	Na	Sodium
6	K	Potassium
7	Ca	Calcium
8	Sc	Scandium
9	Ti	Titanium
10	V	Vanadium
11	Cr	Chrome
12	Mn	Manganèse
13	Fe	Fer
14	Co	Cobalt
15	Ni	Nickel
16	Cu	Cuivre
17	Zn	Zinc
18	Rb	Rubidium
19	Sr	Strontium
20	Y	Yttrium
21	Zr	Zirconium
22	Nb	Niobium
23	Mo	Molybdène
24	Tc	Technétium
25	Ru	Ruthénium
26	Rh	Rhodium
27	Pd	Palladium
28	Ag	Argent
29	Cd	Cadmium
30	In	Indium
31	Ga	Gallium
32	Ge	Germanium
33	As	Arsanique
34	Se	Sélénum
35	Br	Bromé
36	Kr	Krypton
37	Cs	Césium
38	Ba	Baryum
39	La-Lu	Lanthanides
40	Hf	Hafnium
41	Ta	Tantale
42	W	Tungstène
43	Re	Rhénium
44	Os	Osmium
45	Ir	Iridium
46	Pt	Platine
47	Au	Or
48	Hg	Mercure
49	Tl	Thallium
50	Pb	Plomb
51	Bi	Bismuth
52	Po	Polonium
53	At	Astatine
54	Rn	Radon
55	Fr	Francium
56	Ra	Radium
57-71	Ac-Lr	Actinides
58	Rf	Rutherfordium
59	Db	Dubinium
60	Sg	Seaborgium
61	Bh	Bohrium
62	Hs	Hassium
63	Mt	Meltinanium
64	Ds	Darmstadtium
65	Rg	Roentgenium
66	Cn	Copernicium
67	Nh	Nihonium
68	Fl	Florovium
69	Mc	Moscovium
70	Lv	Livermorium
71	Ts	Tennessee
72	Og	Oganesson

PRINCIPE



Conçu en 1869 par le chimiste russe Dimitri Ivanovitch Mendeleïev, le tableau périodique classe tous les éléments chimiques selon leur numéro atomique et leurs propriétés chimiques. Quatre éléments ont été identifiés entre 2004 et 2010 et viennent d'être validés par l'Union internationale de chimie pure et appliquée (IUPAC).

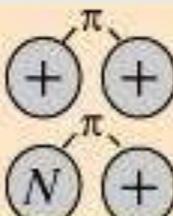
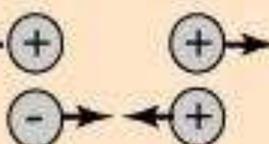
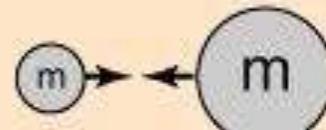
57	La	58	Ce	59	Pr	60	Nd	61	Pm	62	Sm	63	Eu	64	Gd	65	Tb	66	Dy	67	Ho	68	Er	69	Tm	70	Yb	71	Lu
	Lanthane		Cérium		Praséodyme		Néodyme		Prométhium		Samarium		Europium		Gadolinium		Terbium		Dysprosium		Holmium		Erbium		Thulium		Ytterbium		Lutatium
89	Ac	90	Th	91	Pa	92	U	93	Np	94	Pu	95	Am	96	Cm	97	Bk	98	Cf	99	Es	100	Fm	101	Md	102	No	103	Lr
	Actinium		Thorium		Protactinium		Uranium		Neptunium		Plutonium		Américium		Curium		Berkzium		Californium		Einsteinium		Fermium		Mandelavium		Nobelium		Lawrencium

Éléments synthétiques créés artificiellement dans des accélérateurs de particules ou lors de réactions nucléaires

✗ Éléments n'ayant pas d'utilisation

★ Nouveaux éléments chimiques validés en 2016 par l'IUPAC

Fundamental Forces

Strength	Range (m)	Particle
<i>Strong</i>  Force which holds nucleus together	10^{-15} (diameter of a medium sized nucleus)	gluons, π (nucleons)
<i>Electro-magnetic</i> 	Infinite	photon mass = 0 spin = 1
<i>Weak</i>  neutrino interaction induces beta decay	10^{-18} (0.1% of the diameter of a proton)	Intermediate vector bosons W^+ , W^- , Z_0 , mass > 80 GeV spin = 1
<i>Gravity</i> 	Infinite	graviton ? mass = 0 spin = 2

Formes d'énergies libres (çàd utilisable par l'homme) : gravitation; cinétique; thermique; radiative; chimique; électrique; nucléaire



L'énergie de gravitation

- utilisée par exemple dans des barrages hydrauliques où, en faisant s'écouler de l'eau dans des canalisations, elle permet de mettre en mouvement des turbines.

L'énergie cinétique

- permet de mettre en mouvement les pales des éoliennes qui elles-mêmes actionnent des générateurs d'électricité.

L'énergie chimique dont les énergies fossiles

- elle naît des forces de liaison regroupant des atomes dans une molécule - utilisée dans un accumulateur ou une pile électrique - également libérée dans les énergies fossiles (pétrole, gaz, charbon) et dans la biomasse.

L'énergie électrique

- elle naît du déplacement des électrons dans un conducteur - actionne les moteurs électriques, fait fonctionner les circuits électroniques intégrés et les différents types d'éclairage. Elle se caractérise par une grande facilité de distribution mais présente une difficulté de stockage. Son domaine d'application ne cesse de croître.

L'énergie thermique ou calorique

- rôle essentiel dans la révolution industrielle - elle actionne aujourd'hui les turbines et alternateurs générant de l'électricité.
- la géothermie, chaleur provenant du globe terrestre, est un cas particulier de l'énergie thermique.

L'énergie radiative dont l'énergie solaire

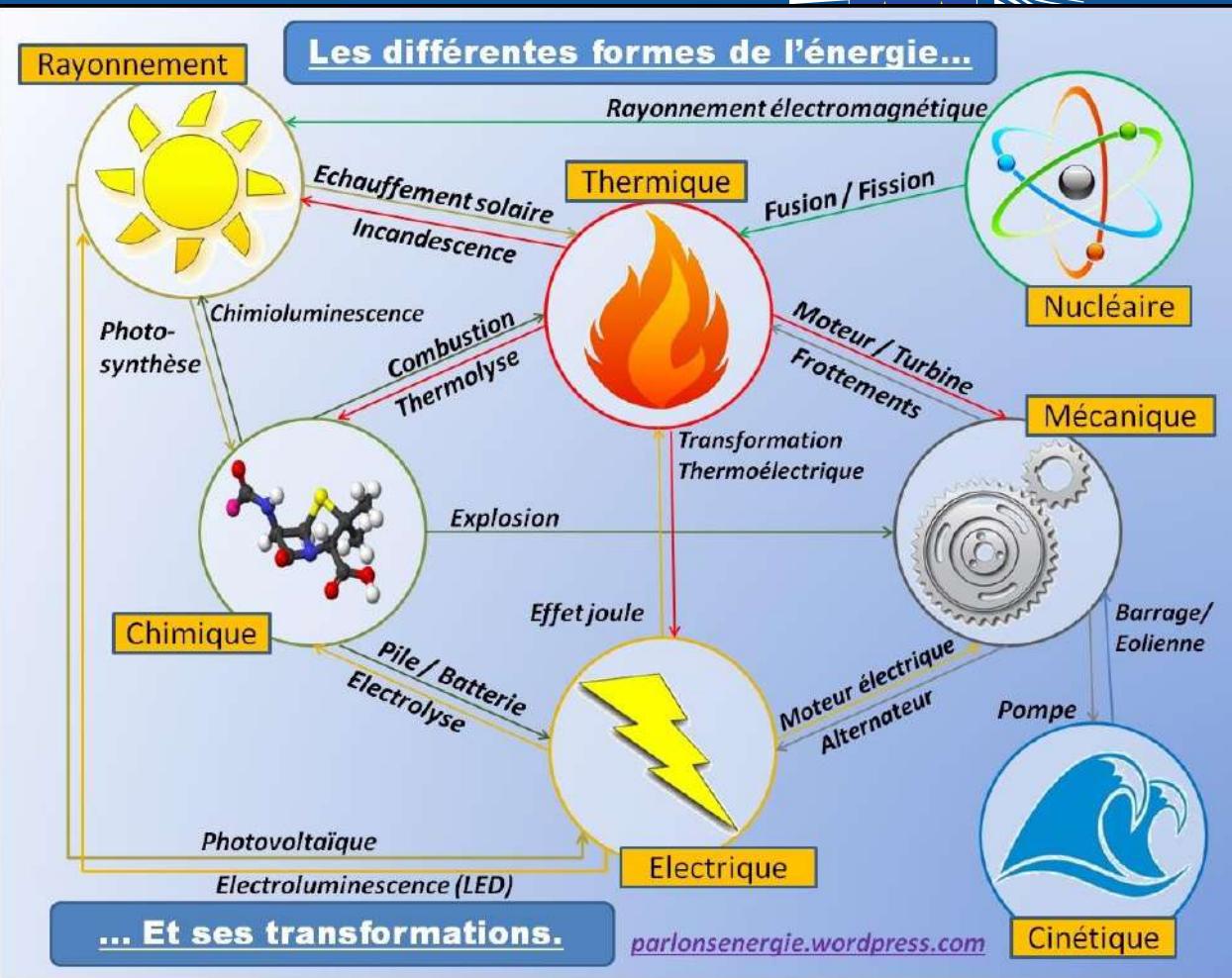
- ondes radio, lumière visible, rayons Ultra-Violets, rayons X, etc. - permet à une ampoule électrique d'éclairer, à un four à micro-ondes de cuire les aliments + les centrales photovoltaïques.

L'énergie nucléaire

- elle naît de l'utilisation des forces de liaison des protons et des neutrons au sein du noyau des atomes - fission des atomes lourds tels que l'uranium 235 ou fusion des atomes légers tels que les isotopes d'hydrogène – production de chaleur, de neutrons, de rayons alpha, beta, gamma... - utilisée dans les centrales nucléaires pour actionner les générateurs d'électricité au travers de fluides caloporteurs.

NB : Dans le langage courant, le terme « énergie » est employé en substitution d'« énergie utilisable par l'homme », aussi appelée « énergie libre ». Source : <http://www.connaissance-des-energies.org/fiche-pedagogique/energie>

Deux principes de la thermodynamique : conservation de l'énergie ~~totale~~ et augmentation de l'entropie

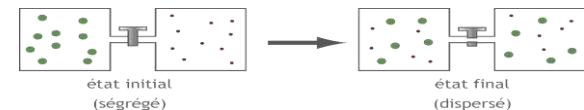


Enoncé du premier principe de la thermodynamique

« L' énergie totale E d'un système fermé et isolé se conserve au cours de ses transformations thermodynamiques (càd entre deux états d'équilibres thermodynamiques) »

Enoncé du deuxième principe de la thermodynamique (augmentation de l'entropie)

« L' entropie d'un système isolé (qui n'échange ni matière ni énergie sous quelque forme que ce soit avec l'extérieur) ne peut pas diminuer. Elle augmente lors d'une transformation irréversible, ou reste constante si la transformation est réversible »



L'entropie est la dernière et la plus mystérieuse des cinq grandeurs physiques (température, pression, volume, énergie interne, entropie) définissant l'état d'un système thermodynamique, c'est-à-dire d'un ensemble matériel délimité capable d'échanger de la chaleur et du travail avec le milieu extérieur.

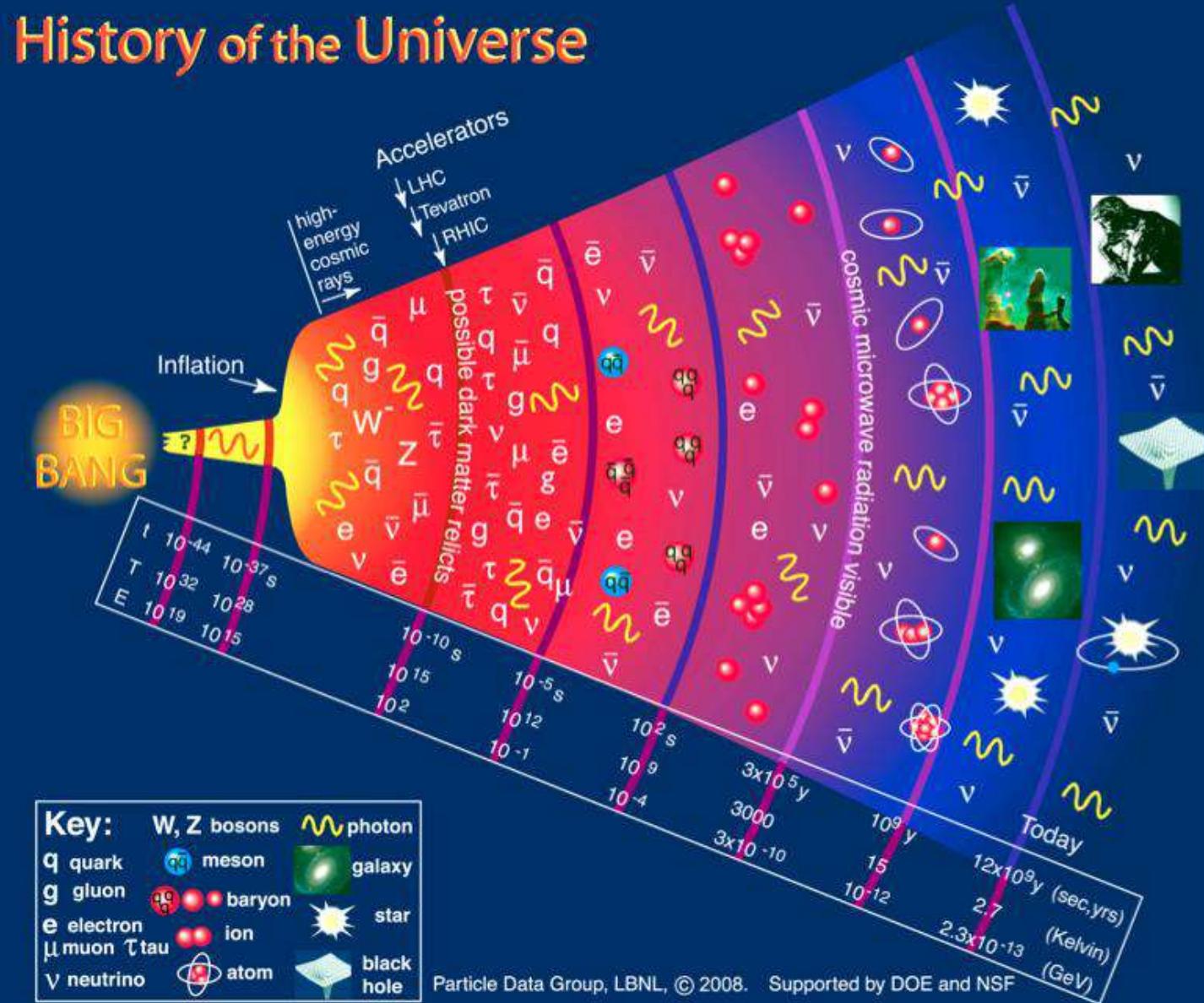
L' entropie mesure la « qualité » de l'énergie disponible au sein du système. Au cours de ses transformations, l'énergie devient de moins en moins utilisable. Une énergie de bonne qualité est une énergie ordonnée, c'est-à-dire d'entropie faible. - <https://www.connaissancesdesenergies.org/quest-ce-que-lentropie-150928>.

Du Big Bang à
nos jours :
illustration des
deux infinis
(infiniment
petit et
infiniment
grand)

Sont représentés les échelles de temps, d'énergie et de température relatives à chaque époque de l'évolution de l'univers.

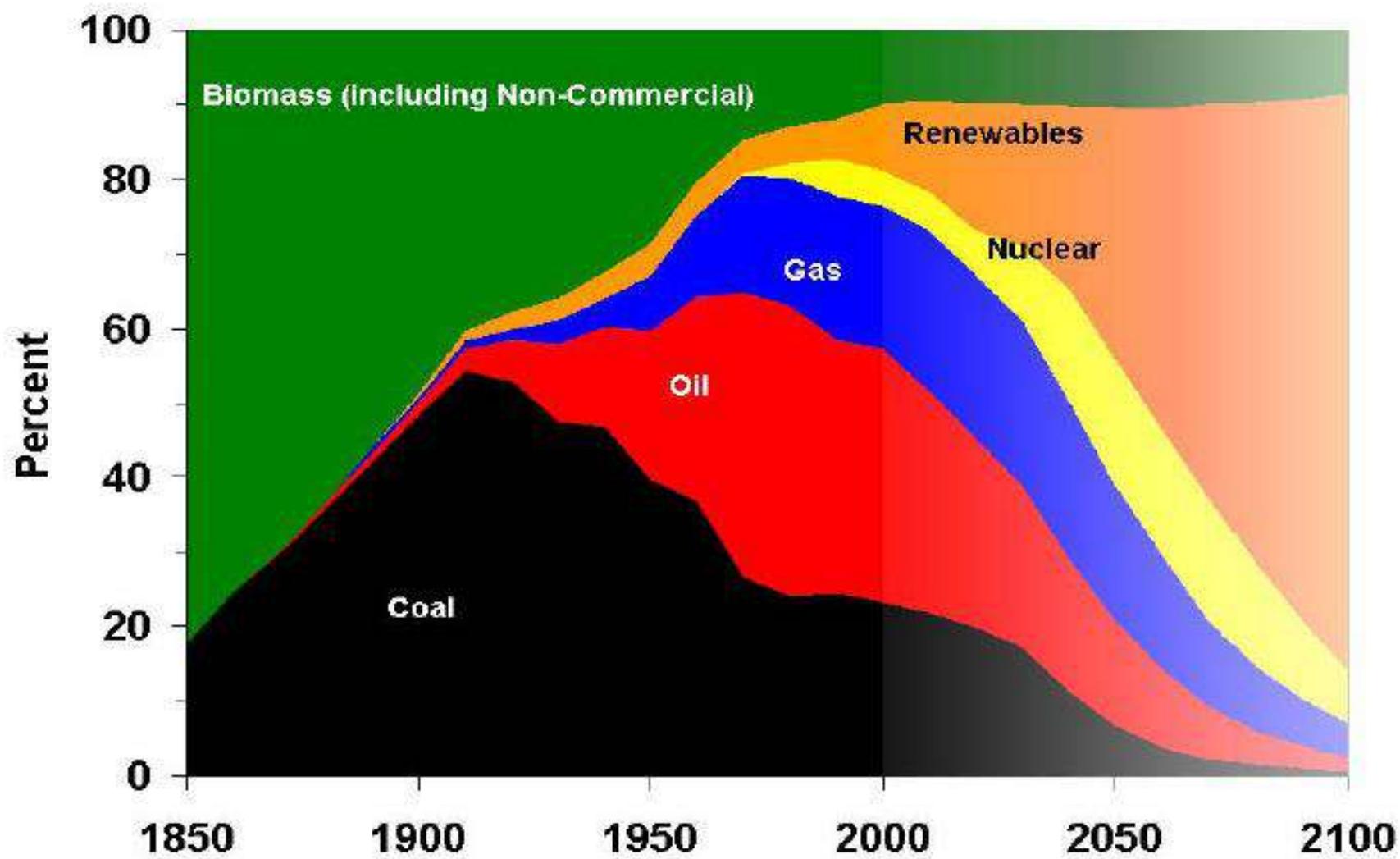
En particulier ce n'est que 300 000 ans après le Big Bang que la lumière a pu s'échapper (début du domaine de l'astronomie et de l'astrophysique).

Source:
<http://culturesciencesphysique.ens-lyon.fr/ressource/particules-elementaires-Ille-1.xml>



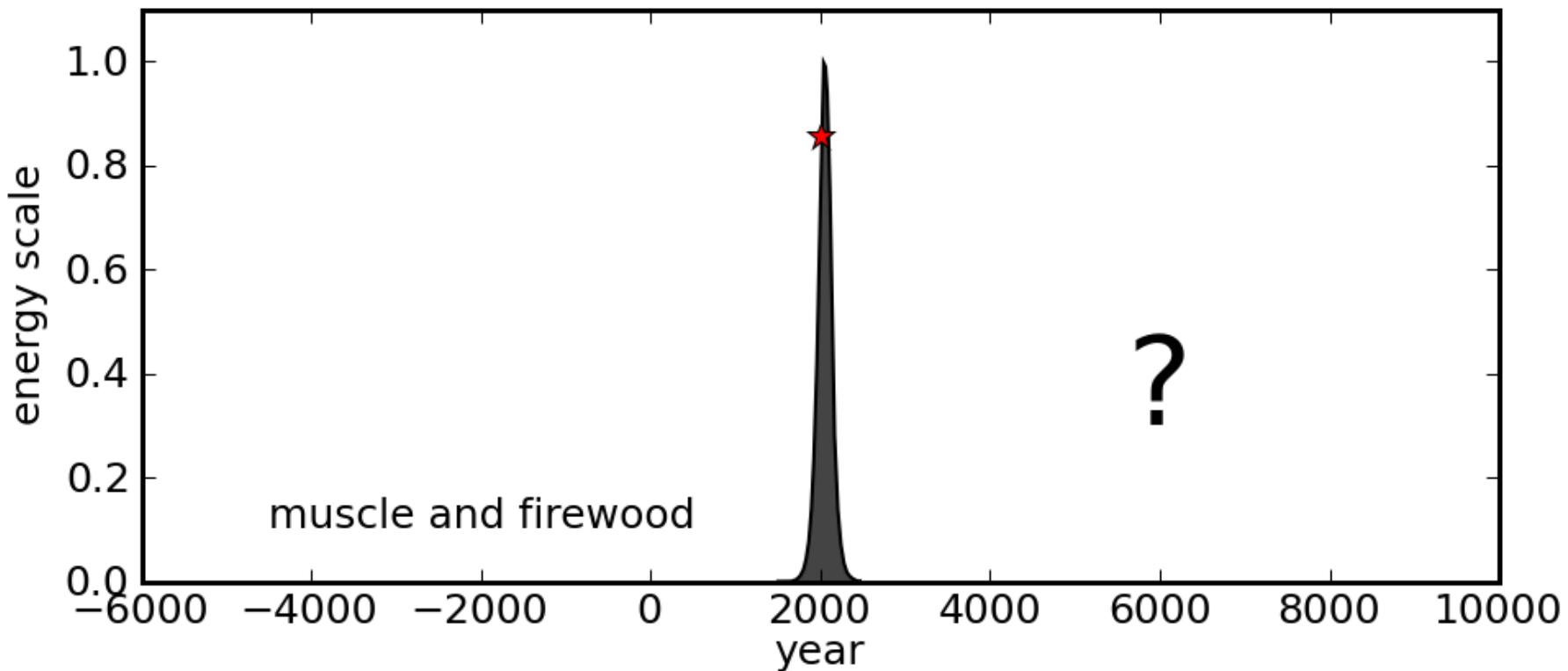
Although universe has undergone significant evolution and change since Big Bang (13.8 billion years ago), the sum total of mass and energy within it remains constant (first law of thermodynamics applicable to mass and energy).

Evolution of global primary energy sources (1/2)



Evolution of global primary energy / substitution of fossil, fissile, renewables
(a great variety of energy scenarios have been developed since C. Marchetti, IIASA, 1985)

Evolution of global primary energy sources (2/2)



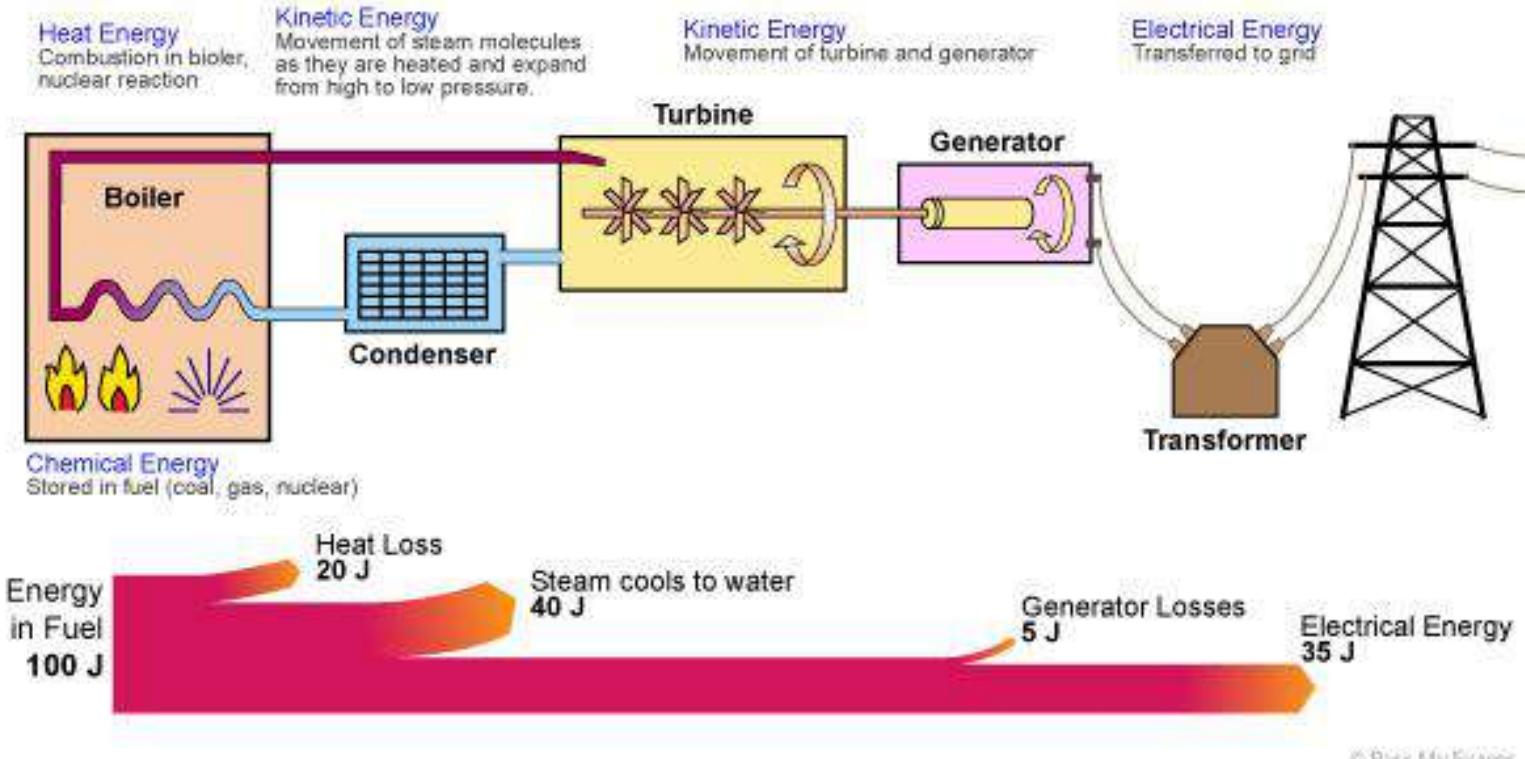
We live like kings today, on the backs of roughly 100 energy slaves each (human metabolism is 100 Watts, but Americans enjoy 10 000 W of continuous power).

Our richness is very much tied to surplus energy availability, and that so far has been a story of finite fossil fuels. But even under solar power, we can't continue our track record of 3% energy growth per year for even several hundred years!

Global physical limits—thermodynamic, energy return on energy invested, finite arable land, water, fisheries, climate change, etc.—are all asserting themselves to remind us that nature doesn't care about our dreams."

(<http://physics.ucsd.edu/do-the-math/>) by Tom Murphy, professor of physics at the University of California, San Diego, March 2015)

Energy transfer (from chemical to electricity) and “Energy Return on Investment”



“Energy Return on energy Investment” (EROI)

Life-cycle analysis, focused on energy, is useful for comparing net energy yields from different methods of electricity generation.

- Nuclear power shows up very well as a net provider of energy, and only hydro-electricity is nearly comparable.
=> Examples of EROI assessments: 3.5 for Biomass (corn) ; 28 for fossil gas in a CCGT ; 49 for Hydro (medium-sized dam) ; 75 for Nuclear (in a PWR)

Source: “Energy intensities, EROIs (energy returned on invested), and energy payback times of electricity generating power plants”, Weißbach D. et al, Energy, Volume 52, Pages 210-221 (April 2013) / from Institut für Festkörper-Kernphysik Berlin, Germany / (https://festkoerper-kernphysik.de/Weissbach_EROI_preprint.pdf)

Les sciences de la nature

Comparing the world's energy resources: every year and total reserve

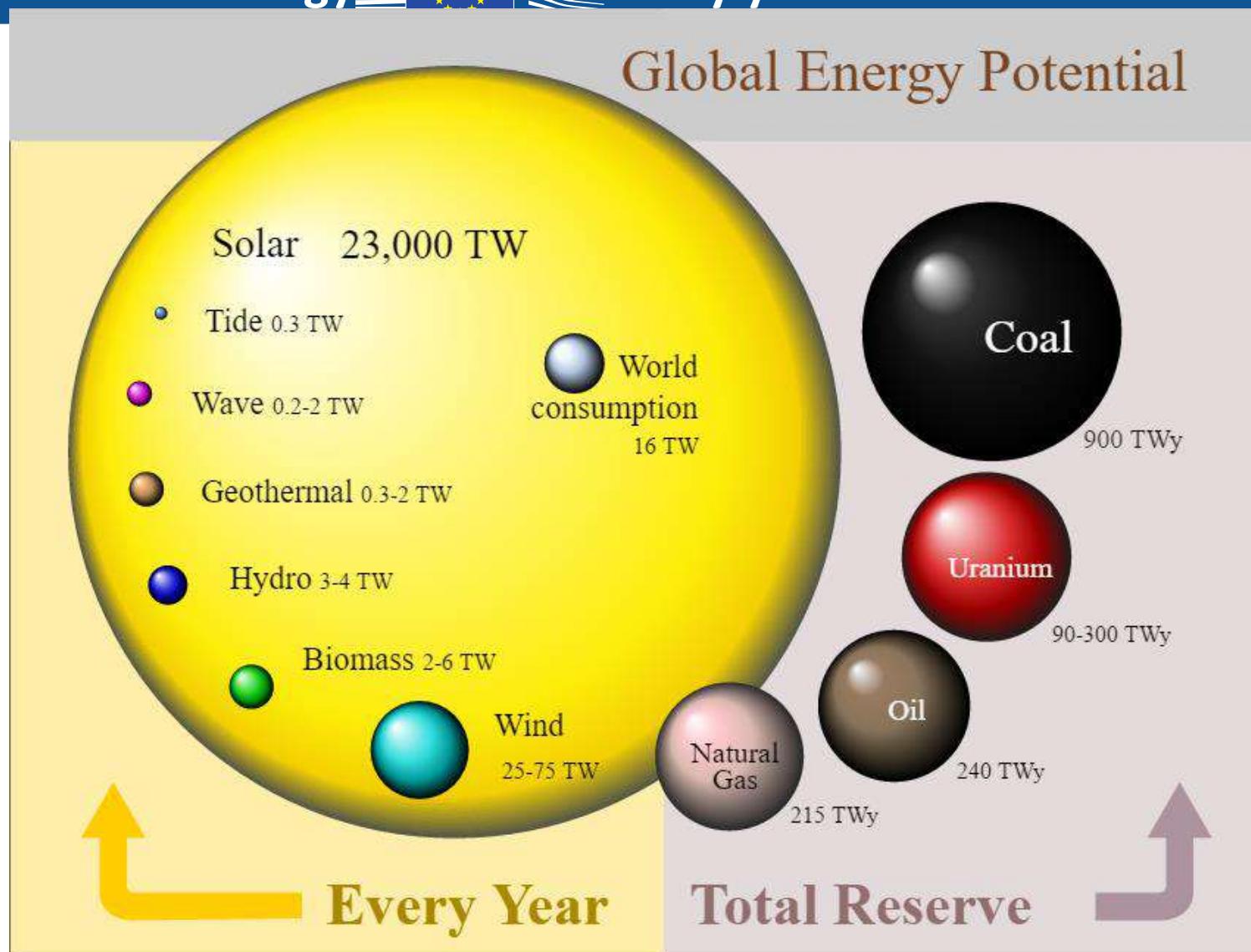


All the renewable sources of energy are depicted in this diagram as annual outputs (i.e. power, TW)

whereas the non-renewables like fossils and nuclear are shown in their totality (i.e. energy, TW).

All these energy sources exist on Earth – and they are dwarfed by the monstrous capacity of the one thing that enters our planetary closed system – solar energy.

=> Where should we invest for the long-term ?



Source: <http://waitbutwhy.com/2015/06/the-deal-with-solar.html>

Energies de flux (vent, soleil):

many renewable energy sources are intermittent, unpredictable and non-dispatchable



Intermittent Renewable Energy Sources (RES)

RES specificities, such as production variability and low-predictability, zero marginal-cost of generation, and strong site specificity, result in a set of technical and economic challenges.

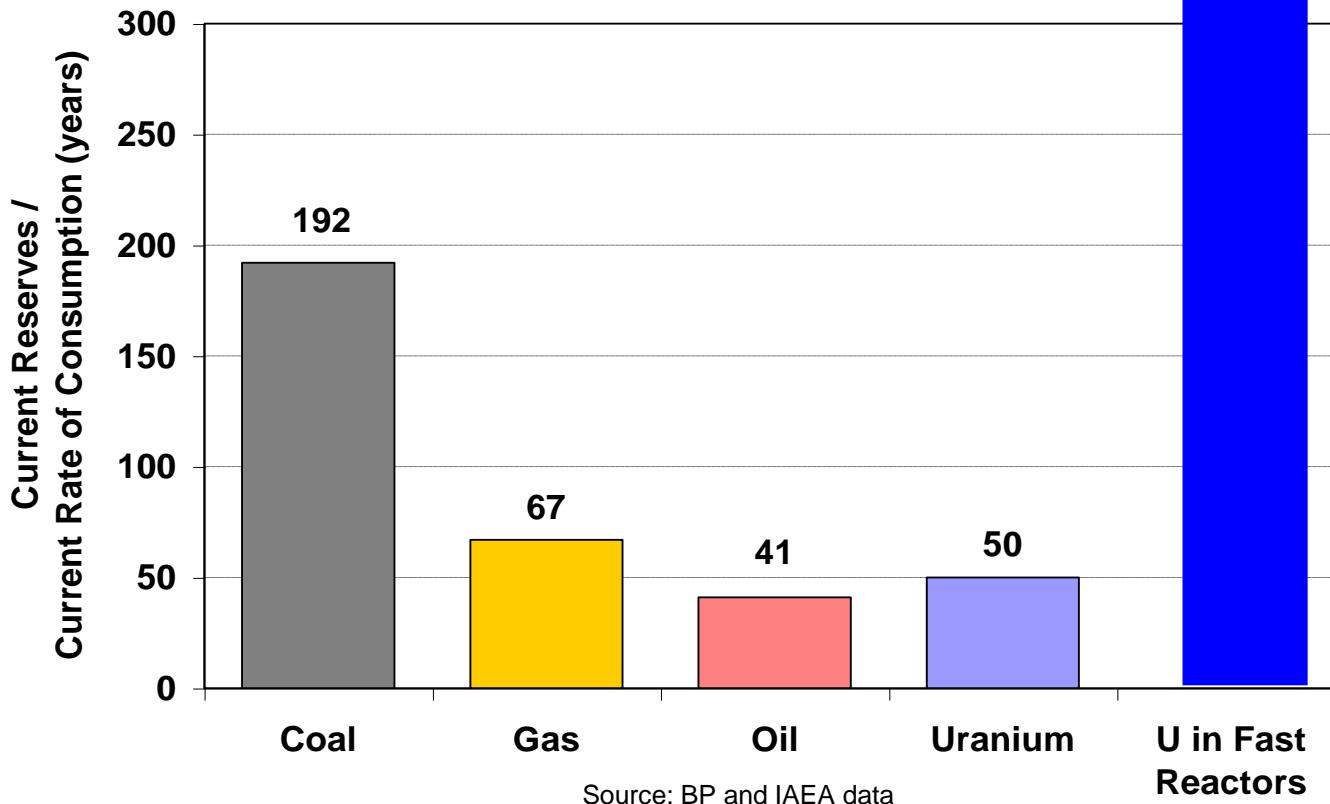
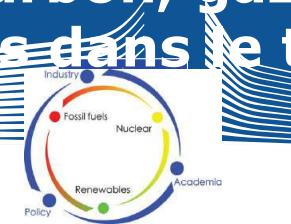
NB: Day ahead forecasts of generation by a single wind-farm feature up to 20% errors => need for better physical models and meteorological data mixed with statistical models

NB: Threats to grid stability for large penetration rates (up to 20%) => need for requirements for fault-ride through capacity, provision of reactive power, frequency and voltage control, and incentives to minimize deviations.

Source: MIT Energy Initiative (2012)

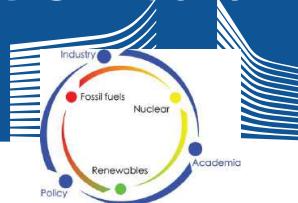


Energies de stock (charbon, gaz, pétrole, uranium) : réserves limitées dans le temps et l'espace



NB : For fast neutron reactor systems, sustainability of fissile resources is not a practical issue

Generation/consumption balance: a physical reality

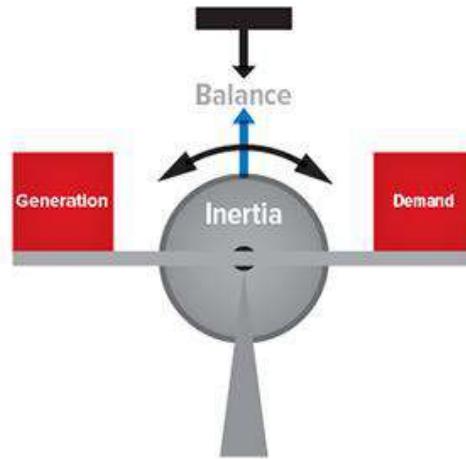


(1) Why is balance needed between electricity generation and consumption?

Electricity cannot be stored in large quantities and has to be consumed instantly

⇒ **Generation must always equal consumption at any time of day and on any day of the year.**

This physical reality is called the 'generation/consumption balance'.

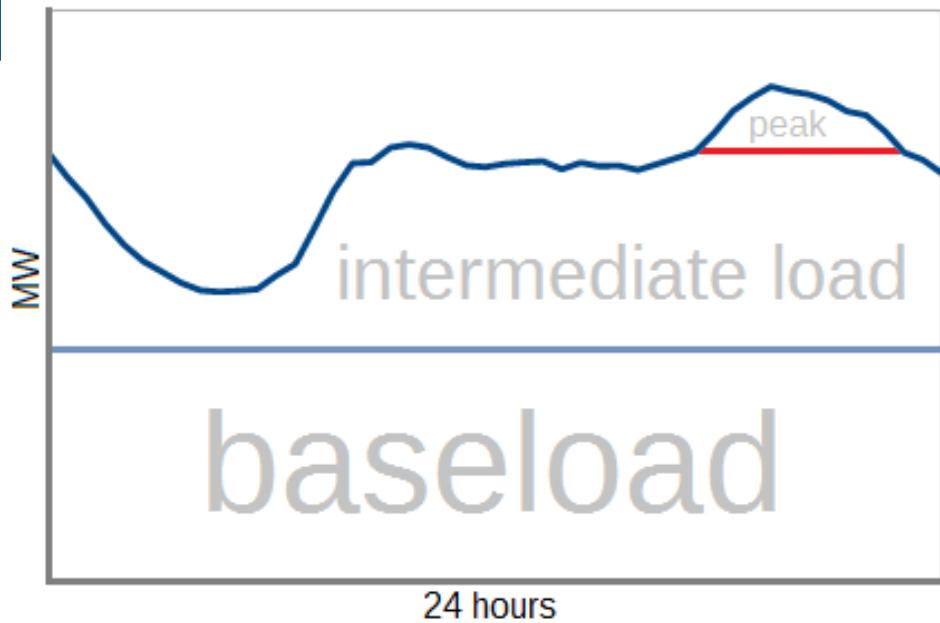


(2) Another challenge of electric power systems : path of least resistance

What are loop flows ? Electricity current takes the path of least resistance. When power is produced in one place to supply a consumer elsewhere, it should mainly flow along the most direct power lines between the two. But if the route is congested, it will take a detour through other parts of the grid – looping around the blockage. This can result in the current ending up in an unexpected places, even flowing through the grids of neighbouring countries.

"Loop flow : why is wind blowing from northern Germany putting east-European grids under pressure?", CLEW (Clean Energy Wire, Bonn), 29 Dec 2015
- <https://www.cleanenergywire.org/factsheets/loop-flows-why-wind-power-northern-germany-putting-east-european-grids-under-pressure>

Load on the electrical grid (base, intermediate, peak) and Merit Order curve

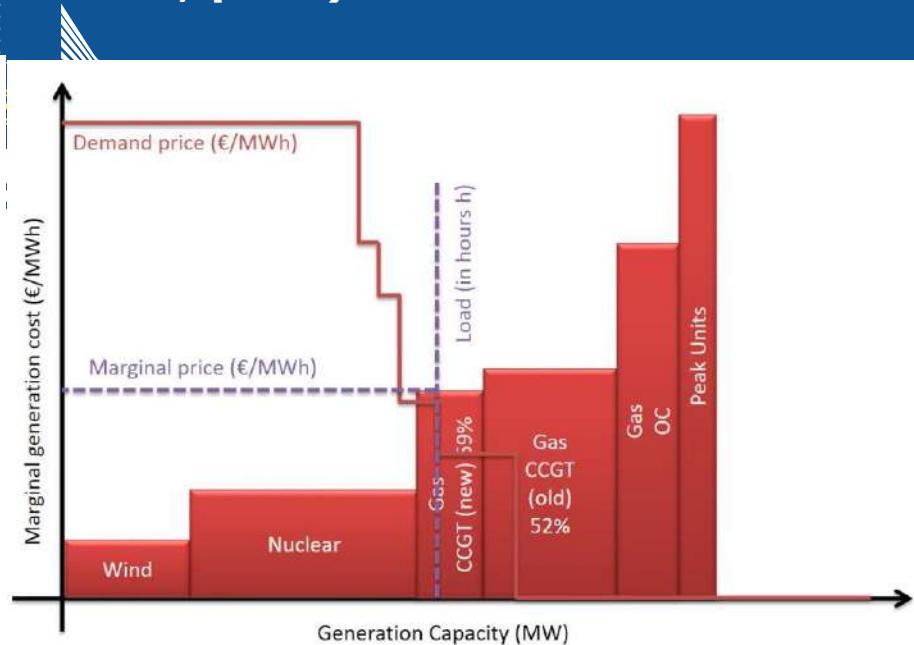


Certain types of power plants are valued for their constant output and reliability at relatively low operating costs, providing the base of this curve. This is the **baseload** of an established electrical supply market.

The remaining **intermediate** and **peak load** above this is met with generators which operate more sporadically, often for a mere few hours, requiring higher market prices (or government assistance) to meet their costs.

Taken all together, this supply, universally measured in megawatts (MW), must equal the load at all times to maintain the stability of the distribution system.

NB : « **merit order** » = l'optimisation du mix de production par empilement successif selon un coût marginal de production croissant (c'est une logique de préséance économique)



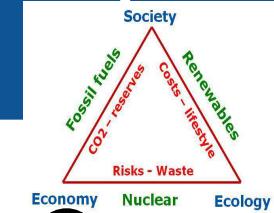
The order in which different generators supply their market is determined by their marginal cost, and is known as the merit order.

The **merit order** for a Market Operator is a way of ranking available sources of energy, in ascending order of their short-run marginal cost of production, so that those with the lowest marginal costs are the first ones to be brought online to meet demand, and the plants with the highest marginal costs are the last to be brought on line.

Belgian situation: **Renewables** have a very low marginal cost (the sun and the wind are for free) and are found at the bottom of the curve. **Nuclear** has also a low running cost and follows the renewables in the ranking. Peak plants, which are meant to cover rare peaks in demand (for example on an exceptionally cold winter day) are often diesel or gasoline fueled and therefore have the highest running cost.

- Fédération Belge des Entreprises Electriques et Gazières asbl /FEBEG/
 - <https://www.febeg.be/fr/merit-order>
 - <https://www.next-kraftwerke.be/en/knowledge-hub/merit-order-curve/>

Full Cost of Electricity Provision (e.g. LCOE)



Plant-level production
costs at market prices

Grid-level
costs at the
system level

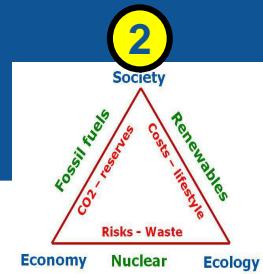
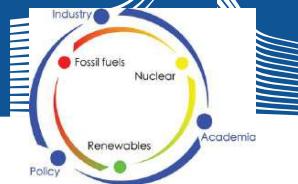
Full costs including
all external costs
regarding emissions,
land-use, climate
change, security of
supply etc.

$$LCOE = \frac{\text{TOTAL LIFECYCLE COST}}{\text{TOTAL LIFETIME ENERGY PRODUCTION}}$$

expressed in dollars per kilowatt-hours (\$/kWh)

$$\text{Levelized cost of electricity} = \frac{\text{Investment cost}}{\text{Years of operation}} + \frac{\text{Maintenance cost}}{\text{Annual energy output}} + \text{Cost for energy storage (balancing)}$$

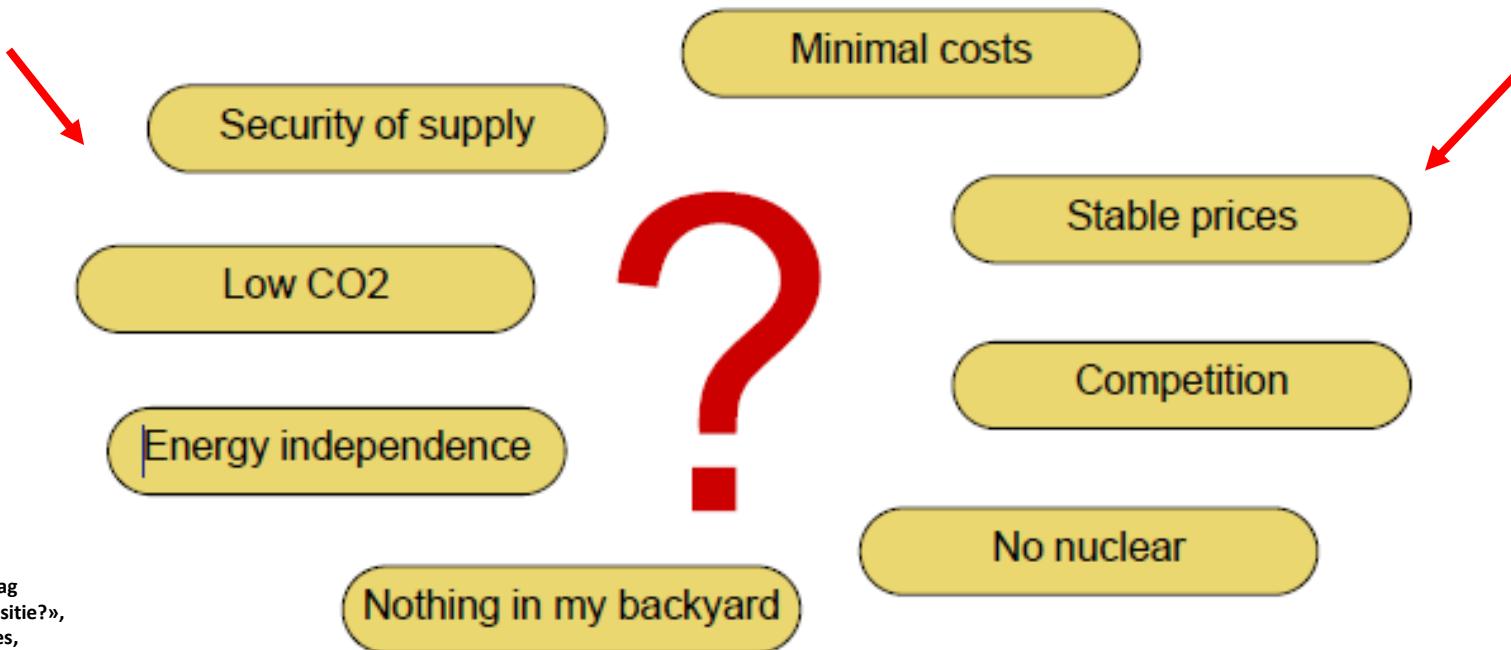
Energy Consensus Closer Than We Think ?



2

answer : not sure

"one of the root causes: we CANNOT have it all ! "



Source : The Boston Consulting Group - KBVE/SRBE Studiedag «Welke energietransitie?», Palais des Académies, Brussels, May 8th, 2014

« Les écologistes devraient plaider pour un maintien des investissements dans le nucléaire. ...

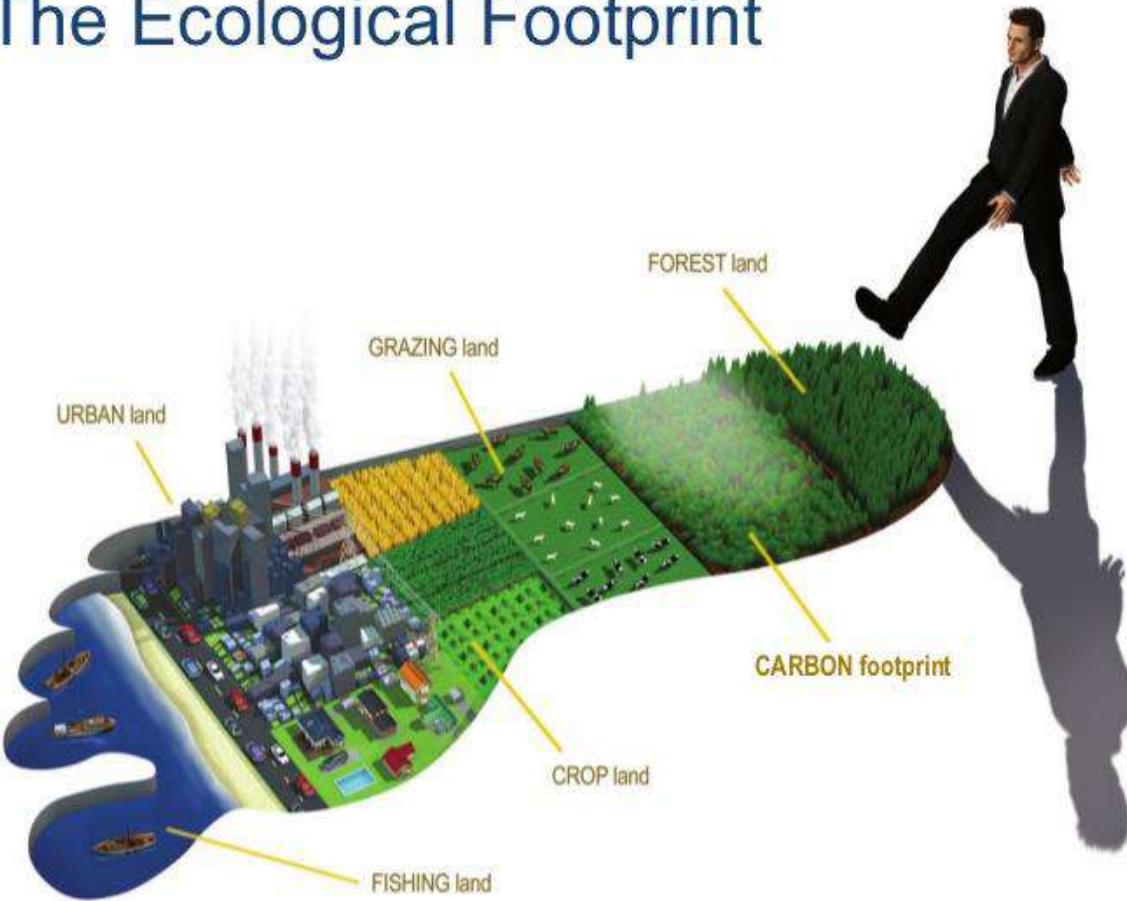
Une dénucléarisation va de pair avec un retour à l'énergie fossile, et par conséquent, à une augmentation des émissions de CO2. »

Maarten Boudry, philosophe, 3 février 2018, journal « De Morgen »

<https://www.forumnucleaire.be/actus/nouvelle/interview-maarten-boudry-dans-de-morgen>

Primary sources in comparison : which one is the best ? (footprint)

The Ecological Footprint

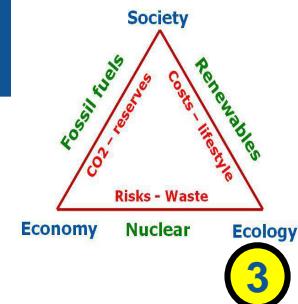


Primary sources in comparison

One question that is often asked is: Which one is the best ? As always, it depends on circumstances such as geographic location, availability of space, capital costs, operational costs, and environmental concerns. Hence, energy technologies do not necessarily compete with each other purely based on carbon footprint or price /i.e. : Capital Cost [\$/kW] ; Levelised cost of energy [\$/kWh]/.

Other rough comparison criteria (not exhaustive list of “footprints”) :

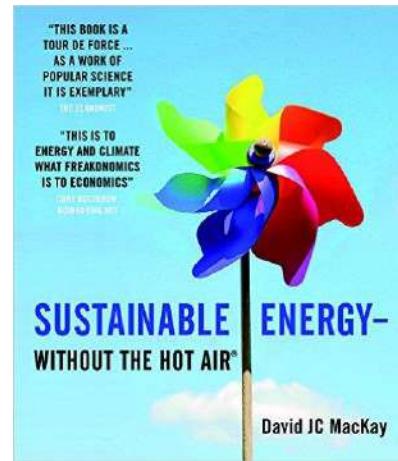
Conversion Process (e.g. turbine) ; Where ? (e.g. few locations worldwide) ; Installed Base (e.g. 20 GW) ; Capacity Factor (e.g. 25%) ; Power depends on (e.g. annual radiation) ; Land use - Annual energy (kWh/m²) ; Power density of the source (W/m²)



The ecological footprint is the developed method in which humanity measures the way in which Earth is affected by the human activities which use resources in comparison to the amount of waste that accumulates.

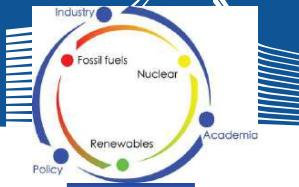
The categories included within the ecological footprint include the carbon footprint (which conceives energy), the built-up land (which conceives settlements), forests (which conceive timber and paper), croplands and pastures (which conceive food and fiber), and fisheries (which conceive seafood).

(<https://www.theodysseyonline.com/progressive-hopes-for-the-ecological-footprint>)

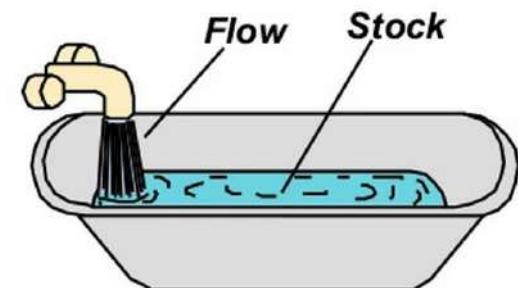


"Sustainable Energy: Without the Hot Air"
Sir David Mackay, 2009, UIT Cambridge
(download pdf file for free / read translations
in 15 languages thanks to kind volunteers)
Go to: www.withouthotair.com

Consequences of COP-21: alliance between Renewables and Nuclear

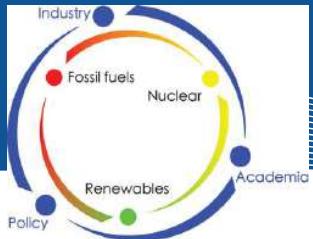


Low carbon intermittent renewables need a stable low carbon base



Jean-Bernard Lévy (CEO and chairman of EDF): la COP 21 débute dans quelques jours ; quels sont les objectifs du premier électricien nucléaire mondial en matière d'énergies renouvelables ? (27/11/2015)

« EDF est engagé depuis toujours dans la lutte contre le changement climatique, grâce à un mix énergétique à 98% sans CO₂. Le développement des énergies renouvelables associé à une production nucléaire stable et sûre, est le moyen de parvenir à un nouvel équilibre du mix de production d'EDF, véritable atout de la transition énergétique et de la lutte contre le changement climatique.



« Vers une économie décarbonée »

1 – Brève histoire : du feu primitif à l'électricité

2 – Le cap : UN-Agenda 2030 et «triangle énergétique européen»

3 – Invariants (sciences de la nature) et contraintes (EU Triangle)

4 - Faits et chiffres : démographie, climat, politiques énergétiques

5 - Défis technologiques et humains (incertitudes) : stockage, etc

6 – Conclusion : recherche, innovation et formation

* Responsibility for the information and views set out in this Collège Belgique course lies entirely with the author *

* Reproduction of the texts of this course is authorised provided the source is acknowledged *

Social Media and Society: The Good, The Bad and The Ugly



Energy, Heat, and Work (human mechanical power = 100 W)



Enérgieia - ἐνέργεια - « force en action » en grec ancien

Ascension du Mont Blanc

- Hauteur $h = 3800 \text{ m}$
- Homme $m = 70 \text{ kg}$
- Gravitation $g = 9.81 \text{ m/s}^{**2}$

=> **Energie d'ascension :** $h \times m \times g = 2.6 \text{ MJ}$ (approx. 0.7kWh)

⇒ **Puissance « mécanique Homme » (7 heures ascension) = 100 W**

Remember : The mechanical horsepower, also known as imperial horsepower, is approximately equivalent to 745.7 watts.

**Reminder : mechanical output of human body
= around 100 kWh per year**

=> **100 TWh / an pour besoins électriques en Belgique en 2040**
<= >100 esclaves énergétiques / habitant, an

(Rappel : 1 Tera vaut un million au carré, soit un million de millions / $T = 10^{**12}$)

Transitions between potential and kinetic energy are such an intimate part of our daily lives that we hardly give them a thought.

It happens in walking as the body moves up and down. Our bodies utilize the chemical energy in glucose to keep us warm and to move our muscles.

In fact, life itself depends on the conversion of chemical energy to other forms.

**Energy is conserved:
it can neither be created nor destroyed.**

So when you go uphill, your kinetic energy is transformed into potential energy, which gets changed back into kinetic energy as you coast down the other side. And where did the kinetic energy you expended in peddling uphill come from? By conversion of some of the chemical potential energy in your breakfast cereal.

Source: National Science Foundation - LibreTexts library
https://chem.libretexts.org/Core/Physical_and_Theoretical_Chemistry/Thermodynamics/Chemical_Energetics/Energy%2C_Heat%2C_and_Work

MIEUX COMPRENDRE LE PRIX DE L'ÉLECTRICITÉ

QUE FAIT-ON AVEC UN KILOWATT-HEURE ?

kWh – kilowatt-heure

C'est l'unité de mesure de l'énergie. Elle est souvent confondue avec le watt (W). Le watt est une unité de mesure de puissance mécanique ou électrique. Le kilowatt-heure est une unité de mesure d'énergie correspondant à l'énergie consommée en une heure par un appareil de 1 000 watts.

Concrètement, 1 kWh c'est...

une ½ heure
de sèche-cheveux



1 heure de fonctionnement
d'un radiateur de 1 000 W

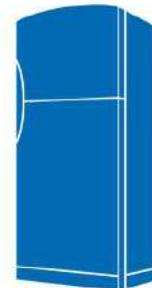
un cycle de lave-linge



3 à 5 h de télévision



1 journée de réfrigérateur



1 à 1,5 jour d'éclairage
dans un logement



4 mois environ
de smartphone



Le kilowatt-heure (kWh) est l'unité servant à mesurer la consommation d'un appareil. 1 kilowatt-heure correspond à l'énergie consommée par un appareil de 1.000 watts pendant une heure. Le watt est ainsi la puissance d'une machine qui fournit un joule toutes les secondes alors que le watt-heure est l'énergie fournie en une heure par une machine de 1 watt.

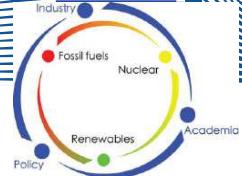
Les dépenses énergétiques des différents appareils utilisés par les ménages au quotidien (ménagers, d'éclairage, informatiques...) ne sont pas équivalentes.

Certains appareils consomment en effet bien plus d'énergie que les autres.

Avec 1 kWh, on peut ainsi alimenter en électricité un réfrigérateur pendant une journée entière alors qu'on ne peut faire fonctionner un radiateur de 1.000 watts que pendant une heure.

Deux domaines de « quasi-certitude » 1/2

(1) accroissement de la population mondiale



(4.1) L'accroissement de la population mondiale restera massif (10 milliards en 2050 contre 7,5 aujourd'hui)

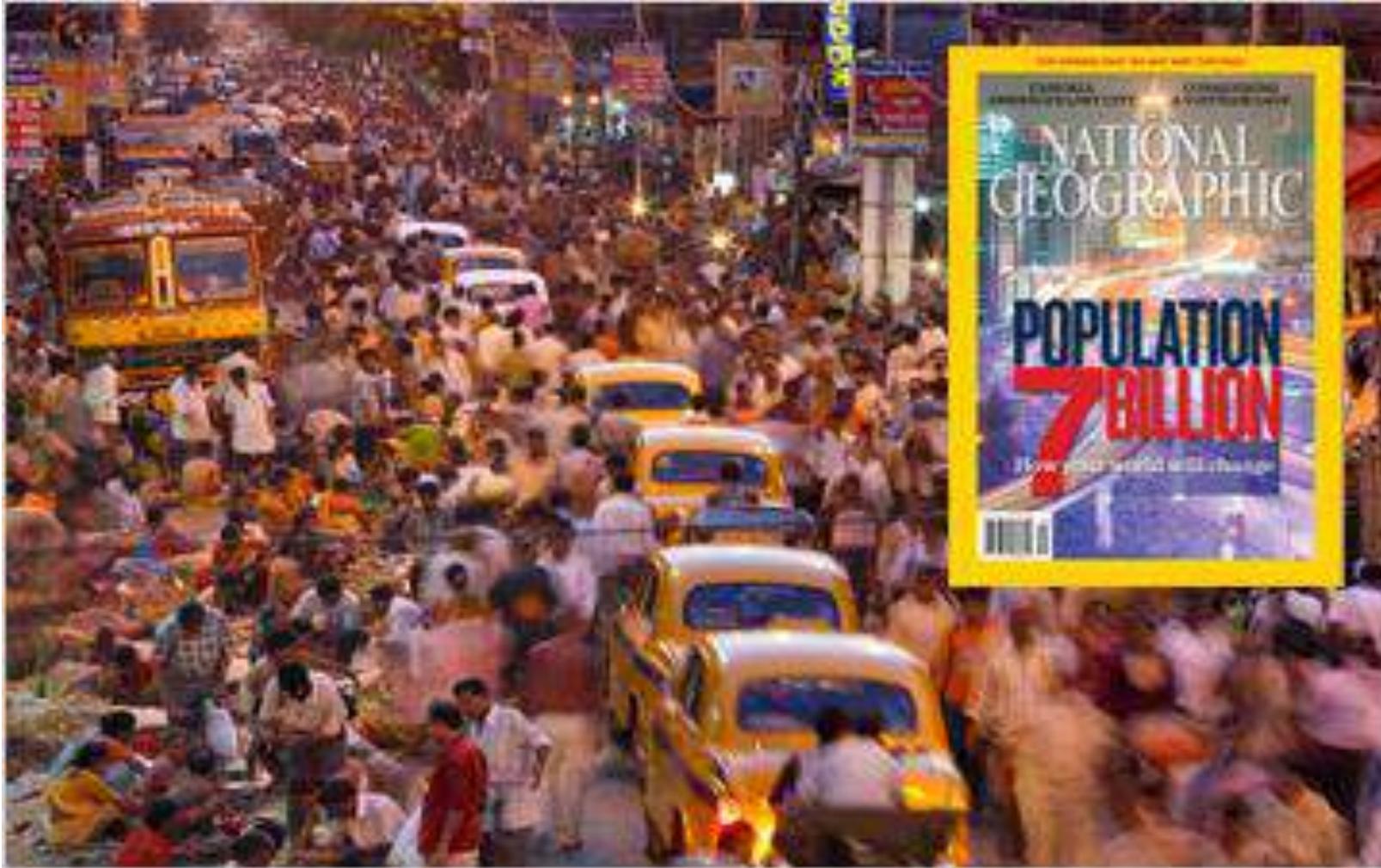
- **dix milliards d'habitants en 2050, deux et demi de plus qu'aujourd'hui, avec en particulier une explosion en Afrique (+ augmentation de la classe moyenne et des habitudes de consommation axées sur celles des pays riches).**

La population mondiale a besoin et a droit à un système énergétique moderne (basé, en particulier, sur un accès universel à l'électricité et aux transports).

- **forte urbanisation: le taux mondial, de 54% aujourd'hui, devrait dépasser 65% en 2050, soit un accroissement de 2,5 milliards de citadins, portant à 6 milliards la population totale vivant dans des agglomérations.**

Plus des deux tiers de l'énergie mondiale sera consommée dans les villes.

- = > ***Le développement de l'humanité (en particulier, dans l'hémisphère Nord) a reposé sur des sources d'énergie abondantes et bon marché mais souvent polluantes.***
- = > ***L'humanité saura-t-elle procéder en douceur à la transition vers un système plus respectueux de l'environnement et une croissance plus inclusive mais à énergie chère ?***



"National Geographic", Jan 2011 issue

The human population is going to cross the 7 Billion mark some time this year (2011), and it is in a trend of continuous growth towards 9 Billion mark in the next 30 over years!

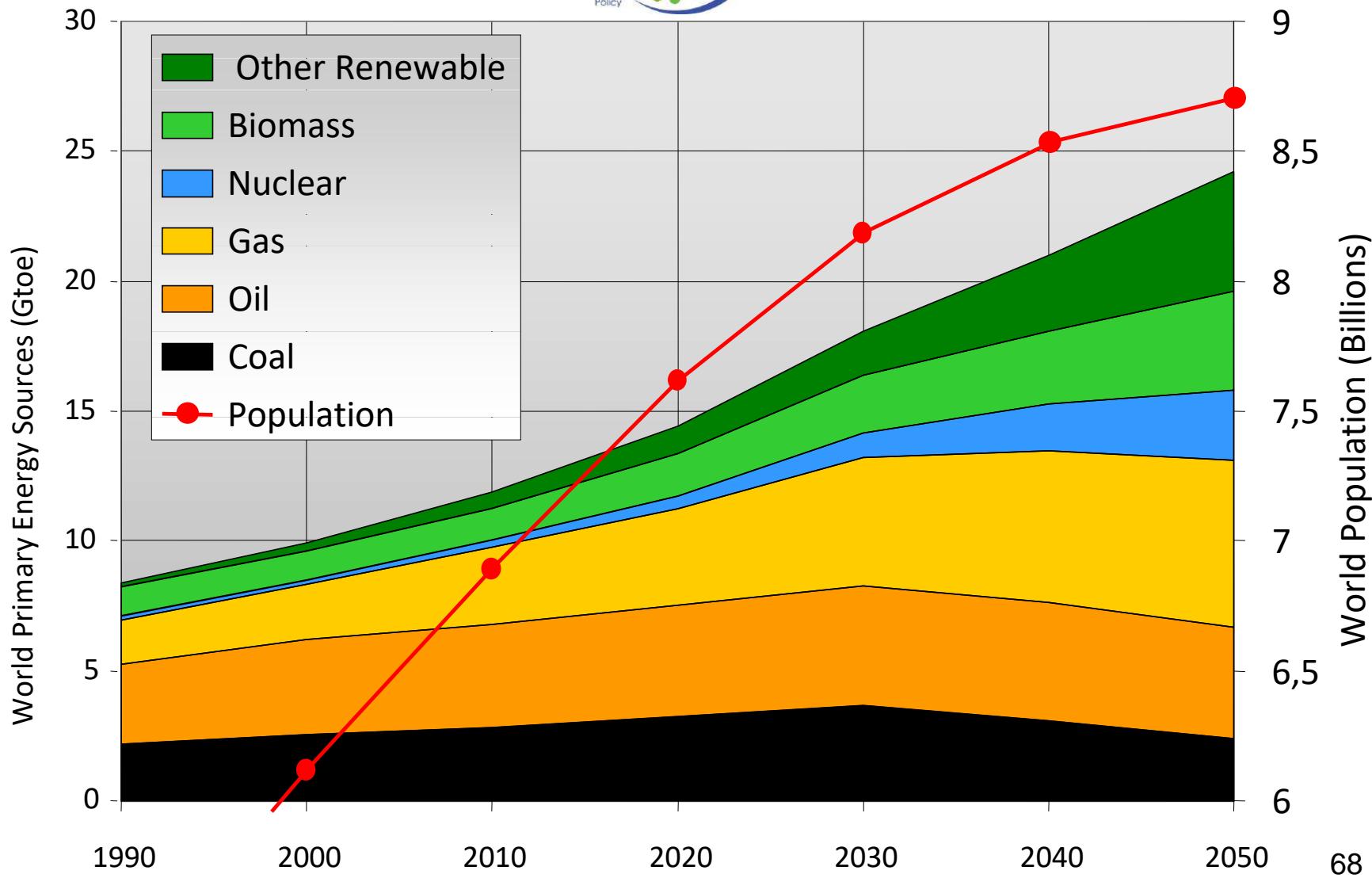
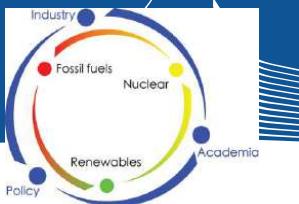
Does this planet earth still has enough natural resources to sustain such growth in a peace and harmony way?

NB: human population was 1 billion in 1800, 2 billion in 1930, 3 billion in 1960

(Source: United Nations and US Population Reference Bureau, Washington

<http://www.prb.org/Publications/DataSheets/2016/2016-world-population-data-sheet.aspx>)

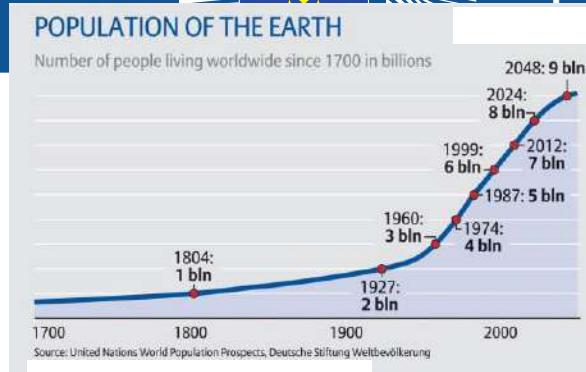
Energy sources (diversified energy mix) and world population: 1990 - 2050



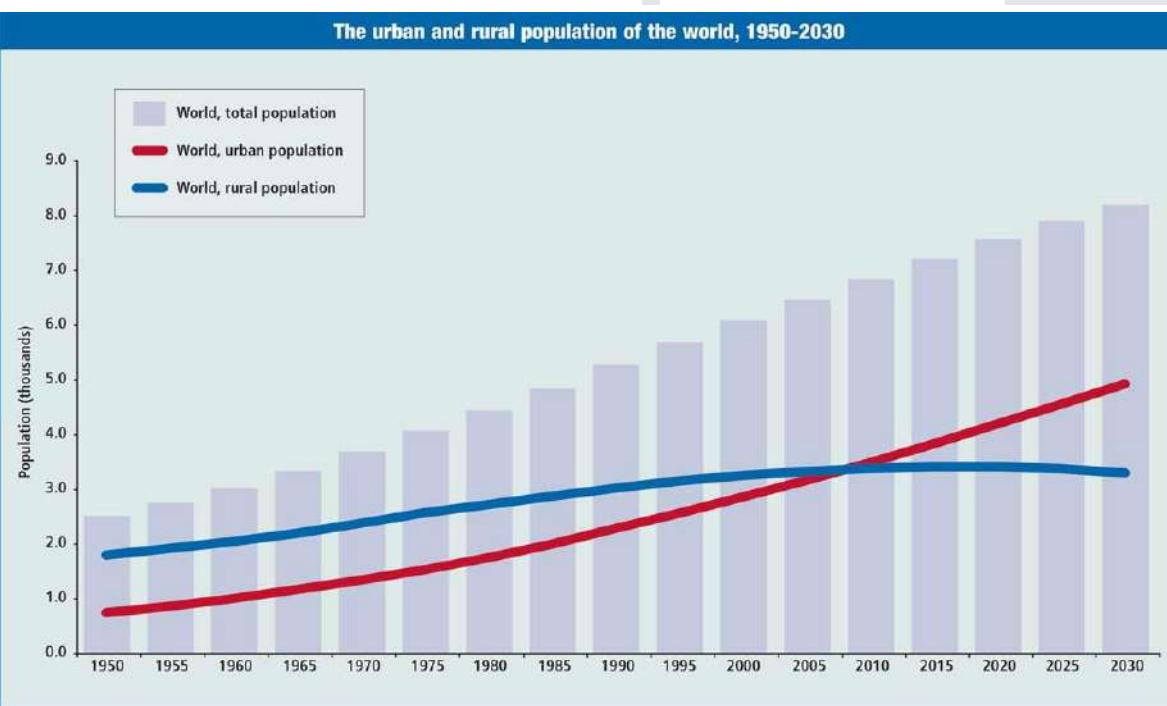
Source IEA : Energy to 2050 - Scenarios for a Sustainable Future

World Urbanization Prospects (urban and rural) 1950 - 2030

("environ en 2010, nous sommes sortis du Néolithique", Michel Serres, 2013)



The urban and rural population of the world, 1950-2030



The twentieth century witnessed the rapid urbanization of the world's population. The global proportion of urban population increased from a mere 13 per cent in 1900 to 29 per cent in 1950 and, according to the 2005 Revision of World Urbanization Prospects, reached 49 per cent in 2005. Since the world is projected to continue to urbanize, 60 per cent of the global population is expected to live in cities by 2030. According to the latest United Nations population projections, 4.9 billion people are expected to be urban dwellers in 2030. (<http://www.un.org/esa/population/publications/WUP2005/2005wup.htm>)

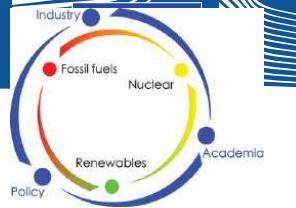
Michel Serres, philosophe des sciences (1930 -) :

« Nous traversons la plus importante mutation depuis la préhistoire ! »

« Le premier changement qui me paraît le plus important dans le siècle qui précède, c'est le fait que nous étions 79% de paysans et aujourd'hui 1,1% seulement. Nous étions des paysans depuis le Néolithique et nous ne le sommes plus du tout. » dans « Biogée », 2013,
<http://www.cles.com/enquetes/article/michel-serres-nous-traversons-la-plus-importante-mutation-depuis-la-prehistoire>

Deux domaines de « quasi-certitude » 2/2

(2) changement climatique et pollution de l'air en ville => électrification massive



(4.2) Le climat change de façon beaucoup plus rapide et plus perturbante que prévu. Son corollaire, la pollution de l'air en ville est une préoccupation environnementale et économique majeure

- La lutte contre les émissions de gaz à effet de serre est non seulement un impératif, mais aussi une urgence, selon des approches bien sûr différentes selon les situations du Nord au Sud. Pour rester sous les 2°C en 2100, il faudrait atteindre « zéro émission nette de CO₂ » en 2050, c'est-à-dire un équilibre entre ce qui est émis et ce qui peut être absorbé notamment par les océans et les forêts. L'objectif de rester sous les 2°C en 2100 est extrêmement ambitieux et coûteux.
- Les pays émergents, Chine hier, Inde aujourd'hui, Afrique demain, ont soif d'énergie bon marché mais la pollution galopante (surtout l'air dans les grandes villes) et ses conséquences sur les individus les conduisent à la sagesse en matière de choix de politiques et technologies énergétiques.
- Les ressources en énergie fossile ne vont pas manquer. C'est la conséquence des récentes découvertes d'hydrocarbures non conventionnels mais aussi de l'inflexion de la courbe de demande, sous l'effet des politiques d'efficacité énergétique et de développement des énergies renouvelables.

=> *Le moteur des développements dans le domaine de l'énergie sera la décarbonation de l'économie.*

=> *En particulier, l' **électrification massive** à partir de sources décarbonées sera la parade principale à la pollution de l'air dans les villes : cela rendra les villes à la fois plus respirables, saines, climatisées, mais aussi circulantes, communicantes et résilientes.*

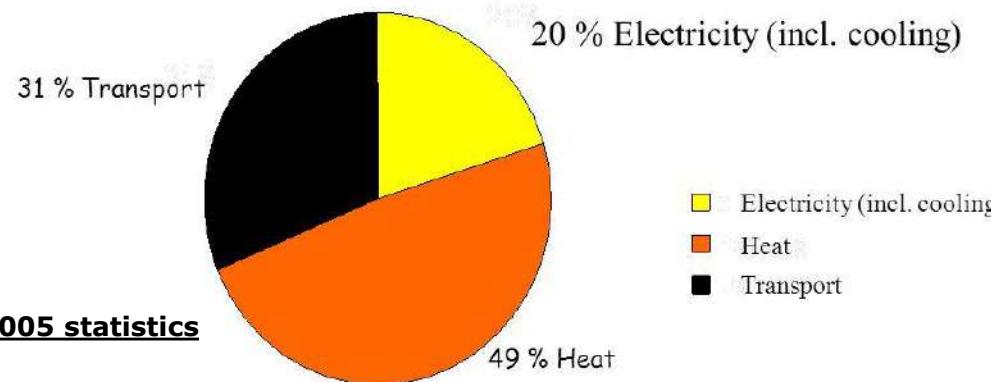
Decarbonisation of the energy system by 2050 (EU Energy Roadmap 2050)

=> electricity more than doubling its share in final energy demand

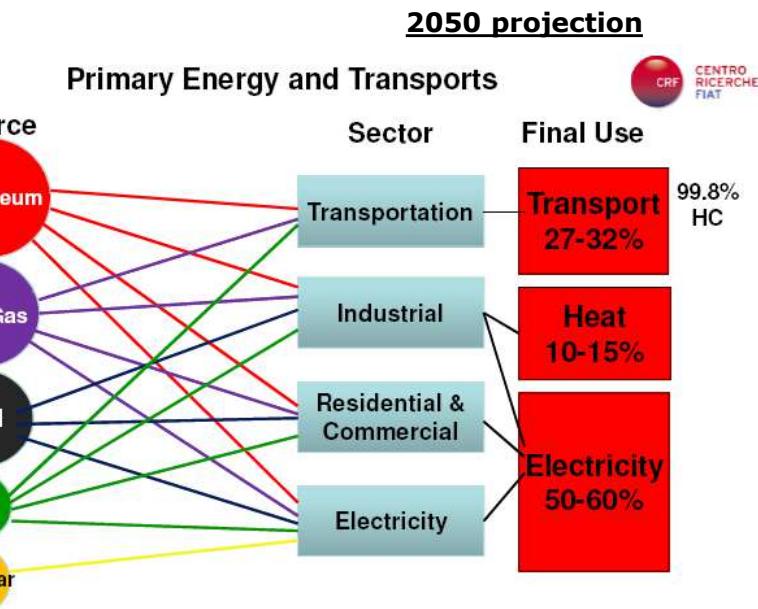


EREC

Final Energy Consumption by Sector EU-25



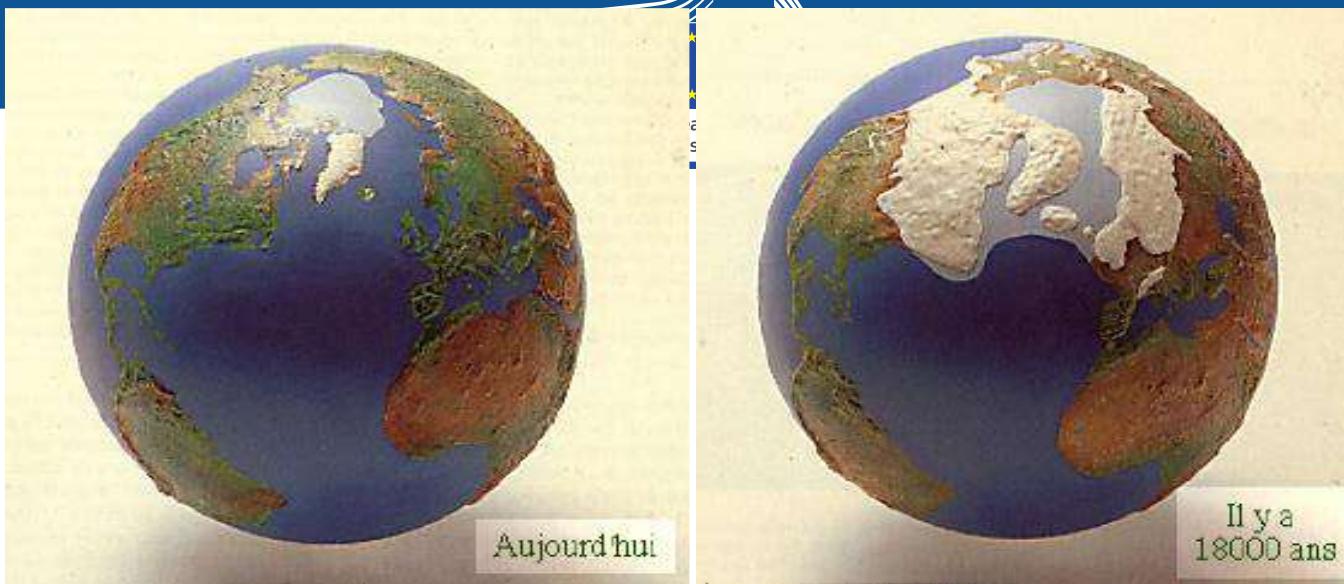
Source: Eurostat figures elaborated by EREC



Projection until 2050 – “Electricity will play a central role in the low carbon economy” => What really matters is the final use. With the advent of e-mobility from 2025 most primary energy will be converted into electricity > 70 % (FIAT Group)

Source: Electromobility WG in ARTEMIS Joint Undertaking ("Advanced Research & Technology for EMbedded Intelligence and Systems" - <http://www.artemis-ia.eu/project/index/view?project=49>)

Climat d'hier à demain



- Pre-industrial CO₂ = 280 ppmv / - 2000 AD CO₂ = 370 ppmv
- 2011 AD CO₂ = 391 ppmv (i.e. 40 % > pre-industrial level)

(IPCC 2014 report - http://www.ipcc.ch/pdf/assessment-report/ar5/syr/AR5_SMR_FINAL_SPM.pdf)

Source: "Climat d'hier à demain", Ed. du CNRS, 2000, 143 p. (<http://www2.cnrs.fr/en/35.html>), Sylvie Joussaume, directrice du Département des sciences de l'Univers et de l'Institut national des sciences de l'Univers (= prix Jean-Rostand 1994 du meilleur ouvrage de vulgarisation scientifique)

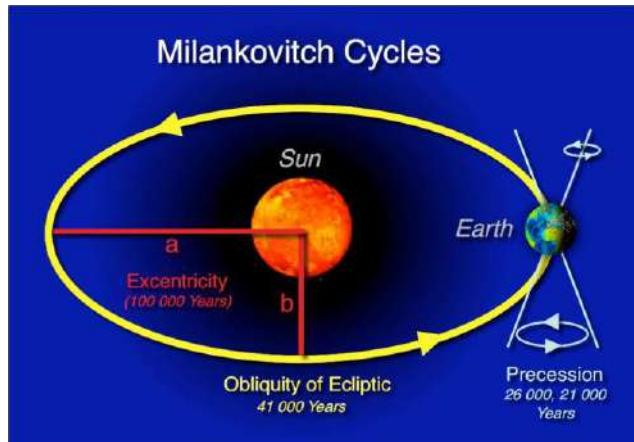
La théorie de Milutin Milankovitch, élaborée en 1941, rend compte de l'alternance des cycles glaciaires et interglaciaires durant le Quaternaire. Une glaciation se produit lorsque les hautes latitudes de l'hémisphère nord reçoivent un minimum de rayonnement solaire durant l'été.

Trois paramètres astronomiques jouent un rôle important dans la distribution de l'insolation sous les hautes latitudes :

- (1) l'excentricité de l'orbite terrestre (période d'environ 100 000 ans),
- (2) l'inclinaison de l'axe de rotation de la Terre par rapport au plan de l'écliptique (période d'environ 41 000 ans)
- et (3) la précession de l'axe des pôles (période d'environ 22 000 ans).

$$\Delta T = -5^\circ\text{C} / \Delta \text{sea level} = -130 \text{ m}$$
$$\Delta \text{ice volume} = +52\,106 \text{ km}^3 / \text{CO}_2 = 200 \text{ ppmv}$$

Rappel: ppm (parties par million) est le ratio du nombre de molécules de gaz sur le nombre total de molécules d'air sec. Par exemple, 300 ppm signifie 300 molécules de gaz pour un million de molécules d'air sec.



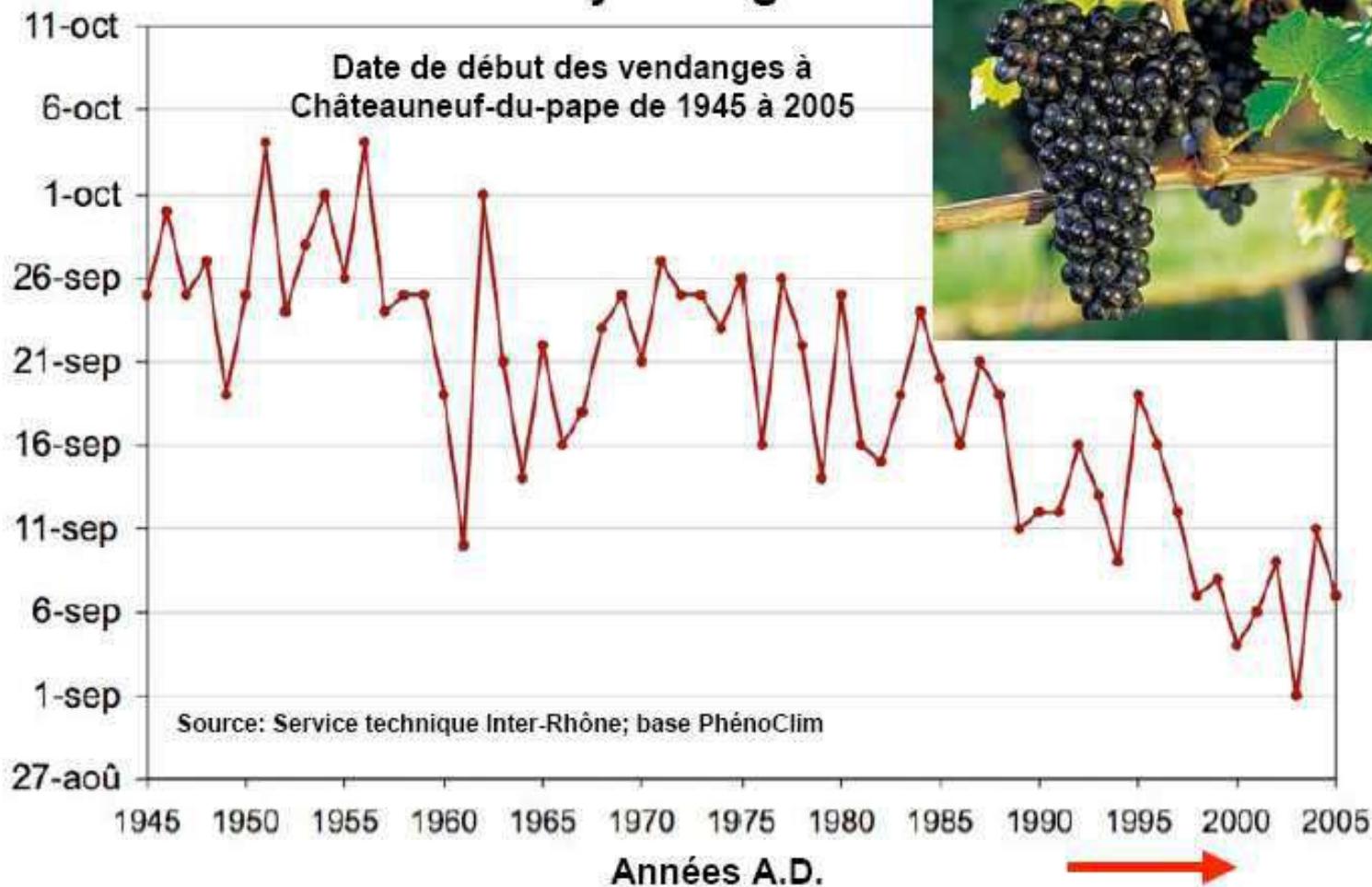
La théorie astronomique de Milankovitch explique de façon satisfaisante les grandes variations climatiques des cycles glaciaires.

Par exemple, il y a 18 000 ans, la dernière grande glaciation de l'Amérique du nord avait atteint son apogée et la région de Montréal était alors recouverte par 2 kilomètres d'épaisseur de glace.

(voir André Berger 2004 - <http://www.em-consulte.com/en/article/25548>
- voir également : <https://www.futura-sciences.com/planete/definitions/climatologie-cycle-milankovitch-13390/>

Le réchauffement global est réel

Changements écologiques : avancement du cycle végétatif

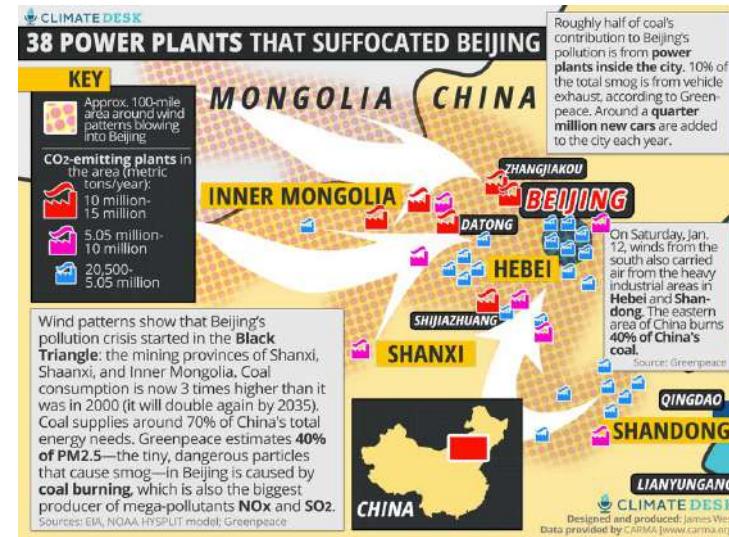


Air pollution in China has turned into a major social problem



Three factors are contributing to the air pollution problem in China:

- **Coal for industry:** China is one of the leading countries in some of the most polluting and energy-intensive industries, such as cement, iron and steel and mining. China burns coal to produce most of its electricity (more than 65% of its energy mix and 80% of its electricity are coal-derived).
- **Coal for heating:** China also uses coal to heat up water used for district-heating during winter and many small houses that do not have access to district-heating systems (like those in Beijing's Hutongs) also use coal.
- **Transportation:** China has had an amazing expansion of its total number of cars and flights, which undoubtedly contribute to the air pollution problem. Urbanization in China and middle class consumption modes are developing in an extremely high speed.



EU Energy Roadmap 2050 (COM(2011)) : ambitious decarbonisation policy (reducing greenhouse gas emissions to at least 80 % below 1990 levels by 2050)

EU Energy Roadmap 2050 (COM(2011) 885 Brussels, 15.12.2011 (*)

As a result, the EU is committed to reducing greenhouse gas emissions to at least 80 % below 1990 levels by 2050 in the context of necessary reductions by developed countries as a group, while at the same time ensuring security of energy supply and competitiveness.

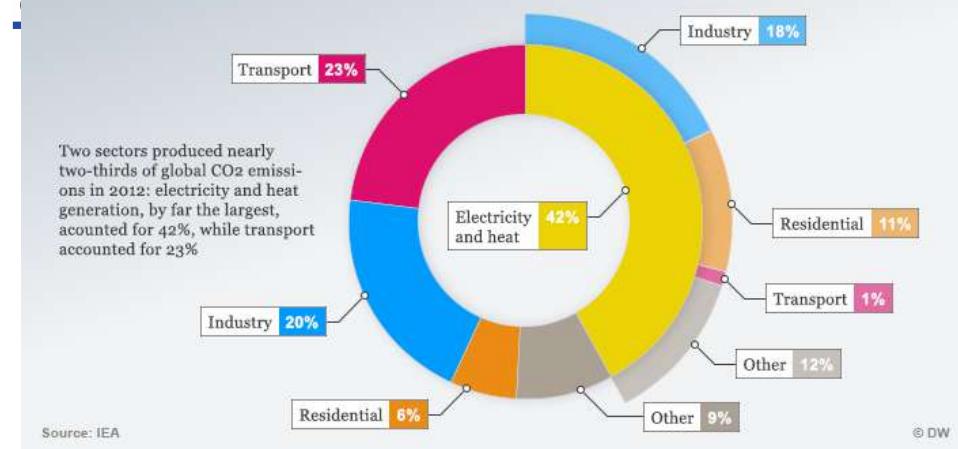
This ambitious decarbonisation policy objective is aligned with the *5th Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC – 2014 - **)*: upper targets of 440 ppm CO₂ and 2 °C; 50 % GHG reduction world-wide and 60 to 80 % in OECD countries).

Two excerpts of the 2014 IPCC document:

“Zero- and low-carbon energy supply includes renewables, nuclear energy and fossil energy with carbon dioxide capture and storage (CCS) or bioenergy with CCS (BECCS).” (p 23)

“Scenarios that are likely to maintain warming at below 2 °C include more rapid improvements in energy efficiency and a tripling to nearly a quadrupling of the share of zero- and low-carbon energy supply from renewable energy, nuclear energy and fossil energy with carbon dioxide capture and storage (CCS) or bioenergy with CCS (BECCS) by the year 2050.” (p 82)

World CO₂ emissions by sector



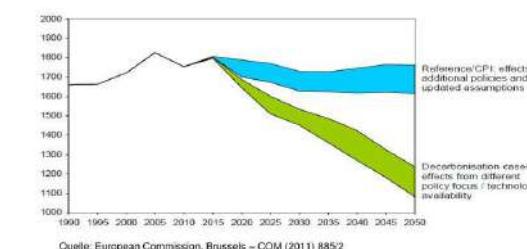
World CO₂ emissions by sector in 2012 (IEA)

NB: World-wide, net electricity generation is projected to increase 69% by 2040, from 21.6 trillion kWh in 2012 to 25.8 trillion kWh in 2020 and 36.5 trillion kWh in 2040. (“International Energy Outlook 2016” /IEO-2016/ Reference case)
https://www.iea.org/media/statistics/topics/emissions/CO2_Emissions_Overview.pdf



Energy Roadmap 2050

Graph 3: Gross energy consumption - range in current trend (REF/CPI) and decarbonisation scenarios (in Mtoe)



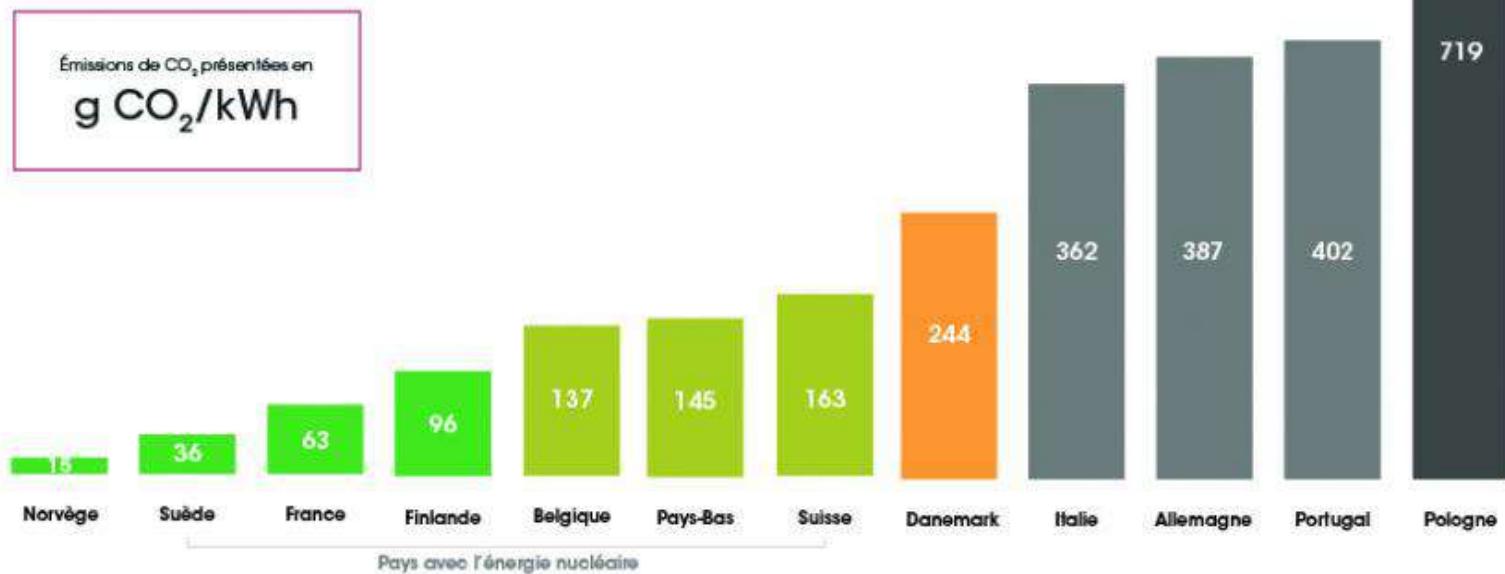
* Reference for EU: Roadmap 2050 (+ EU 27 Energy Figures) - http://ec.europa.eu/energy/energy2020/roadmap/index_en.htm

** Reference for IPCC: "IPCC, 2014: Climate Change 2014: Synthesis Report". Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), Geneva, Switzerland, 151 p

- http://www.ipcc.ch/pdf/assessment-report/ar5/syr/SYR_AR5_FINAL_full.pdf

Emissions de CO₂ eq par kWh produits par différents types de moyens de production d'électricité (2017)

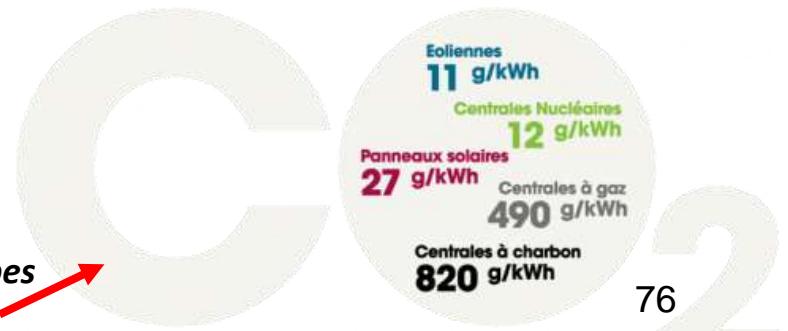
Source : « Electricity Map » | Emissions CO₂ de la consommation électrique en temps réel (gCO₂eq/kWh)
- <https://www.electricitymap.org/>



La présence de l'énergie nucléaire dans le mix énergétique signifie moins d'émissions de CO₂ (ex. : Belgique, France, Finlande et Suède). Avec notre mix énergétique actuel, la Belgique est bien partie pour réaliser les objectifs climatiques.

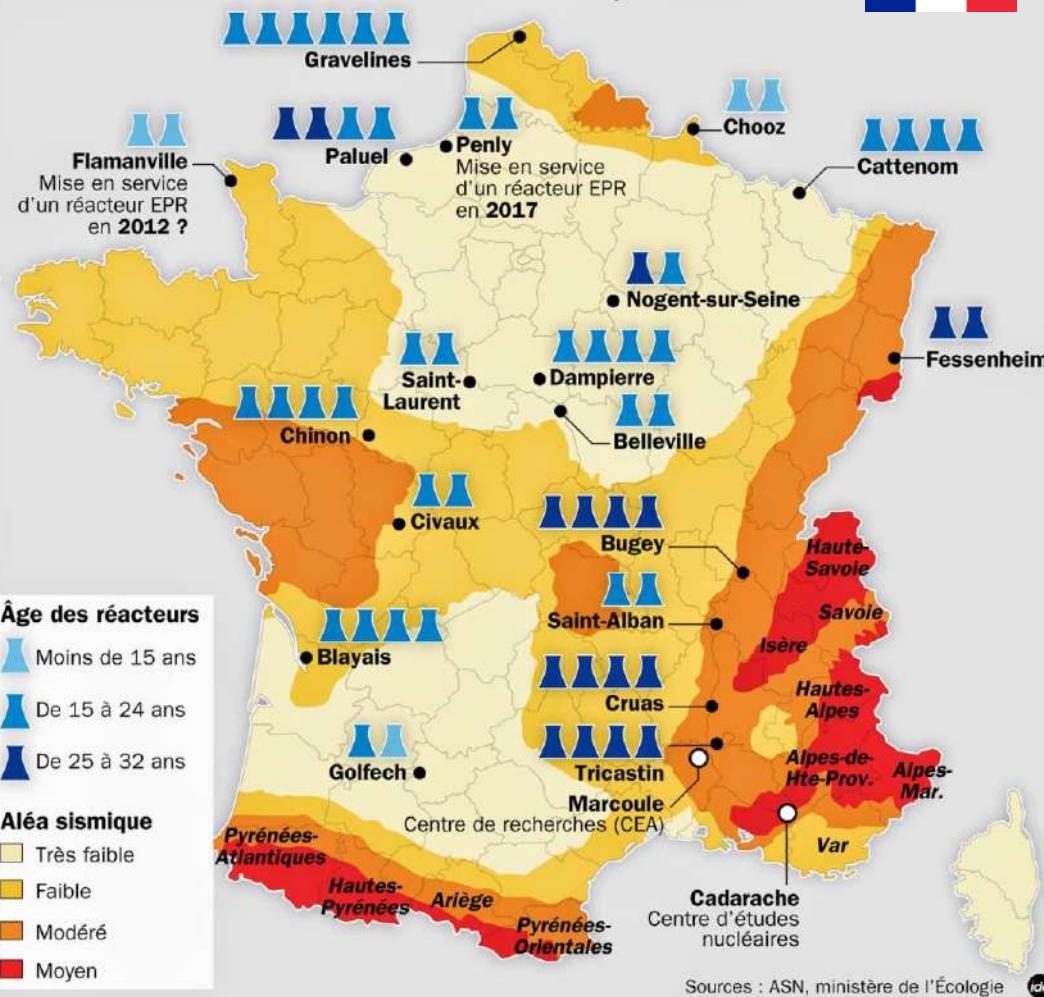
- <https://www.forumnucleaire.be/la-production-delectricite-et-les-emissions-de-co2-en-belgique>

Emissions de CO₂ par kWh produits par différents types de moyens de production d'électricité. Source: GIEC



How to keep the supply system stable and affordable with the rapid expansion of intermittent renewable energy sources ? (1/6)

Les centrales nucléaires françaises



In 2015, electricity production was 568 TWh (gross), and of this nuclear provided 437 TWh, hydro 59 TWh, coal and gas 32 TWh, and solar and wind 29 TWh.

After net exports of 64 TWh, total electricity consumption came to 422 TWh, about 6300 kWh per capita on average. Installed capacity at the end of 2015 was 129 GWe.

For France, it's Nuclear, Nuclear, Nuclear

France has 58 nuclear reactors operated by EdF, with a total capacity of 63.2 GWe, supplying 437 TWh of electricity in 2015.

- France derives about 75% of its electricity from nuclear energy, due to a long-standing policy based on energy security. This share may be reduced to 50% by 2025.
- France is the world's largest net exporter of electricity due to its very low cost of generation, and gains over €3 billion per year from this.
- The country has been very active in developing nuclear technology. Reactors and especially fuel products and services have been a significant export.
- About 17% of France's electricity is from recycled nuclear fuel.

Source: World Nuclear Association, October 2017

<http://www.world-nuclear.org/information-library/country-profiles/countries-a-f/france.aspx>

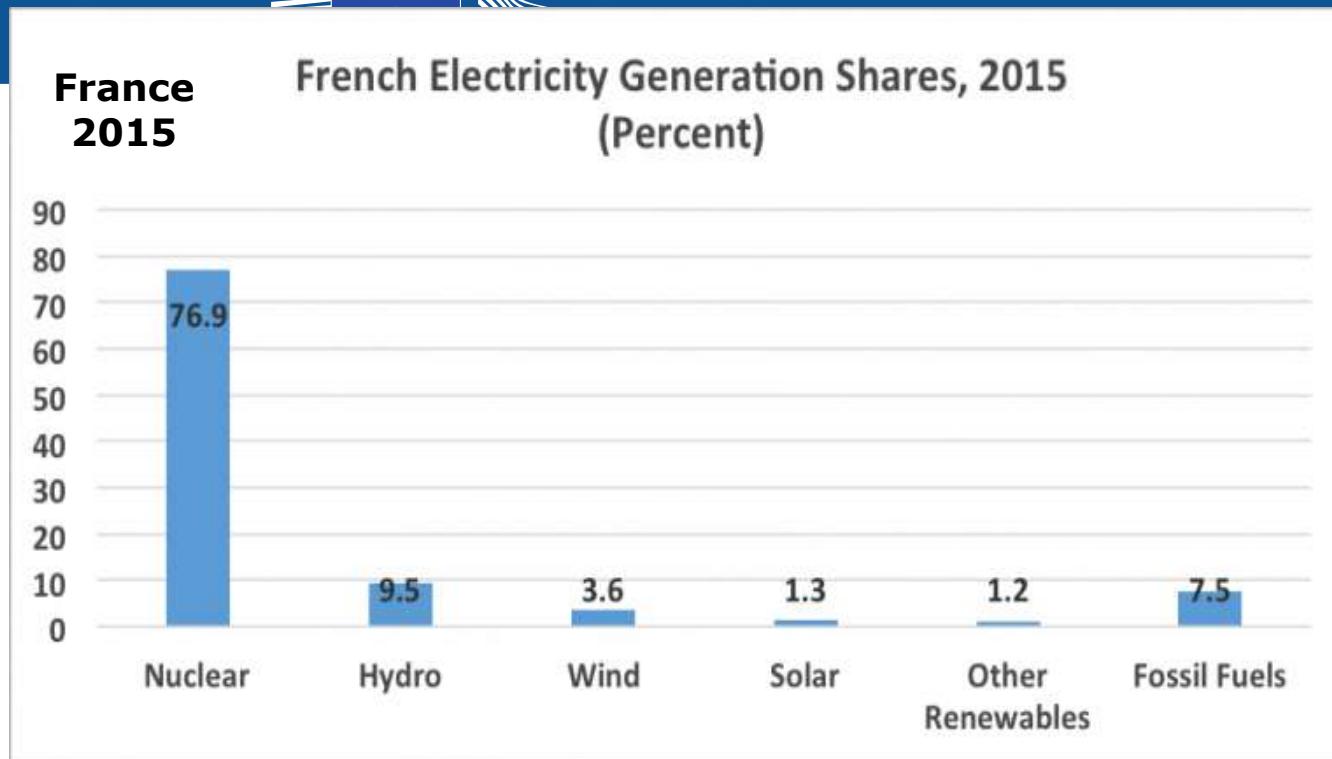
Voir également: « Les 7 conséquences de la politique énergétique allemande », Forum Nucléaire Belge, Bruxelles, séminaire 12 mai 2015 (<https://www.forumnucleaire.be/theme/energie/les-7-consequences-de-lenergiewende>)

How to keep the supply system stable and affordable with the rapid expansion of intermittent renewable energy sources ? (2/6)



France through nuclear

and Germany through coal



Note: Other renewables are geothermal, biomass, and other

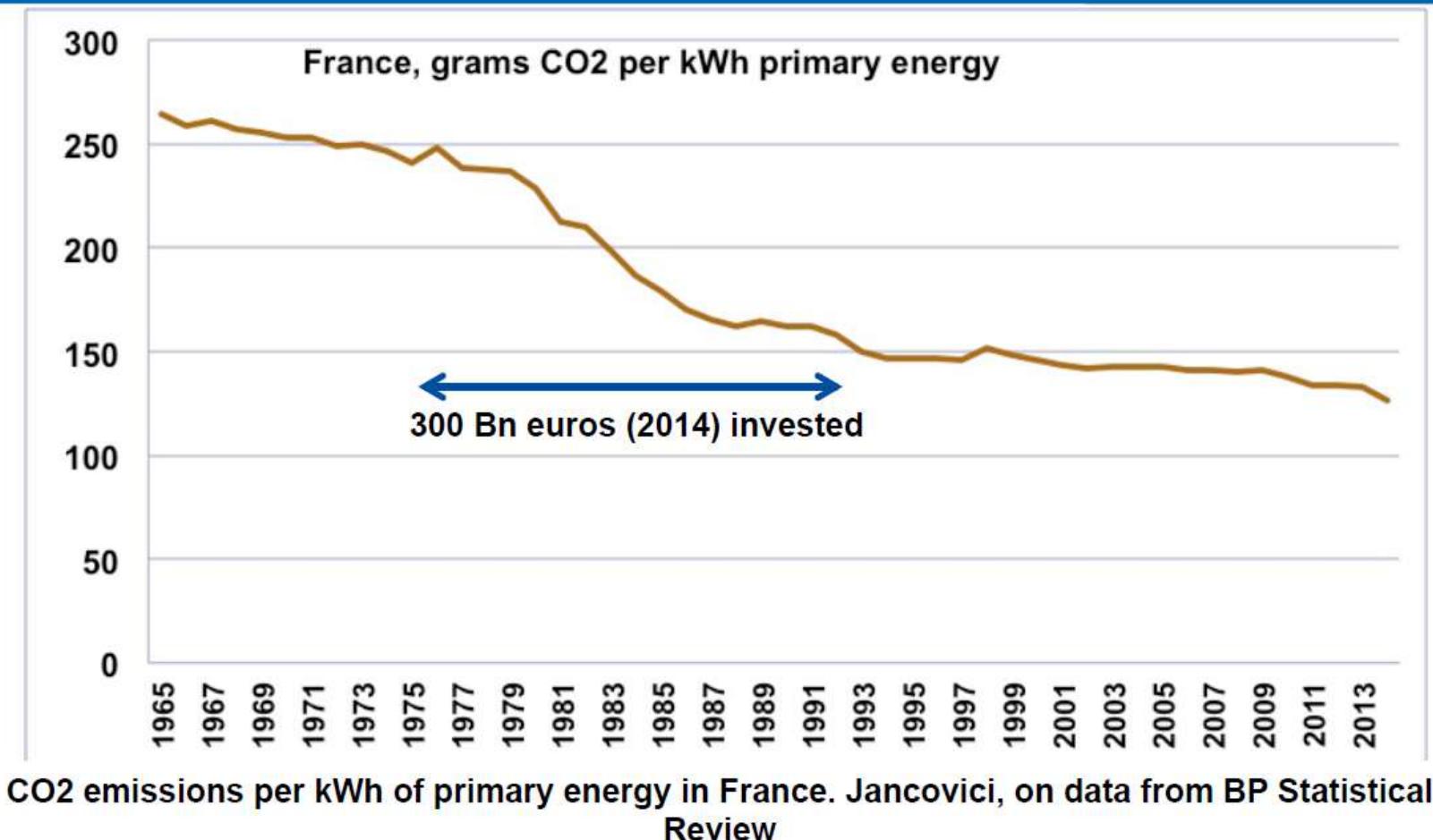
« Malgré des investissements énormes dans les renouvelables, seulement 46 % de l'électricité allemande sont issus de sources d'énergie propre, à comparer aux 93 % de la France ».

Coal is not going away in France and Germany as both countries need it to keep the lights on when nuclear units in France are down for inspection and as Germany's energy transition brings in intermittent renewable energy to replace its retiring nuclear units.

Source: BP Statistical Review, <http://www.bp.com/en/global/corporate/energy-economics/statistical-review-of-world-energy.html>

History : French (1975 – 1995) vs German (1995 – 2015) policies

I spend 300 billion € to decrease CO₂ emissions: 2nd option



How to keep the supply system stable and affordable with the rapid expansion of intermittent renewable energy sources ? (4/6)



New coal-fired power stations

Planned locations,
output in megawatts



Black
coal



Lignite

Germany opened over 10 GW of new coal fired power plants over the period 2011 – 2016.
<http://instituteforenergyresearch.org/analysis/france-germany-turn-coal/>

For Germany, it's Coal, Coal, Coal

"Germany's energy transition has also been a transition to coal:

Despite multi-billion subsidies for renewable energy sources, power generation from brown coal (lignite) has climbed to its highest level in Germany since 1990.

It is especially coal-fired power plants that are replacing the eight nuclear power plants that were shut down, while less CO₂-intensive, but more expensive gas-fired power plants are currently barely competitive.

Energy expert Patrick Graichen speaks of Germany's "energy transition paradox": the development of solar and wind farms, yet rising carbon dioxide-emissions."

(Die Welt, January 2014).

Source: « REAL CLEAR Energy » news, Jan 16, 2014
(http://www.realclearenergy.org/charticles/2014/01/16/germanys_plans_for_new_coal_plants_107463.html#.Utlp27WUXJ8.twitter)

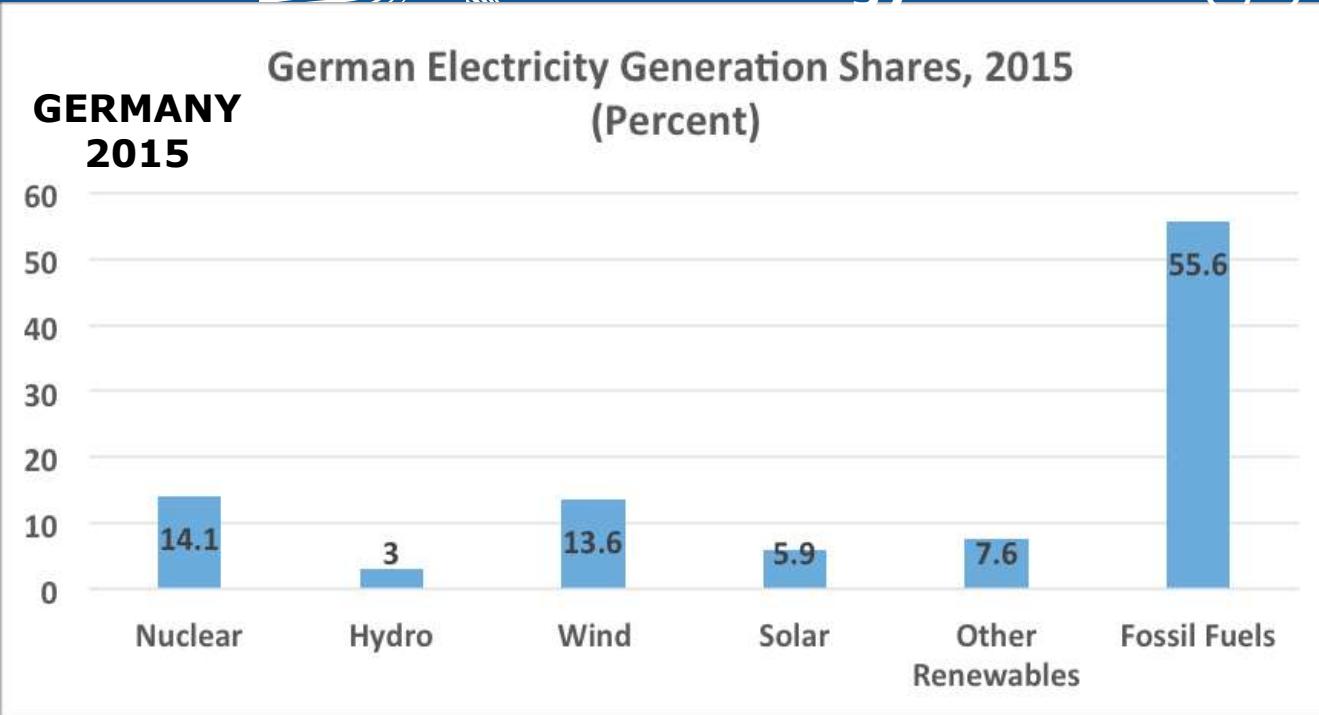
Germany's electricity production in 2016 was 648 TWh, with demand of 595 TWh and net export of 54 TWh. Of the total generation, lignite provided 150 TWh (24 %), hard coal 112 TWh (18 %), nuclear 85 TWh (14 %), gas 81 TWh (13 %), onshore wind 65 TWh (11 %), offshore wind 12 TWh (2 %), biomass 46 TWh (7.5 %), solar PV 38 TWh (6 %), hydro 21 TWh (3.5 %), and household waste 6 TWh (1 %).
(AG Energiebilanzen figures)

How to keep the supply system stable and affordable with the rapid expansion of intermittent renewable energy sources ? (5/6)



France through nuclear and

Germany through coal



Note: Other renewables are geothermal, biomass, and other

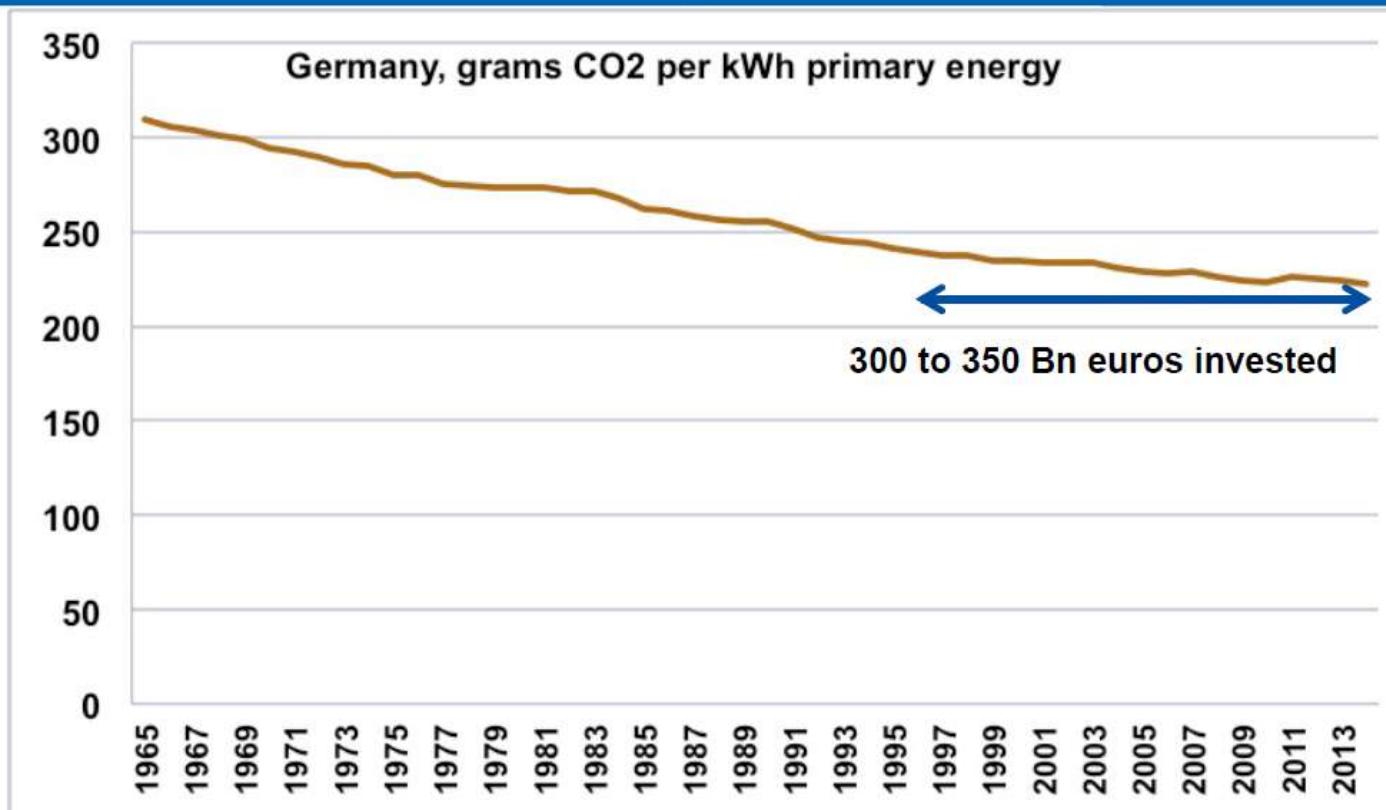
While Germany gets 27.3 percent of its generation from non-hydroelectric renewable energy, it is also heavily dependent on coal and natural gas for base-load power and to back up its intermittent wind and solar power, generating over 50 percent of its power from fossil fuels. (See chart above.)

Germany has over 20 gigawatts of lignite-fired electric generating capacity operating as of the beginning of 2015, generating about 25 percent of its electricity last year. It is Europe's most abundant and least-expensive domestic fuel, especially when located close to power plants. Germany also uses hard coal, which generated about 18 percent of its electricity

History : French (1975 – 1995) vs German (1995 – 2015) policies



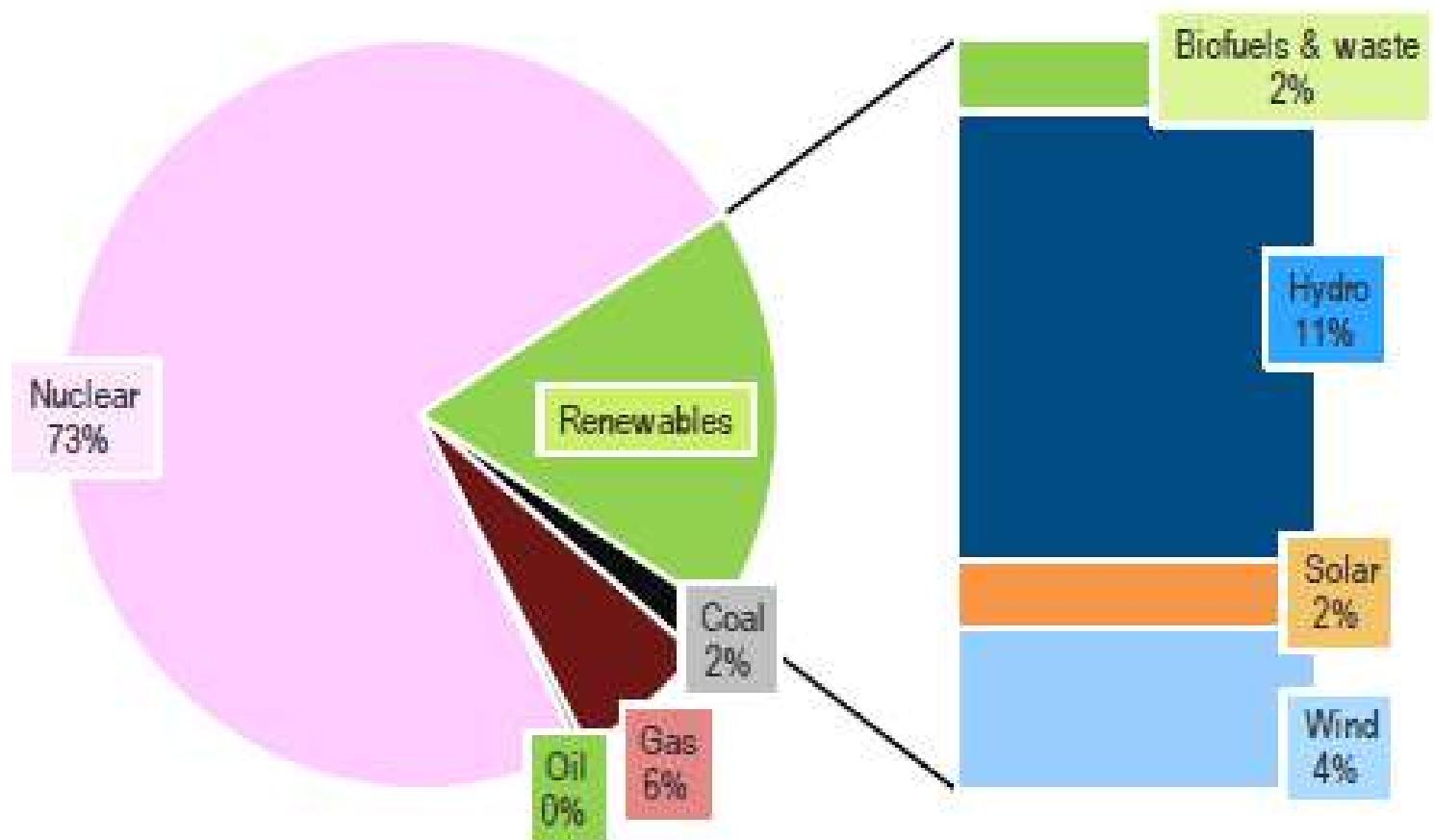
I spend 300 billion € to decrease CO₂ emissions: 1st option



CO₂ emissions per kWh of primary energy in Germany. Jancovici, on data from BP Statistical Review

ELECTRICITY GENERATION: 549.6 TWh

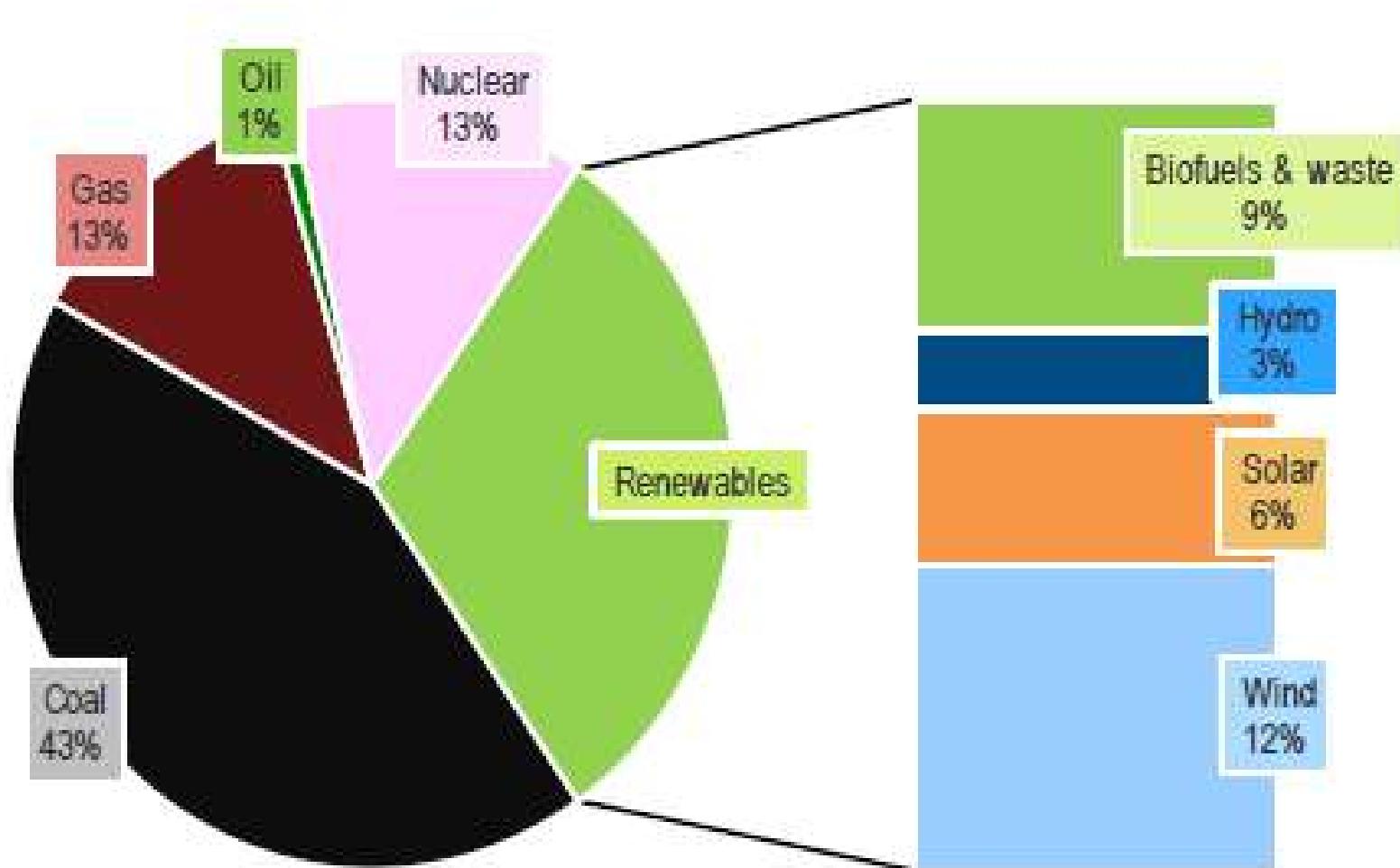
18% renewables (IEA average: 24%) and 73 % nuclear





ELECTRICITY GENERATION: 642.9 TWh

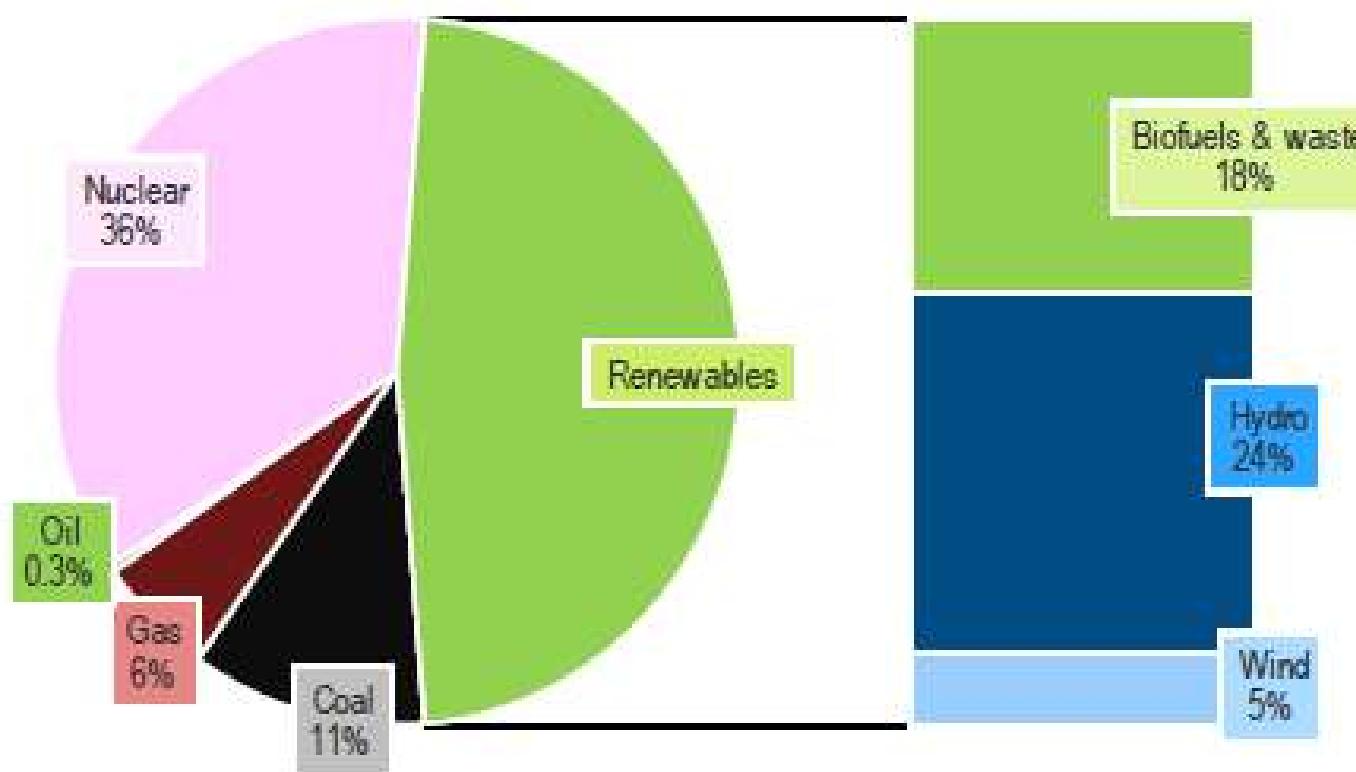
31% renewables (IEA average: 24%) and 56 % fossile fuels





ELECTRICITY GENERATION: 68.6 TWh

45% renewables (IEA average: 24%) and 36 % nuclear



In 2016, 47 per cent of Finland's electric power came from renewables, with 36 per cent coming from nuclear power.
More than 3/4 of the renewable energy comes from sustainable forestry and is produced in CHP plants.

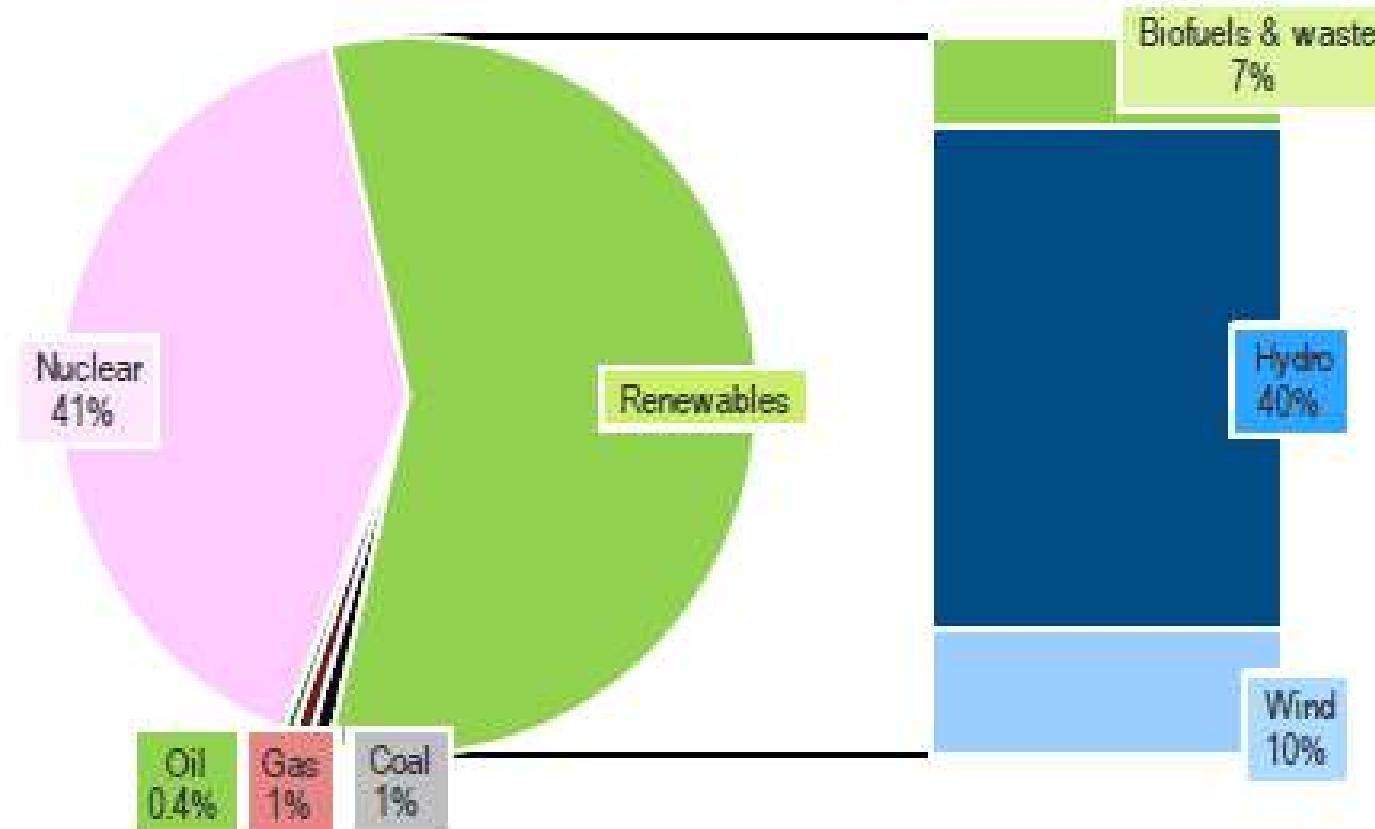
A system to store radioactive nuclear waste for 100 000 years.

Buried deep under an island in the Baltic, the world's first permanent nuclear-waste repository is nearing completion (operations to begin in 2023). Construction licence for final disposal facility ("Onkalo") of spent nuclear fuel was granted in November 2015 at the site of the Olkiluoto NPPs.



ELECTRICITY GENERATION: 154.8 TWh

57% renewables (IEA average: 24%) and 41% nuclear



7 oct. 2015 - The Prime Minister of Sweden has announced that his country will work towards becoming "one of the first fossil fuel-free welfare states in the world," in a speech to the UN General Assembly. A goal of deriving 100 percent of the nation's electricity from "renewable sources" by 2040 does not exclude nuclear energy ("red-green coalition").

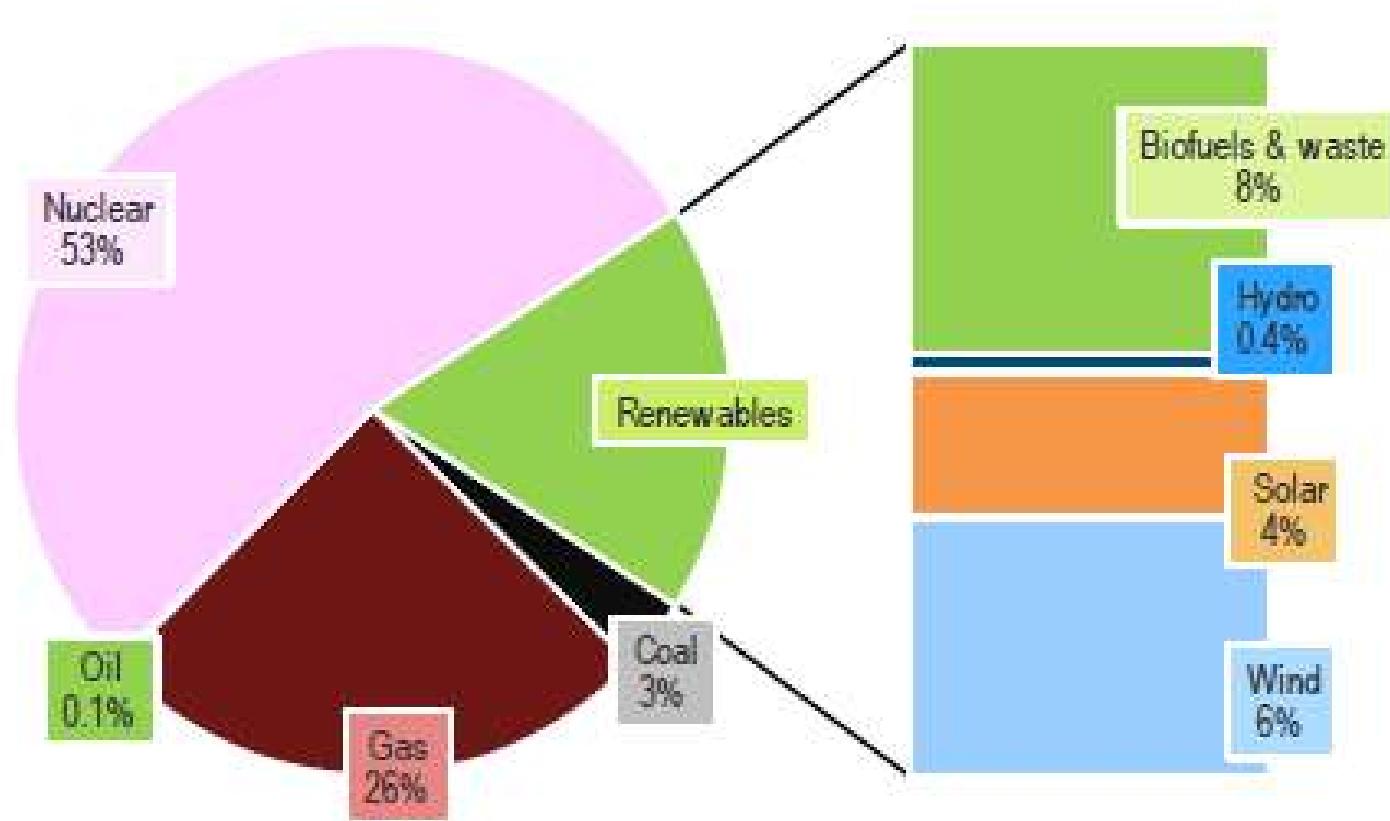
In 2016, 57 per cent of Sweden's electric power came from renewables such as hydropower and wind sources, with the remainder coming from nuclear power.

Source : IEA, Sweden - Energy System Overview 2016
- <https://www.iea.org/media/countries/Sweden.pdf>



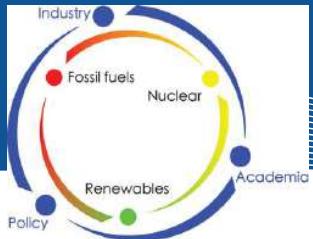
ELECTRICITY GENERATION: 82 TWh

18% renewables (IEA average: 24%) and 53 % nuclear



=> Total primary energy consumption (TPES) in Belgium is 657 TWh including 82 TWhe for electricity (=> ratio elec/TPES = 12.5 %)

Source : IEA, Belgium - Energy System Overview 2016
- <https://www.iea.org/media/countries/Belgium.pdf>



« Vers une économie décarbonée »

1 – Brève histoire : du feu primitif à l'électricité

2 – Le cap : UN-Agenda 2030 et «triangle énergétique européen»

3 – Invariants (sciences de la nature) et contraintes (EU Triangle)

4 - Faits et chiffres : démographie, climat, politiques énergétiques

**5 - Défis technologiques et humains
(incertitudes) : stockage, etc**

6 – Conclusion : recherche, innovation et formation

* Responsibility for the information and views set out in this Collège Belgique course lies entirely with the author *

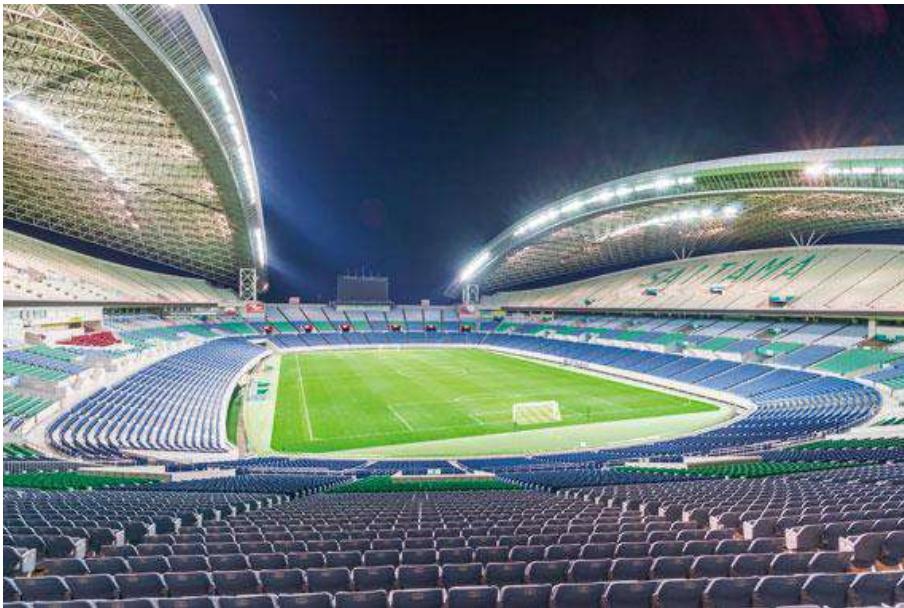
* Reproduction of the texts of this course is authorised provided the source is acknowledged *

Comment garder notre mode de vie ...? 1/2

tout en contribuant à améliorer celui des autres



Alamy





... sans “impacter” notre
environnement ? 2/2

nexus

“eau – énergie – alimentation”
< => climat, pollution, ressources



(1) la « grande transition » : vers la 4-ème révolution industrielle ?



(5.1) La « grande transition » : convergence d'un développement technologique accéléré et d'une révolution digitale irréversible

- Actuellement, les énergies « vertes » ont beau se développer très rapidement, 85.5 % de l'énergie mondiale est encore produite par les énergies fossiles. De plus, les cours des combustibles fossiles fluctuent de façon imprévisible. A l'échelle mondiale en 2016, le solaire et l'éolien représentent 2 % de la consommation primaire totale, contre 1 % pour la biomasse et la valorisation des déchets, 4.5 % pour le nucléaire et 7 % pour l'hydraulique (BP statistics 2016).

NB: « *Resilient Energy Union* »: objective n° 3: share of renewable energy: target of at least 27 % by 2030 (binding at the EU level)
Key question => where will the remaining 73 % of energy come from ?



- Dans les cités émergentes, la révolution digitale accompagnera partout l'électrification. Production et consommation électriques seront harmonisées par des logiciels puissants, mis en œuvre dès la conception des infrastructures et des bâtiments, capables de piloter ensuite globalement l'efficacité énergétique de grandes agglomérations (« réseaux intelligents »).

= > 4-rth industrial revolution : towards integrated energy, transport and ICT systems ?
(strong links between energy production, distribution and use; mobility and transport; and information and communication technologies (ICT))

Les deux « transitions » du système électrique européen (Jean-Pierre Hansen et Jacques Percebois, 2017)

«La vague du marché et la marée verte»
choc entre la volonté de créer un marché
et celle de respecter un impératif écologique

Ce livre bienvenu fait un bilan fort précis des évolutions des systèmes électriques depuis vingt ans. C'est à dire depuis que la vague de dérégulations, privatisations et autres mesures visant à les extraire des services publics s'est heurtée au double écueil de l'économie réelle et des impératifs climatiques.

Mais un marché fou – où le prix du bien échangé est totalement déconnecté des caractéristiques physiques de sa production et donc de son coût de revient réel – peut-il donner de bons conseils ?

Source : <http://huet.blog.lemonde.fr/2017/09/04/le-marche-et-lelectricite-le-dogme-perd-leurope/>

Concurrence « par » le marché ou « pour » le marché ?

(A. Smith 1776 /la main invisible/ vs E. Chadwick 1859 - p 199)
Concession de service public ? (mise aux enchères et contrat)

La réforme européenne de l'industrie électrique introduit la concurrence là où elle est possible, c'est-à-dire dans les domaines de la production et la fourniture d'électricité. En revanche, les monopoles naturels identifiés tels les infrastructures de réseaux de transport et de distribution restent régulés.

Conférence SEII, Bruxelles, 27 mars 2018. Jean-Pierre Hansen plaide pour un mécanisme de type « concession de service public » pour la fourniture d'électricité.

Exemple cité : Vélib à Paris. Le système Vélib', composé de 1.800 stations et plus de 20.000 vélos, avait été créé en 2007 par JCDecaux, leader de la publicité et de l'ameublement urbain, qui en avait obtenu la concession pour dix ans. Changement de concessionnaire le 12 avril 2017 : le marché Vélib' a été attribué au consortium Smoovengo, mené par Smoove, spécialiste du vélo en libre service (Montpellier).

JEAN-PIERRE HANSEN
JACQUES PERCEBOIS

TRANSITION(S) ÉLECTRIQUE(S)

CE QUE L'EUROPE
ET LES MARCHÉS
N'ONT PAS SU VOUS DIRE



PREFACE DE GÉRARD MESTRALLET



Jean-Pierre Hansen et Jacques Percebois sont fins connaisseurs des systèmes électriques, par une double approche – celle de l'ingénieur et celle de l'économiste.

NB: Jean-Pierre Hansen est CEO et chef de la direction d'Electrabel de 1992 à 1999 puis de 2005 à 2010. Il est responsable de Suez Énergie Europe et International au sein de GDF SUEZ de 2003 à 2012. Professeur à l'UC Louvain, il a aussi enseigné l'économie de l'énergie à l'École Polytechnique (Paris). Il est Membre de l'Académie Royale de Belgique depuis 2009.

Les deux « transitions » du système électrique européen

(1) La première, celle de la fin des services publics, a échoué. Et comme les Britanniques discutent d'une renationalisation de leurs chemins de fer après l'échec cinglant des privatisations, celle des systèmes électriques doit être rediscutée sur la place publique.

(2) La seconde, celle du défi de la dé-carbonisation de la production d'électricité – le secteur le plus émetteur de CO2 au plan mondial en raison de la domination du charbon et du gaz – suppose une intervention publique décisive.

Aucun marché ne peut déboucher sur une planification judicieuse et de long terme des moyens de production et des réseaux de transport visant cette transition au moindre coût. Et ceci quelques soient les moyens décarbonés utilisés : hydrauliques, éoliens, photovoltaïques, marins, géothermiques, biomasse, biogaz, nucléaire. Ce que le marché dicte, ce sont les moyens de production à la rentabilité immédiate la plus élevée, gaz naturel et charbon. Les choix optimaux entre ces différents moyens ne peuvent être identiques selon les pays et les régions, les ressources naturelles et les impératifs de l'énergie nucléaire sûre et à bas coût n'y étant pas les mêmes.

Renewables have “grid priority”,
meaning the grid must take their electricity first



“According European utilities - How to lose half a trillion euros :
Europe’s electricity providers face an existential threat”

Oct 12th 2013 | The Economist

<http://www.economist.com/news/briefing/21587782-europe-s-electricity-providers-face-existential-threat-how-lose-half-trillion-euros>

Trois grands domaines d' incertitudes 2/3

(2) Le stockage de l'énergie (le « chaînon manquant ») ?



(5.2) Le stockage de l'énergie, le « chaînon manquant de la transition énergétique » vers une économie sobre en carbone

Le stockage massif et bon marché de l'électricité, y compris sur une période annuelle, sera-t-il une réalité commerciale ?

Il s'agit du Saint Graal de l'énergie, celui que convoitent toutes les sources d'énergie primaire.

En effet, l'électricité peut toujours être produite sans émission de CO₂, mais l'offre comme la demande d'électricité seront de plus en plus variables et le stockage permet d'éviter des investissements de surcapacité ruineux en production et transport d'électricité.

La gestion de la demande de puissance électrique - piloter la consommation d'électricité

Modern demand response could provide another solution (or a complement) to storage technologies aiming at managing the modern grid. Demand-side management, user participation and demand flexibility are increasingly important in the era of the digitally enabled grid.

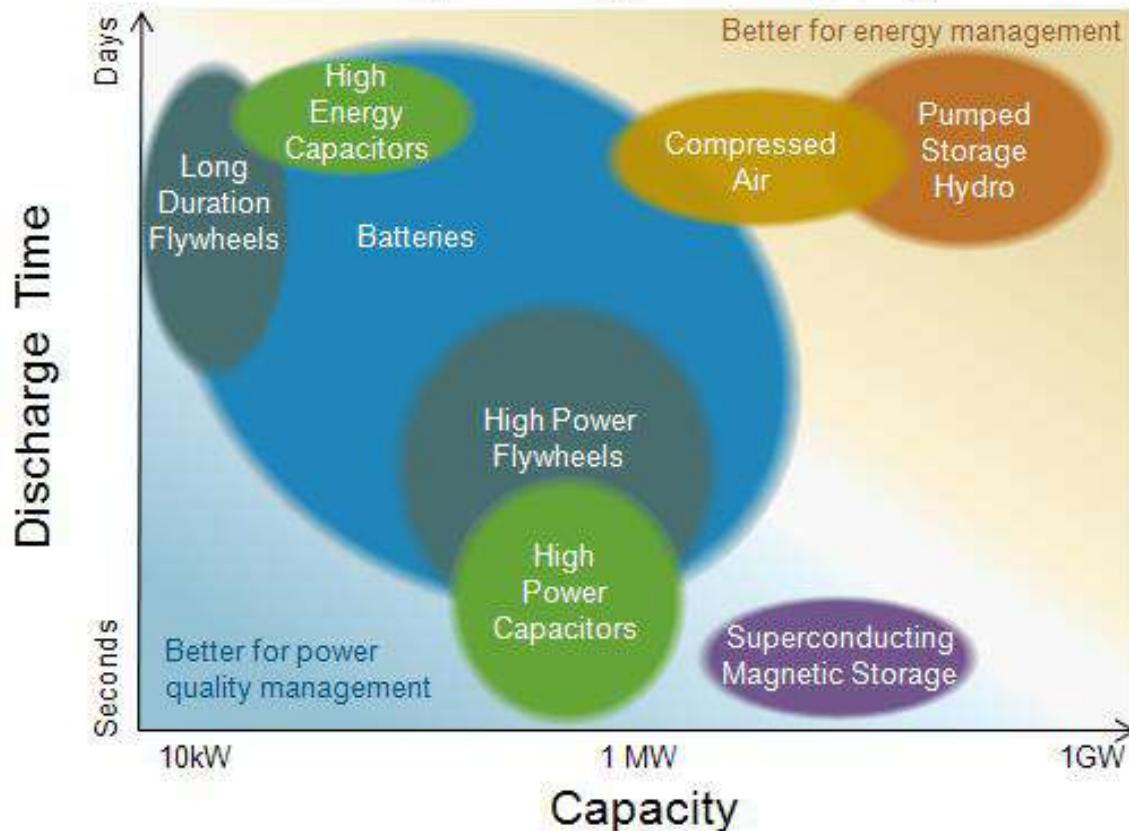
What is demand response ?

According to the United States of America's Federal Energy Regulatory Commission, demand response (DR) is defined as: "Changes in electric usage by demand-side resources from their normal consumption patterns in response to changes in the price of electricity over time, or to incentive payments designed to induce lower electricity use at times of high wholesale market prices or when system reliability is jeopardized."

Source: <http://www.ferc.gov/>

Electricity storage in the power sector: the missing link to renewable energy

Electricity Storage Technologies



Electricity storage technologies can be used for:

- energy management / long timescales. Daily, weekly, and seasonal variations in electricity demand are fairly predictable (e.g. pumped hydroelectric storage or compressed air energy storage)
- power quality management / shorter timescales. Demand fluctuations on shorter timescales - from a few minutes down to fractions of a second - require rapidly-responding technologies (e.g. flywheels, super-capacitors, or a variety of batteries)

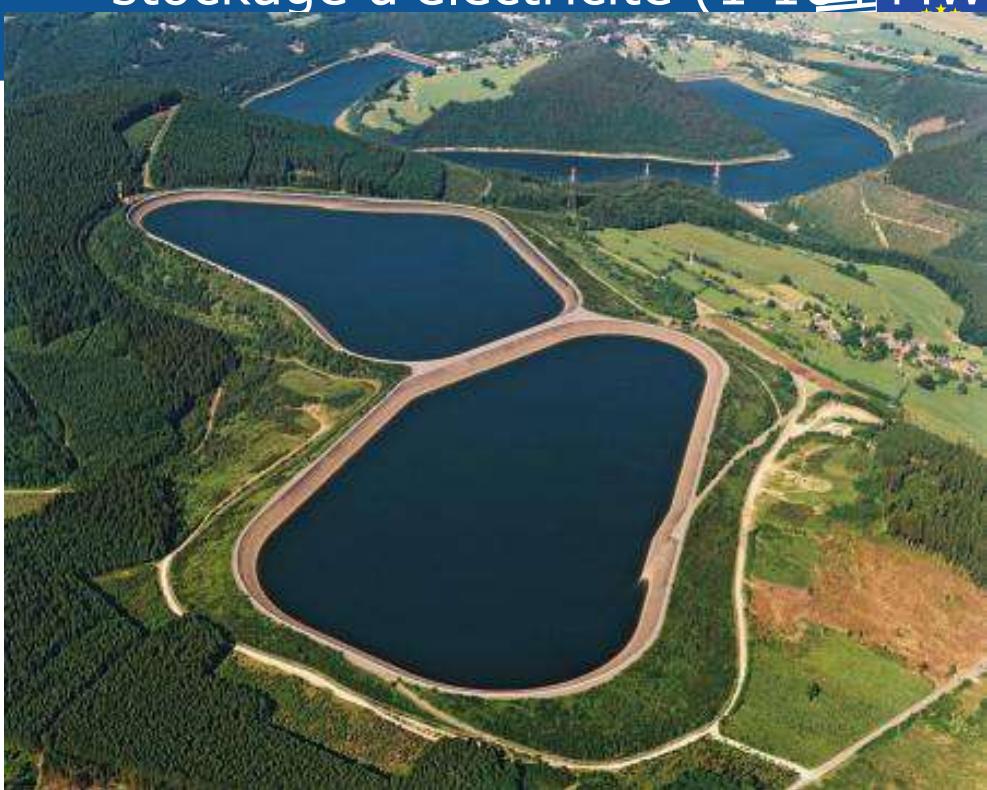
Source: U.S. Energy Information Administration, based on Energy Storage Association (2011)

Le stockage de l'énergie est le « chaînon manquant » de la Transition Energétique

For further information: <https://setis.ec.europa.eu/setis-reports/setis-magazine/power-storage>

Centrale hydroélectrique de pompage-turbinage de Coo :

= stockage d'électricité (1 164 MW pendant 5 heures, soit 5 GWh)



La centrale hydroélectrique de Coo-Trois-Ponts appartient à Engie Electrabel et est située en Belgique non loin de la cascade de Coo (sur l'Amblève, près de l'abbaye de Stavelot). A la différence des autres centrales hydrauliques classiques, cette centrale est équipée de machines réversibles (six turbines Francis réversibles convertibles en pompes). Le passage du mode pompage au mode turbinage s'effectue en quelques minutes (temps de démarrage inférieur à 2 minutes). Le turbinage est capable de fournir 1 164 MW pendant 5 heures (un stockage de 5 000 mégawattheures). Par an, cela représente un stockage/restitution de 1 000 GWh avec un rendement de 75 %. Le rendement global de la centrale est de 75%. Cela veut dire que 3/4 de l'énergie prélevée en heures creuses sont restitués aux heures de pointe.

Une technologie propre et avantageuse

- Modulation aisée de la puissance produite en fonction des variations de la demande
- Réserve d'énergie quasi instantanée en cas de perturbation du réseau
- Possibilité de démarrage rapide (quelques dizaines de secondes)
- Permet d'équilibrer la production non prévisible du renouvelable (éolien, solaire)
- Source d'énergie non polluante qui ne consomme pas d'eau et ne nécessite pas de combustion
- Impact maîtrisé sur l'environnement grâce à la conception souterraine de la plupart des installations techniques

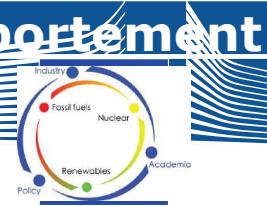
Source: <http://corporate.engie-electrabel.be/fr/producteur-local/hydroelectrique/>

et http://www.apere.org/doc/1304-le_pompage_turbinage.pdf



Trois grands domaines d' incertitudes 3/3

(3) Le comportement humain ?



(5.3) Le comportement humain (influence sur les politiques énergétiques) (nouvelle gouvernance de l'énergie - initiatives d'énergie citoyenne ?)

La recherche dans le domaine de l'énergie doit faire une place importante aux sciences humaines et sociales aux côtés des autres disciplines. De manière générale, les citoyens doivent être étroitement associés, en amont, aux choix en matière de politiques et de technologies énergétiques afin de devenir les acteurs de ces transformations.

De nombreuses questions se posent, par ex. en politiques « climat – énergie » et économique:

(1) instruments à mettre en œuvre pour accompagner « la grande transition » ?

« La vraie urgence, c'est de donner un coût important aux émissions de CO₂, afin de les pénaliser. On peut espérer qu'en 2050, un prix élevé du carbone sera une banalité dans le monde. » (Claude Mandil, ancien directeur exécutif de l'Agence Internationale de l'Energie, Paris /2003-2007/)

(2) Bouleversement de nos façons de produire et de consommer l'énergie

La transformation énergétique en cours provoque une révision en profondeur des fondements de nos économies (nouveau paradigme énergétique « offre < = > demande»).

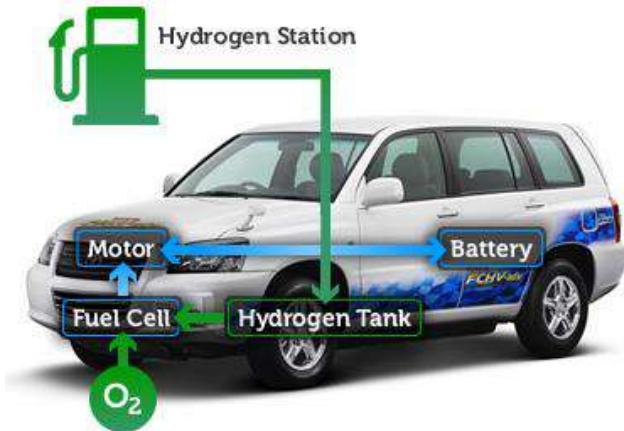
= > Les gens sont passés de « conSUMER » à « PROsumer » en participant d'une manière ou d'une autre au concept et/ou au développement du produit (« PROducer »).

= > Nous ne ferons pas l'économie d'un changement profond des comportements.

On ne peut pas maintenir ou souhaiter le mode nord-américain de consommation de ressources et d'énergie. N'oublions pas qu'un Américain moyen consomme 32 fois plus qu'un Kenyan moyen.

What will fuel future highways?

Gasoline ? Diesel ? Compressed or Liquified Natural Gas ? Hydrogen ? Electricity ?



Hydrogen for cars - Fuel cells could become a battery supplement

The True Cost of Powering an Electric Vehicle (EV)

Rather than worry about autonomy (km/battery), cost-conscious EV buyers should focus on how to get car-charging kWh at the lowest rates.

<http://www.edmunds.com/fuel-economy/the-true-cost-of-powering-an-electric-car.html>



Overall, in the EU, an additional electrical capacity of 150 GW will be needed to charge electric cars (2016 study)



A total of 7 energy mix scenarios were proposed in the EU Energy Roadmap 2050, as a basis for policy action. One of the main conclusions of decarbonisation of the energy system by 2050 is:

in the EU, electricity will have to play a much greater role than now (almost doubling its share in final energy demand to 36-39 % in 2050 – today it is 21 %)

and will have to contribute to decarbonisation of transport and heating / cooling.

NB: Gross electricity production in the EU is estimated at 4900 TWhe per year in 2050 (compared to 3280 TWhe in 2011).



Elektrische auto in de EU vereist equivalent van 150 kerncentrales

De Standaard 28/09/2016 (Belgian newspaper, 100 000 copies)
"Een grootschalige introductie van elektrische wagens in Europa zou 150 gigawatt aan bijkomende elektriciteitsopwekking vereisen. Dat berekende het Europese Milieuagentschap. Dat is het equivalent van 150 kerncentrales."

http://www.standaard.be/cnt/dmf20160927_02490059

⇒ **Overall, in the EU, an additional electrical capacity of 150 GW will be needed to charge electric cars**

Source: "Electric vehicles and the energy sector - impacts on Europe's future emissions", European Environment Agency (EEA, Copenhagen), briefing published 26 Sep 2016 - <http://www.eea.europa.eu/themes/transport/electric-vehicles/electric-vehicles-and-energy>

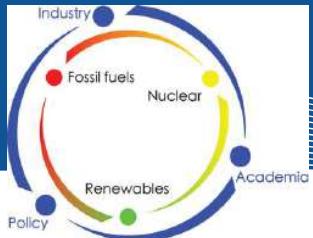
One Belt, One Road (Chinese initiative 2017): “Project of the Century”



Economist.com

“One Belt, One Road” /OBOR/ (also called “Belt – Road – Initiative” /BRI/) : “Project of the Century”

President Xi Jinping on Sunday 14 May 2017 detailed plans to fund China's "One Belt, One Road" project, an expansive trade and infrastructure initiative that aims to connect by land and sea over 60 countries in Asia, Europe, the Middle East and Africa and produce over \$21 billion in economic activity. At the opening of the Belt and Road Forum in Beijing on Sunday, President Xi described OBOR as "the project of the century." Ambitious and expansive, OBOR, as the New York Times put it, "looms on a scope and scale with little precedent in modern history, promising more than \$1 trillion in infrastructure." (<https://masspointllc.com/china-one-belt-one-road-us-legal-dominance/>)



« Vers une économie décarbonée »

1 – Brève histoire : du feu primitif à l'électricité

2 – Le cap : UN-Agenda 2030 et «triangle énergétique européen»

3 – Invariants (sciences de la nature) et contraintes (EU Triangle)

4 - Faits et chiffres : démographie, climat, politiques énergétiques

5 - Défis technologiques et humains (incertitudes) : stockage, etc

6 – Conclusion :

recherche, innovation et formation

* Responsibility for the information and views set out in this Collège Belgique course lies entirely with the author *

* Reproduction of the texts of this course is authorised provided the source is acknowledged *

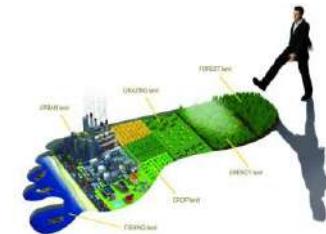
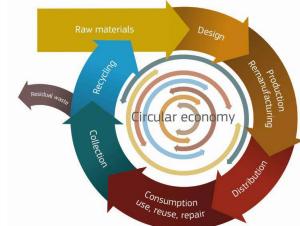
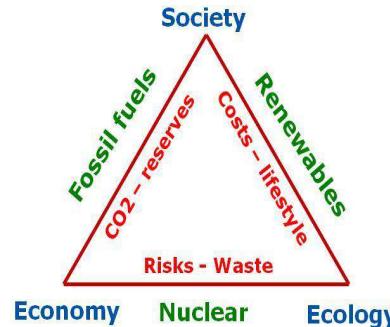
Messages clés à emporter

Nécessité de garder un mix énergétique complet (renouvelables, fossiles, nucléaire)



(1) Problème énergétique à résoudre

**Besoin total d' électricité en Belgique en 2040
= 100 TWh_e (= 100 milliards de kilowattheures_e)**



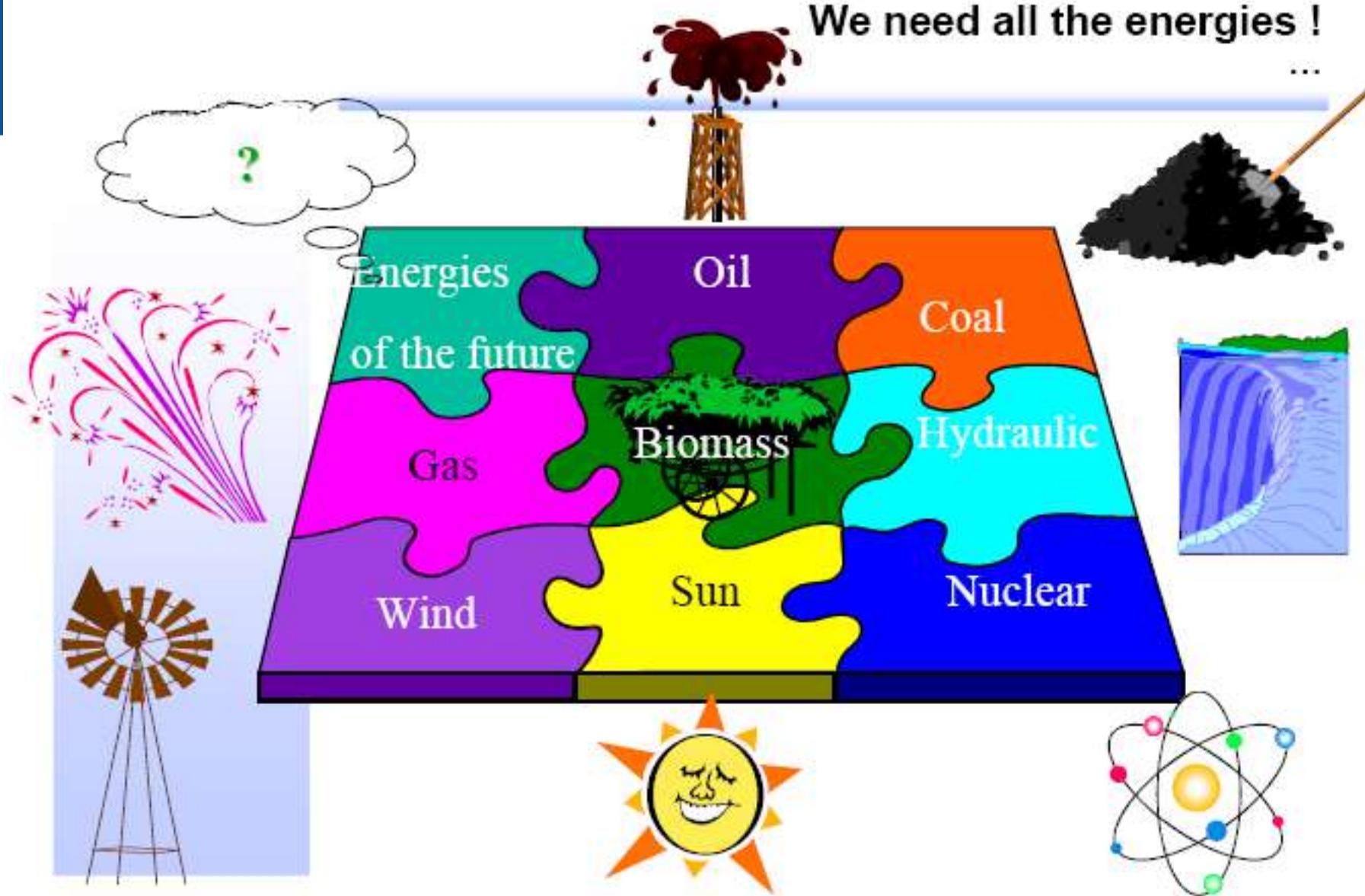
**(3) Invariants : sciences de la nature
(réseau électrique et « empreinte »)
et sciences de l'homme**

Par ex. dans le monde : évolution démographique, changement climatique => électrification massive

(5) « Incertitudes » : défis de type technologique et humain

E.g. 4-rth industrial revolution : towards integrated energy, transport and ICT systems ? + new paradigm “producer < = > consumer” ?

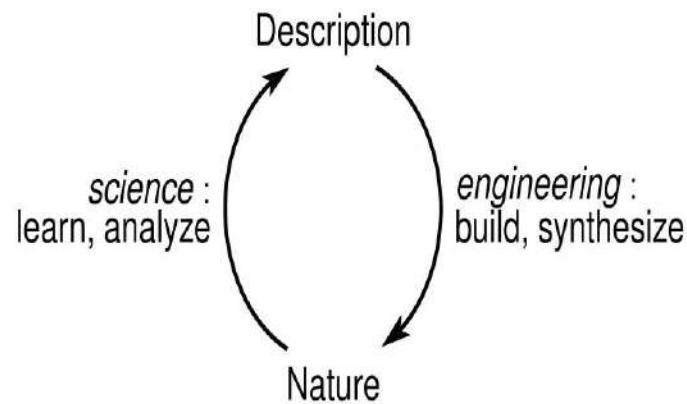
We need all the energies !



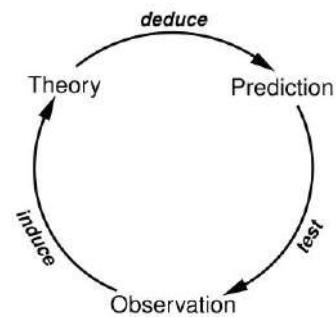
Article 194 of the Lisbon Treaty :

"Union policy on energy shall aim, in a spirit of solidarity ...:.. Such measures shall not affect a Member State's right to determine the conditions for exploiting its energy resources, its choice between different energy sources and the general structure of its energy supply". (http://europa.eu/lisbon_treaty/index_en.htm)

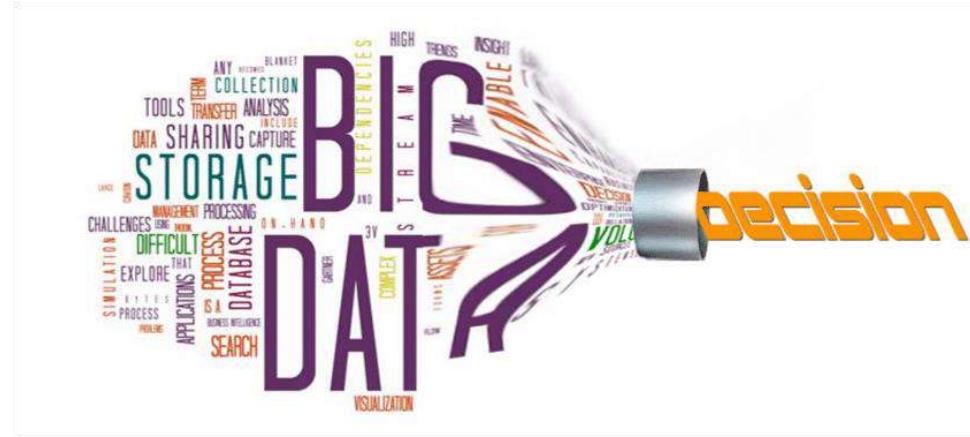
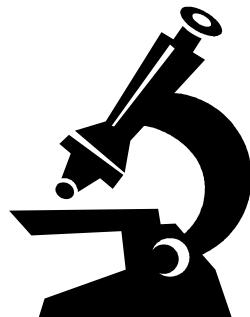
Recherche, innovation et formation



**“Scientists discover the world that exists;
engineers create the world that never was.”**
Theodore von Kármán (1881 –1963)

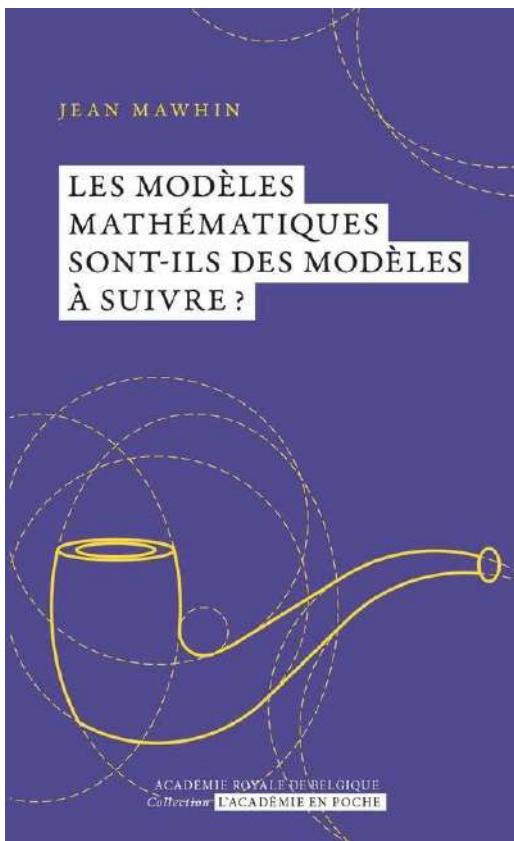


In science, we never are definitely right; we can only be sure when we are wrong.



voir aussi : Mouvement citoyen « 100 TWh » - contact : info@100twh.be et <http://www.100twh.be/>

Puisque ces mystères nous dépassent, feignons d'en être l'organisateur (modèle du climat < = = >> modèle de l' univers)



« Les modèles mathématiques sont-ils des modèles à suivre ? » Jean Mawhin, 11 mai 2017 - 128 pages -
Éditeur Académie royale de Belgique - 7 euros



Chapitre conclusion pp 99 – 101 « LE PLUS BEAU MODELE DU MONDE NE PEUT DONNER QUE CE QU'IL A ... »

... Le système d'équations aux dérivées partielles de modèles mathématiques du climat n'a pas honte d'être plus compliqué que celui décrivant des modèles mathématiques de l'univers tout entier !

La raison est simple : la société souhaite évidemment avoir des prévisions sur la température moyenne de la terre dans cent ans plus précises que sur l'état de l'univers dans un milliard d'années.

Les modèles mathématiques sont et restent des outils précieux pour notre compréhension de l'univers qui nous entoure, et pour notre pouvoir d'action.

Comme toutes les œuvres humaines, ils sont et seront utilisés pour le bien comme pour le mal. La responsabilité incombe seulement aux utilisateurs.

Enfin, ils aideront peut-être, dans une certaine mesure, à soulager quelque peu l'angoisse fondamentale de l'homme face au monde qui l'entoure.

Le poète français Jean Cocteau (1889 – 1963) l'écrit avec finesse dans les « Mariés de la Tour Eiffel » :

« Puisque ces mystères nous dépassent, feignons d'en être l'organisateur ».

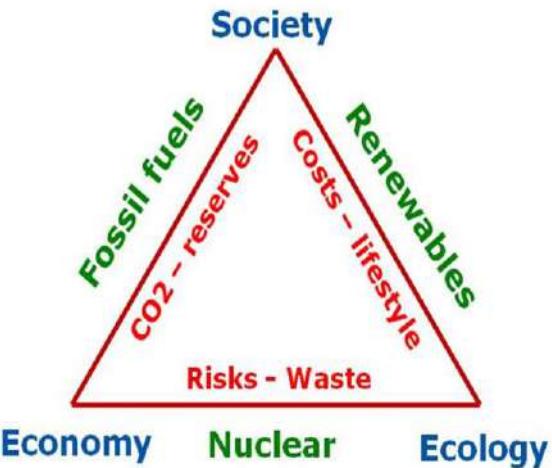
Source : Jean Mawhin est professeur émérite de l'Université Catholique de Louvain et membre de la Classe des Sciences de l'Académie royale de Belgique. Mathématicien, il est l'auteur de plus de 400 publications sur l'analyse non linéaire et l'histoire des mathématiques.

- Collège Belgique - conférence cours de Jean MAWHIN - 9 mars 2016 – vidéo 1 h 24 min : <https://www.youtube.com/watch?v=Nq0fyqs5Kac>
- Interview de Jean MAWHIN : « Les modèles mathématiques sont-ils des modèles à suivre ? » - Date : 22.05.2017 — Vidéo 4 min. — Audio 53 min
- <https://lacademie.tv/conferences/interview-de-jean-mawhin-les-modeles-mathematiques-sont-ils-des-modeles-a-suivre->

Why invest in research ?



"Attracting more people and investing more in science and research are the keys to our future, if we want to be competitive in global markets.



- * ***Some of our trading partners are competing with primary resources, which we do not have.***
- * ***Some compete with cheap labour, which we do not want.***
- * ***Some compete at the cost of the environment, which we cannot accept.***

Building the knowledge society is probably the best, and maybe only, way to sustain the European model of society, without having to make a trade-off between economic growth, social cohesion and environmental protection."

Source: Janez Potočnik, European Commissioner for Science and Research (2004-2009), Ljubljana, Slovenia, March 21, 2005 (ERA News, 2005-02-03)

Bibliographie : ouvrages de référence et articles de journaux scientifiques



(1) « Energie : Economie et politiques » de Jean-Pierre Hansen (Auteur), Jacques Percebois (Auteur), Marcel Boiteux (Préface), Jean Tirole (prix Nobel d'économie 2014, Introduction), Editions De Boeck, 2010, réédition 2015 - 832 pages

(2) « Transition(s) électrique(s) : Ce que l'Europe et les marchés n'ont pas su vous dire », Jean-Pierre Hansen et Jacques Percebois (Préface de Gérard Mestrallet), Editions Odile Jacob, 2017

(3) European energy RTD policy: “Benefits and limitations of nuclear fission for a low-carbon economy”

* 2012 interdisciplinary study synthesis report and compilation of the experts' reports

* 2013 symposium agenda and speakers' symposium speeches delivered on 26-27 February 2013, Brussels

(<https://publications.europa.eu/en/publication-detail/-/publication/e92b20be-9163-4aee-b469-87828b10c0f1/language-en>)

(4) " Towards a new interdisciplinary approach for Euratom research, innovation and education: impact on EU and non-EU countries ", Georges Van Goethem, October 2014. European Commission, DG Research and Innovation, Dir Energy - G.4 / Fission Energy., Royal Academy for Overseas Sciences of Belgium (ARSOM – KAOW), Brussels, Bulletin des Séances - Nouvelle Série, Vol. 60 N°3-4 (2014) (http://www.kaowarsom.be/documents/B_59_2013/GOETHEM.pdf)

(5) Nucléaire et renouvelables : « Séminaire académique : La coexistence du nucléaire et des énergies renouvelables », Forum nucléaire belge, 29 novembre 2016, Palais des Académies, Bruxelles

<https://www.forumnucleaire.be/theme/energie/seminaire-academique-la-coexistence-du-nucleaire-et-des-energies-renouvelables>

(6) “The Fabulous Nuclear Odyssey of Belgium”, Luc H. Geraets, GDF SUEZ Nuclear Activities, Brussels, in Journal of Pressure Vessel Technology - Technology Review (American Society of Mechanical Engineers /ASME/) | Volume 131 | Issue 3 | (Apr 06, 2009) (<http://pressurevesseltech.asmedigitalcollection.asme.org/article.aspx?articleid=1473480>)

(7) “Nuclear Fission, Today and Tomorrow: From Renaissance to Technological Breakthrough (Generation IV)”, Georges Van Goethem, J. Pressure Vessel Technol 133(4), 044001 (May 11, 2011) (16 pages)

(<http://pressurevesseltech.asmedigitalcollection.asme.org/article.aspx?articleid=1461565>)

(8) “Handbook of Generation IV Nuclear Reactors”, 2016, A volume in Woodhead Publishing Series in Energy, edited by: Igor Pioro (ISBN: 978-0-08-100149-3) (<http://www.sciencedirect.com/science/book/9780081001493>), Chapter 10 – “Euratom research and training program in Generation-IV systems: Breakthrough technologies to improve sustainability, safety and reliability, socio-economics, and proliferation resistance”, pages 241-281, G. Van Goethem

Bibliographie : documents audiovisuels sur internet (youtube)



- (1) "Next step for nuclear power plant : Generation IV", (32 min), 23 juil. 2016, Société française d'énergie nucléaire (SFEN)
- <https://www.youtube.com/watch?v=pEj5LJqxbs&t=40s>
Nicolas Devictor, Head of program "4th Generation Reactors" - Commissariat à l'énergie atomique et aux énergies alternatives (CEA)
- (2) "Generation IV nuclear reactors" (18 min), April 2012, event on energy game changers organised by Intelligence²
- <https://www.youtube.com/watch?v=HsIQNtr8Zjo>
Robin Grimes, Professor of Materials Physics at Imperial College London
- (3) "Generation IV fast Reactors and the Re-use of Long-lived Nuclear Waste" (27 min), 25 mai 2015, GIF event
- http://globalenergysystemsconference.com/presentations/GES2013_Day2_Session1_Richard_Stainsby.pdf
Richard Stainsby, Chief Technologist, UK National Nuclear Laboratories
- (4) Generation IV International Forum (GIF) - Education and Training Task Force - short (60 to 90 minutes) webinar presentations on specific Gen IV systems and related topics (13 webinars in total, September 2016 to May 2018) - including SCK•CEN's R&D on MYRRHA (webinar no 19 on 21 March 2018) - https://www.gen-4.org/gif/jcms/c_84279/webinars
- (5) "Why I changed my mind about nuclear power" (20 min), 17 nov. 2017, TEDxBerlin
- <https://www.youtube.com/watch?v=ciStnd9Y2ak>
Michael Shellenberger, co-founder and Senior Fellow at the Breakthrough Institute, where he was president from 2003 to 2015
- (6) « ENERGIE NUCLEAIRE- C'est pas sorcier » (26 min), 27 mai 2013, la chaîne officielle de l'émission de France 3
- « C'est pas sorcier », le magazine de la découverte et de la science - <https://www.youtube.com/watch?v=3alleGA8vnA>
Voir aussi « QUE FAIRE DES DECHETS NUCLEAIRES ? » (26 min), 27 mai 2013 - <https://www.youtube.com/watch?v=HtZRUFeB3dA>
- (7) « Aspects scientifiques de la sûreté nucléaire », (1h40min), 20 déc. 2012, CEA Sciences
- <https://www.youtube.com/watch?v=6K1wJiJTAaY>
Jean-Christophe NIEL, Directeur général de l'Autorité de Sûreté Nucléaire (ASN) en France
- (8) « Peut-on faire une transition énergétique sans nucléaire ? » (2h52min), 13/03/2017, Visiatome de Marcoule (Gard)
- <https://www.youtube.com/watch?v=Cypoy5QqL9c>
Jean-Marc Jancovici, cofondateur de Carbone 4 et président du think tank The Shift Project