Subatech

UNIVERSITÉ DE NANTES

IMT Atlantique
Bretagne-Pays de la Loire
École Mines-Télécom

NUCLEAR ENERGY: SUSTAINABILITY & DEVELOPMENT

Abdesselam ABDELOUAS
Professor of Radiochemistry
SUBATECH department

NE Nuclear Engineering MSc. Director
Erasmus Mundus Joint Master Degree SARENA Coordinator
Radiochemistry Group Director

Abdesselam.Abdelouas@subatech.in2p3.fr

From basic principles to applications

SUBATECH

Early Universe and High Energies

- Quark-Gluon Plasma
- Cosmic rays
- Nuclear Astrophysics

- Theory

- Detectors

NUCLEAR PHYSICS & ENVIRONMENT
Energy production
Material Sciences

- Radiochemistry
- Radioactive waste
- Radiation damage
- Radiolysis

- Transmutation
- Reactor simulation
- Non-Proliferation

- Instruments
- NDT – Detectors

- SMART (Metrology)

- ARRONAX cyclotron

NUCLEAR MEDICINE

- Radionuclides
- Detectors :
3 gamma – liquid. Xe

- Cyclotron

Nuclear Engineering Teaching at IMT Atlantique

Engineer Degree (3 specializations)

≈30 students

Sustainable Nuclear Engineering: Applications & Management

Internat. Master's Degree of science and technology

2nd year (M2)

RDI	Research and development in instrumentation
NTSE	Nuclear technology, safety and environment
STAR	Nuclear power plants assoc. technologies
ANWM	Advanced Nuclear Waste Management
NEPIA	Nuclear Energy Production & Industrial Appl.

1rst year (M1)

General eng + 1st courses in nuclear physics and technology + radiochemistry

Language: (French flag)

Language: (UK flag)

IMT Atlantique
Bretagne-Pays de la Loire
École Mines-Télécom

Nuclear Engineering Teaching at IMT Atlantique

SARENA
SAfe and REliable Nuclear Applications

European Commission

Erasmus Mundus

SARENA

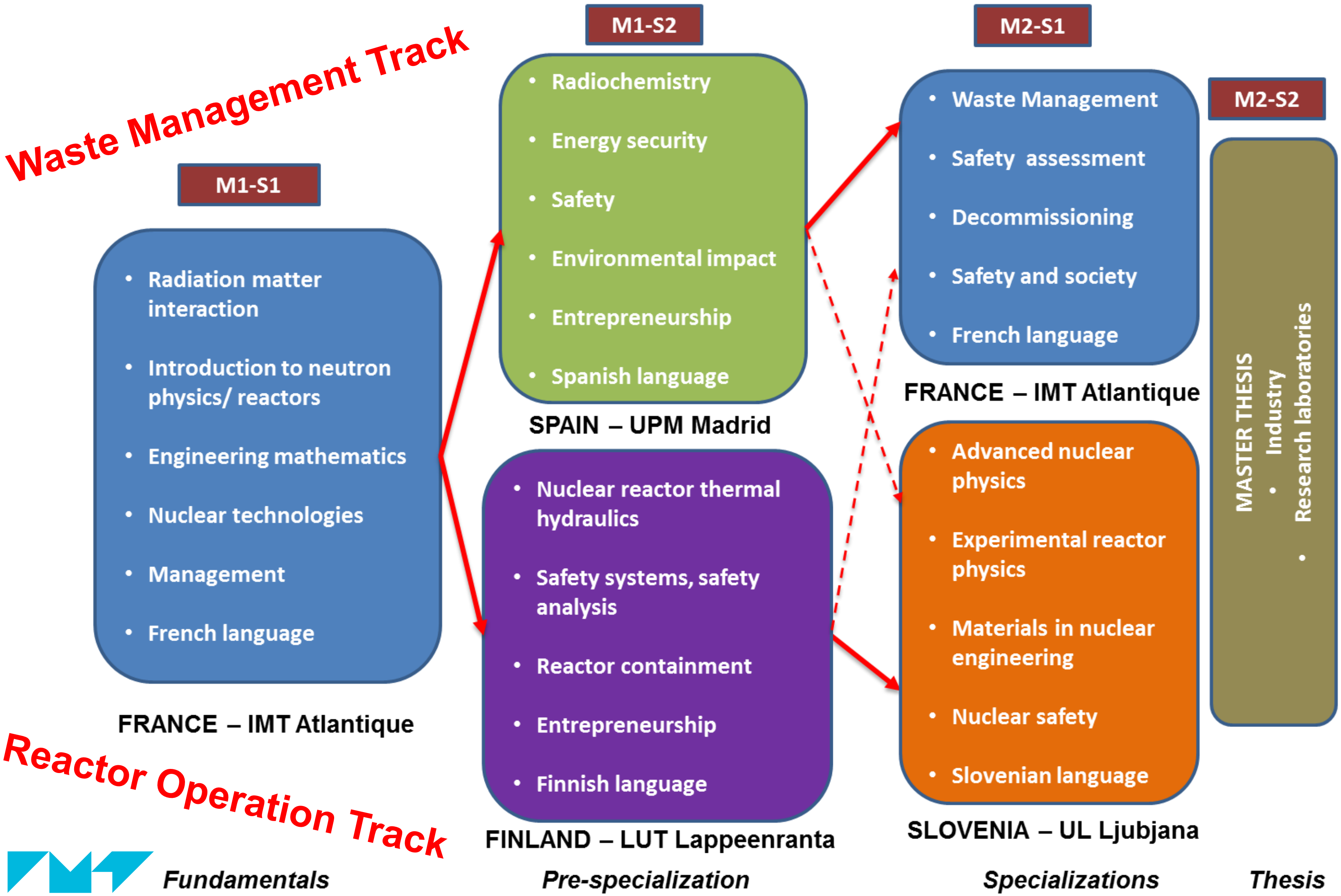
AN ERASMUS MUNDUS JOINT MASTER DEGREE on

SAfe and **RE**liable **N**uclear **A**pplications

IMT Atlantique
Bretagne-Pays de la Loire
École Mines-Télécom

enen
european nuclear education network

Nuclear Engineering Teaching at IMT Atlantique



IMT Atlantique
Bretagne-Pays de la Loire
École Mines-Télécom

Introduction

- Energy
- Electricity
- World Demand

IMT Atlantique
Bretagne-Pays de la Loire
École Mines-Télécom

What is energy?

- Energy constitutes the capacity of a system to supply work.

2 types:

- Limited sources (hydrocarbon, coal, lignite, uranium)

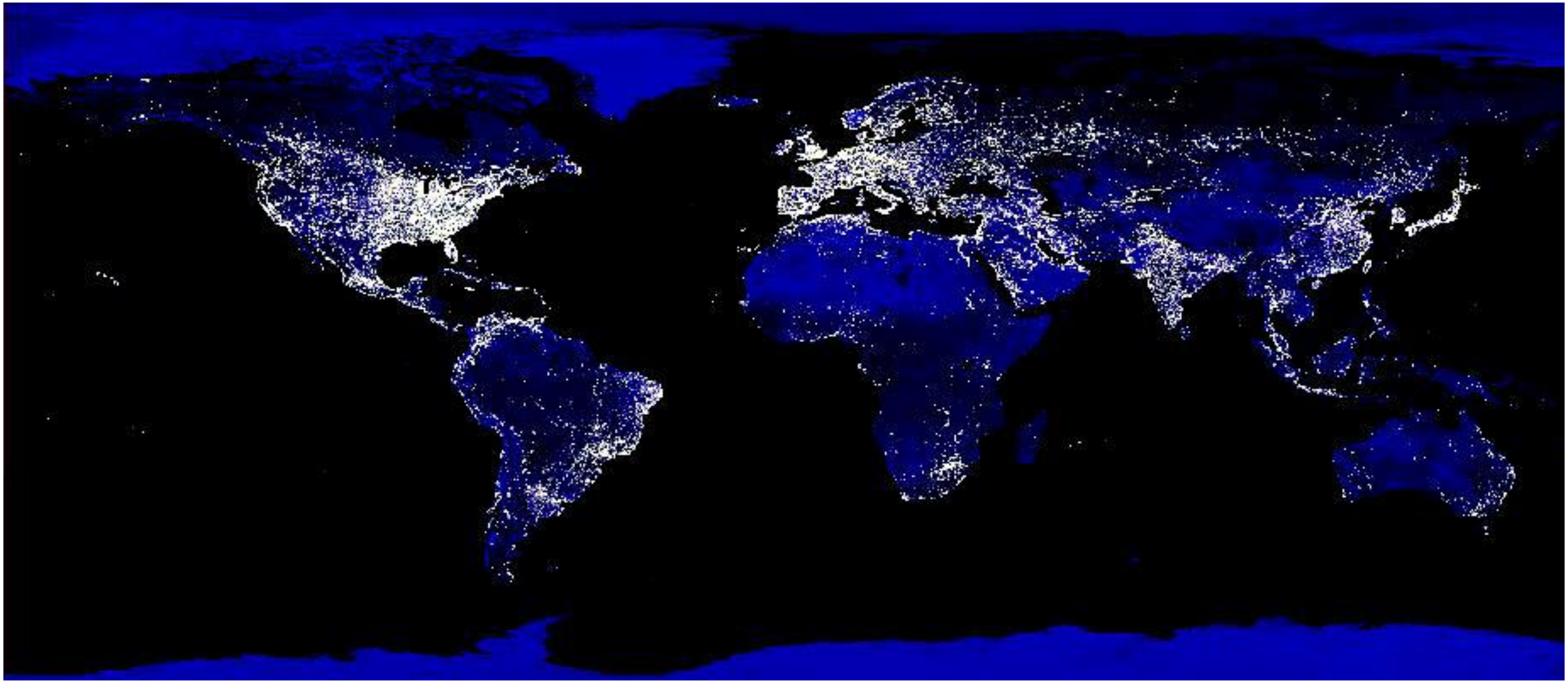
- Renewable sources (sun, wind, geothermal, seawater, rivers)

What is electricity?

- **It is considered as an energy secondary source since it is produced from primary sources**
- **The macroscopic unit is Joule (J) and microscopic unit is electron-volt (eV)**

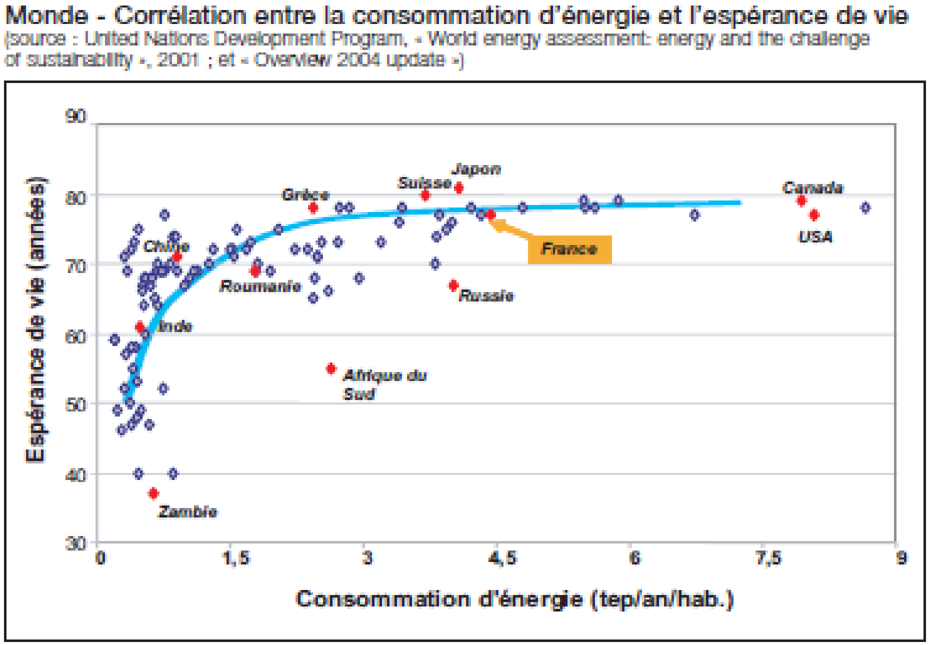
- **A few equivalence between units:**
- **1 calorie = 4.186 J**
- **1 eV = 1.6x10^{-19} J**
- **1 tep = 42 GJ = 7,3 barils oil (159 liters) = 11 kWh**
- **1000 m^3 natural gas = 0.857 tep**
- **1 tonne of coal = 0.667 tep**
- **1 Watt of electric power = 1 J per second**

Where are these lights coming from ?



IMT Atlantique
Bretagne-Pays de la Loire
École Mines-Télécom

Development and Energy

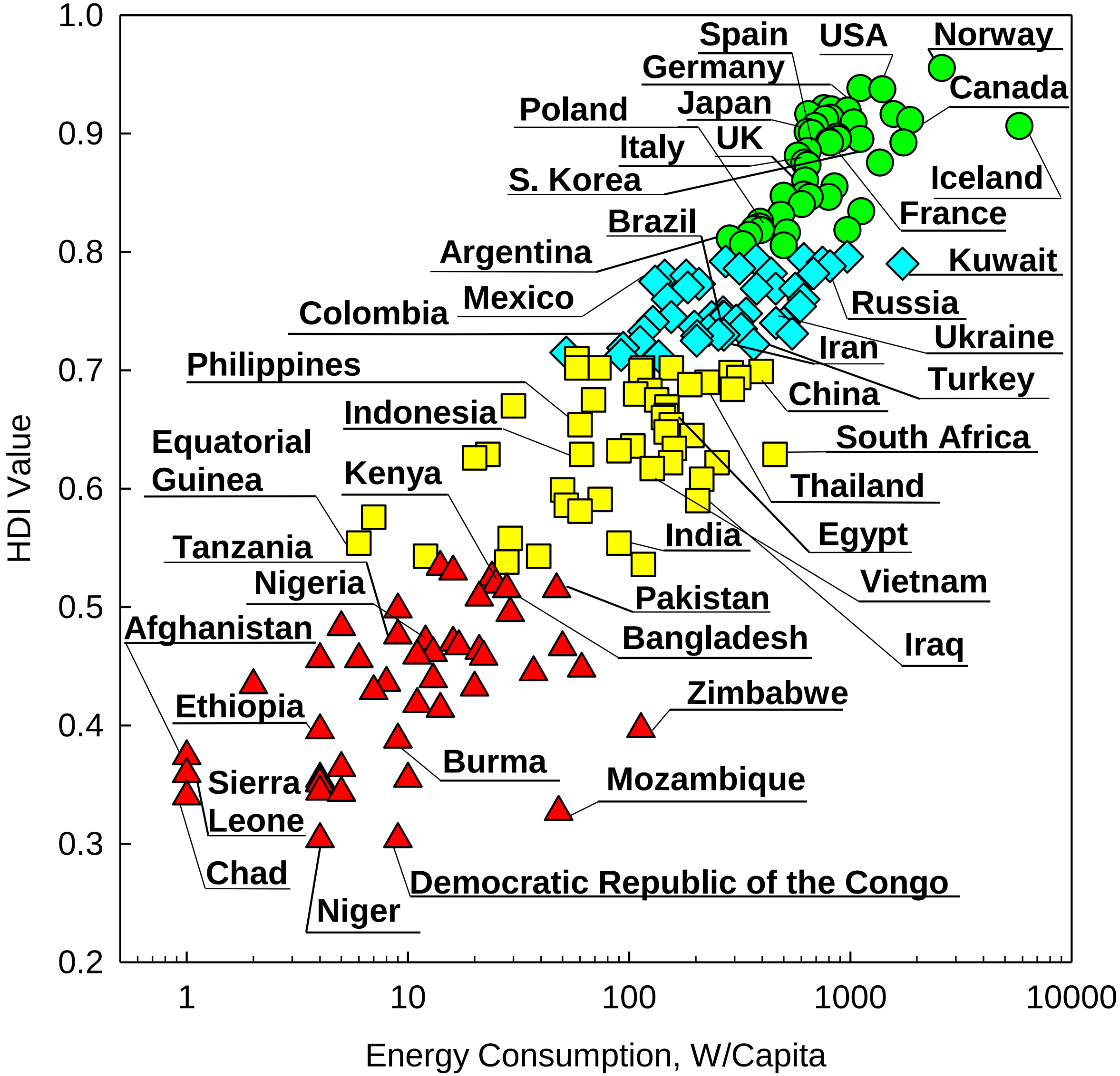


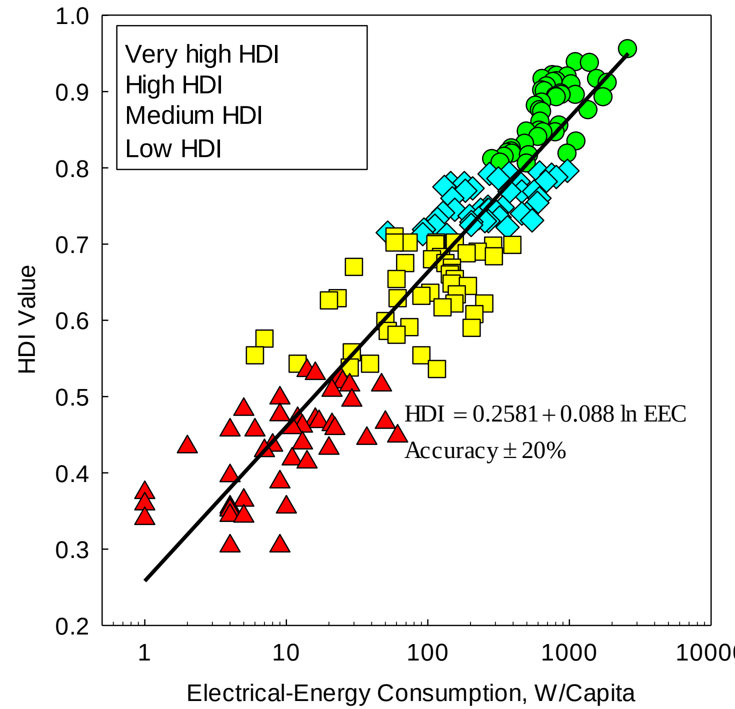
Source AREVA

- 1 tep/year/person = life expectancy 60 years
- 1 to 8 tep/year/person = life expectancy 78 years
- > 1 to 8 tep/year/person = life expectancy do not increase

IMT Atlantique
Bretagne-Pays de la Loire
École Mines-Télécom

HDI and Energy Consumption per Capita



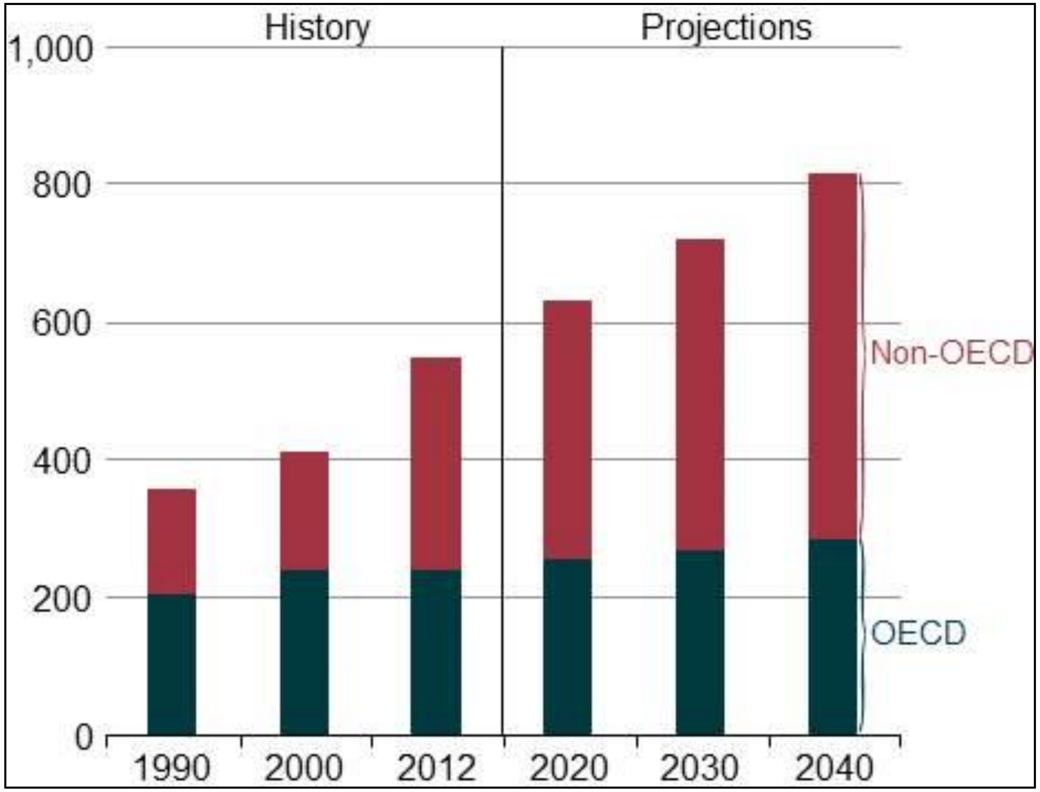


http://www.worldenergyoutlook.org/media/weowebsite/energydevelopment/weo2004chapter10.pdf

Electrical Energy Consumption per Capita in Selected Countries

No.	Country	Population Millions	Energy Consumption		Year	HDI* (2012)		Category
			TW h/year	W/Capita		Rank	Value	
1	Norway	5	116	2603	2013	1	0.955	Very high
2	Australia	23	225	1114	2013	2	0.938	Very high
3	USA	316	3,886	1402	2012	3	0.937	Very high
3	Germany	80	607	822	2009	5	0.920	Very high
4	Japan	127	860	774	2012	10	0.912	Very high
5	Canada	33	550	1871	2011	11	0.911	Very high
6	S. Korea	50	455	1038	2012	12	0.909	Very high
7	Italy	60	310	581	2010	25	0.881	Very high
8	United Kingdom	63	345	622	2011	26	0.875	Very high
9	Russia	143	1,017	808	2013	55	0.788	High
10	Ukraine	45	182	461	2012	78	0.740	High
11	Brazil	194	456	268	2012	85	0.730	High
12	China	1,354	4,693	395	2012	101	0.699	Medium
13	World	7,035	19,320	313	2005-12	103	0.694	Medium
14	EU	503	3,037	688	2012	–	–	–
15	South Africa	53	212	457	2013	121	0.629	Medium
16	India	1,210	959	90	2011	136	0.554	Low
17	Afghanistan	30	0.23	1	2012	175	0.374	Very low
18	Sierra Leone	6	0.54	1	2012	177	0.359	Very low
19	Niger	17	0.63	4	2012	187	0.304	Very low

World Energy Consumption (quadrillion BTU)

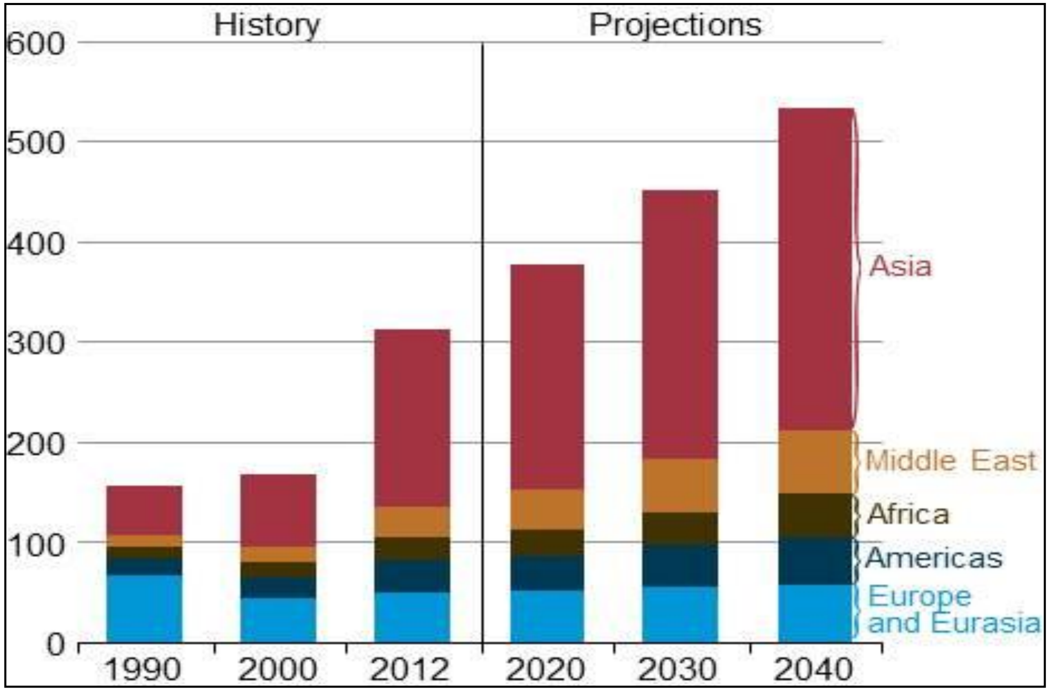


EIA (U.S. Energy Information Administration) estimated the world consumption of primary energy could increase by 48% between 2012 and 2040.

https://www.eia.gov/outlooks/ieo/

IMT Atlantique
Bretagne-Pays de la Loire
École Mines-Télécom

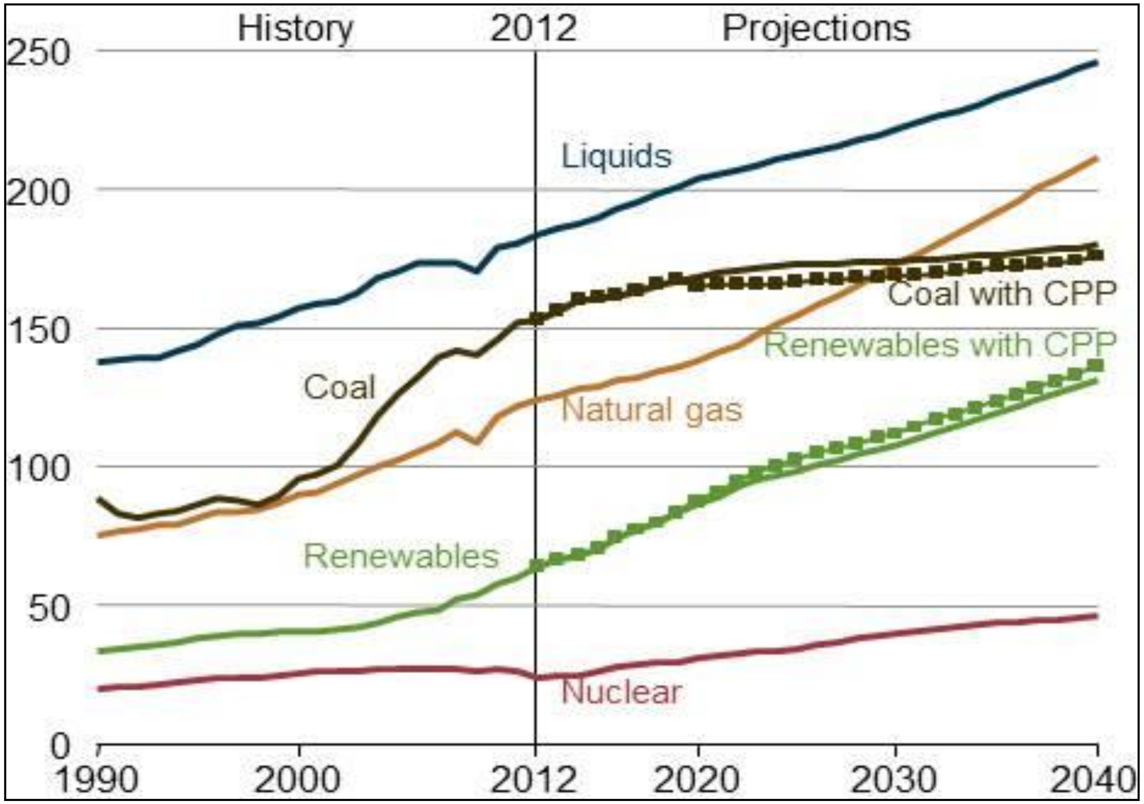
World Energy Consumption by Region (quadrillion BTU)



EIA (U.S. Energy Information Administration) estimated the world consumption of primary energy could increase by 48% between 2012 and 2040.

https://www.eia.gov/outlooks/ieo/

World Energy Consumption by Source (quadrillion BTU)

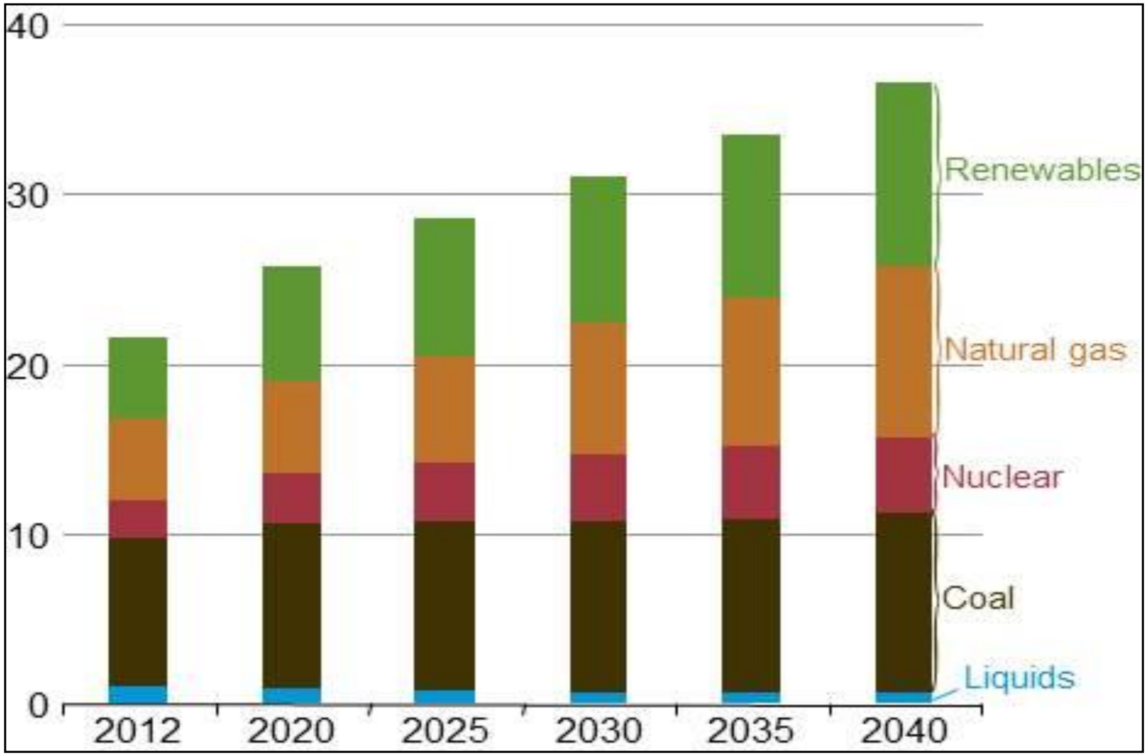


Renewable energy is the world's fastest-growing source of energy, at an average rate of 2.6%/year, while nuclear energy use increases by 2.3%/year, natural gas use increases by 1.9%/year, and coal use increase by 0.6%

https://www.eia.gov/outlooks/ieo/

IMT Atlantique
Bretagne-Pays de la Loire
École Mines-Télécom

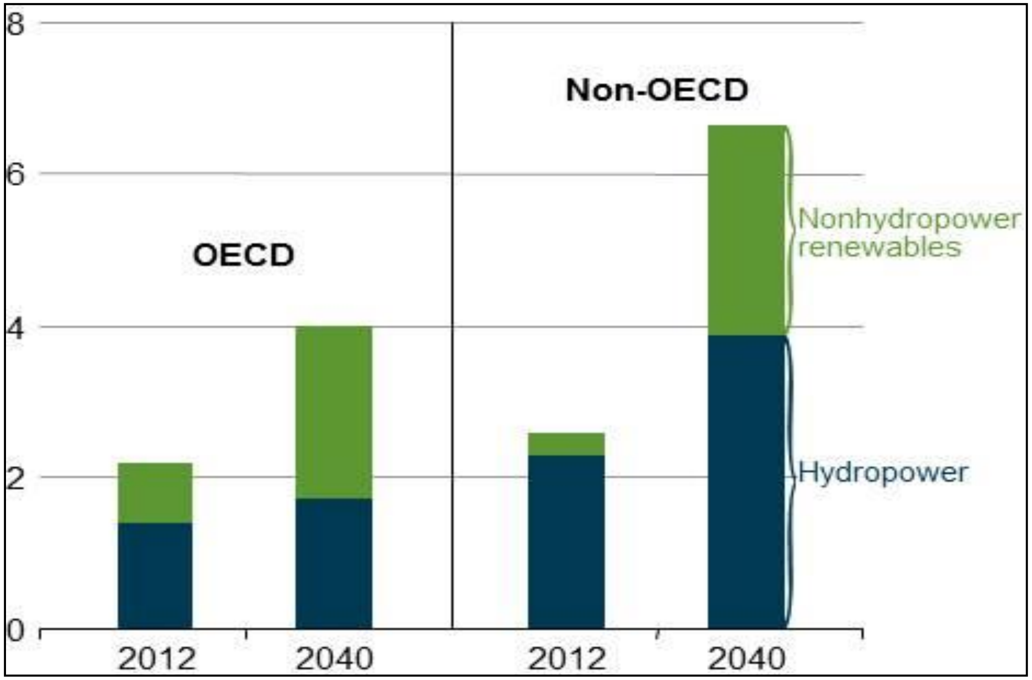
World Net Electricity Generation by Energy Source (Trillion kWHr)



Renewable generation (including hydropower) is the fastest-growing source of electric power in the IEO2016 Reference case, rising by an average of 2.9%/year, compared with average annual increases for natural gas (2.7%), nuclear power (2.4%), and coal (0.8%).

https://www.eia.gov/outlooks/ieo/

World Net Electricity Generation from Renewable Energy Sources (Trillion kWHr)

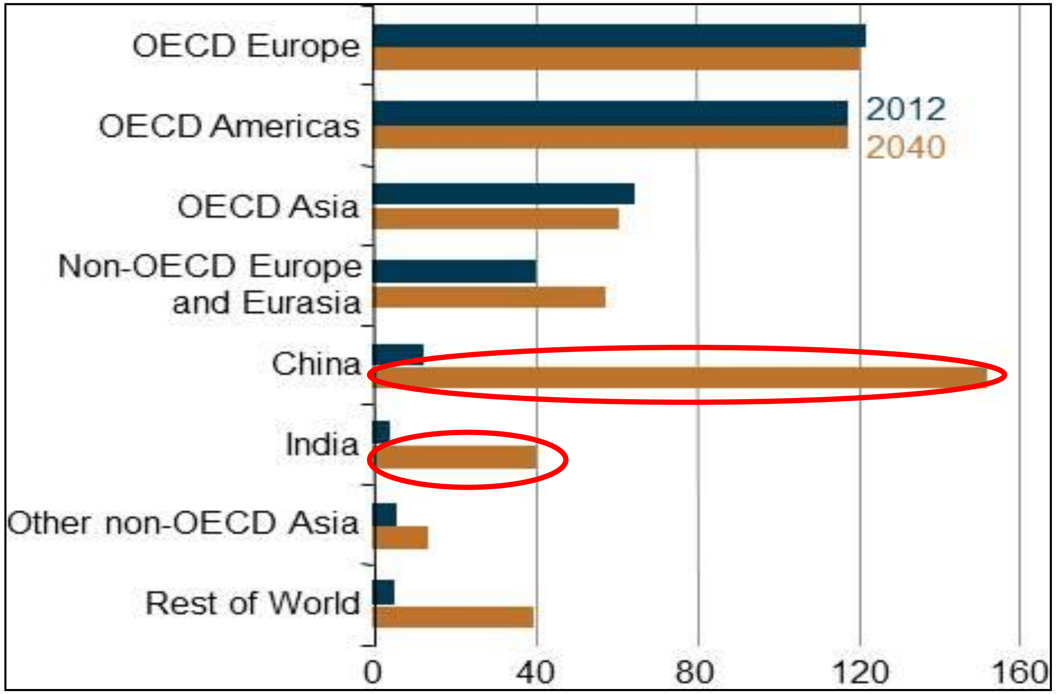


Hydropower renewable generation is expected to be important in non-OECD countries.

IMT Atlantique
Bretagne-Pays de la Loire
École Mines-Télécom

https://www.eia.gov/outlooks/ieo/

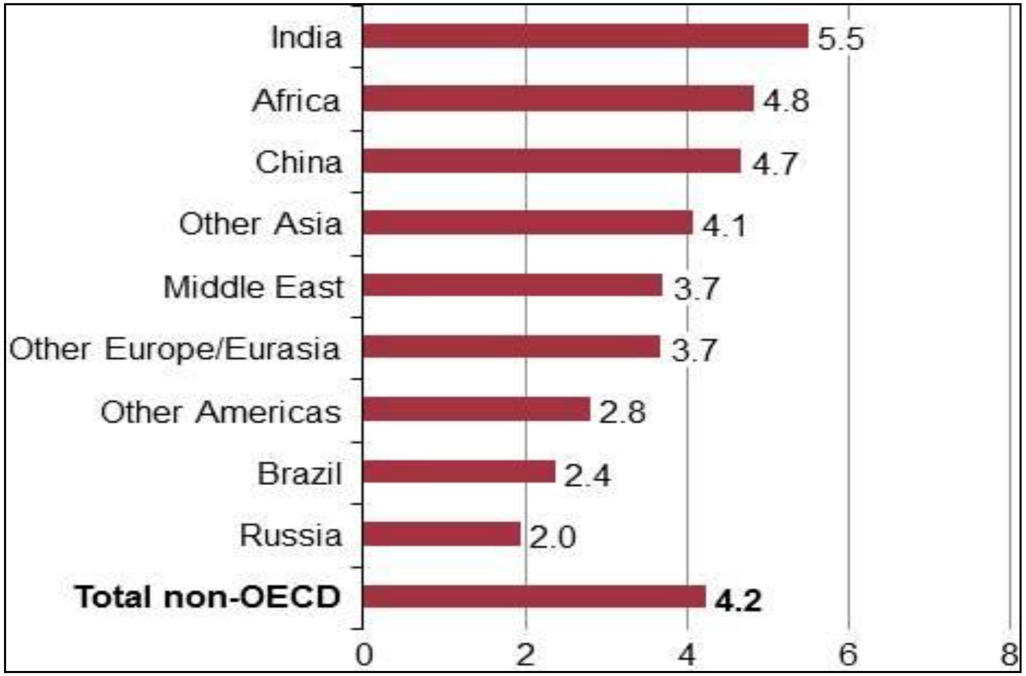
World Nuclear Electricity Generation Capacity by Region (Gigawatts)



Nuclear energy generation is expected to increase massively in China (and India).

https://www.eia.gov/outlooks/ieo/

Non-OECD Real Gross Domestic Product Growth Rate (average annual percent change)

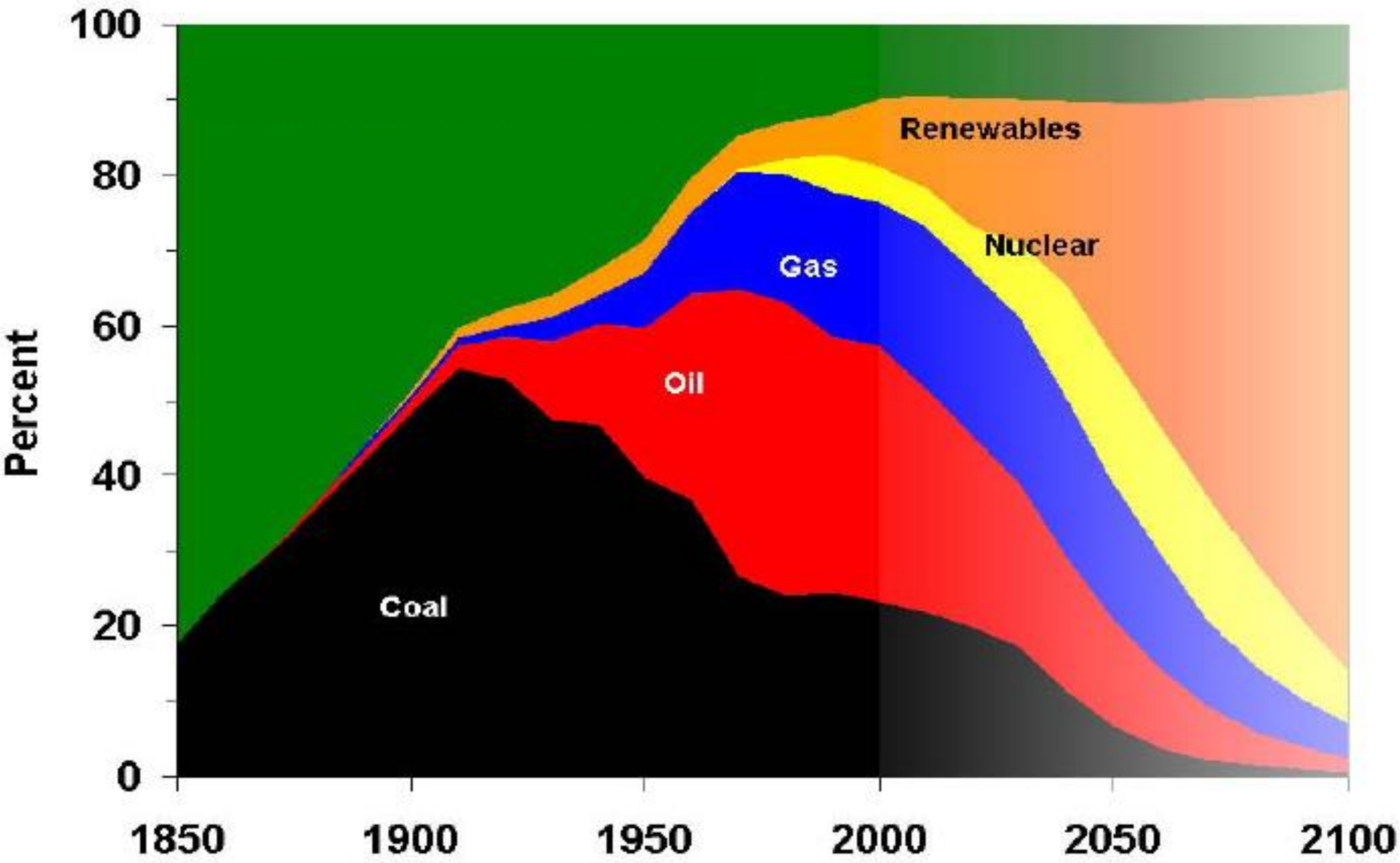


India has the world's fastest-growing economy in the IEO2016 Reference case, averaging 5.5%/year from 2012 to 2040.

IMT Atlantique
Bretagne-Pays de la Loire
École Mines-Télécom

https://www.eia.gov/outlooks/ieo/

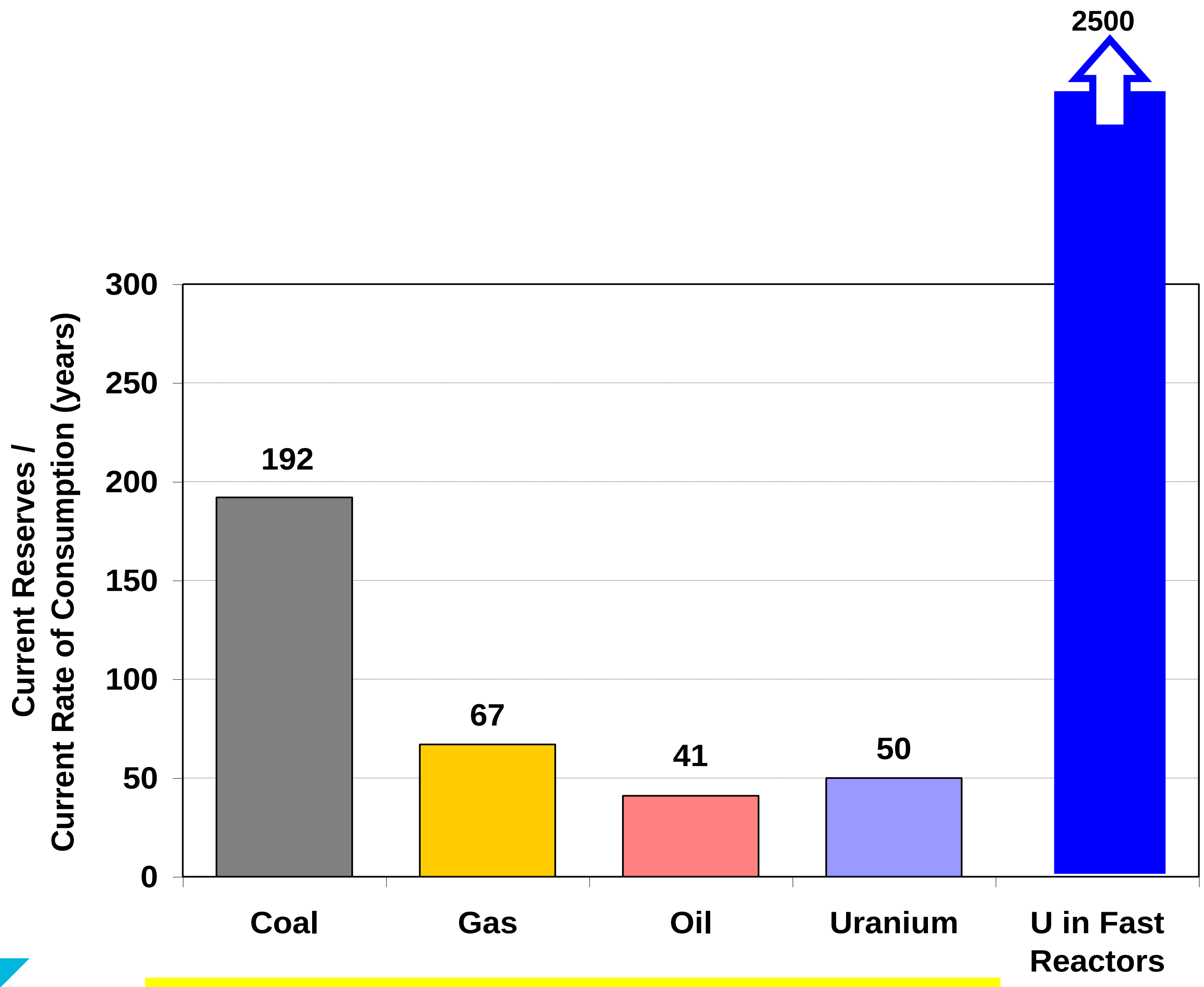
Evolution of Global Primary Energy Sources



IMT Atlantique
Bretagne-Pays de la Loire
École Mines-Télécom

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

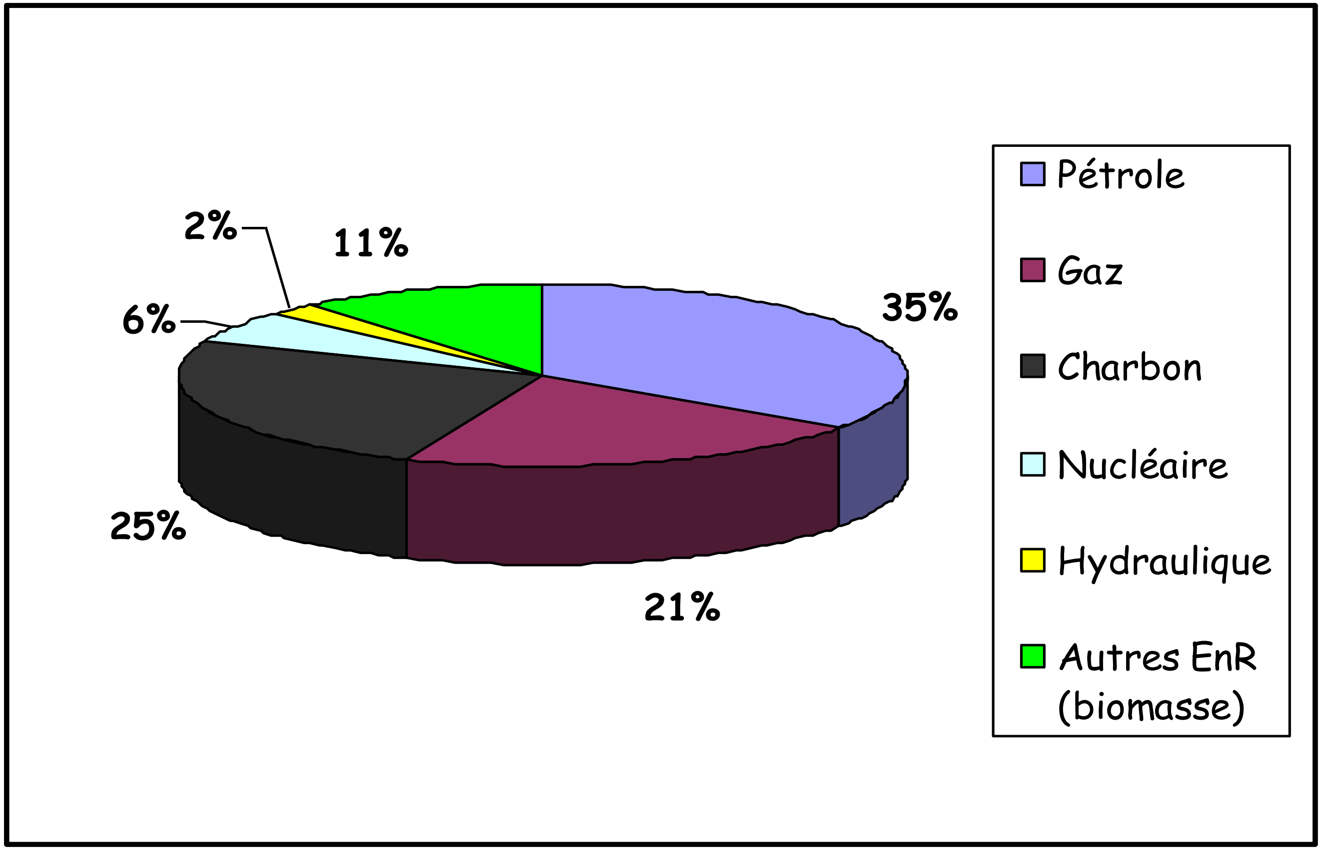
Sustainability: Fissile Resources



IMT Atlantique
Bretagne-Pays de la Loire
École Mines-Télécom

https://www.iaea.org/newscenter/news/fast-reactors-provide-sustainable-nuclear-power-thousands-years

Primary energy supply in 2005 (world)



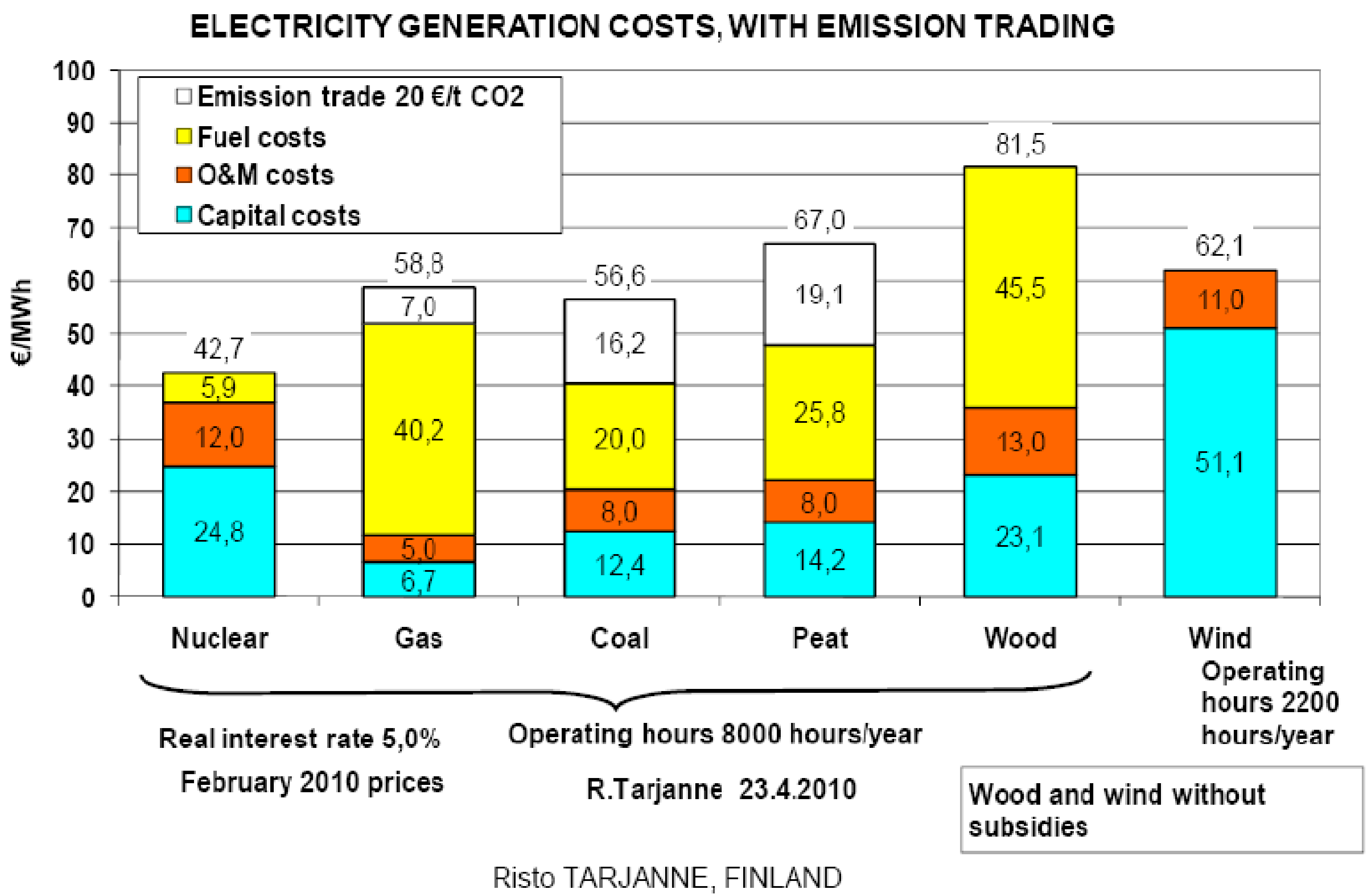
Source AREVA

Electricity in 2005

	Monde	UE-27 pays	France
Production nette en volume	17 218 TWh	3 135 TWh 18 % de la part mondiale	549 TWh 17,5 % de la part européenne
Part de l'électricité dans la consommation finale d'énergie	16 %	20 %	23 %
Electricité nucléaire (production nette et part dans la production totale d'électricité)	2 626 TWh 15 % présente dans 31 pays	955 TWh 30,5 % présente dans 15 pays	430 TWh 78,5 %

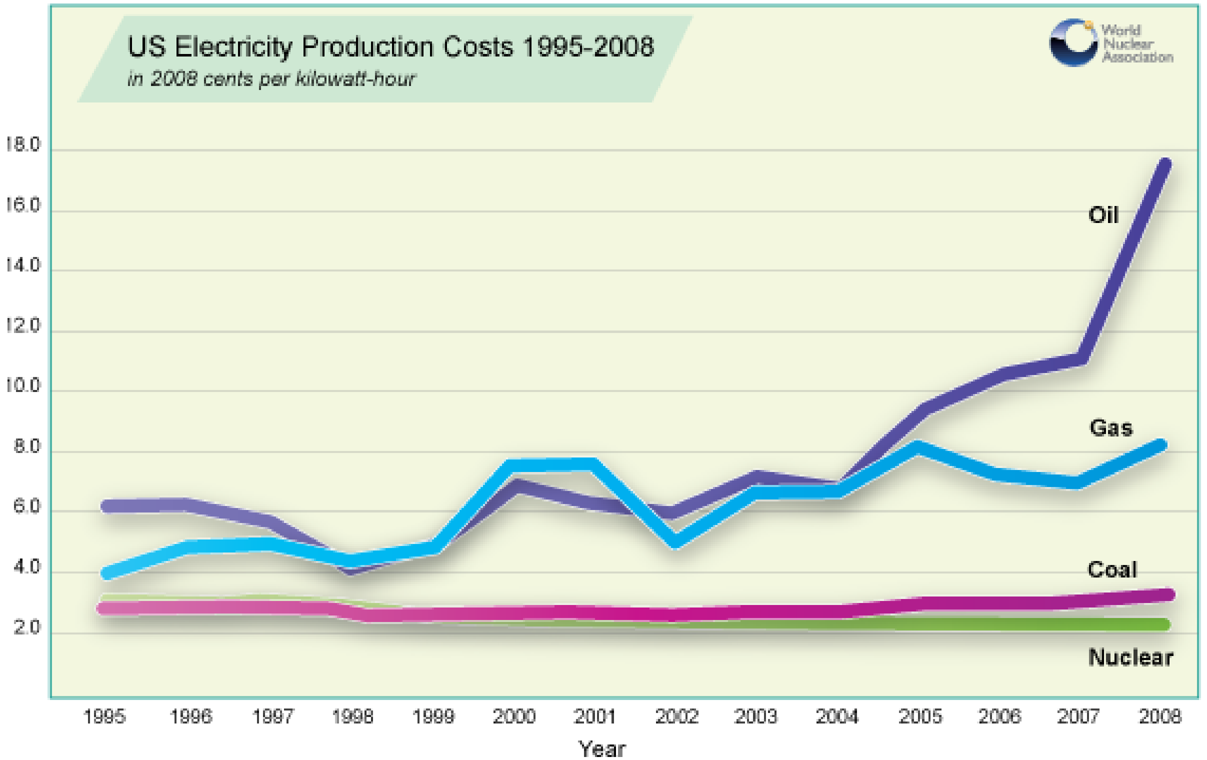
Source AREVA

Electricity Generation Costs with Emission Price of 20 EUR / t CO_2



Source: Tarjanne, Risto and Kivisto Aija, Lappeenranta University of Technology, « Comparison of Electricity Generation costs », 2010

Electricity Generation Costs (USA)

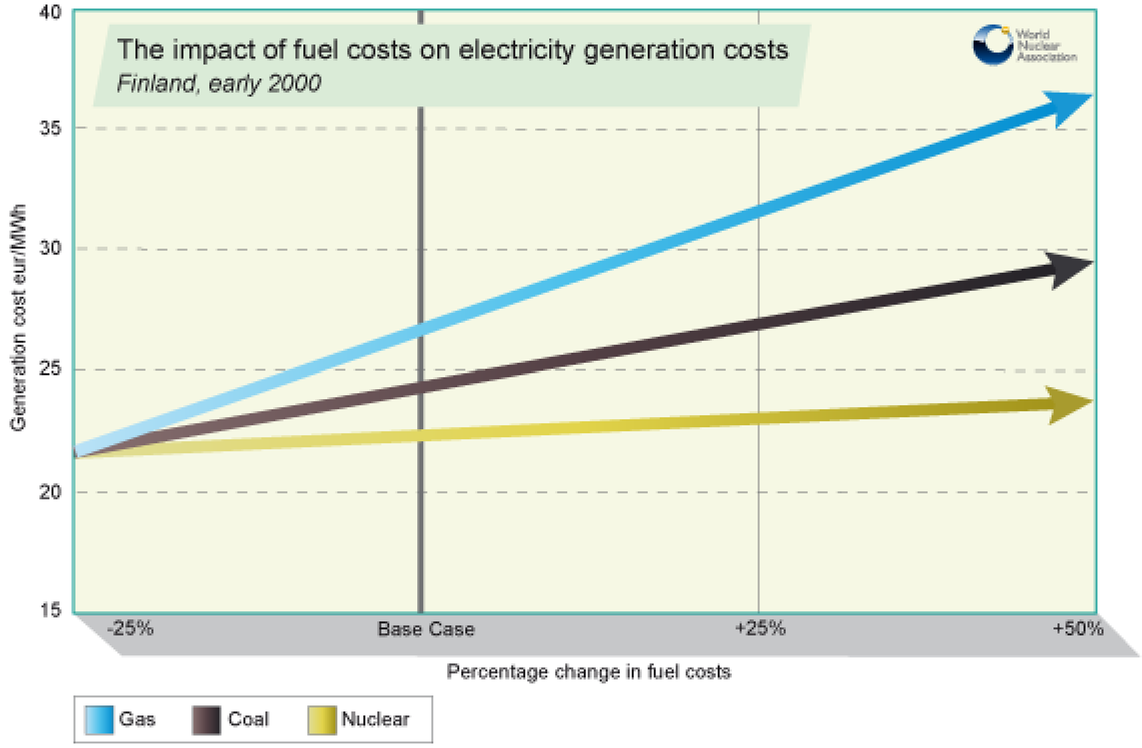


Production Costs = Operations & Maintenance + Fuel. Production costs do not include indirect costs or capital.

Source: *Ventyx Velocity Suite, via NEI*

Electricity cost in USA is declining since 1990 mainly due to decrease of fuel cost (enrichment), operation and maintenance.

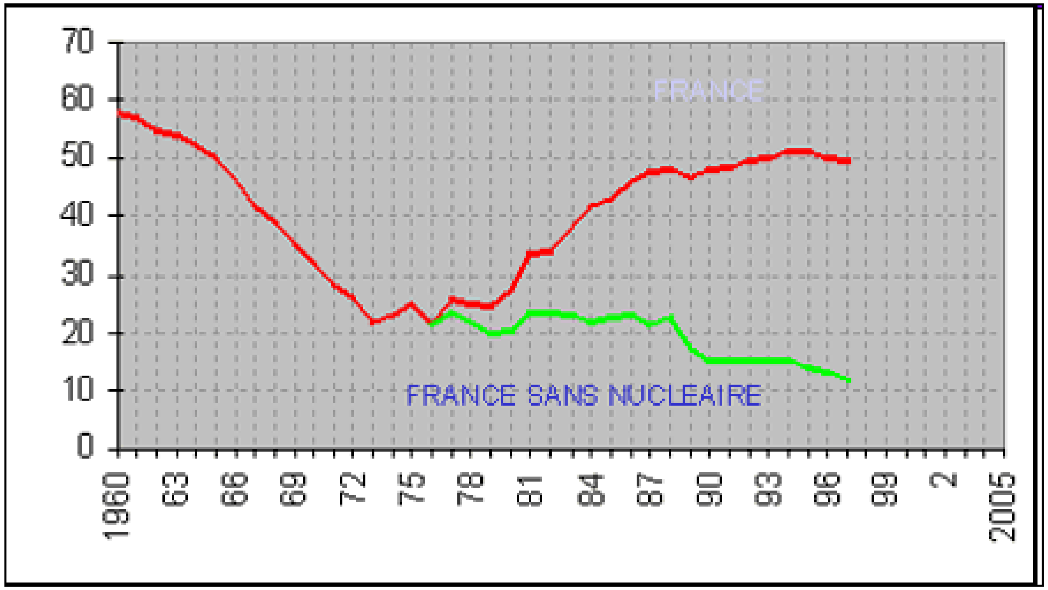
Electricity cost



Doubling the fuel price results in price increase of electricity of 9% for nuclear, 31% for coal and 66% for gas.

IMT Atlantique
Bretagne-Pays de la Loire
École Mines-Télécom

Energy independence



Source SFEN

Société Française d'Energie Nucléaire

The French energetic independance reached a low point of about 20% in mid 70s during the first oil crisis.

IMT Atlantique
Bretagne-Pays de la Loire
École Mines-Télécom

Nuclear and Safety

7	Accident majeur	0
6	Accident grave	0
5	Accident avec risques hors site	0
4	Accident sans risques hors site	0
3	Incident grave	0
2	Incident	41
1	Anomalie	919

Power Plant Operation in France during 10 years (56 reactors in average) – total number of events according to the INES international safety scale (1990-1999).

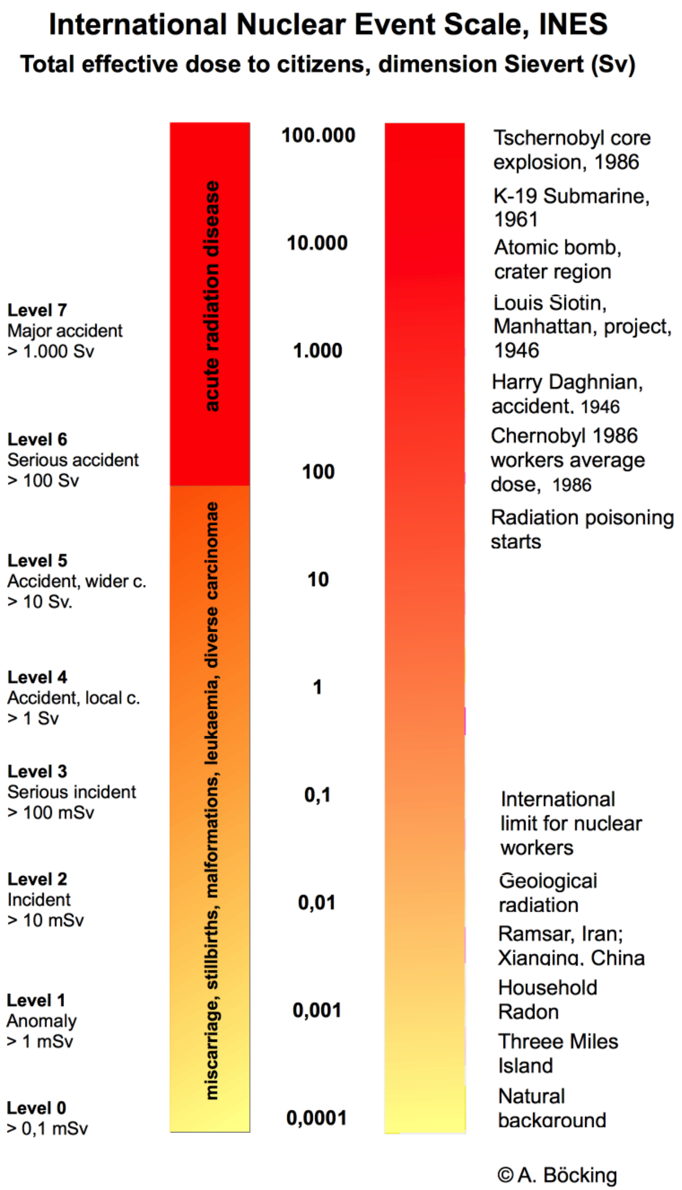
INES: International Nuclear Event Scale

APPLICATION DE L'ÉCHELLE INES

	CONSÉQUENCES À L'EXTÉRIEUR DU SITE	CONSÉQUENCES À L'INTÉRIEUR DU SITE	DÉGRADATION DE LA DÉFENSE EN PROFONDEUR
7 ACCIDENT MAJEUR	Rejet majeur : effets considérables sur la santé et l'environnement		
6 ACCIDENT GRAVE	Rejet important susceptible d'exiger l'application intégrale des contre-mesures prévues		
5 ACCIDENT	Rejet limité susceptible d'exiger l'application partielle des contre-mesures prévues	Endommagement grave du cœur du réacteur / des barrières radiologiques	
4 ACCIDENT	Rejet mineur : exposition du public de l'ordre des limites prescrites	Endommagement important du cœur du réacteur / des barrières radiologiques / exposition mortelle d'un travailleur	
3 INCIDENT GRAVE	Très faible rejet : exposition du public représentant au moins un pourcentage des limites fixées par le guide AIEA*	Contamination grave / effets aigus sur la santé d'un travailleur	Accident évité de peu / perte des barrières
2 INCIDENT		Contamination importante / surexposition d'un travailleur	Incidents assortis de défaillances importantes des dispositions de sécurité
1 ANOMALIE			Anomalie sortant du régime de fonctionnement autorisé
0 ÉCART		Aucune importance du point de vue de la sûreté	
ÉVÉNEMENT HORS ÉCHELLE	Aucune importance du point de vue de la sûreté		

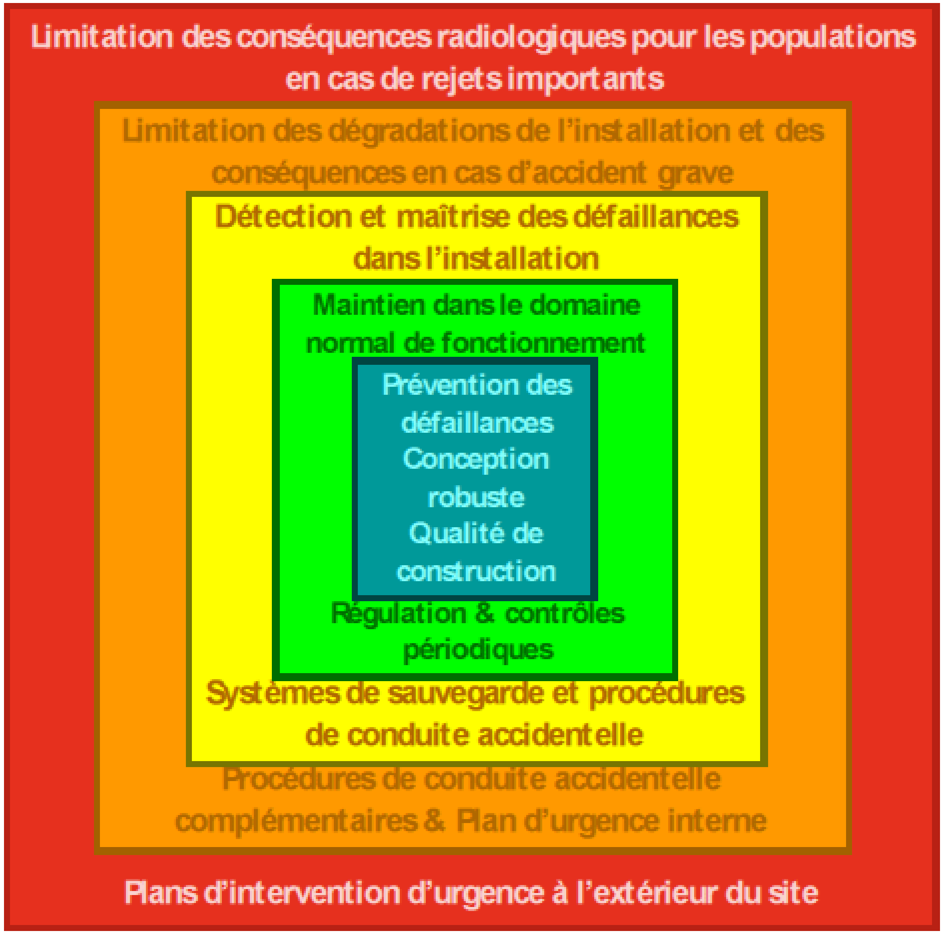
IMT Atlantique
Bretagne-Pays de la Loire
École Mines-Télécom

INES and dose



IMT Atlantique
Bretagne-Pays de la Loire
École Mines-Télécom

Defense in depth



Source : IRSN

INES and dose

1er niveau : Conception et Organisation
Le premier niveau de défense consiste à concevoir et construire l'installation en faisant appel à des techniques fiables et des matériels robustes et à organiser son exploitation de manière à maintenir l'installation dans son domaine normal de fonctionnement.

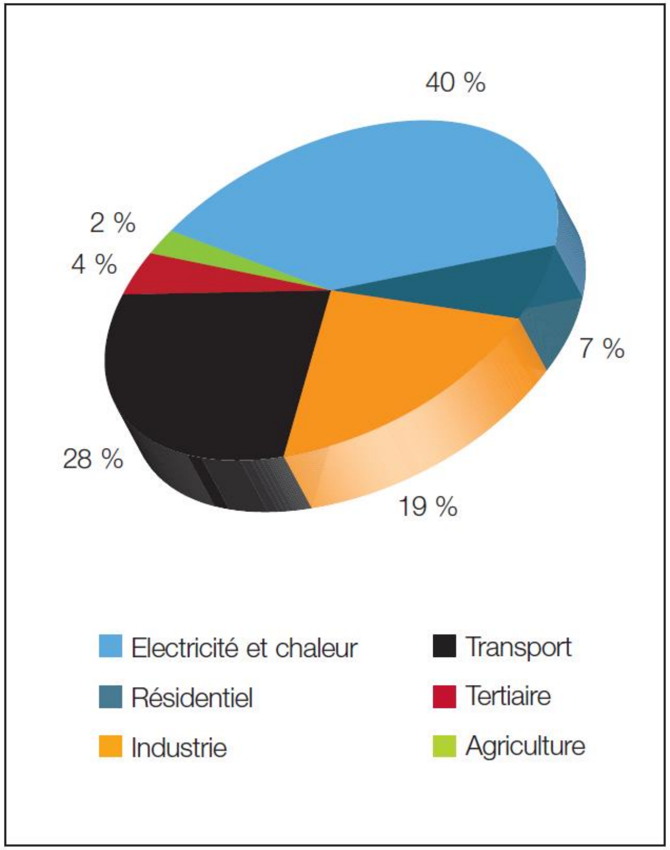
2ème niveau : Dispositifs de contrôle et de protection
Le deuxième niveau de défense vise à empêcher l'installation de sortir de son domaine de fonctionnement normal : des systèmes de régulation, de contrôle et de protection sont présents pour arrêter une évolution anormale avant que des matériels ne soient sollicités au-delà des conditions prévues pour leur fonctionnement.

3ème niveau : Systèmes de sauvegarde et procédures de conduite accidentelle
Le troisième niveau de défense intervient en cas de défaillance des deux premiers niveaux ; il comporte des systèmes dits de sauvegarde et des procédures de conduite de l'installation destinées à circonscrire l'accident et à limiter les effets de ces accidents.

4ème niveau : Limitation des conséquences d'un accident grave
Malgré le soin apporté aux trois premiers niveaux, le risque d'accident susceptible d'entraîner des conséquences importantes bien que minime, n'est pas nul : il est, en effet, impossible de garantir un risque nul. Le quatrième niveau consiste à limiter les rejets provoqués par une situation très grave où le cœur aurait fondu. Les actions à entreprendre font l'objet de procédures ultimes et du Plan d'Urgence Interne établi par l'exploitant.

5ème niveau : Limitation des conséquences radiologiques pour les populations
La mise en œuvre d'actions de protection des populations peut intervenir en cas de rejets plus ou moins importants suppose l'échec ou une efficacité insuffisante des mesures associées aux niveaux précédents. Ces actions sont regroupées dans des Plans Particuliers d'Intervention.

Global warming



Source AREVA

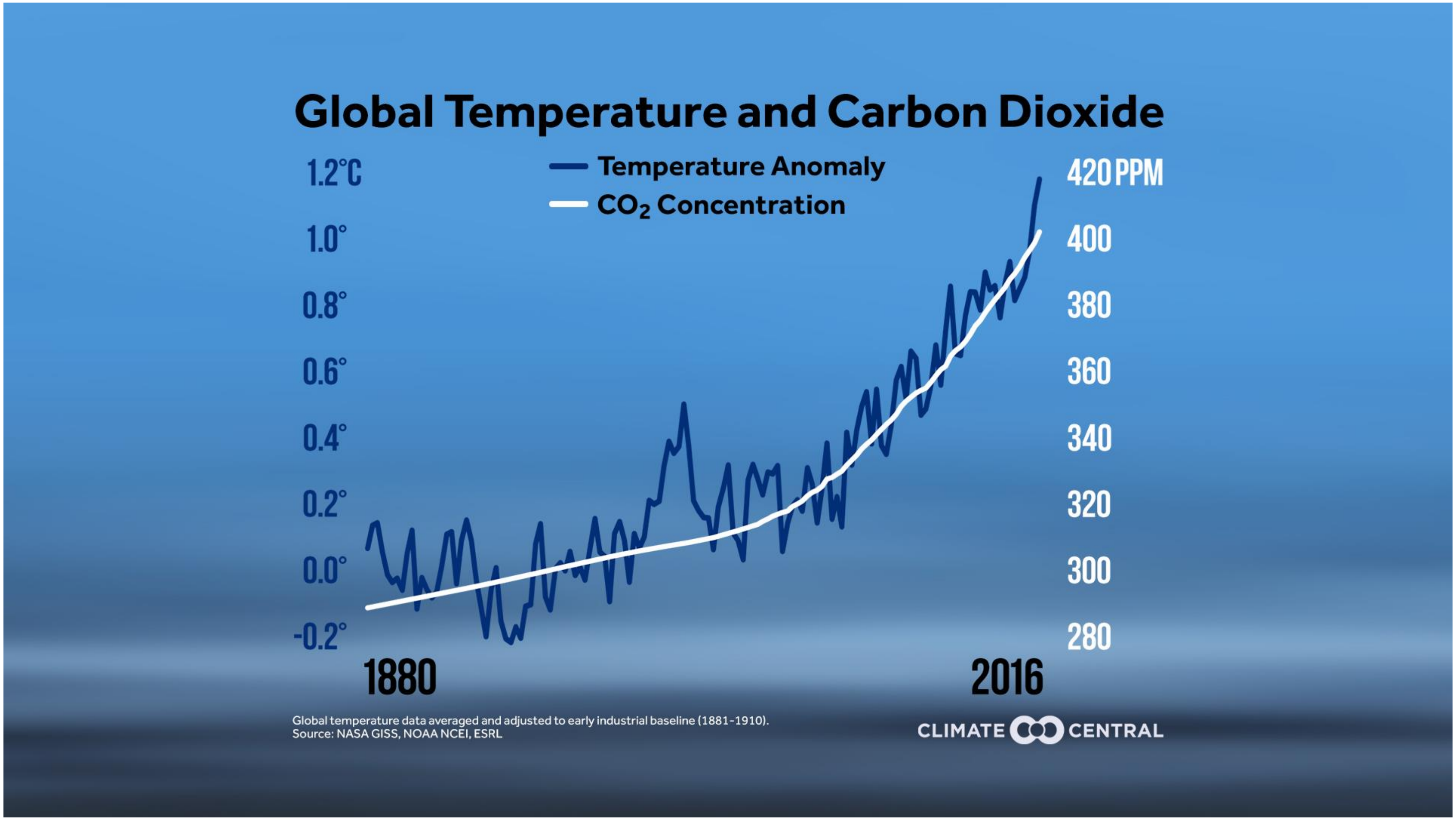
CO_2 emissions worldwide in 2005

IMT Atlantique
Bretagne-Pays de la Loire
École Mines-Télécom

Carbon Dioxide Emissions

IMT Atlantique
Bretagne-Pays de la Loire
École Mines-Télécom

Carbon Dioxide Emission and Global Warming



Climate / Energy Challenge

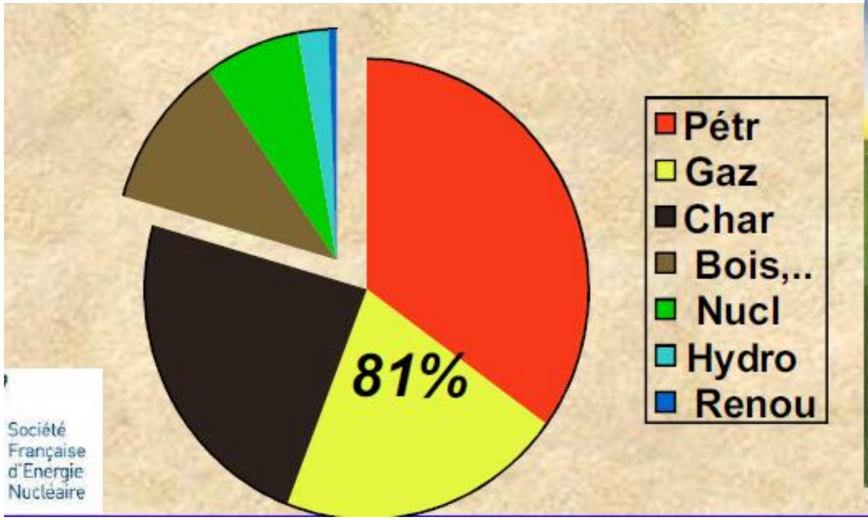
Pre-industrial CO_2 = 280 ppmv
2000 AD CO_2 = 370 ppmv
(Joussaume, 1993)

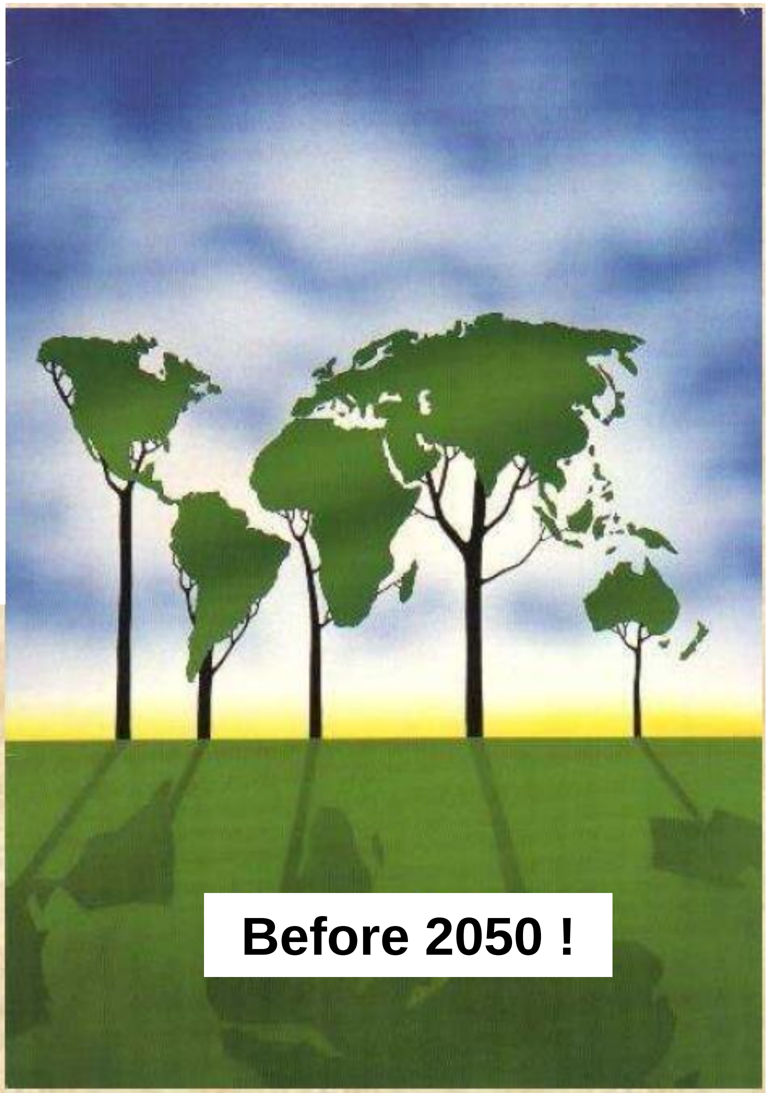
ΔT=-5°C
Δsea level = –130m
Δice volume = +52 106 km^3
CO_2 = 200 ppmv
Pre-industrial CO_2 = 280 ppmv
2000 AD CO_2 = 370 ppmv

IMT Atlantique
Bretagne-Pays de la Loire
École Mines-Télécom

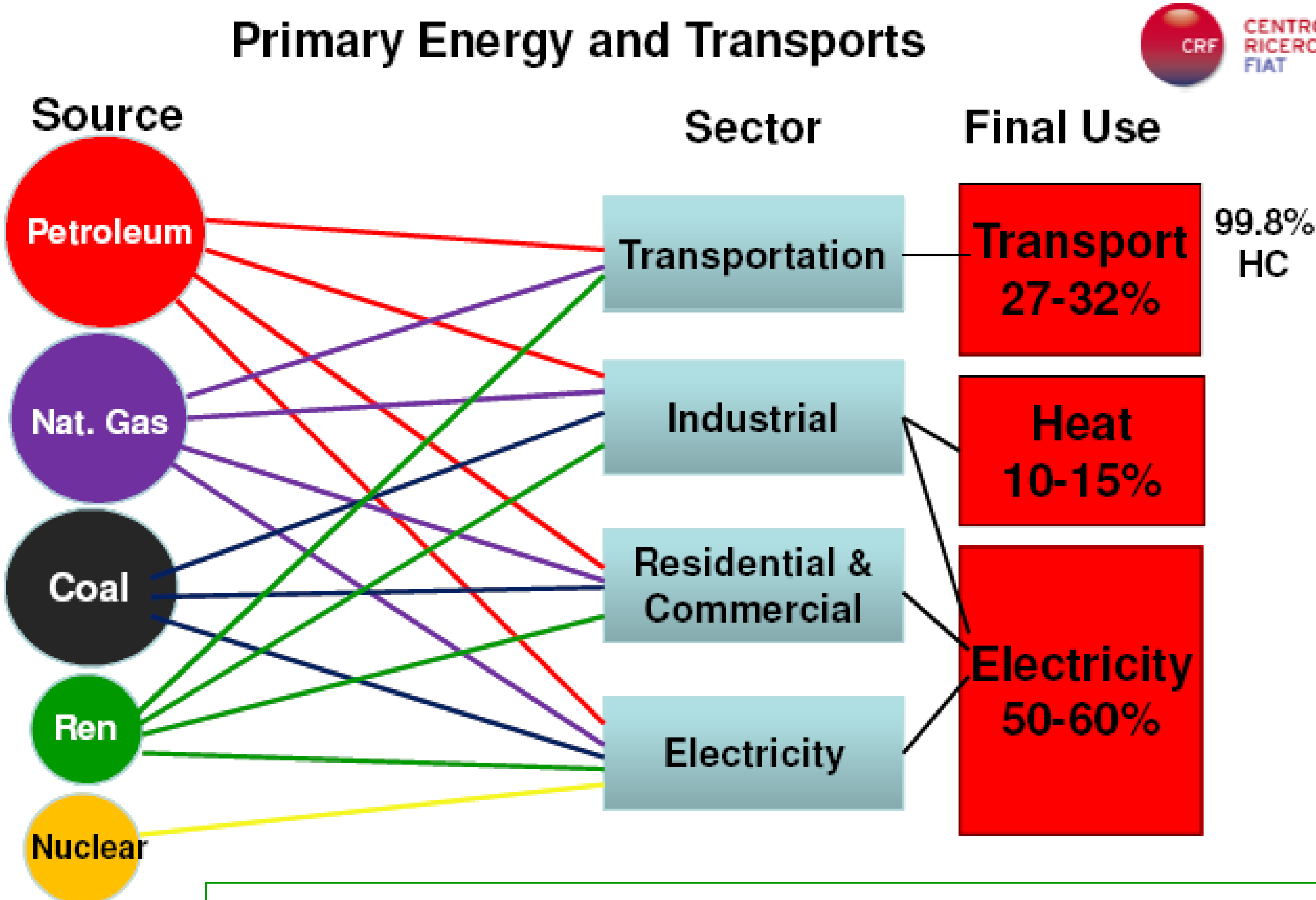
Climate Change Challenge
(EU Energy Roadmap 2050)

Divide by 2 the CO_2 emissions while doubling the energy production





Decarbonisation of the Energy System by 2050 (EU Energy Roadmap 2050)

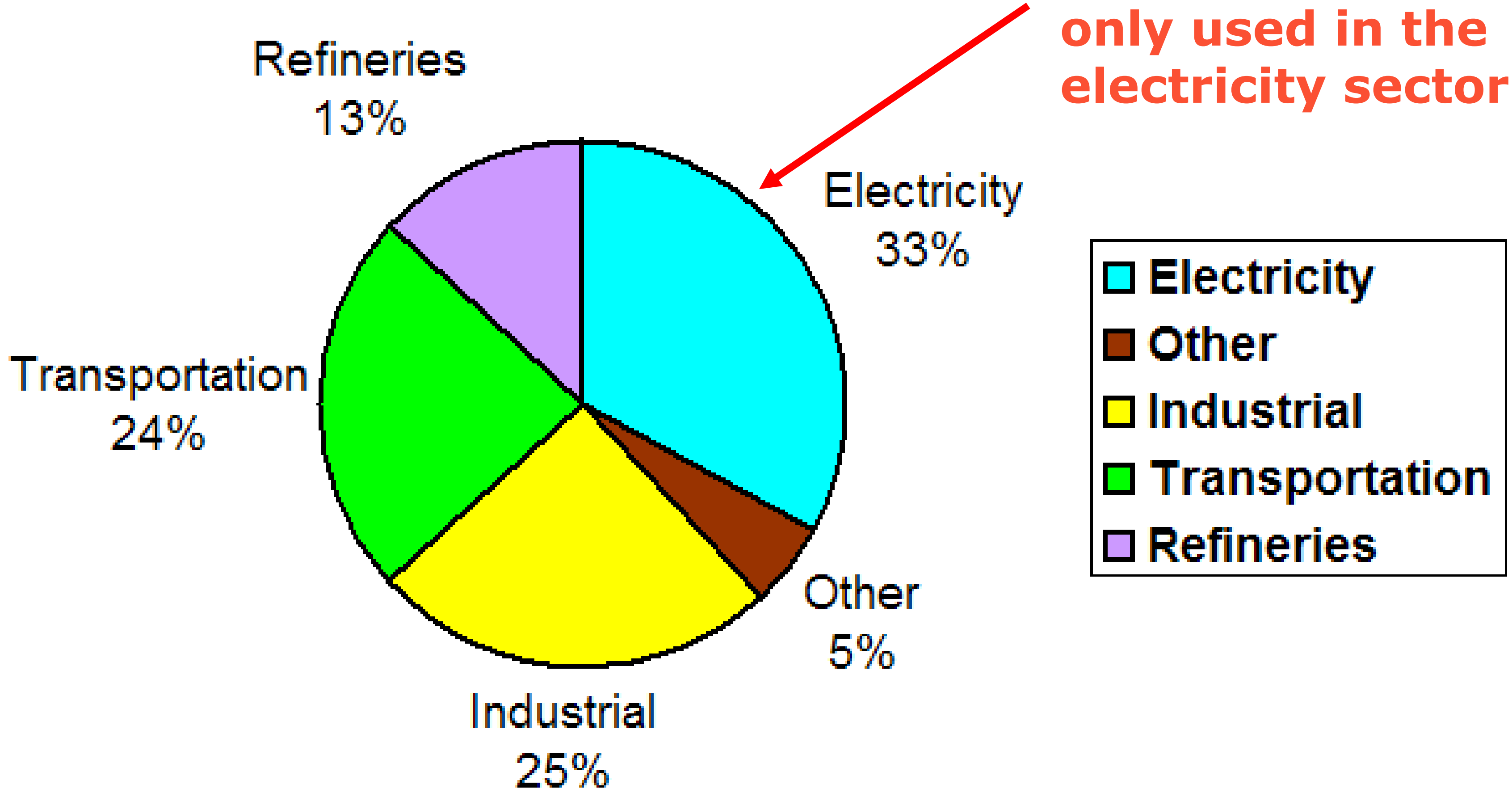


With the advent of e-mobility from 2025 most primary energy will be converted into electricity 70-75%

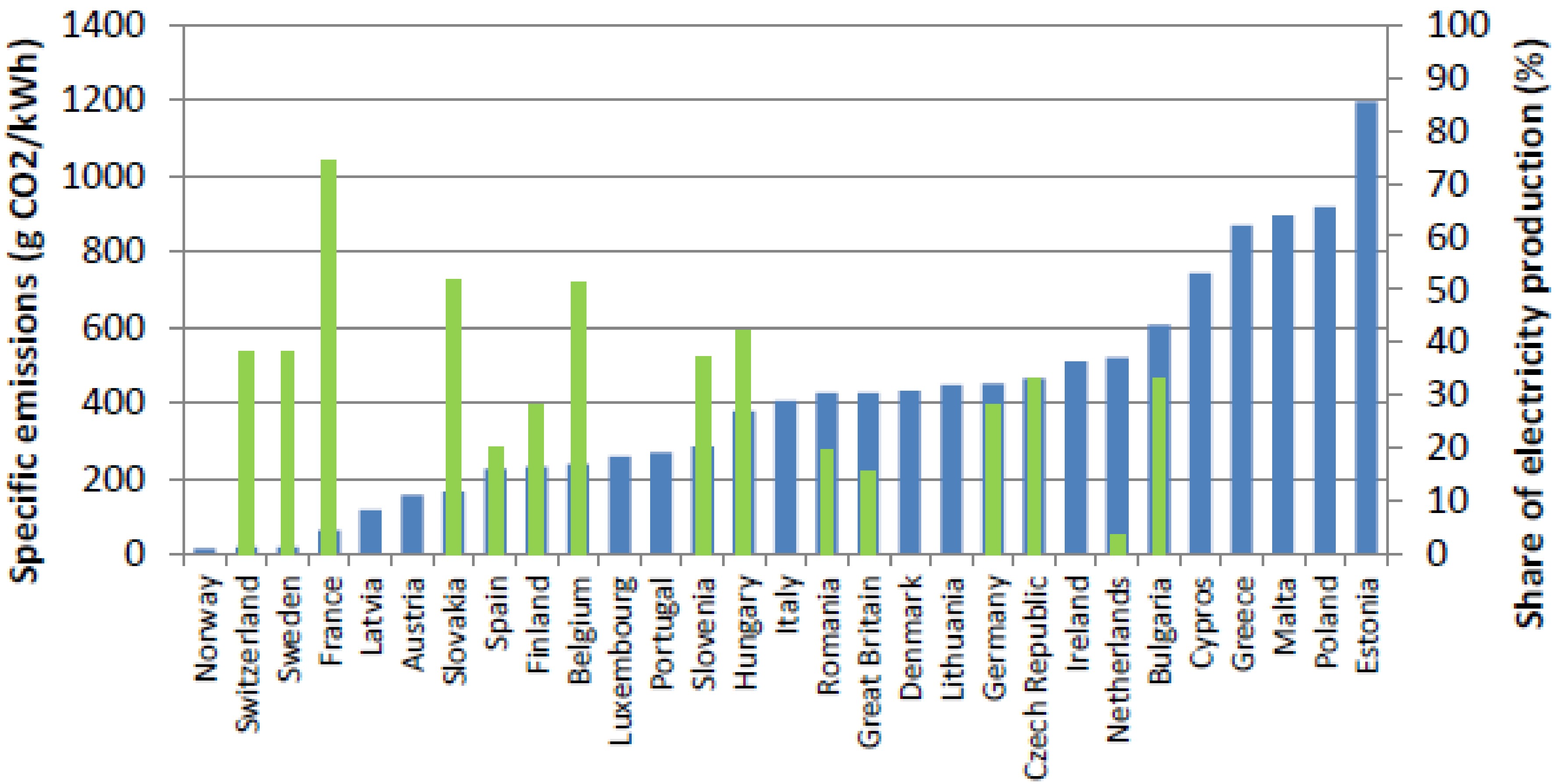
IMT Atlantique
Bretagne-Pays de la Loire
École Mines-Télécom

World CO_2 Emissions by Energy Sector (Nuclear: an Answer to Global Warming ?)

Nuclear energy today only used in the electricity sector

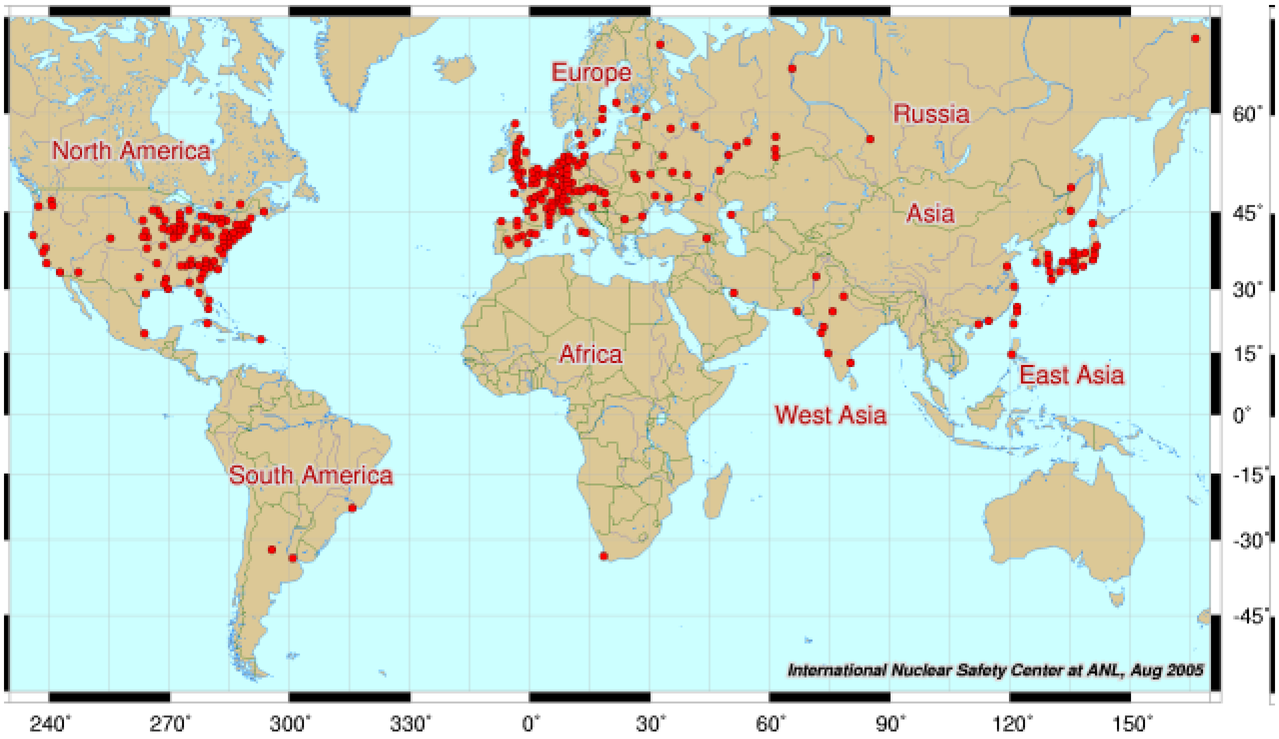


CO_2 Emissions and Nuclear Electricity Production in Europe in 2011



IMT Atlantique
Bretagne-Pays de la Loire
École Mines-Télécom

Nuclear reactors in the world

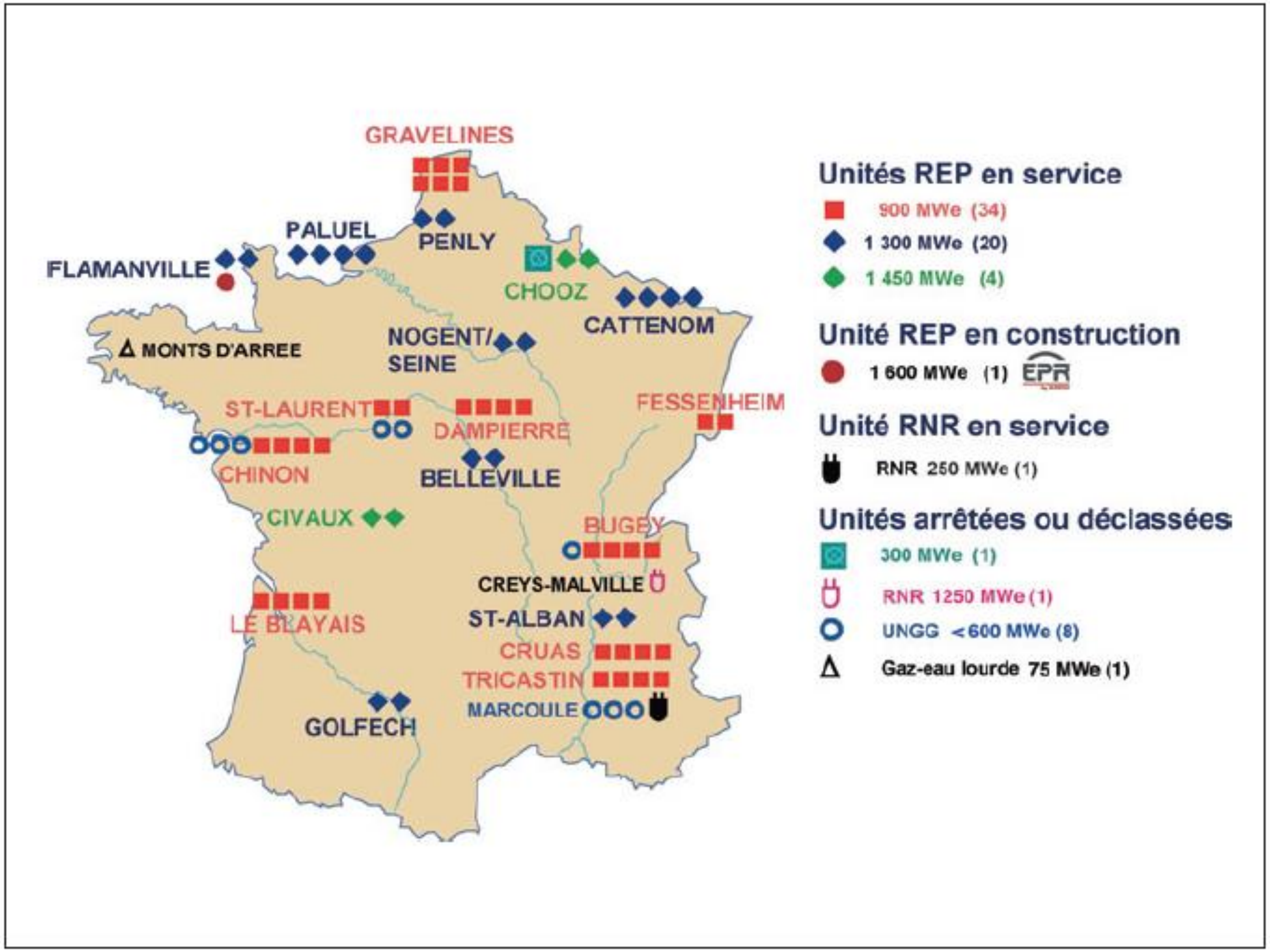


IMT Atlantique
Bretagne-Pays de la Loire
École Mines-Télécom

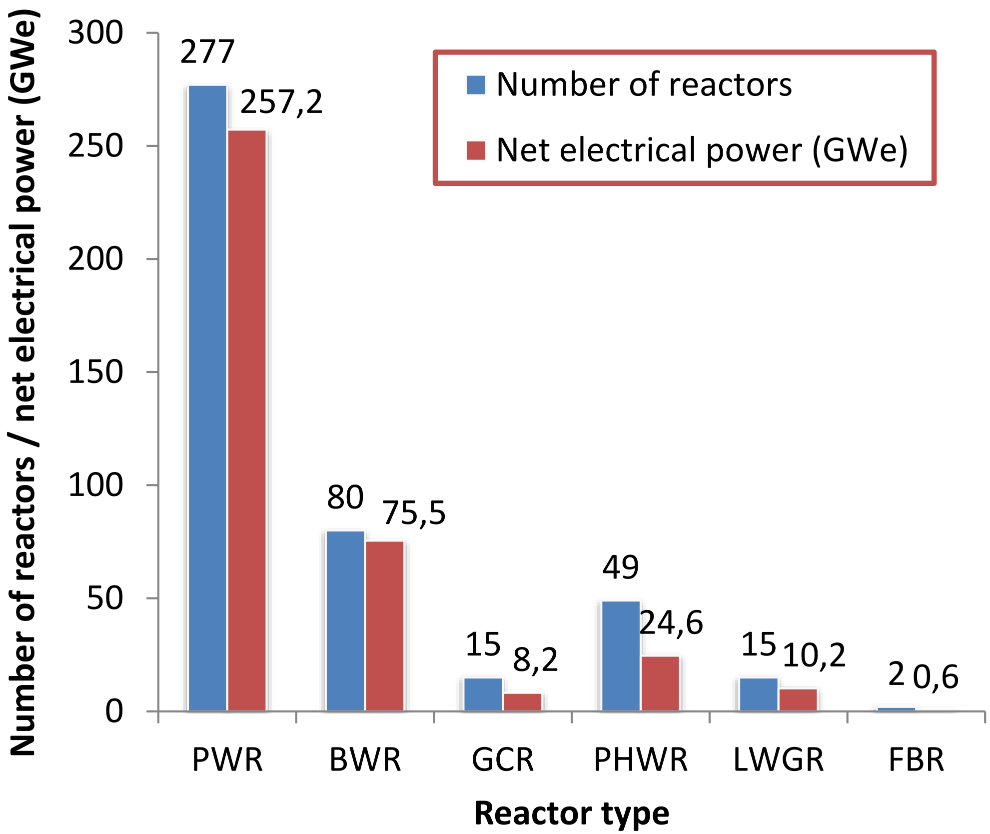
Nuclear reactor in Europe

IMT Atlantique
Bretagne-Pays de la Loire
École Mines-Télécom

Nuclear Power Plants in France



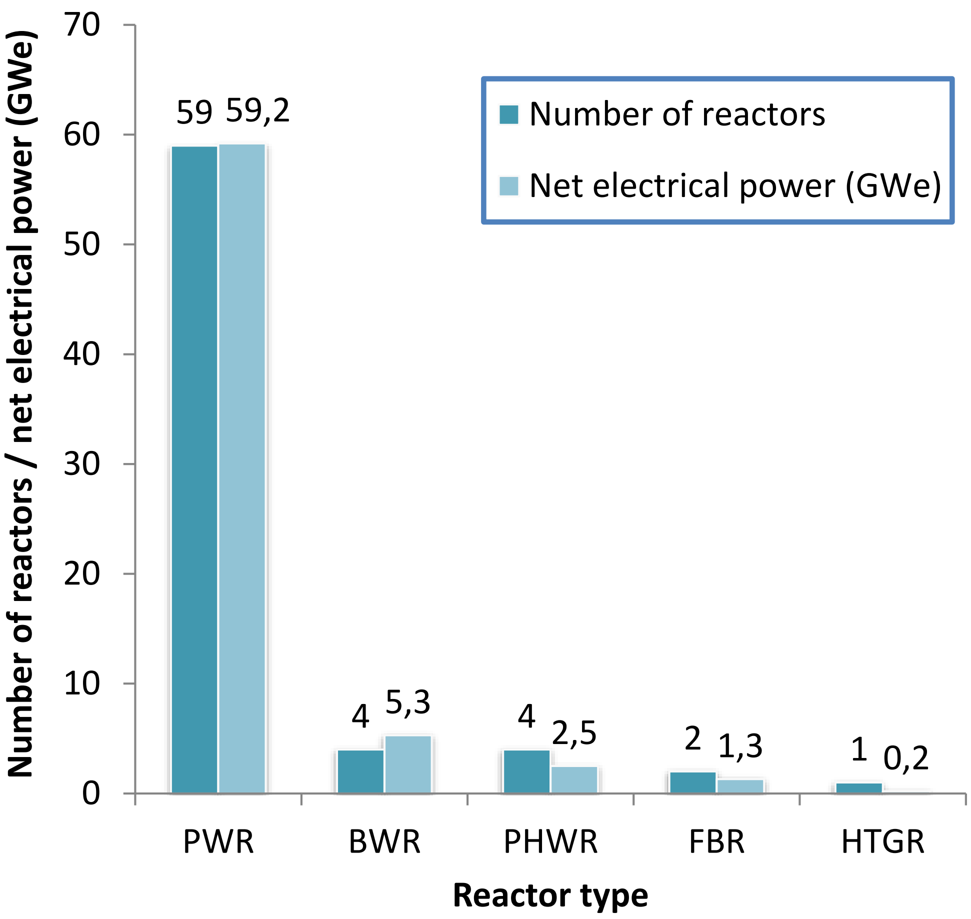
Nuclear Power Plants in the world (Under operation) (IAEA data)



PWR (Pressurized water reactor)
BWR (Boiling water reactor)
GCR (Gas-cooled reactor)
PHWR (Pressurized Heavy Water Reactor)
LWGR (Light Water Graphite Reactor)
FBR (Fast Breeder Reactors)

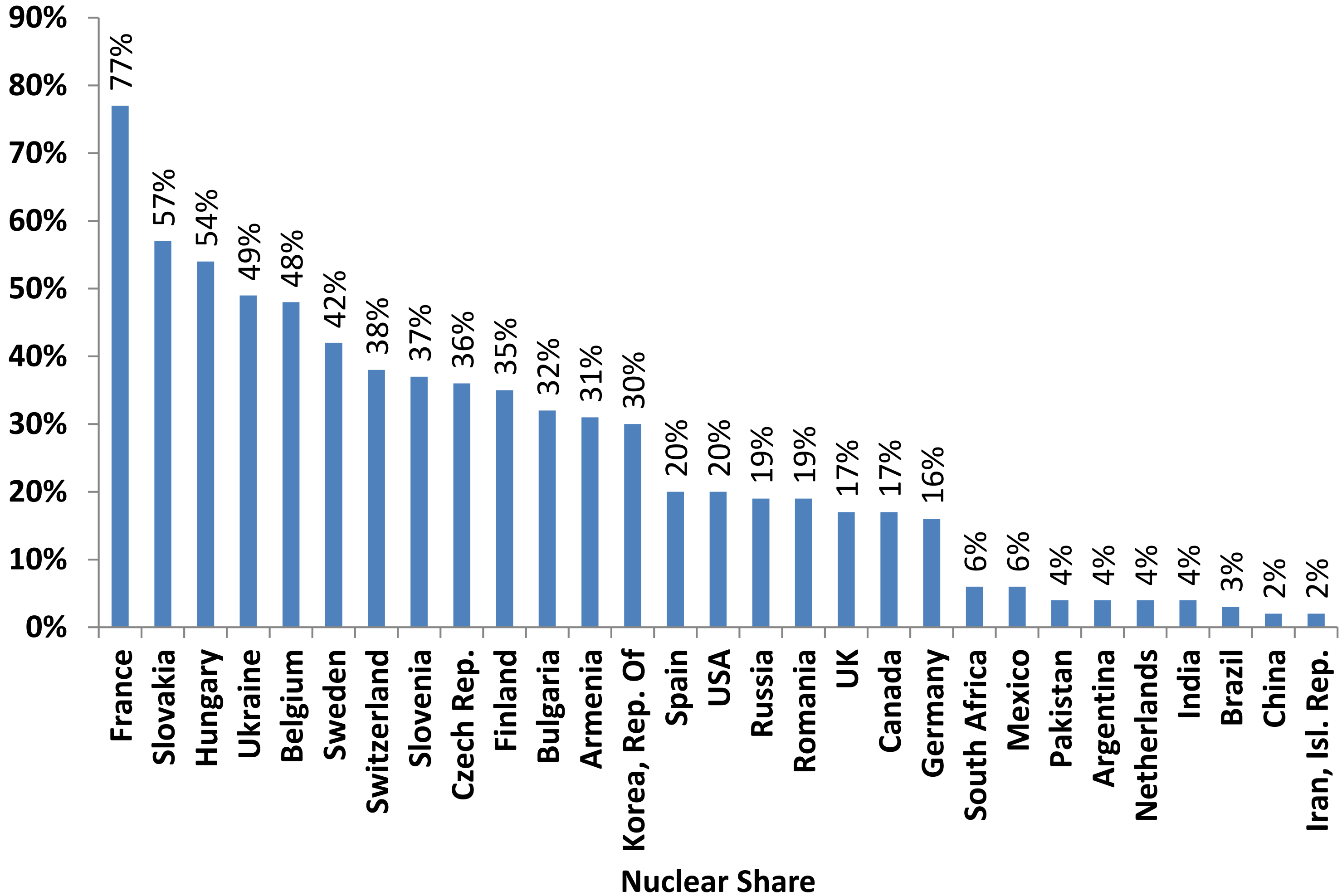
IMT Atlantique
Bretagne-Pays de la Loire
École Mines-Télécom

Nuclear Power Plants in the world (Under construction)



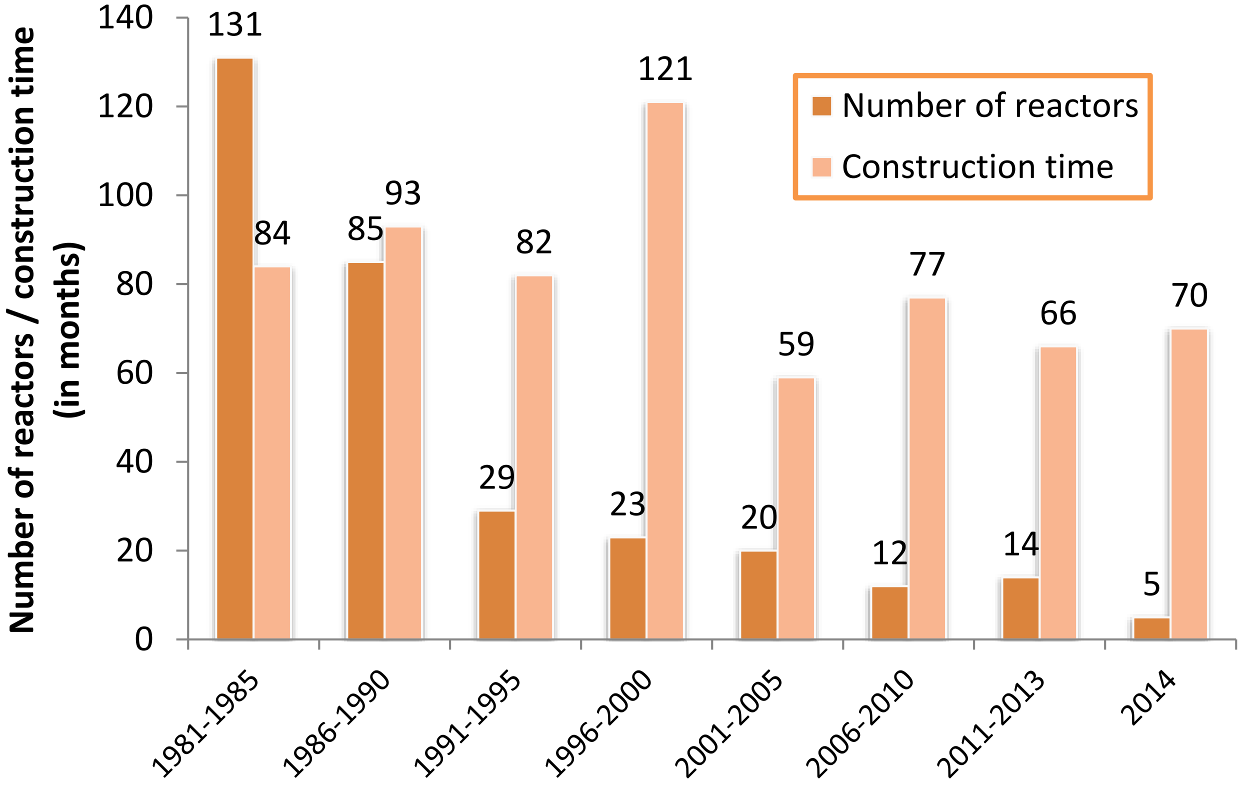
IMT Atlantique
Bretagne-Pays de la Loire
École Mines-Télécom

Nuclear share of electricity generation



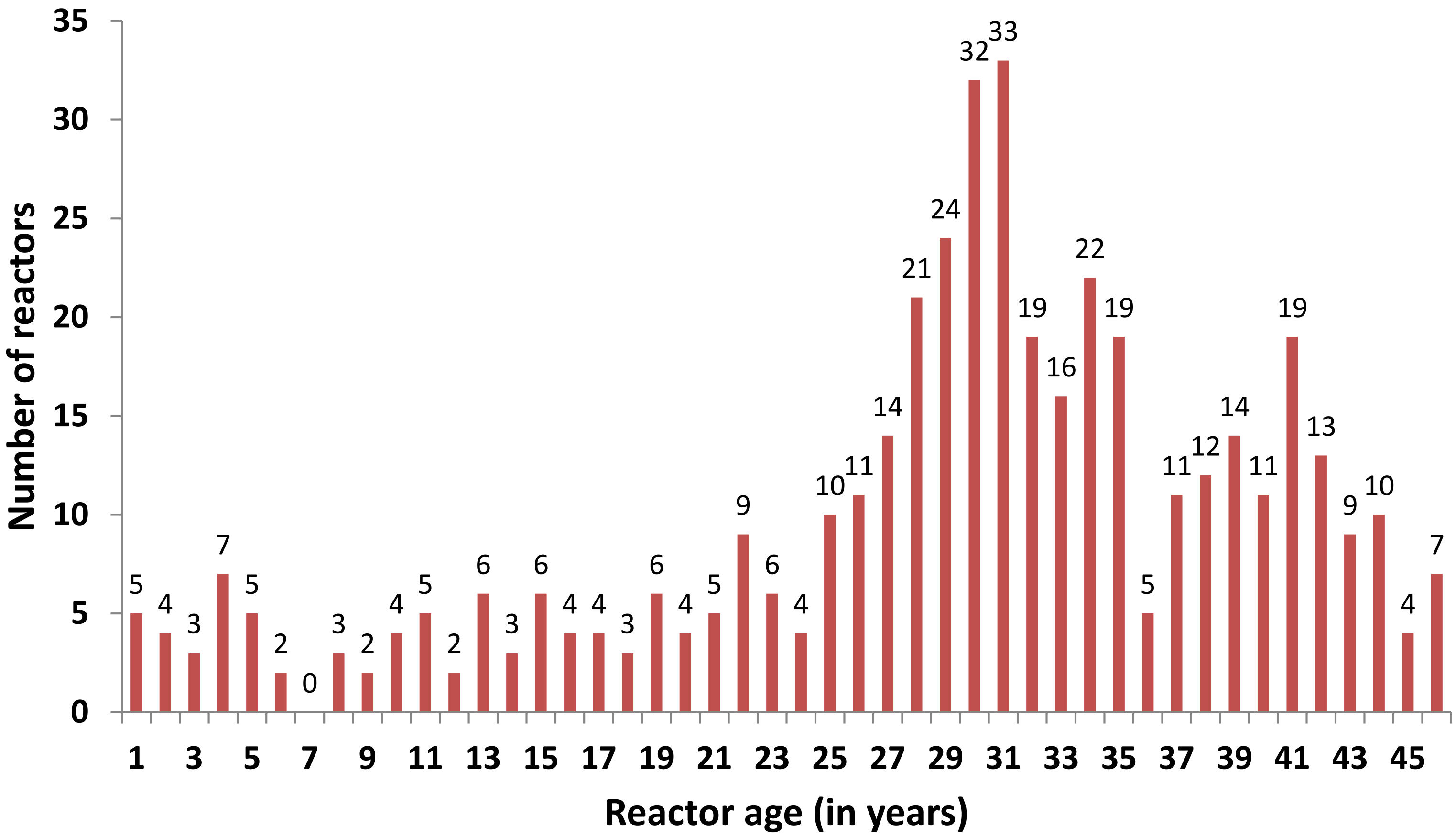
IMT Atlantique
Bretagne-Pays de la Loire
École Mines-Télécom

Worldwide median construction time in months



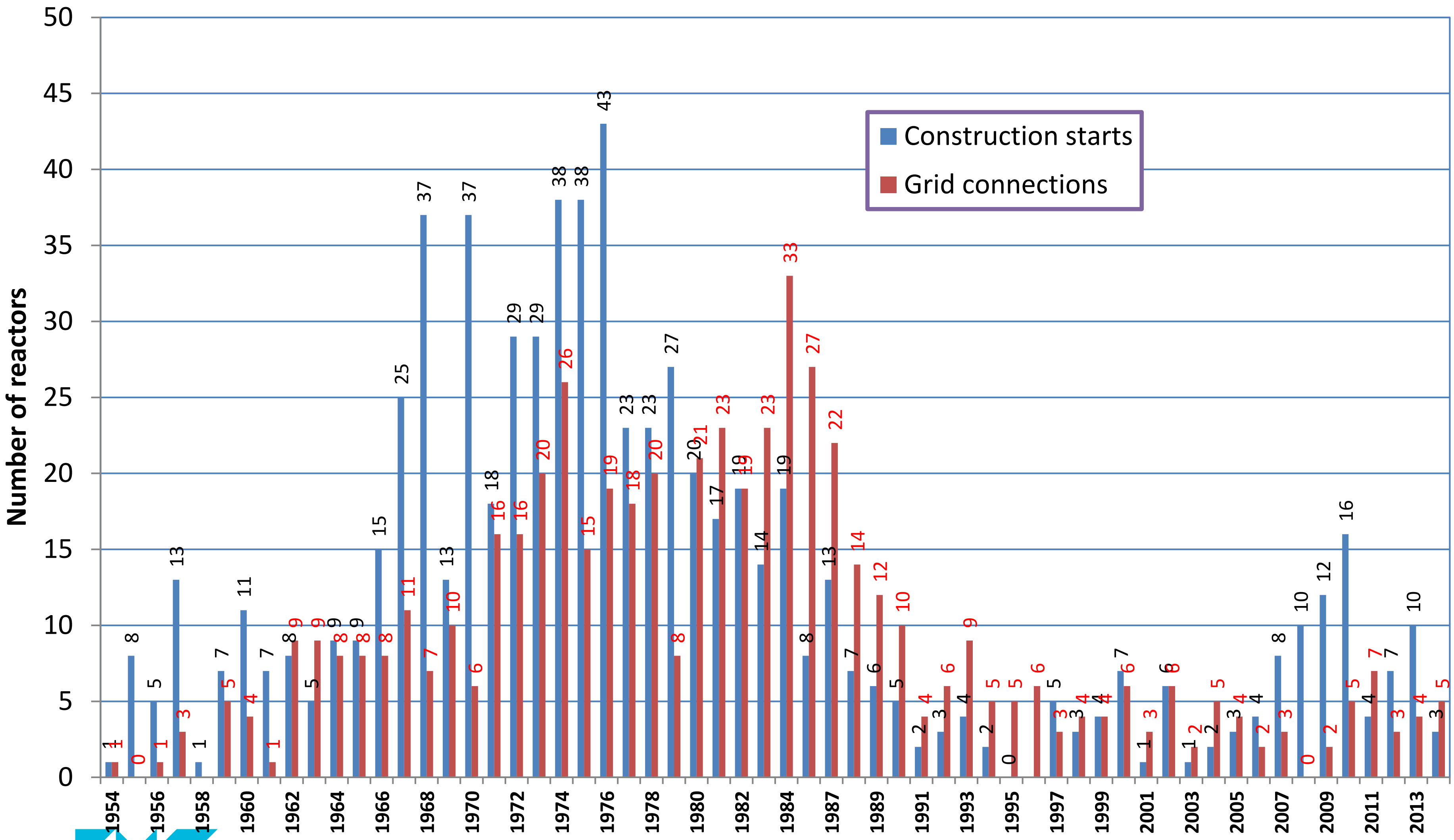
IMT Atlantique
Bretagne-Pays de la Loire
École Mines-Télécom

Worldwide reactors age



IMT Atlantique
Bretagne-Pays de la Loire
École Mines-Télécom

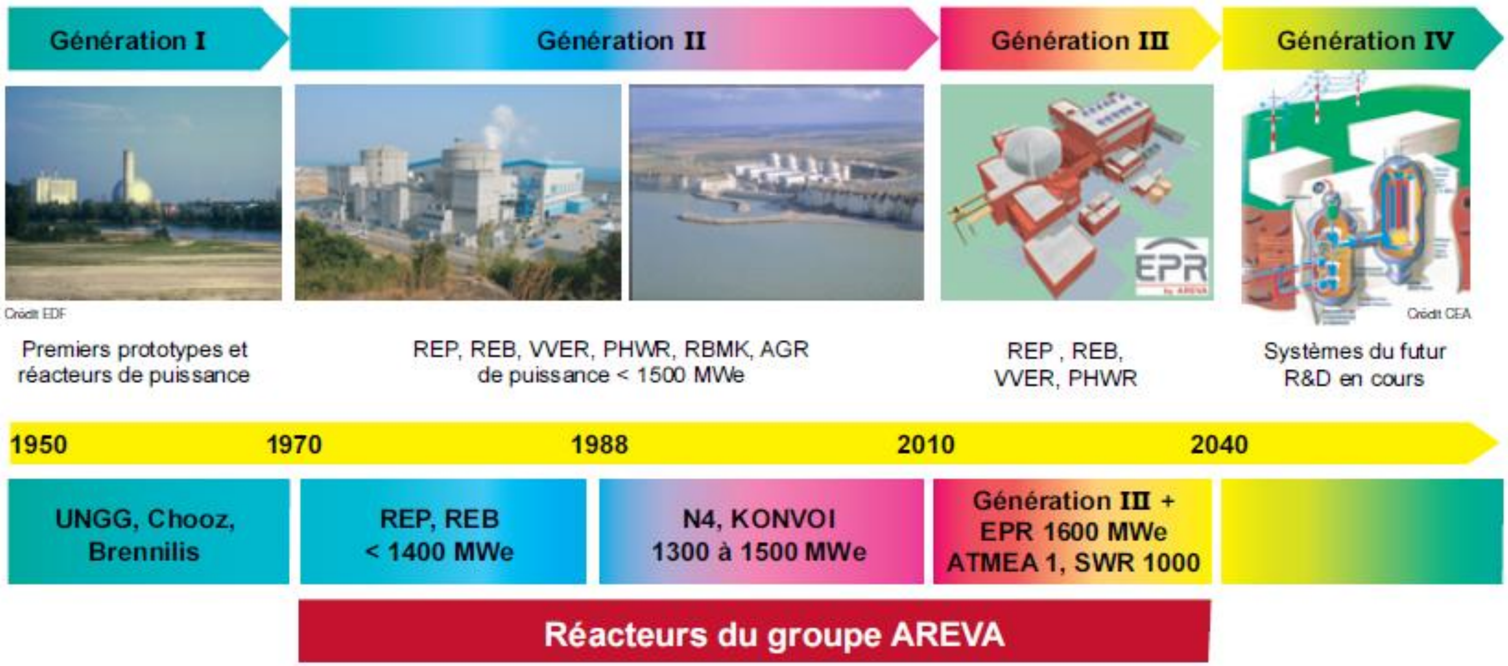
Annual construction starts and connections to the grid



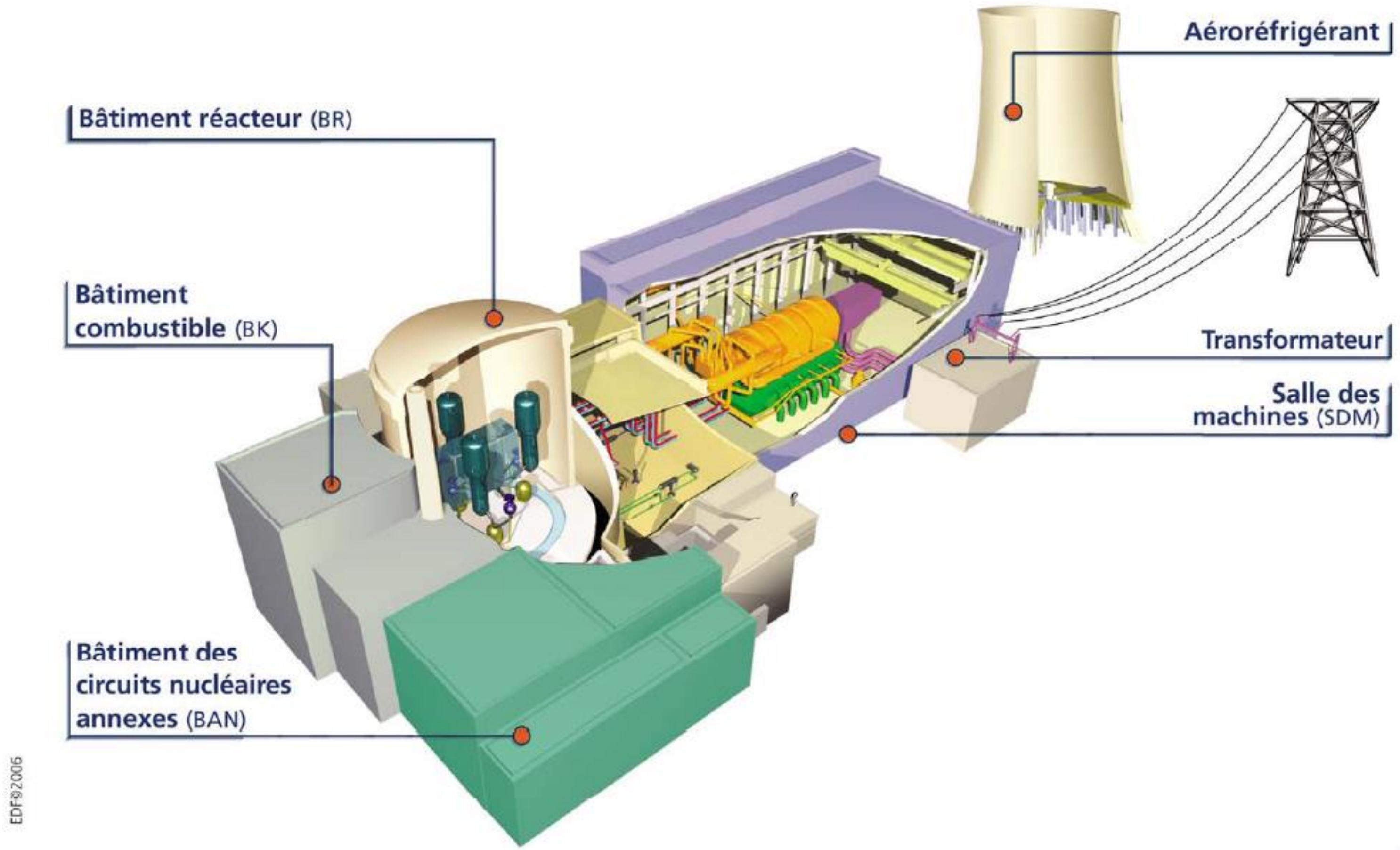
IMT Atlantique
Bretagne-Pays de la Loire
École Mines-Télécom

Nuclear Power Plant

NPP different generations

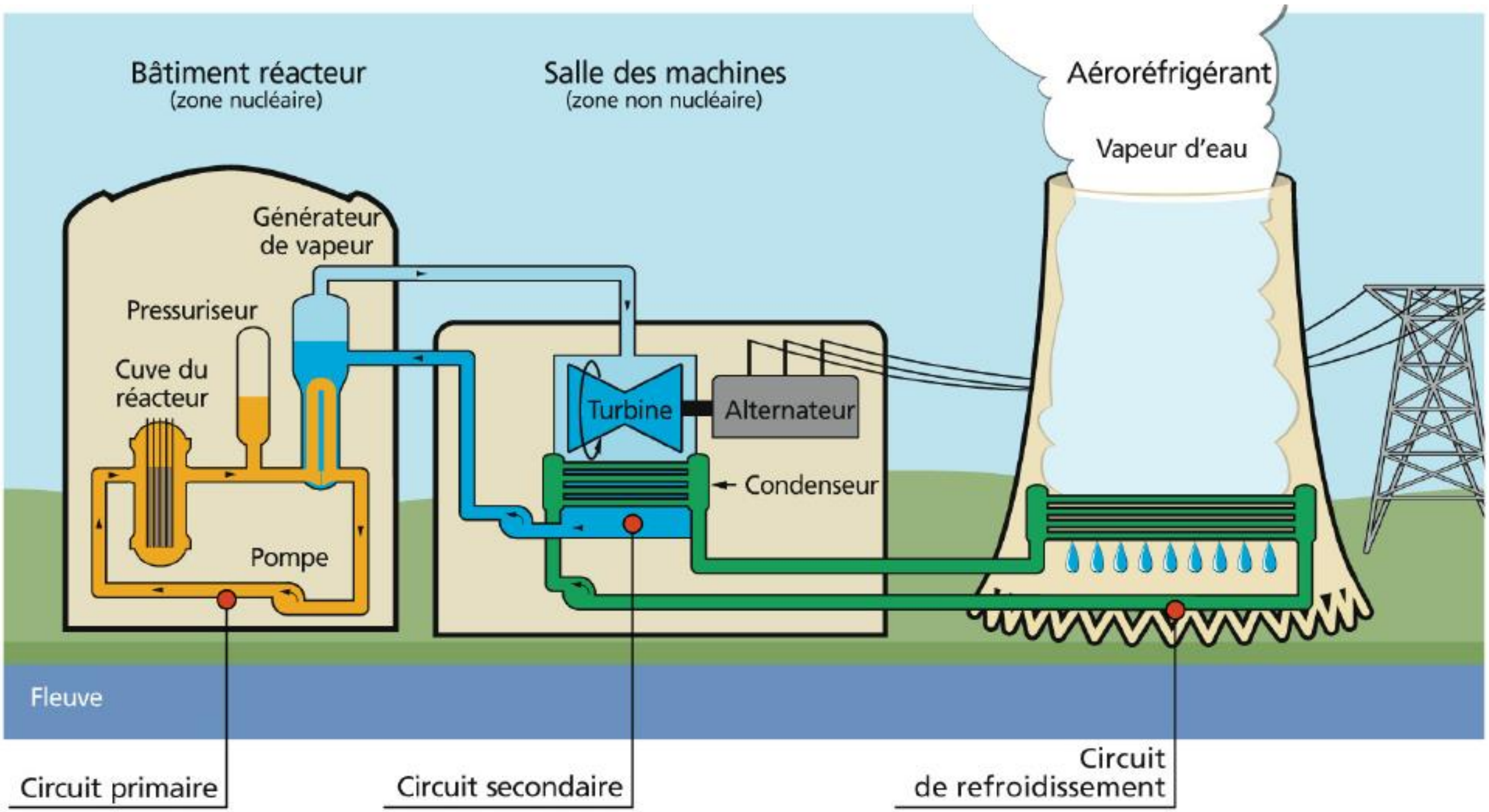


IMT Atlantique
Bretagne-Pays de la Loire
École Mines-Télécom



IMT Atlantique
Bretagne-Pays de la Loire
École Mines-Télécom

PWR Nuclear Power Plant



IMT Atlantique
Bretagne-Pays de la Loire
École Mines-Télécom

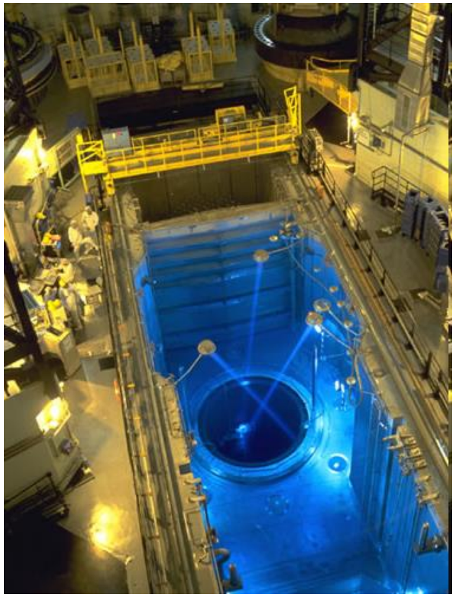
Paluel PWR NPP

Paluel NPP in Haute-Normandie made of 4 PWR reactors (1.3 GWe each).
The NPP provides electricity for about 5 millions persons.

IMT Atlantique
Bretagne-Pays de la Loire
École Mines-Télécom

PWR NPP

Reactor



Vapor generator

Turbine

Electric generator

Transformer

Cooling towers

Mise en place de la cuve du réacteur 1 de la centrale nucléaire de Civaux (France).

Pompe primaire pour un réacteur 1 450 MWe. Usine AREVA de Jeumont (France).

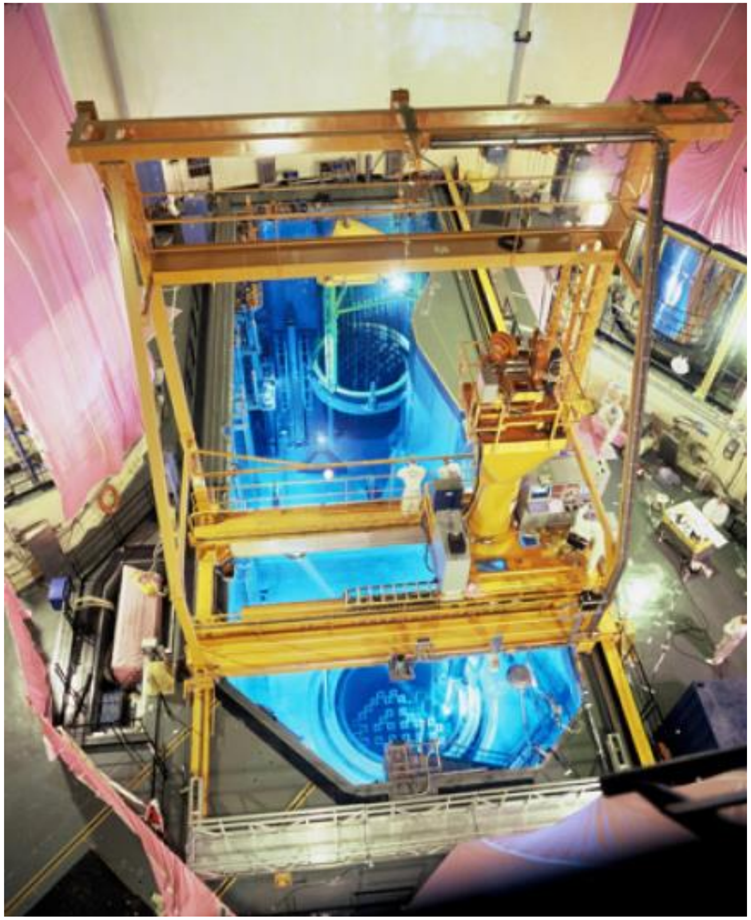
Construction du réacteur EPR à Olkiluoto (Finlande). Mars 2007. Copyright AREVA/P. Bourdon.

Construction du réacteur EPR sur le site d'Olkiluoto (Finlande), janvier 2008.

Construction du réacteur EPR sur le site d'Olkiluoto (Finlande), mars 2008.

Salle des machines de la centrale nucléaire de Chooz (France). Copyright AREVA/E. Joly.

Salle de commande de la centrale nucléaire de Chooz (France). Copyright EDF/M. Morceau.

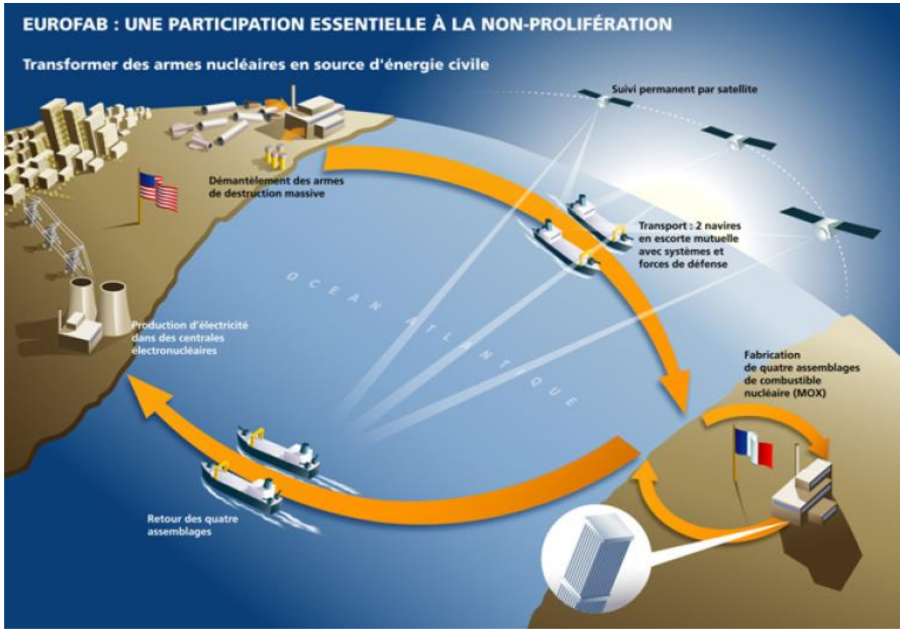


Réacteur 2 de la centrale de Daya Bay (Chine) à l'arrêt pour rechargement en combustible.

Déchargement d'un emballage de combustibles usés dans le port de Cherbourg (France).

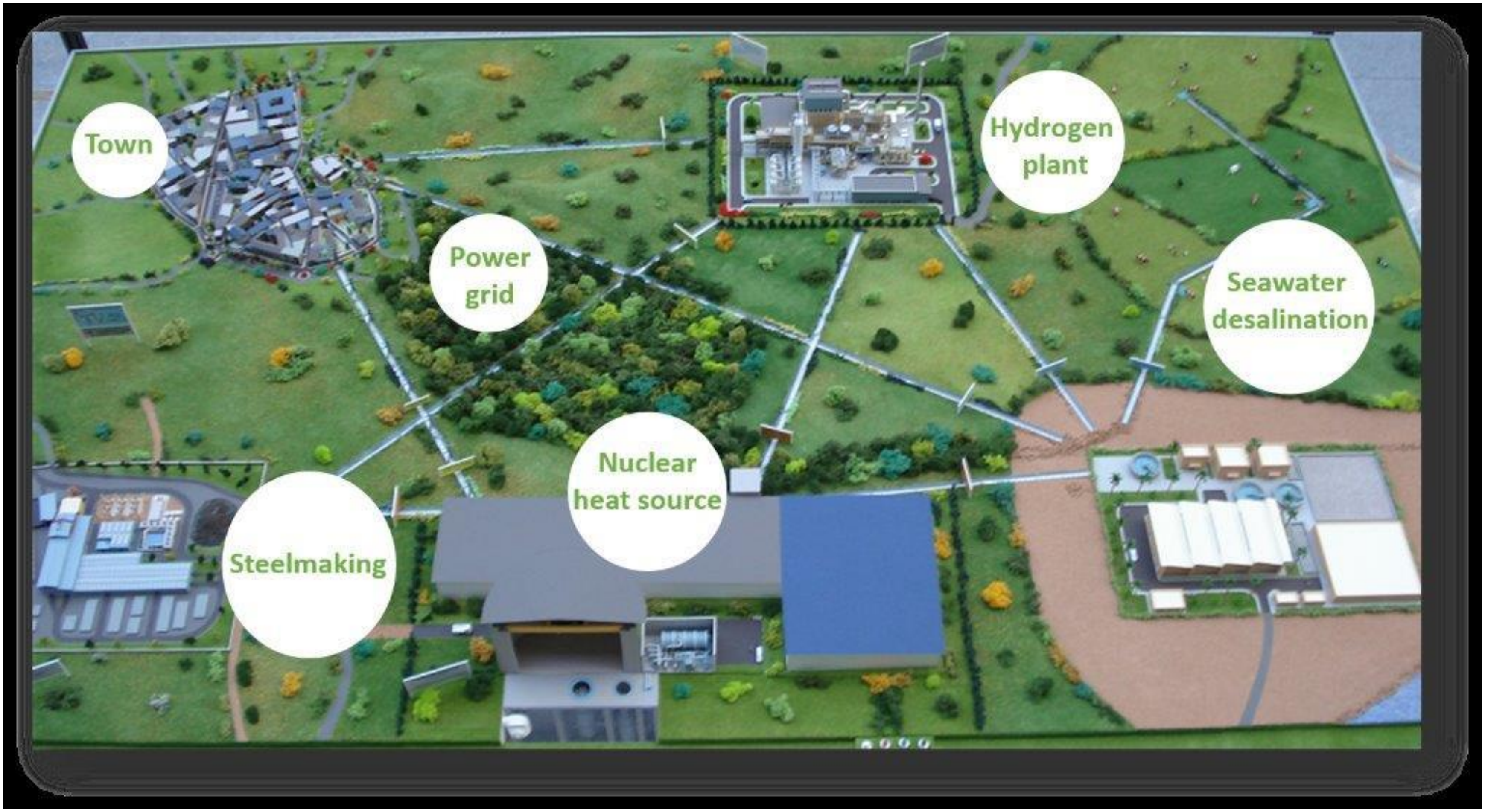
Opérations en boîtes à gants. Usine AREVA de Marcoule (Melox, France).

Assainissement des installations de fabrication de combustibles MOX sur le site AREVA de Cadarache.



EUROFAB : une participation essentielle à la non-prolifération. Copyright AREVA/Karambole.

The nuclear cogeneration concept: providing heat and power to industrial applications



IMT Atlantique
Bretagne-Pays de la Loire
École Mines-Télécom