

Introduction aux “smart grids”

Marc Hélier

marc.helier@sorbonne-universite.fr

Version du 3 octobre 2018

Document réservé aux étudiants de l'UE 2E102



Professeur à Sorbonne Université depuis janvier 2018 et à l'Université Pierre et Marie Curie (UPMC) de septembre 2001 à décembre 2017 (électronique et électromagnétisme).

Auparavant, enseignant-chercheur à Supélec (Gif-sur-Yvette) devenu depuis CentraleSupélec.

Chargé de mission « Prospective » à la Vice-présidence « Recherche, Innovation et Science ouverte » de Sorbonne Université.

Responsable du Directoire des formations et de l'insertion professionnelle de l'UPMC de mars 2012 à décembre 2017, attaché à la vice-présidence Formation et insertion professionnelle de l'UPMC.

Membre du conseil d'administration de la **fondation UPMC** de novembre 2012 à juillet 2018.

Directeur du **Laboratoire d'Électronique et Électromagnétisme (L2E)**, UR2 de l'UPMC, de sa création, en mars 2008 jusqu'en décembre 2011.

Directeur adjoint du Laboratoire des Instruments et Systèmes d'Île-de-France (LISIF) de janvier 2005 à février 2008.

Mes centres d'intérêt en recherche

L'électromagnétisme (équations de Maxwell)

Les antennes et leurs applications (radar...)

La propagation des ondes (libre et guidée)

La compatibilité électromagnétique

L'emploi des probabilités et des statistiques
en électromagnétisme

Les liens de l'électromagnétisme au sens large avec les
questions de l'énergie et du réchauffement climatique

Partie I : Le contexte énergétique actuel

Unités et ordres de grandeur

Quelques chiffres

Sans énergie, pas de croissance ?

Sans énergie, pas de confort ?

Les limitations et les effets indésirables

Un besoin d'anticipation

Unités et ordres de grandeur

Unités et ordres de grandeur

- La référence physique : le Joule (J)
- Le kWh : $1 \text{ kWh} = 3,6 \text{ MJ}$
- Un litre de carburant : **10 kWh**
- 1 baril de pétrole = 159 litres
- La tonne équivalent pétrole (tep) : $1 \text{ tep} = 41,8 \text{ GJ}$
- On a aussi **$1 \text{ tep} = 11\,600 \text{ kWh} = 11,6 \text{ MWh}$**
- tep en français, *toe* (*tonne of oil equivalent*) en anglais

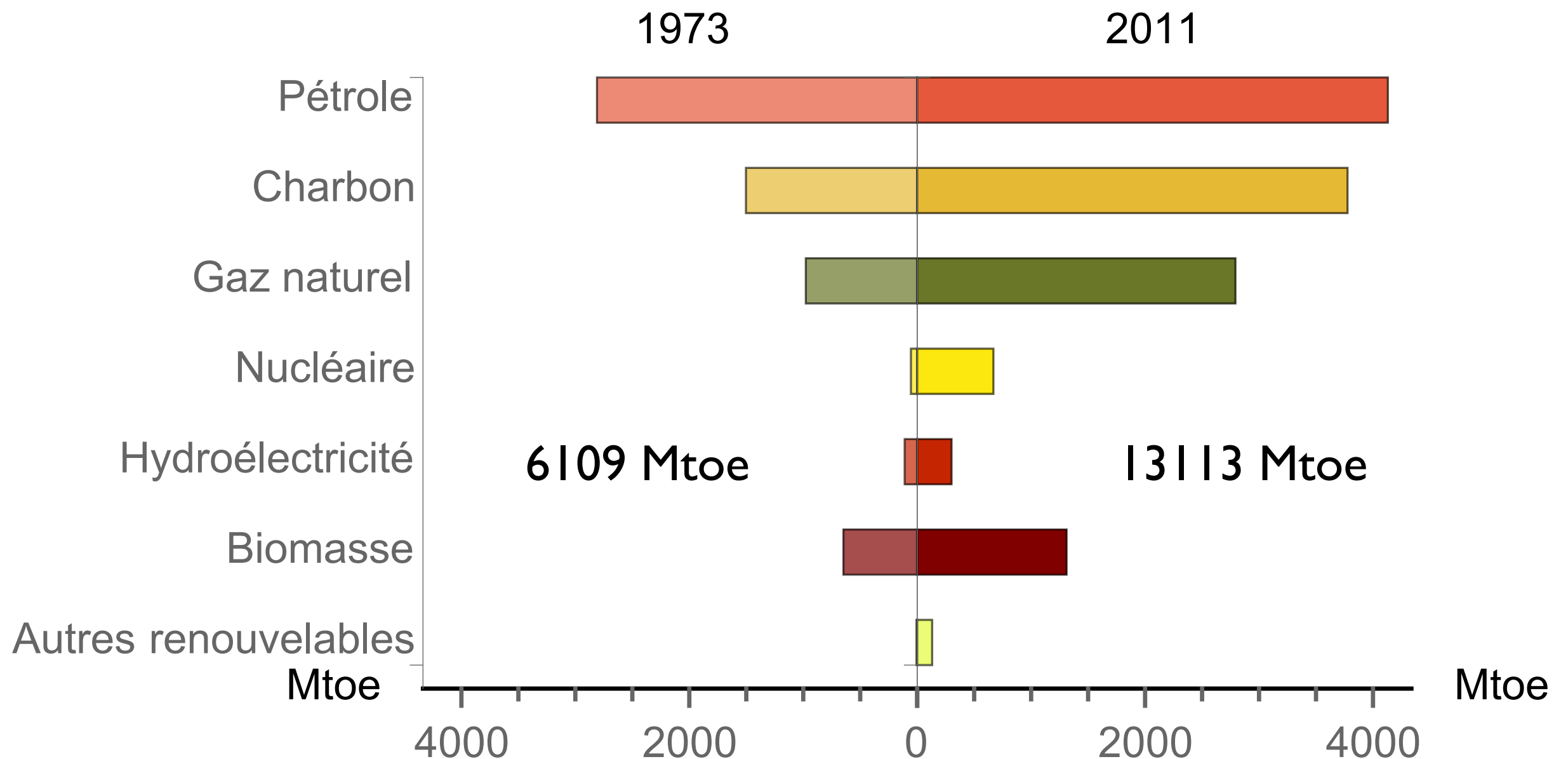
Unités et ordres de grandeur

- La référence physique : le Joule (J)
- Le kWh : $1 \text{ kWh} = 3,6 \text{ MJ}$
- Un litre de carburant : **10 kWh**
- 1 baril de pétrole = 159 litres
- La tonne équivalent pétrole (tep) : $1 \text{ tep} = 41,8 \text{ GJ}$
- On a aussi **$1 \text{ tep} = 11\,600 \text{ kWh} = 11,6 \text{ MWh}$**
- tep en français, toe (*tonne of oil equivalent*) en anglais

Imbattable

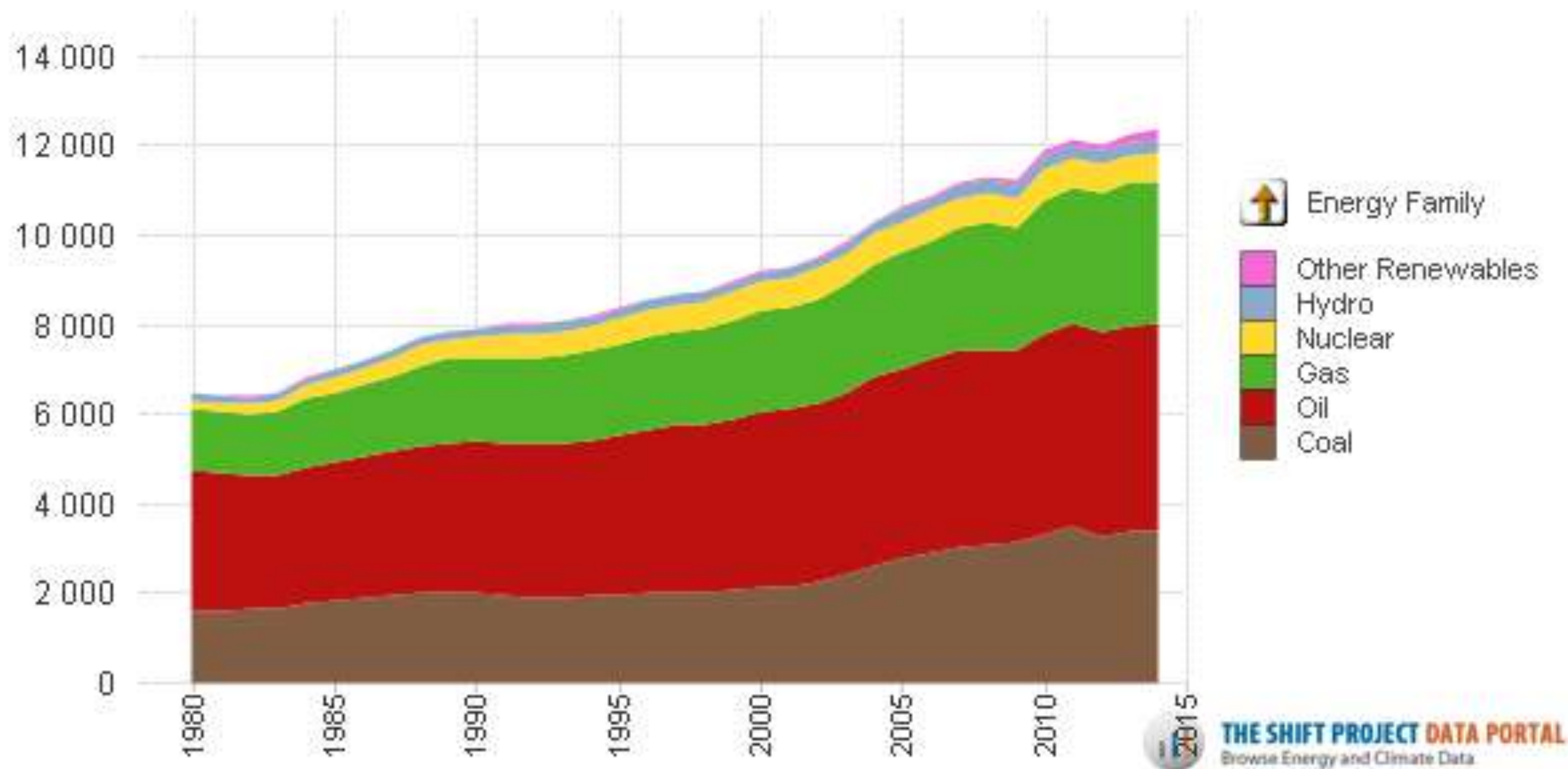
Quelques chiffres

Sources d'énergie primaire dans le monde en 1973 et en 2011



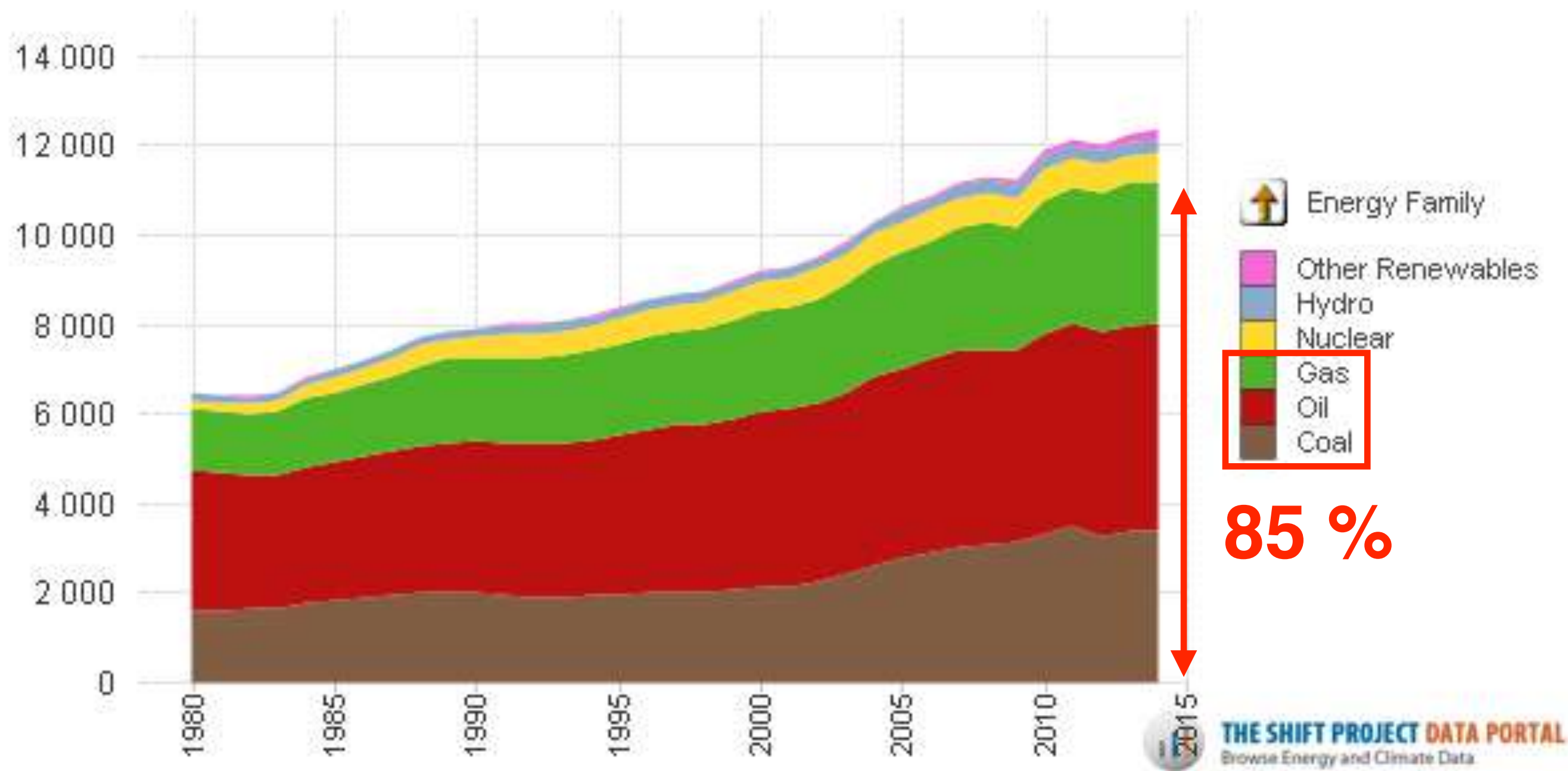
Source des données : AIE, 2013

World, Primary Energy Consumption (Mtoe)



The Shift Project - 96 rue de la Victoire - 75009 Paris
Tel : +33 1 76 21 10 20 - www.theshiftproject.org

World, Primary Energy Consumption (Mtoe)



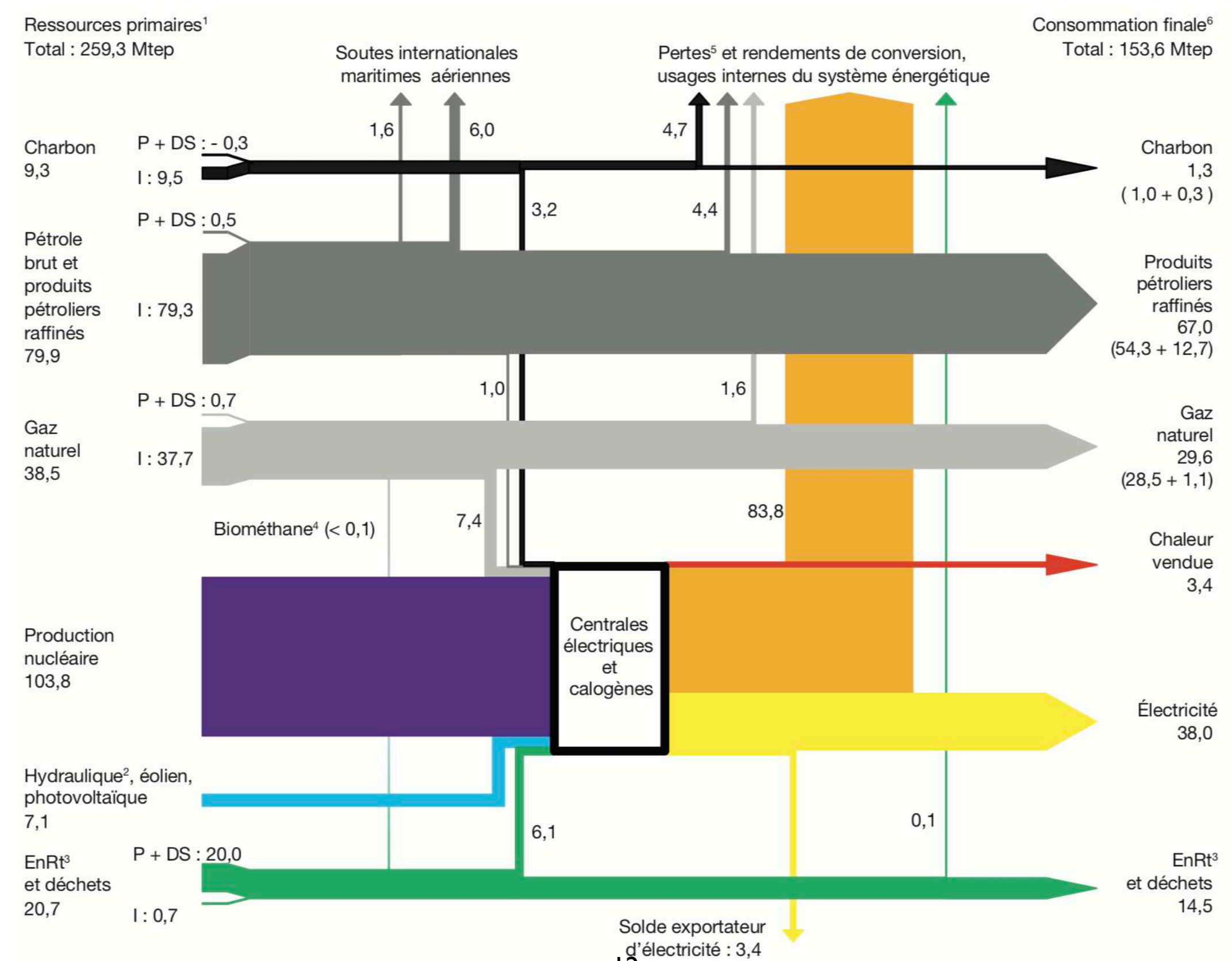
The Shift Project - 96 rue de la Victoire - 75009 Paris
Tel : +33 1 76 21 10 20 - www.theshiftproject.org

Énergies en France (2017)

259,3 Mtep

Source : Commissariat général au développement durable

153,6 Mtep

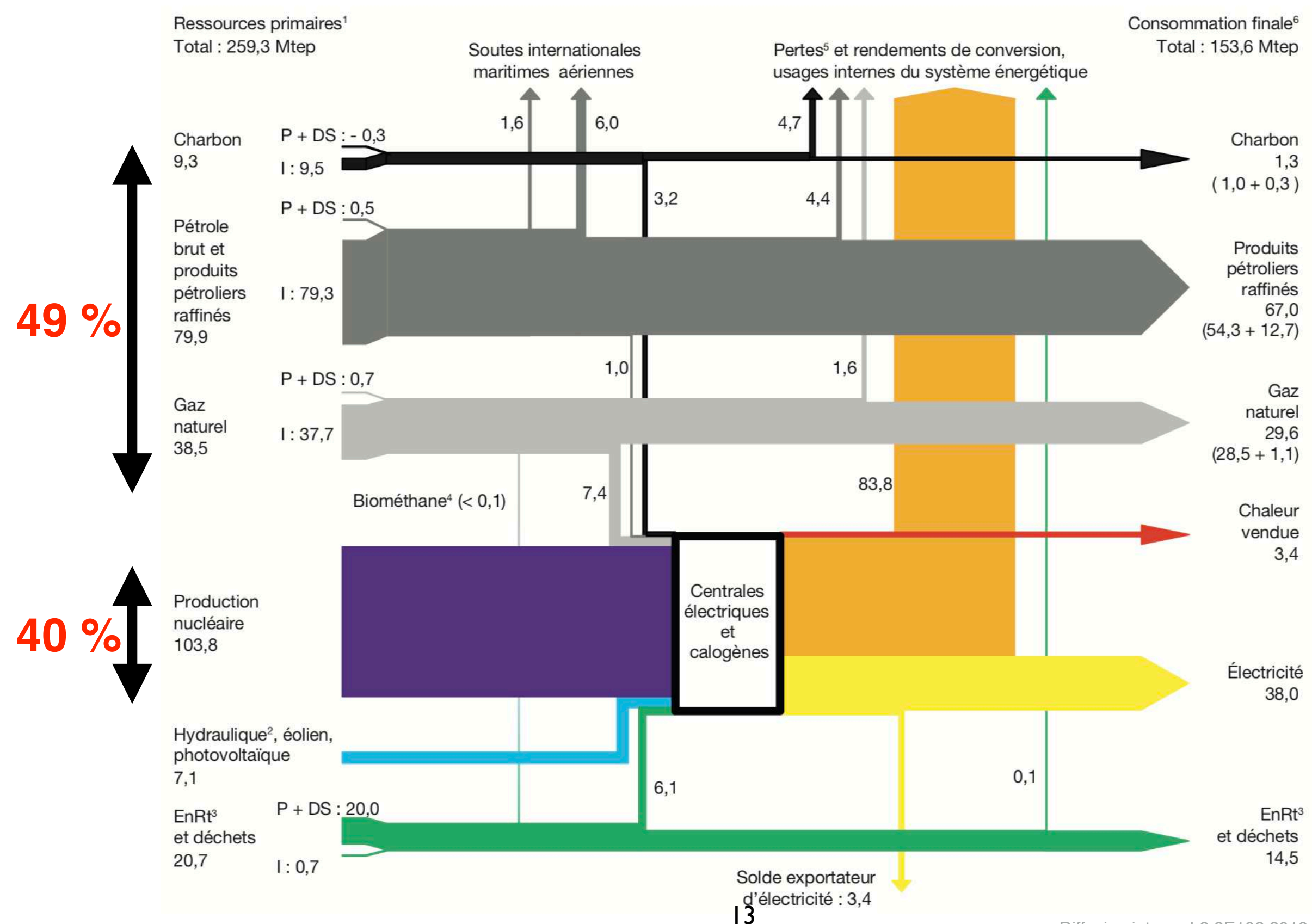


Énergies en France (2017)

259,3 Mtep

Source : Commissariat général au développement durable

153,6 Mtep

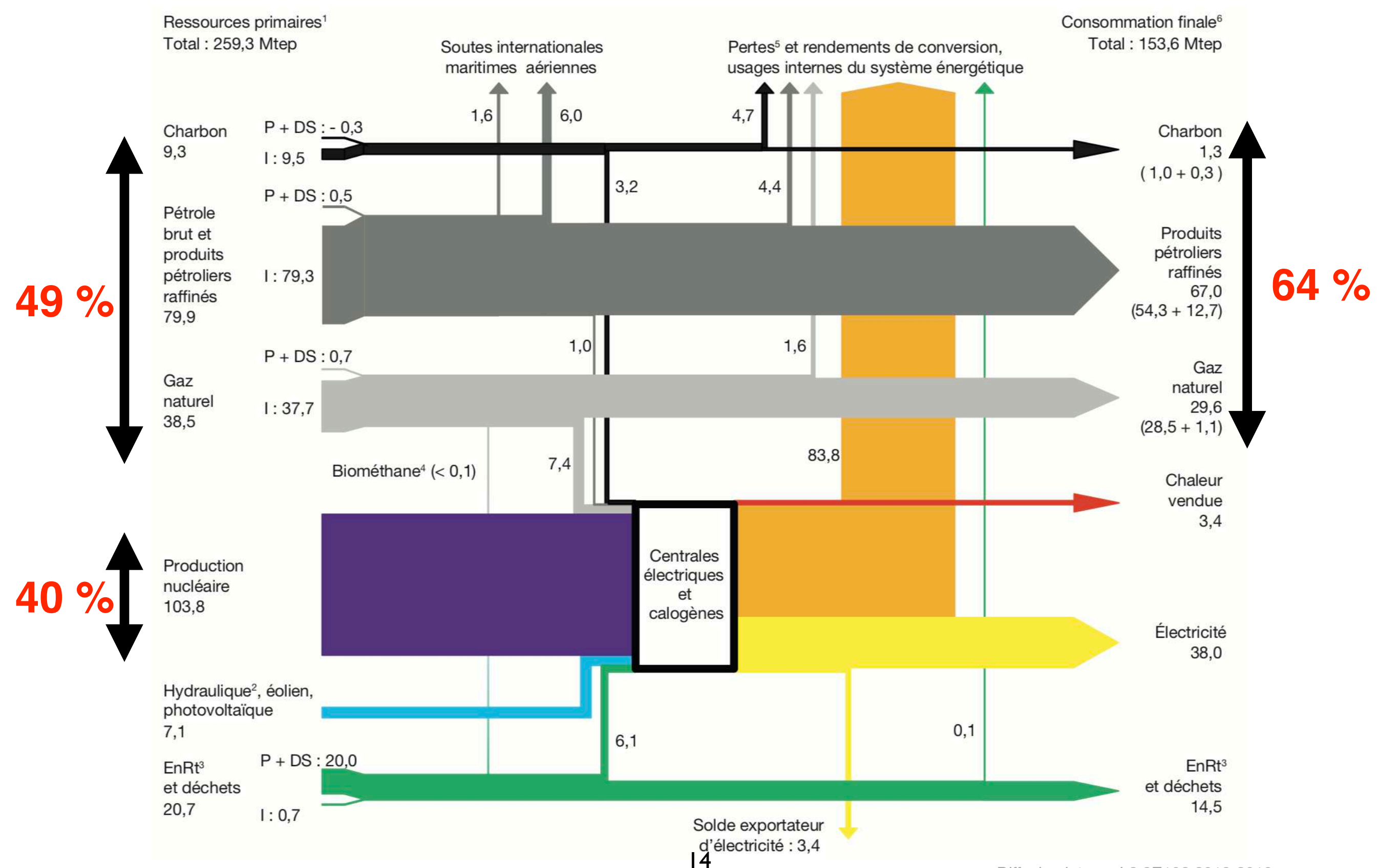


Énergies en France (2017)

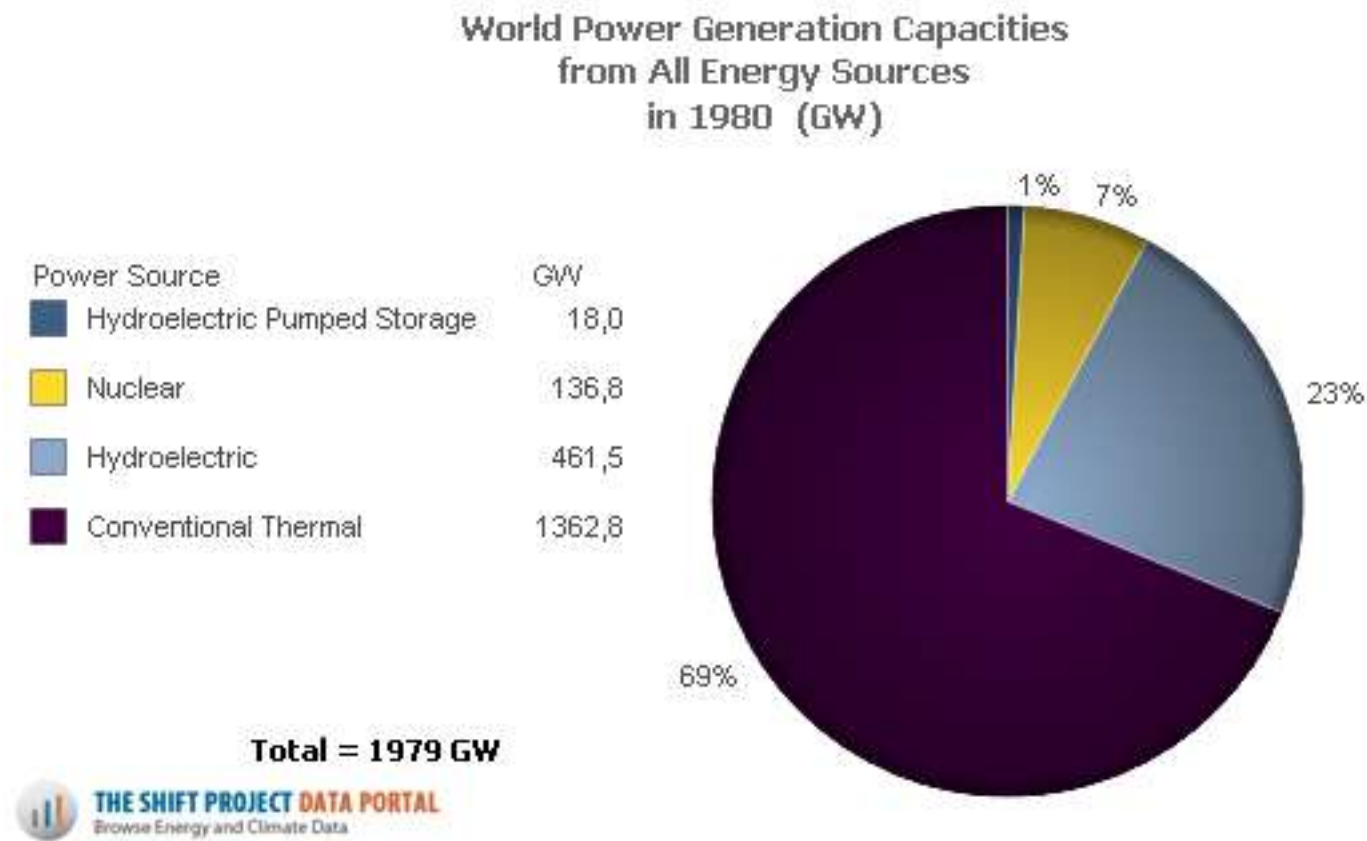
259,3 Mtep

Source : Commissariat général au développement durable

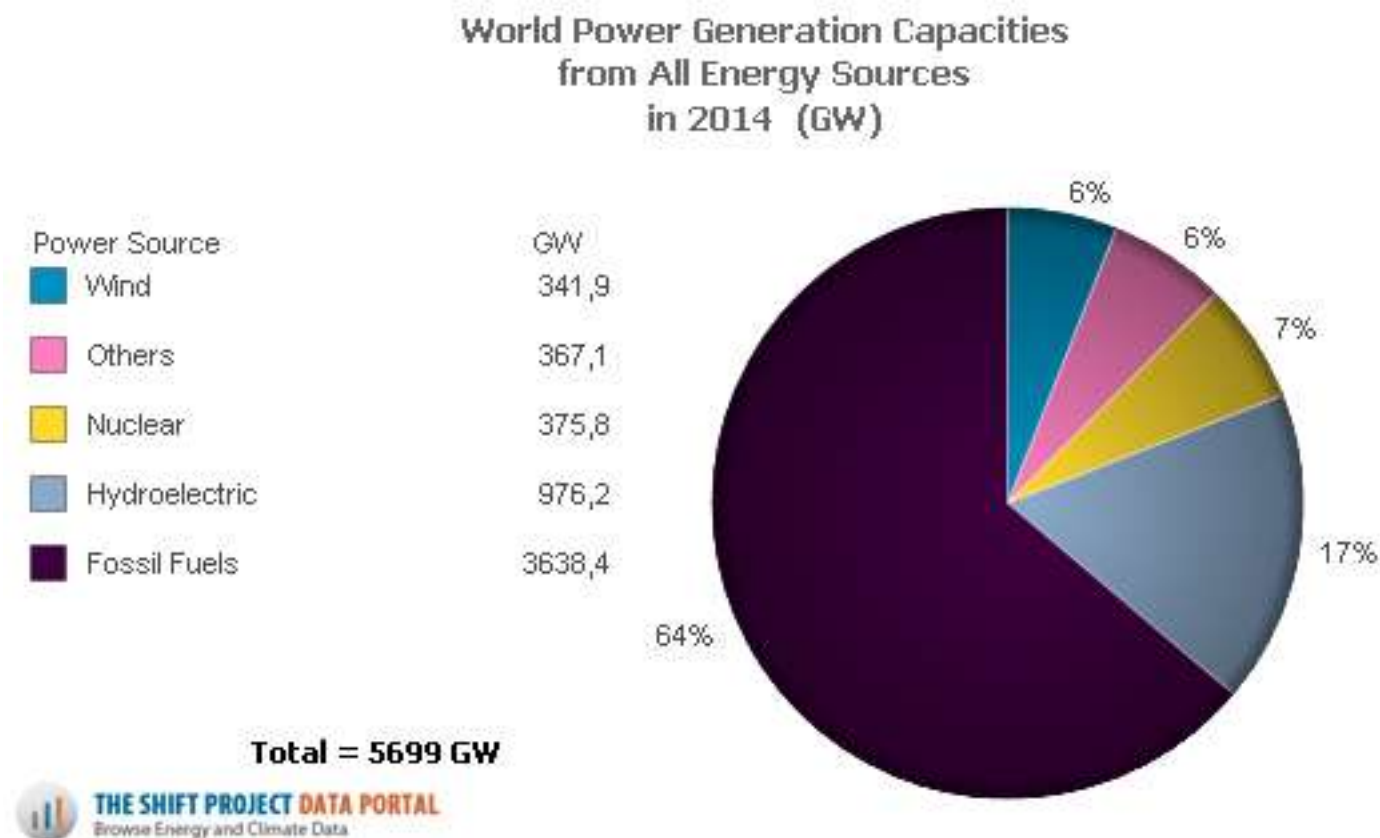
153,8 Mtep



Électricité : évolution de la part fossile (puissances)



1980 : 69 %



2014 : 64 %

Sans énergie, pas de croissance ?

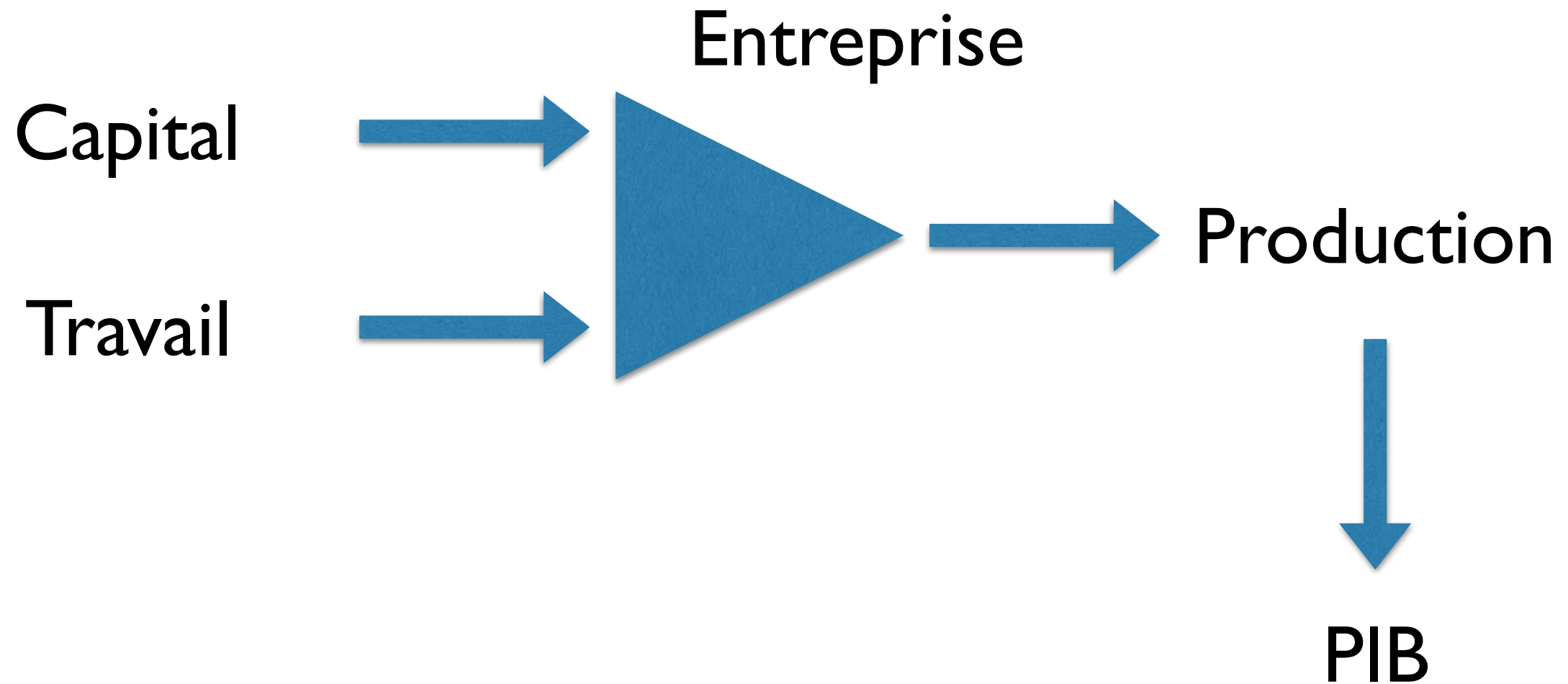
Le lien avec l'économie

Produit Intérieur Brut (PIB) : Valeur marchande totale des biens et services produits au sein d'une nation au cours d'une période donnée (généralement 1 an).

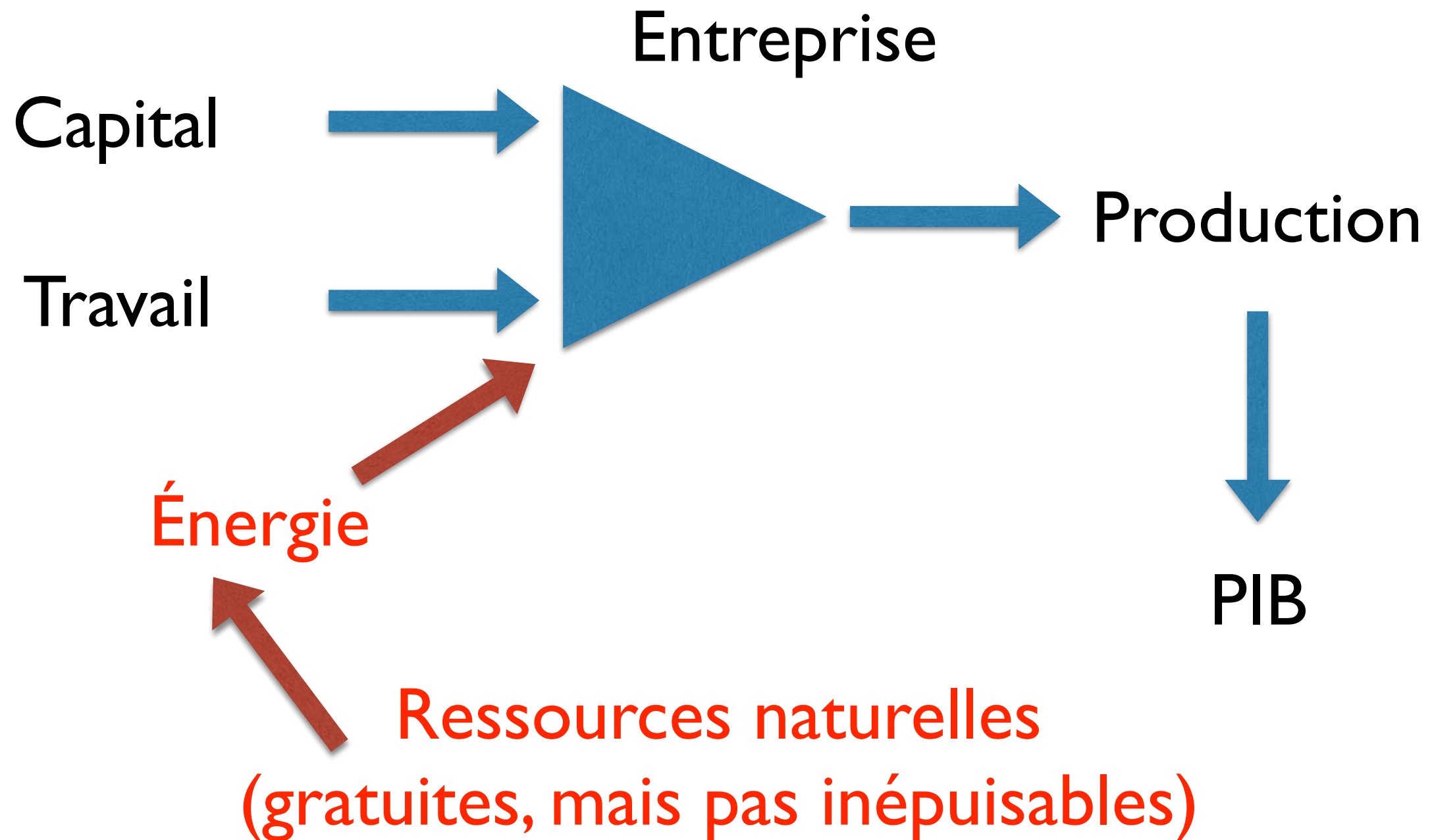
Le **PIB par habitant** s'obtient en divisant le Produit Intérieur Brut d'un pays par le nombre de personnes qui y vivent. Cela permet de comparer les chiffres des PIB de différents pays en tenant compte de l'importance des populations respectives.

Source : <http://www.greenfacts.org>

Modèle économique usuel



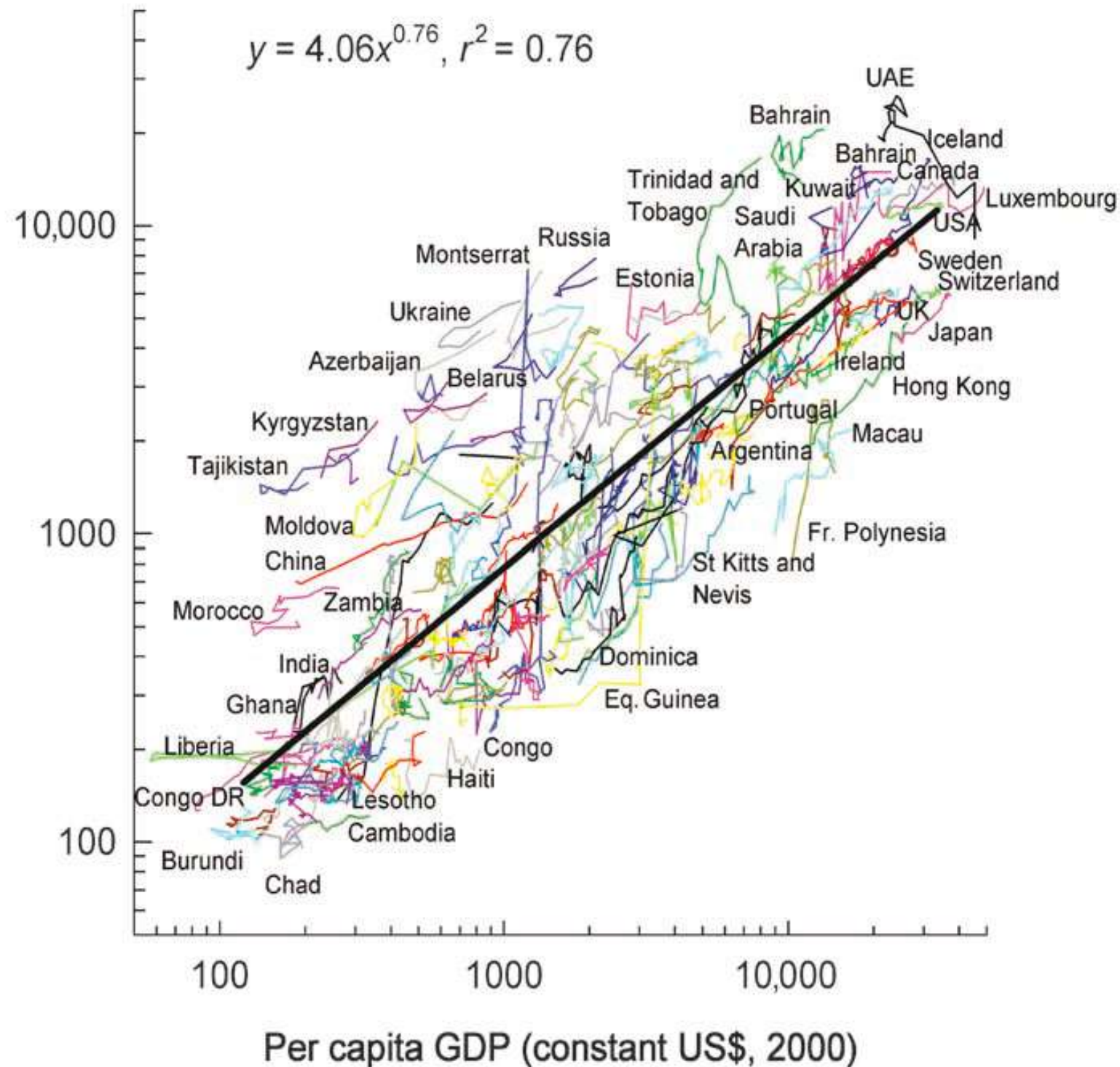
Modèle économique plus réaliste



Énergie et PIB (I)

Unité !

Per capita energy consumption (watts)



Source : Davidson and al., Energetic Limits to Economic Growth, BioSciences, January 2011/Vol. 61 No. 1

Croissance et énergie

(J.-M. Jancovici, W. P. Nel...)

$$PIB = PIB$$

$$PIB = \frac{PIB}{Energie} Energie$$

Source : <http://www.manicore.com>, Jean-Marc Jancovici

Conséquence

$$\frac{PIB(euros)}{Population} = \frac{PIB(euros)}{Energie(kWh)} \frac{Energie(kWh)}{Population}$$

$$\Delta\left(\frac{PIB}{Population}\right) = \Delta\left(\frac{PIB}{Energie}\right) + \Delta\left(\frac{Energie}{Population}\right)$$

Conséquence

$$\frac{PIB(euros)}{Population} = \frac{PIB(euros)}{Energie(kWh)} \frac{Energie(kWh)}{Population}$$

$$\Delta\left(\frac{PIB}{Population}\right) = \Delta\left(\frac{PIB}{Energie}\right) + \Delta\left(\frac{Energie}{Population}\right)$$

< 1,2 %

Conséquence

$$\frac{PIB(euros)}{Population} = \frac{PIB(euros)}{Energie(kWh)} \frac{Energie(kWh)}{Population}$$

$$\Delta\left(\frac{PIB}{Population}\right) = \underbrace{\Delta\left(\frac{PIB}{Energie}\right)}_{< 1,2 \% } + \underbrace{\Delta\left(\frac{Energie}{Population}\right)}_{< 0,5 \% }$$

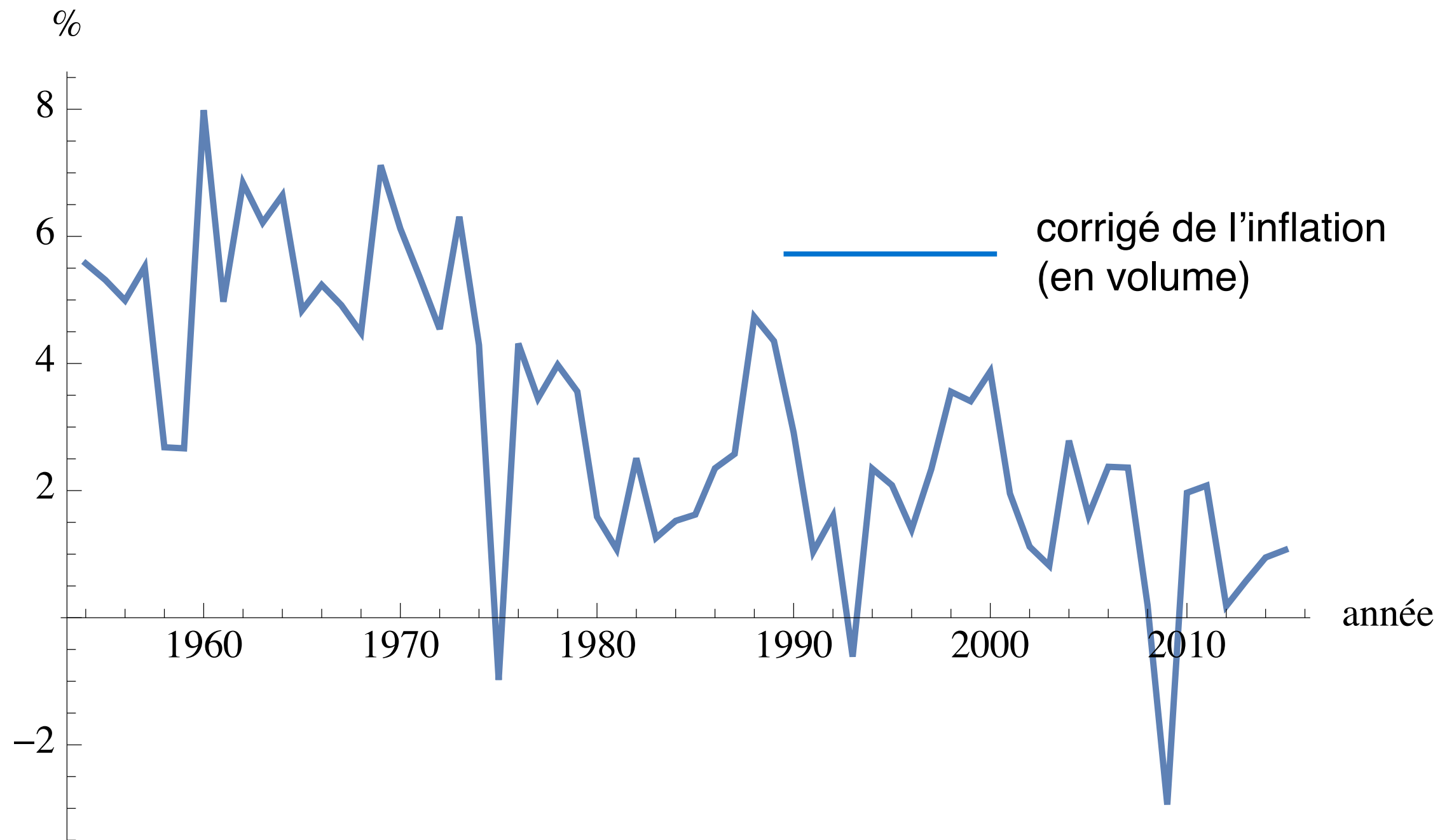
Conséquence

$$\frac{PIB(euros)}{Population} = \frac{PIB(euros)}{Energie(kWh)} \frac{Energie(kWh)}{Population}$$

$$\Delta\left(\frac{PIB}{Population}\right) = \Delta\left(\frac{PIB}{Energie}\right) + \Delta\left(\frac{Energie}{Population}\right)$$

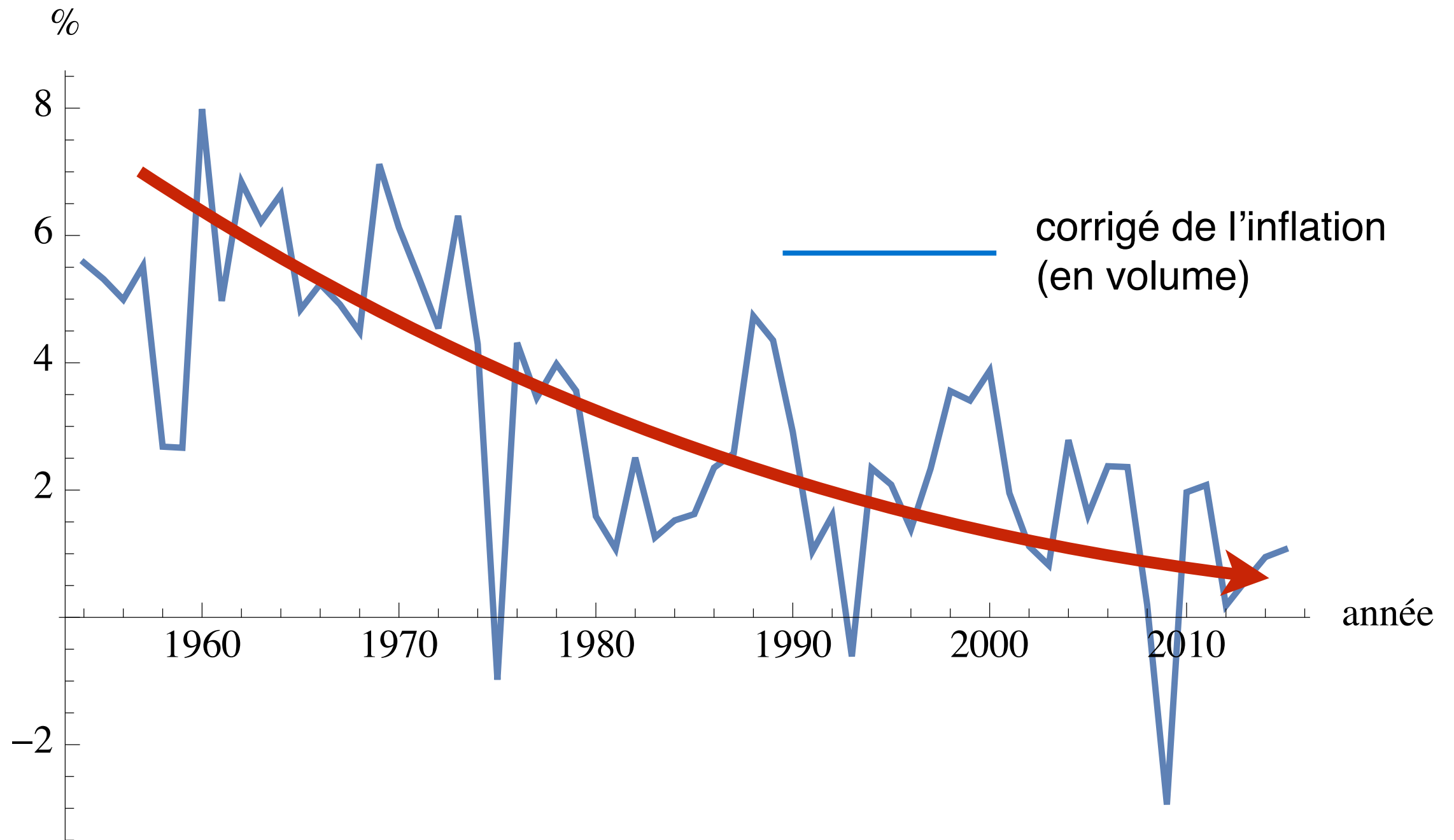
$< 1,7 \%$
 $< 1,2 \%$
 $< 0,5 \%$

Variations du PIB en France



Données INSEE

Variations du PIB en France

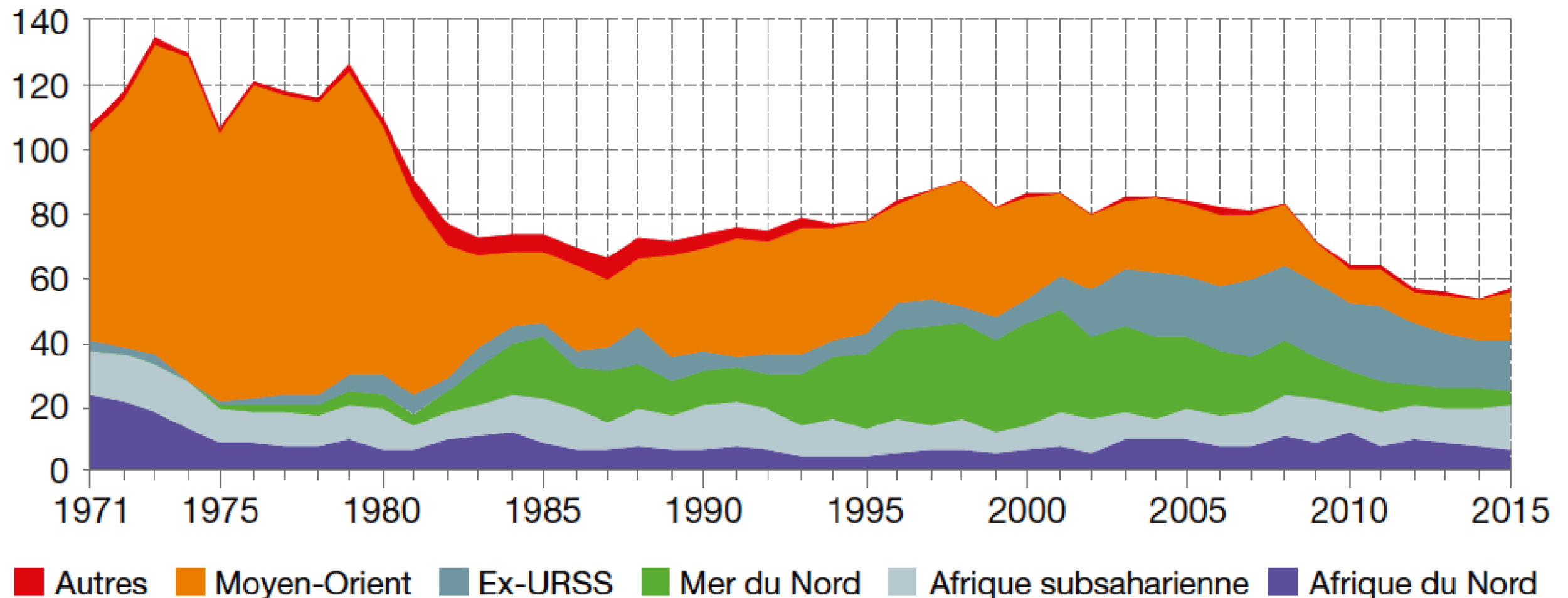


Données INSEE

Consommation de pétrole en France

IMPORTATIONS DE PÉTROLE BRUT PAR ORIGINE : 56,7 MT EN 2015

En Mt



Champ : métropole.

Source : SOeS, enquête auprès des raffineurs

www.statistiques.developpement-durable.gouv.fr

Sans énergie, pas de confort ?

Quelques chiffres

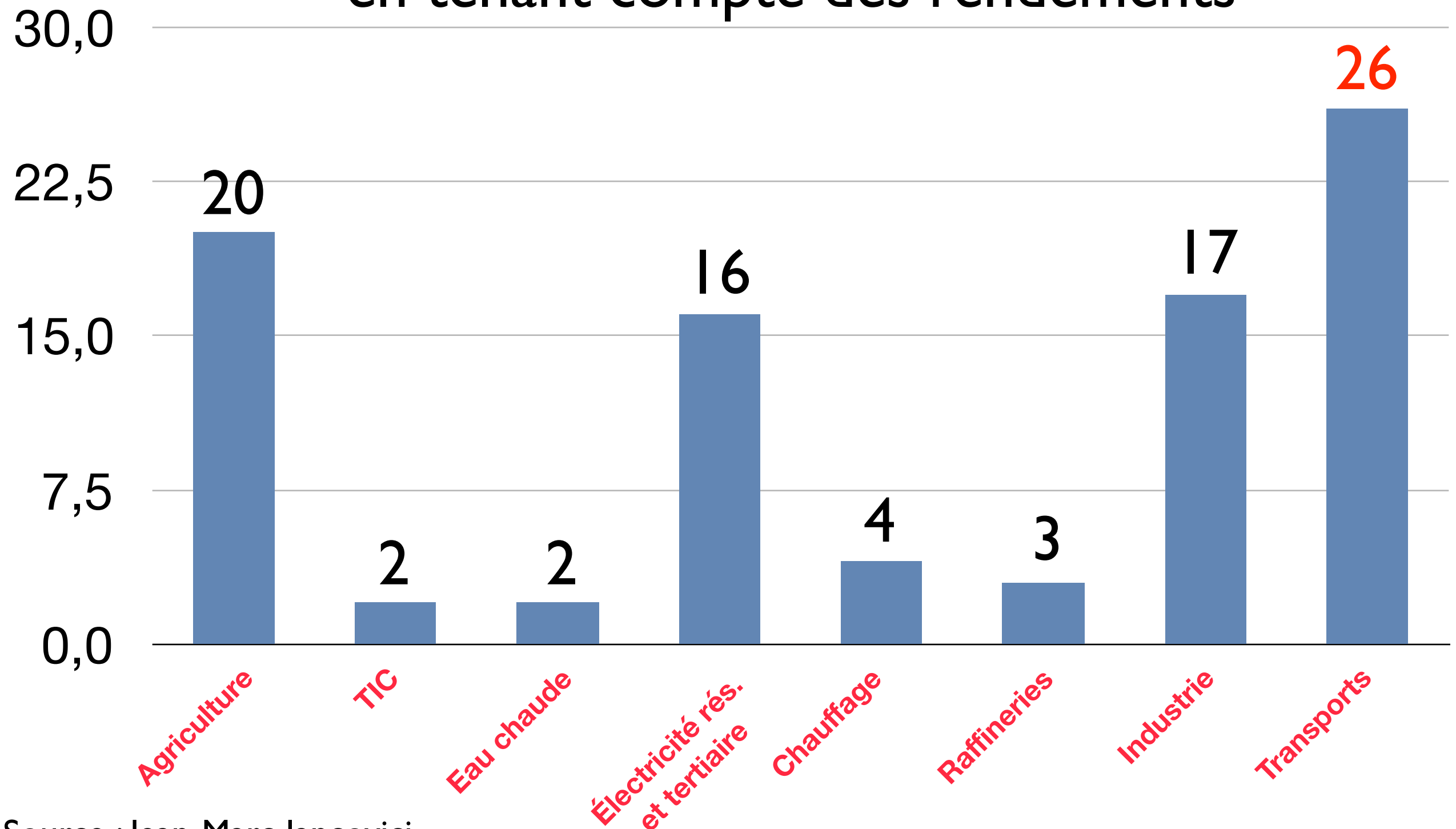
- Un français consomme en moyenne 162 GJ/an (chiffres de 2011)
- soit 45 MWh/an d'énergie primaire
- ou encore environ 30 MWh/an d'énergie finale
- ou un peu moins de **4 tep/an** en moyenne d'énergie primaire
- Un habitant de la planète consomme **1,7 tep/an** d'énergie primaire
- Un homme au repos et en bonne santé absorbe (et restitue sous forme de chaleur) pour son seul métabolisme environ 2000 Calories par jour, soit environ 2,3 kWh par jour ou 0,8 MWh/an
- Il reste 29,2 MWh/an pour faire autre chose...

Un petit calcul

- Métabolisme de base de l'être humain :
 - Puissance crête : 1,4 W/kg
- Puissance produite
 - Poids moyen (homme) : 77 kg (source INSEE)
 - Puissance totale $\sim 110\text{ W}$
- Énergie produite en 12 heures de travail intensif
 - $110\text{ W} \times 12\text{ h} \sim 1,3\text{ kWh}$
 - $47\,200/365/1,3 \sim 97$

Nombre d'« esclaves » à disposition

~90 esclaves par français : en réalité quatre fois plus en tenant compte des rendements



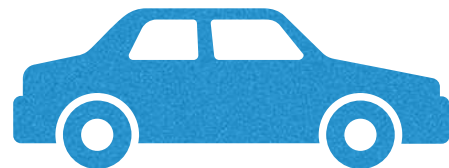
Source : Jean-Marc Jancovici

Esclaves mécaniques équivalents

Source : Jean-Marc Jancovici



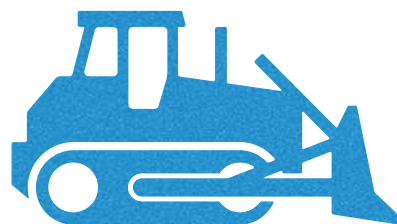
1 paire de jambes



1000 paires de jambes



4000 paires de jambes



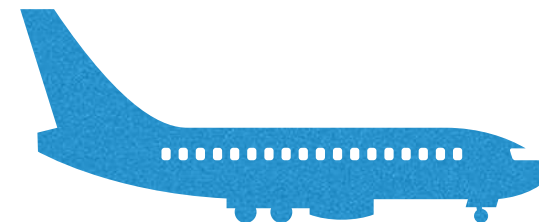
50 000 paires de bras



100 000 paires de jambes (TGV)



7 000 000 paires de bras



1 000 000 paires de jambes



**10 000 000
paires de bras
(laminoir)**

Commentaires

- Notre civilisation repose presque entièrement sur les combustibles fossiles.
- Nous vivons dans un monde où l'énergie est abondante et (encore) peu chère.
- Nous avons déjà consommé la moitié des réserves des combustibles fossiles (en moins de 200 ans).
- Parmi les énergies renouvelables, seules la biomasse et l'hydraulique ont une contribution notable.

Source : Christian Ngô - Demain, l'énergie - Dunod 2009

Les limitations et les effets indésirables

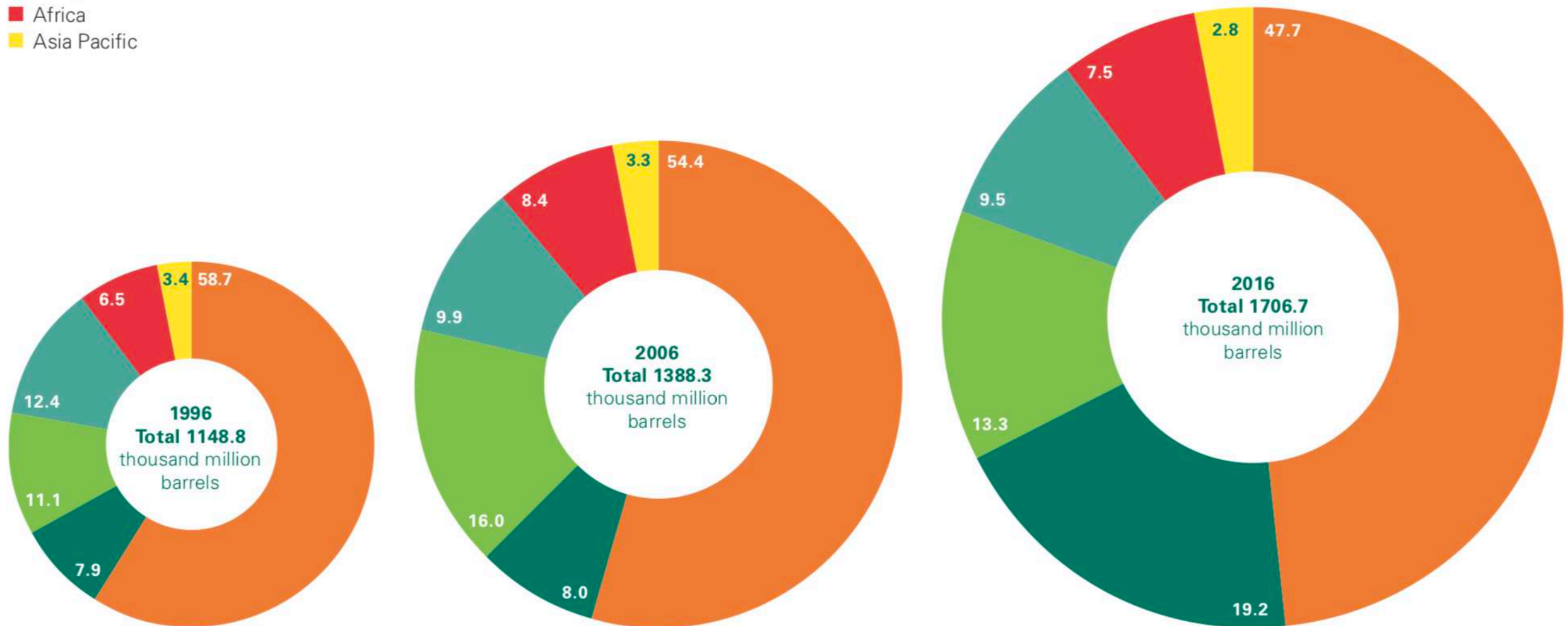
Réserves de pétrole

Distribution of proved reserves in 1996, 2006 and 2016

Percentage

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

Still 50.6 years of global production at 2016 levels



Source : BP Statistical Review of World Energy 2017

BP Statistical Review of World Energy 2017

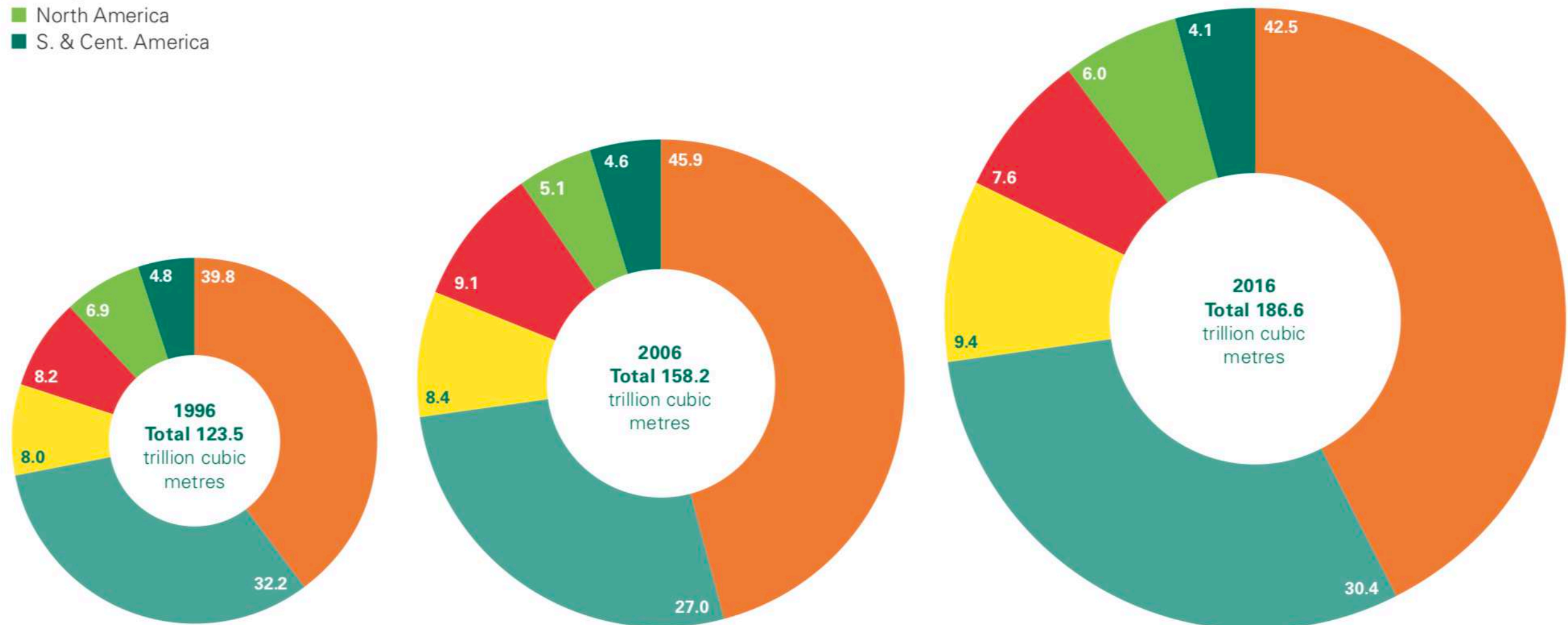
Réserve de gaz

Distribution of proved reserves in 1996, 2006 and 2016

Percentage

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

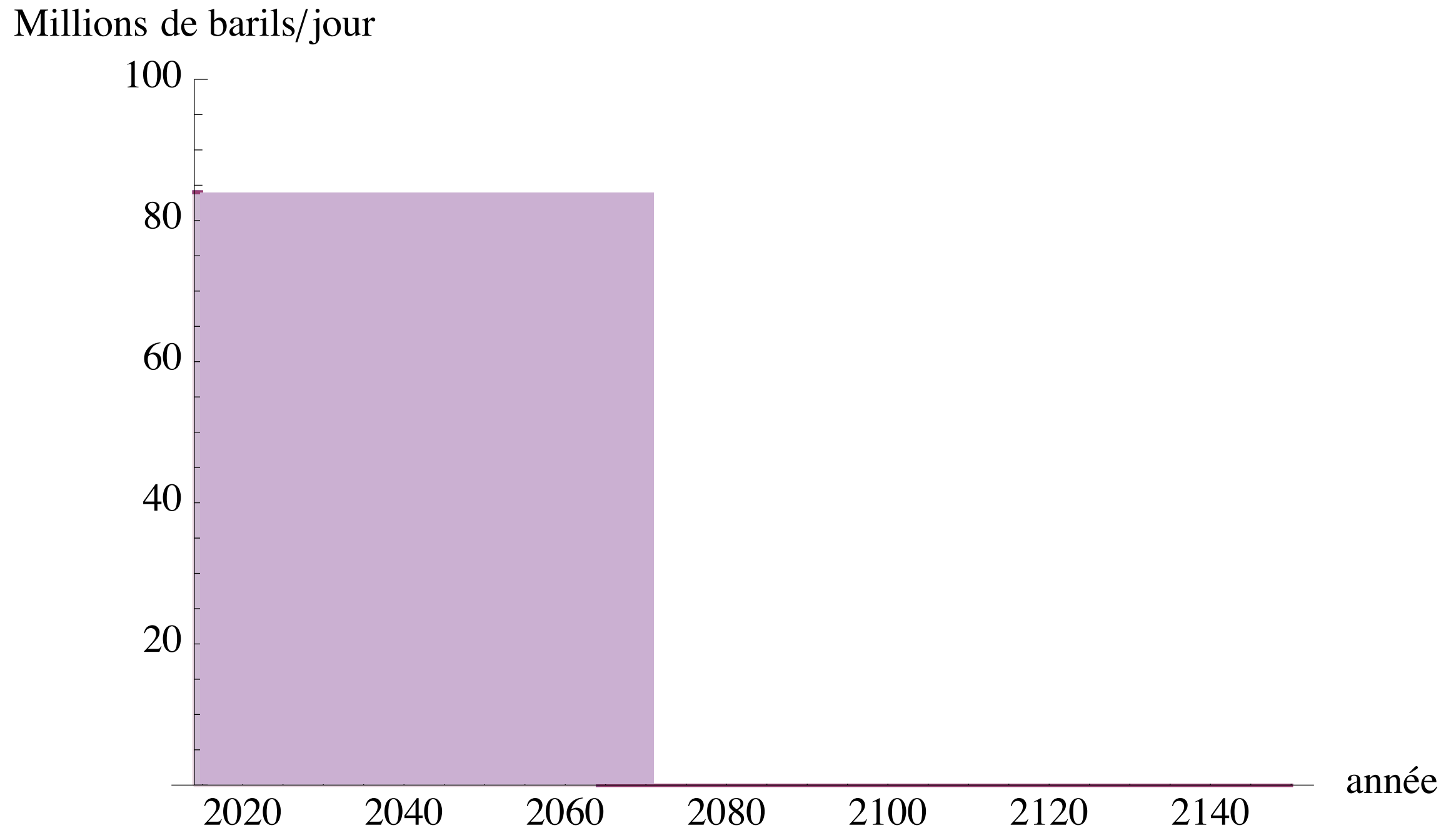
Still 52.5 years of global production at 2016 levels



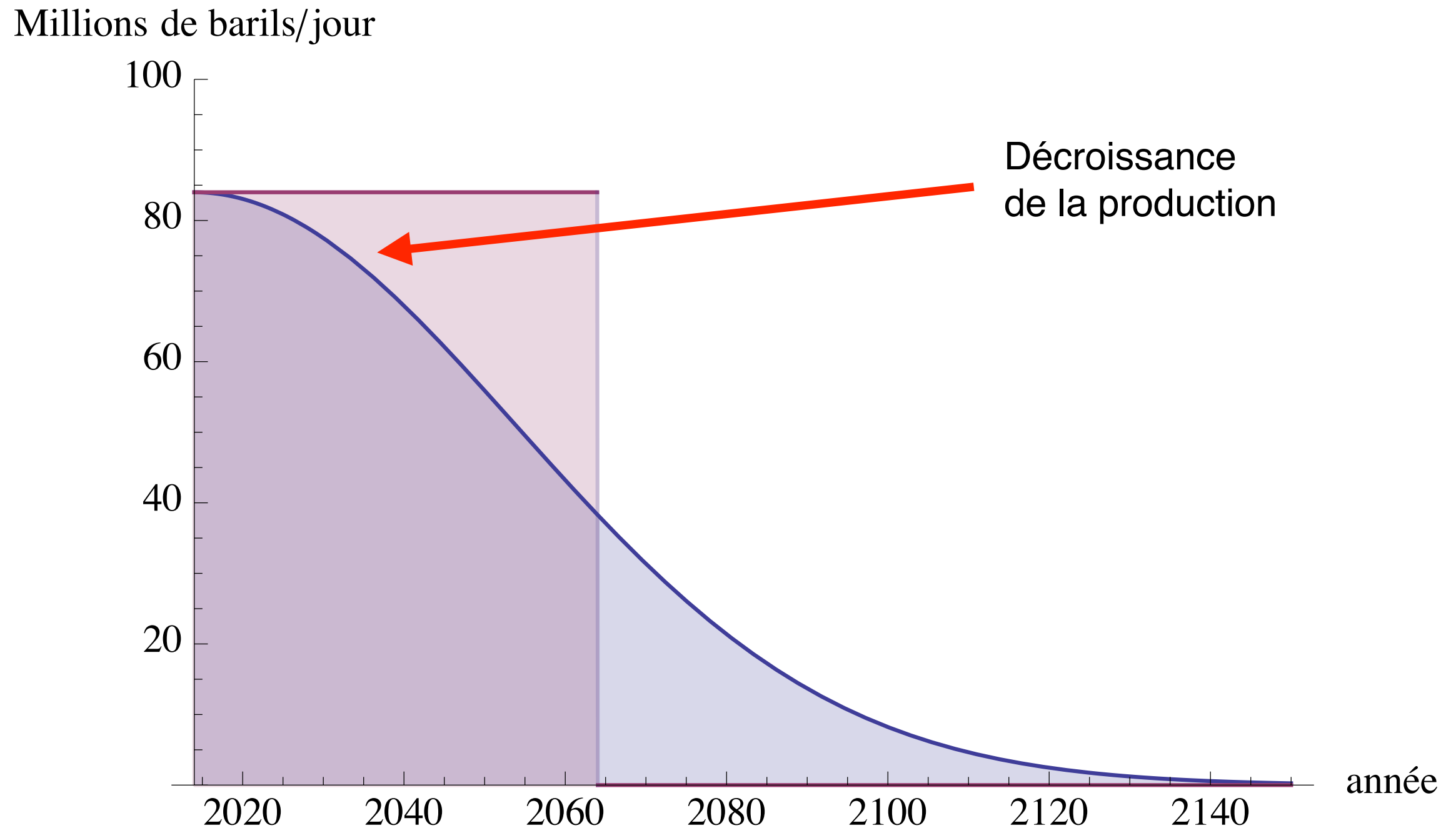
Source : BP Statistical Review of World Energy 2017

BP Statistical Review of World Energy 2017

Encore une cinquantaine d'années ? Donc tout va bien ?



La production ne peut pas rester constante



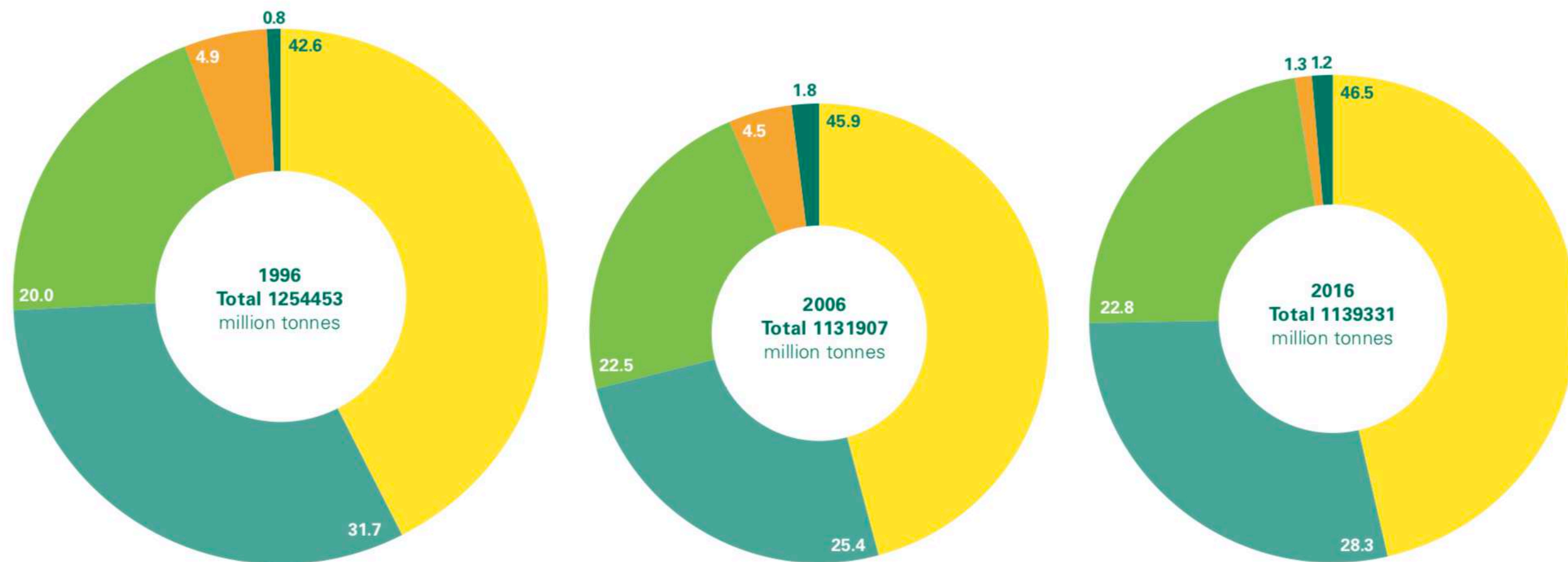
Réerves de charbon

Distribution of proved reserves in 1996, 2006 and 2016

Percentage

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

Still 153 years of global production at 2016 levels



Source : BP Statistical Review of World Energy 2017

Production associée de CO₂

How much CO₂ is released by the production of electricity and combustion of fuels?

GASOLINE / PETROL

2 330 g CO₂ / Liter

Lifecycle CO₂ production [g CO₂ / kWh]

COAL

966

1306

OIL

800

900

NATURAL GAS

439

688

SOLAR photovoltaic

99 - 278

HYDRO 4 - 23

BIOMASS 31 - 61

NUCLEAR 9 - 21

WIND inland 28 - 47

WIND coastal 9

Emissions depend on efficiency of technology used (dark to light grey); triangles (▲) show projections for 2005-20 technology

Buy green electricity to reduce your footprint

Source: IAEA, GHG Emissions of Electricity Generation Chains.

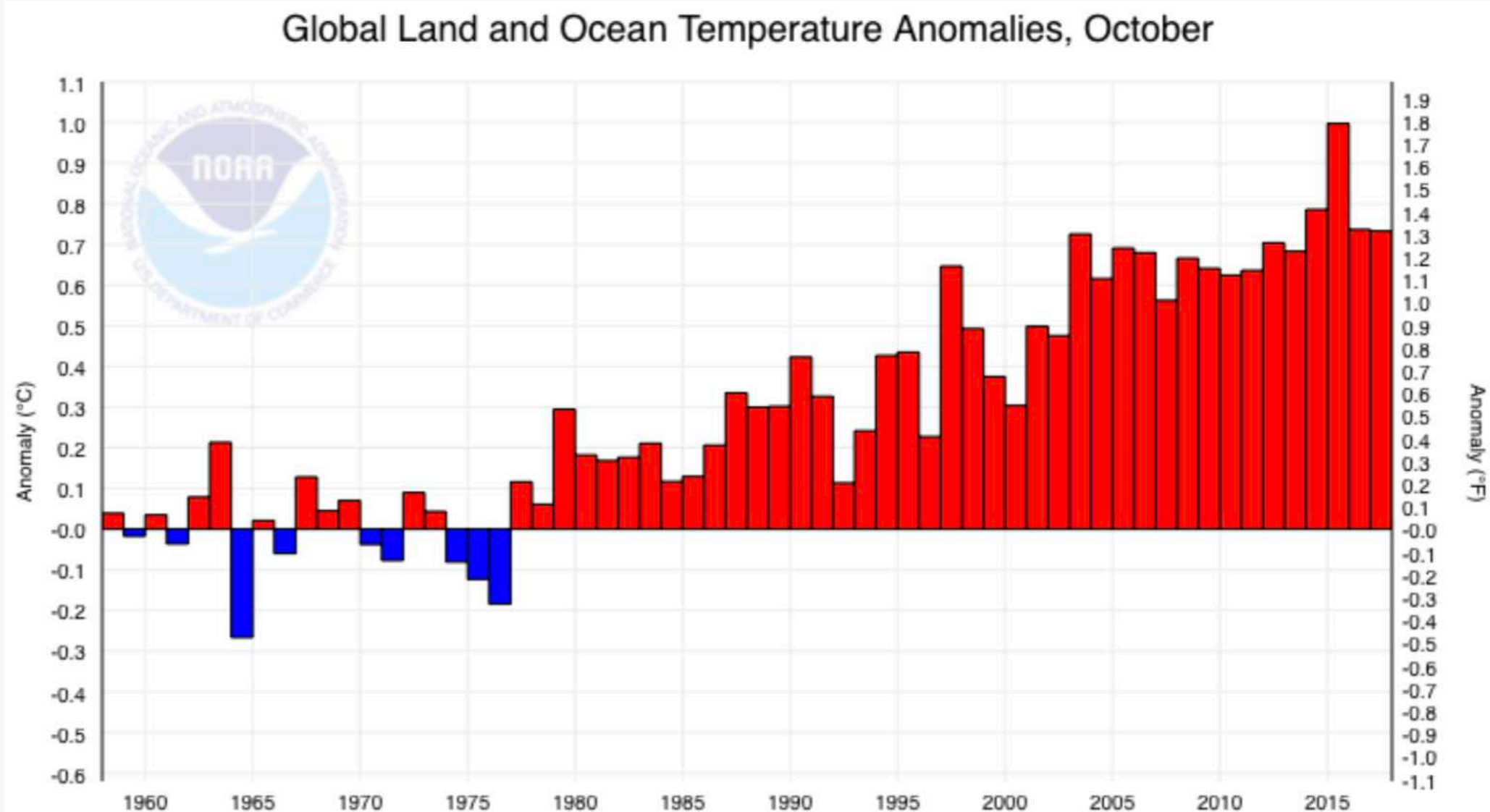
Produced by UNEP/DEWA/GRID-Europe, Feb. 2009

Source : United Nations Environment Programme

Un problème mondial

Globe : écarts par rapport à la température moyenne 1910-2000 : ~14 °C

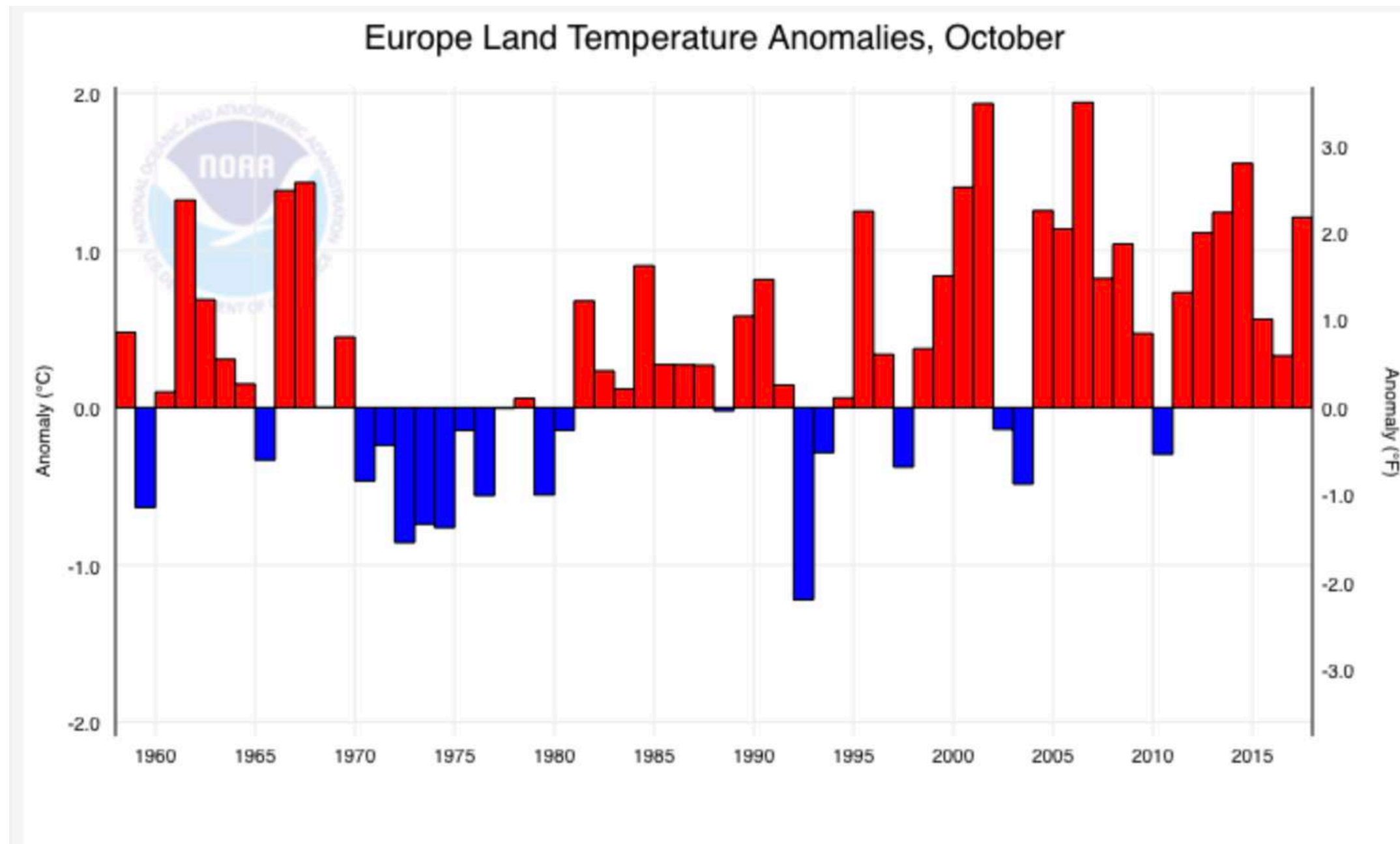
Place mouse on axis and left-click to pan; wheel up/down for zoom in/out (or shift key+left-click).



https://www.ncdc.noaa.gov/cag/global/time-series/globe/land_ocean/1/10/1958-2018

et donc européen

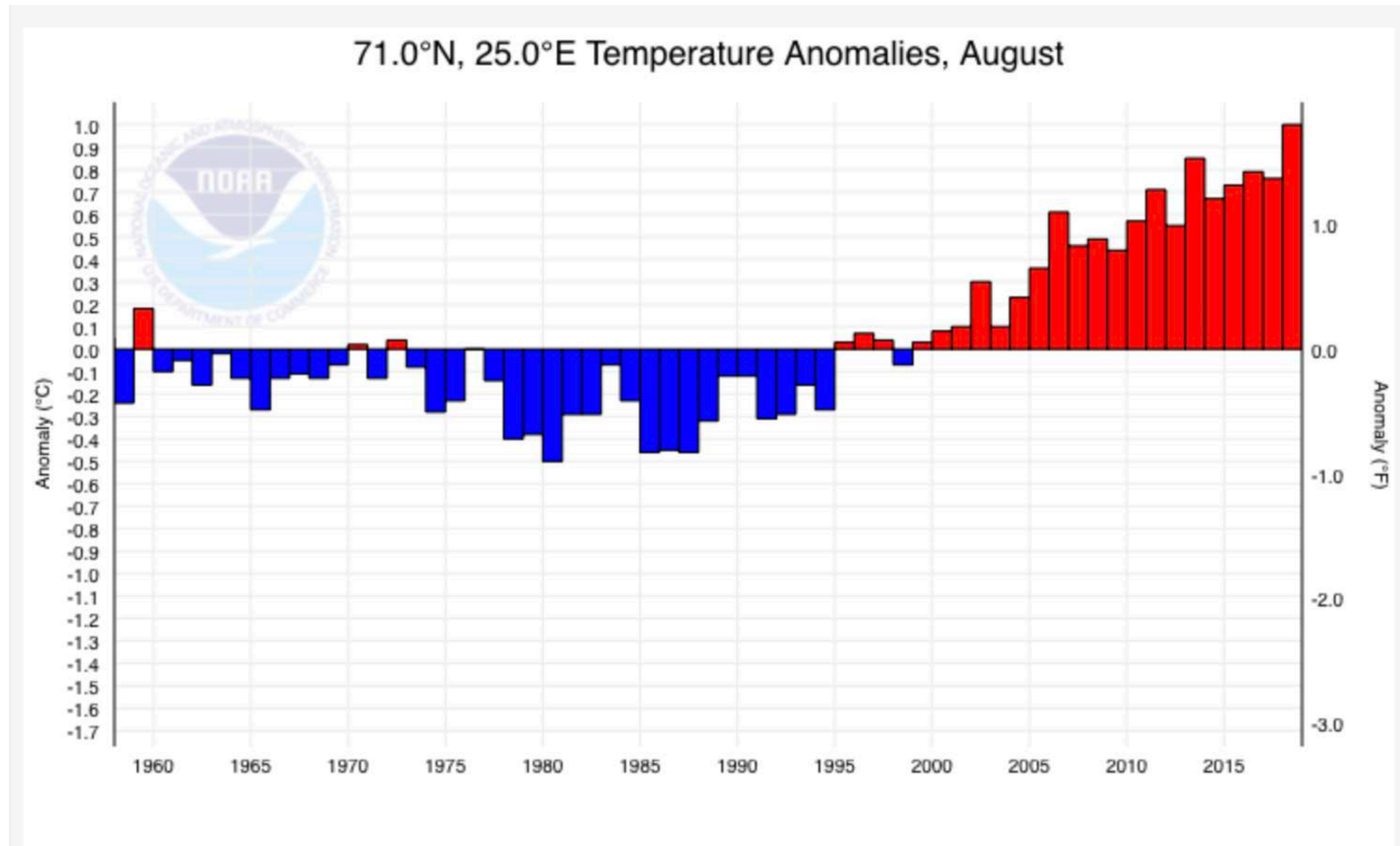
Europe : écarts par rapport à la température moyenne 1910-2000



https://www.ncdc.noaa.gov/cag/global/time-series/globe/land_ocean/1/10/1958-2018

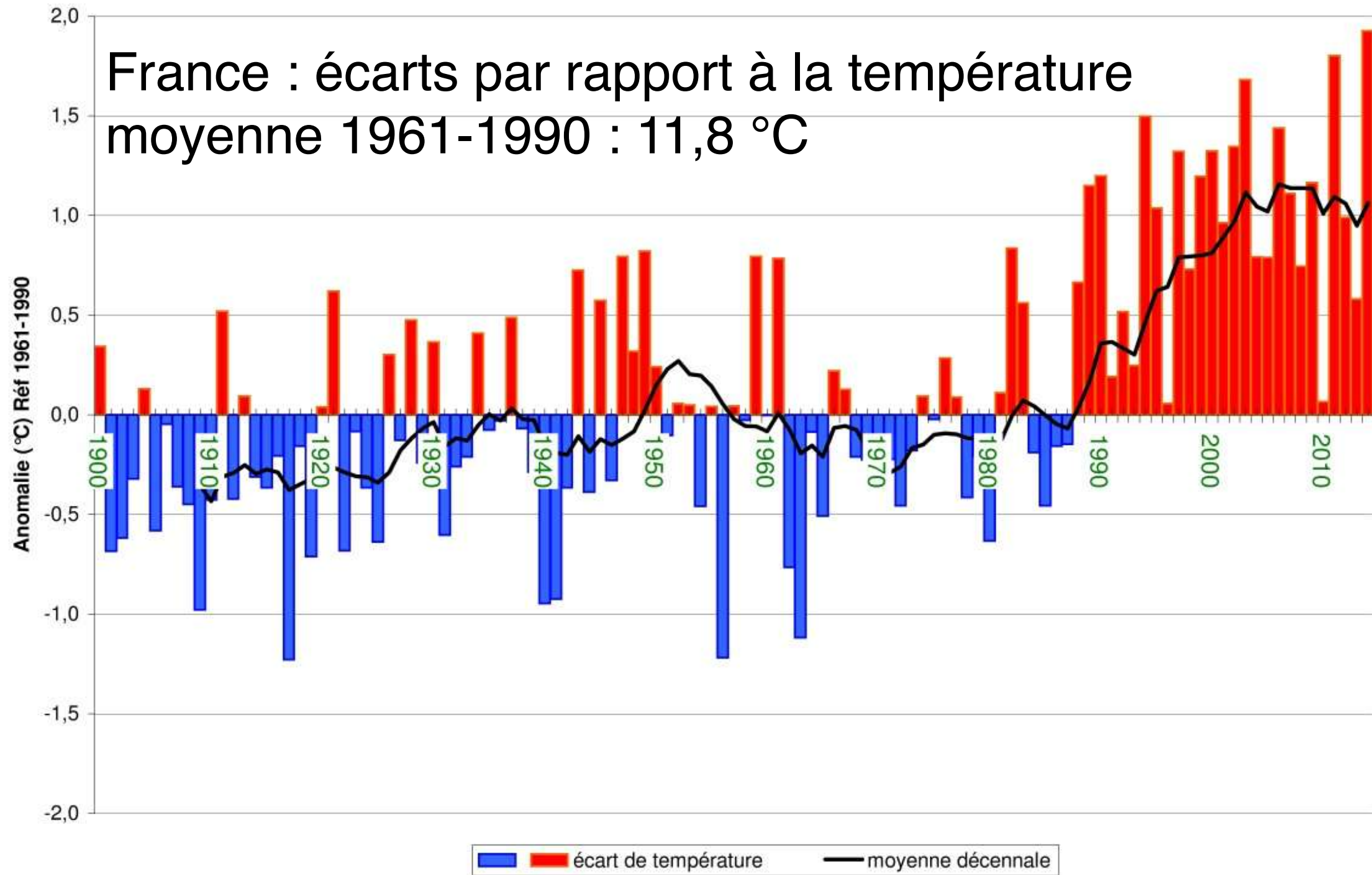
même aux latitudes nord

Cap Nord (Norvège) : mois d'août



https://www.ncdc.noaa.gov/cag/global/time-series/globe/land_ocean/1/10/1958-2018

et en France



<http://www.meteofrance.fr/climat-passe-et-futur/le-rechauffement-observe-a-l-echelle-du-globe-et-en-france>

Aperçu sur le changement climatique



Accélération du réchauffement

Augmentation des émissions de gaz carbonique

Plus d'eau, mais pas partout

Élévation du niveau de la mer

Une couverture neigeuse moindre

Les glaciers fondent

L'Arctique se réchauffe

De nouvelles projections font craindre un réchauffement plus rapide

Le degré de réchauffement dépend du degré d'émissions

Pas uniquement le dioxyde de carbone

Des conséquences plus graves

Des changements dans les saisons

Plus de précipitations dans les hautes altitudes

Source : <http://www.un.org/fr/climatechange/glance.shtml>

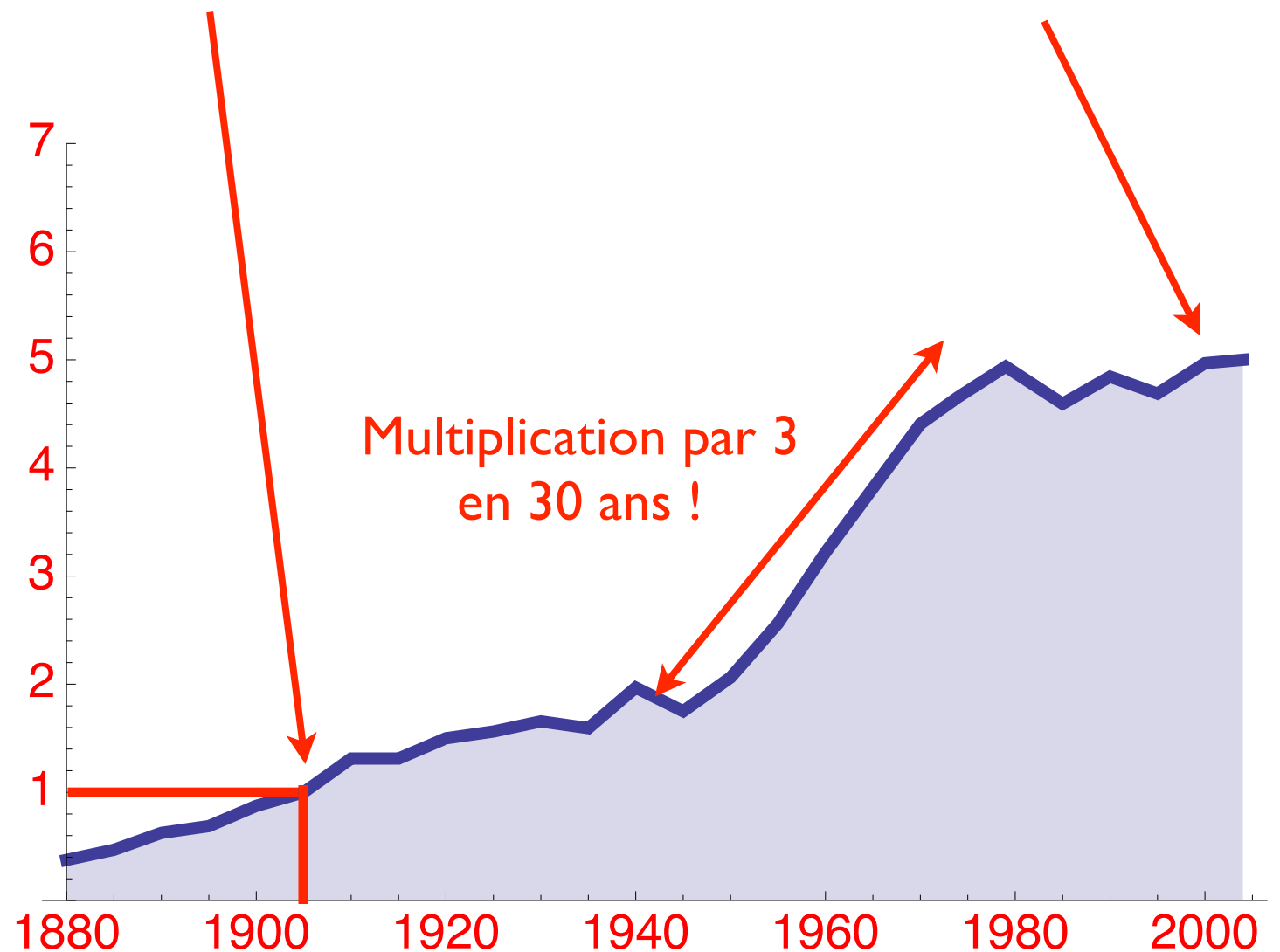
Un besoin d'anticipation

Évolution récente de l'énergie moyenne consommée par personne dans le monde

Source : Jean-Marc
Jancovici

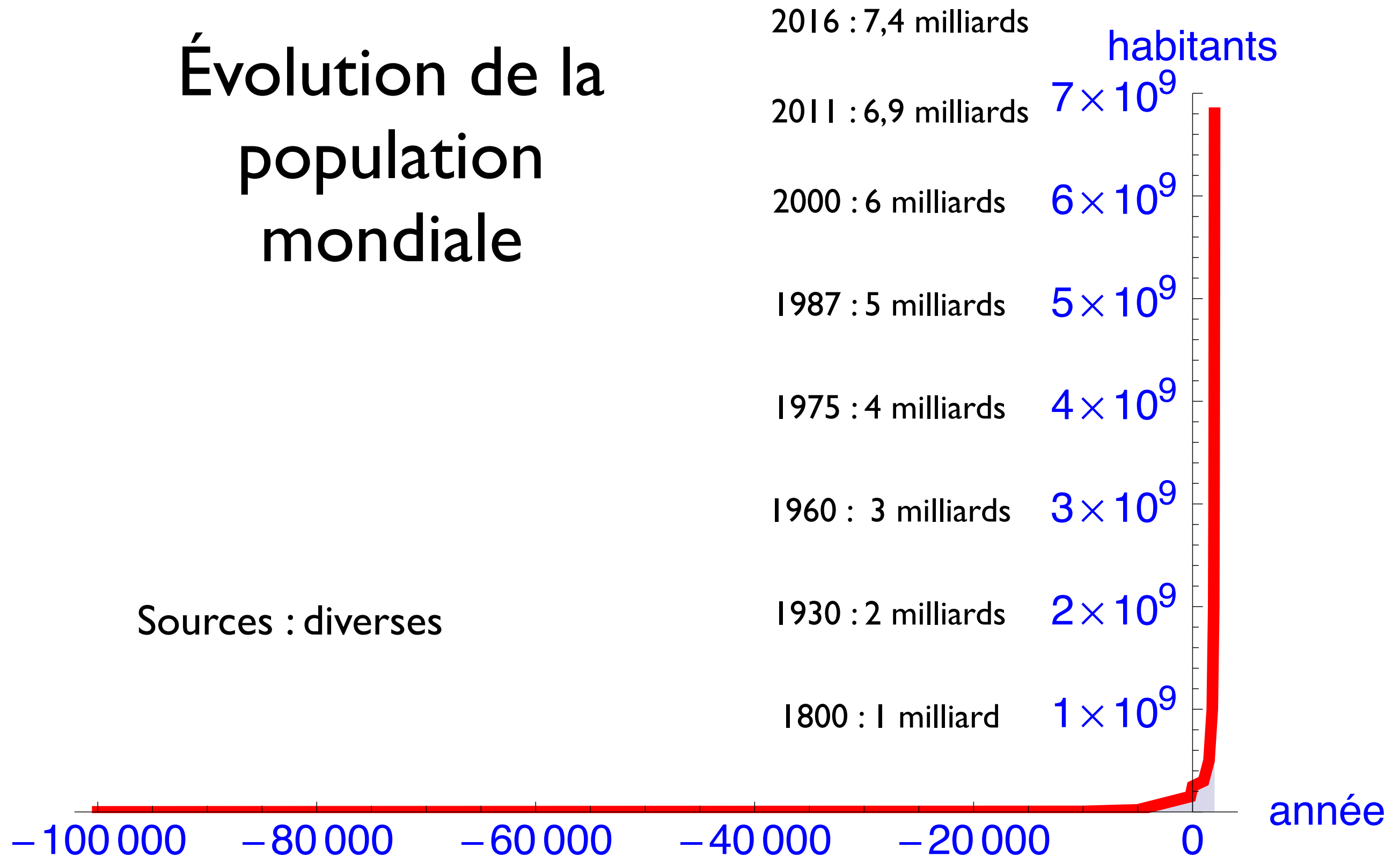
Référence : 1905
0,32 tep
Hors bio-masse

Valeur moyenne : 2000
1,5 tep
Hors bio-masse



Évolution de la population mondiale

Sources : diverses



Des mesures à envisager sérieusement

- Réduire l'utilisation des combustibles fossiles (pétrole, gaz, charbon)
 - pour éviter leur épuisement rapide ;
 - pour limiter l'accroissement de l'effet de serre et les conséquences du réchauffement climatique.
- Diviser au moins par 4 les émissions de CO₂ en France d'ici à 2050 !
- Électrifier l'emploi de l'énergie à partir des énergies renouvelables et la gestion intelligente de l'énergie (*“smart grids”*).

Partie II : Notions sur les réseaux électriques

Quelques outils de base

Constitution des réseaux électriques

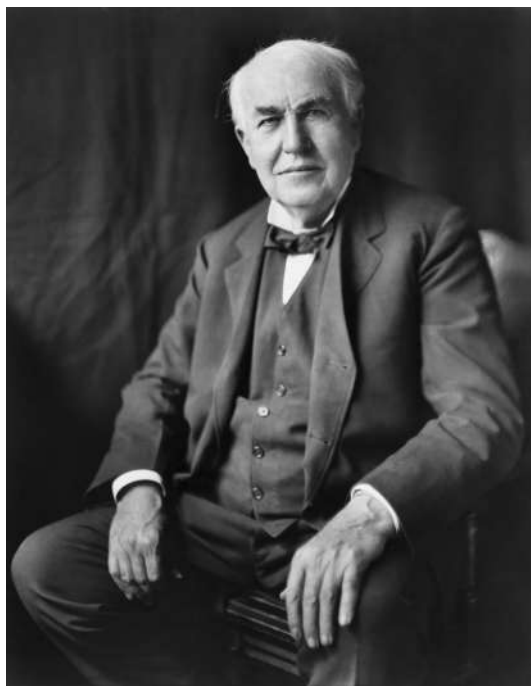
Sources de production d'électricité

Fonctionnement et conduite des réseaux
électriques

Quelques outils de base

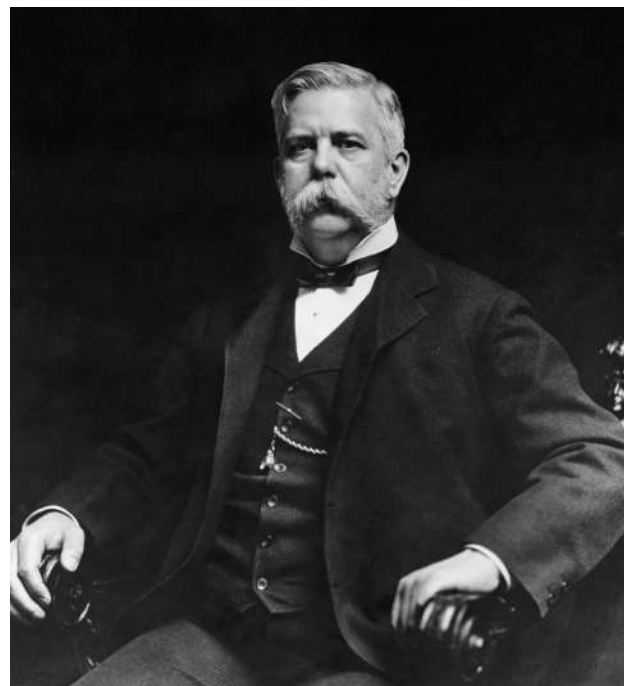
Début de l'électrification

- Deux systèmes concurrents développés à l'origine aux États-Unis :
 - Celui d'Edison, à courant continu (1883)
 - Celui de Tesla et de Westinghouse, à courant alternatif (1895)



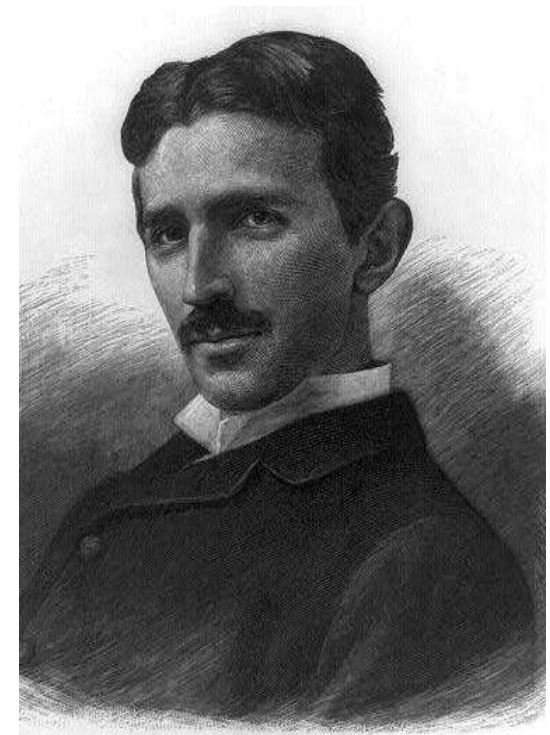
Thomas Edison

Louis Bachrach, [Bachrach Studios](#), restored by [Michel Vuijsteke](#) - This image is available from the United States [Library of Congress](#)'s Prints and Photographs division under the digital ID [cph.3c05139](#)



Georges Westinghouse

Joseph G. Gessford — Library of Congress Prints and Photographs Division [\[1\]](#), call number "BIOG FILE - Westinghouse, George, 1846-1914



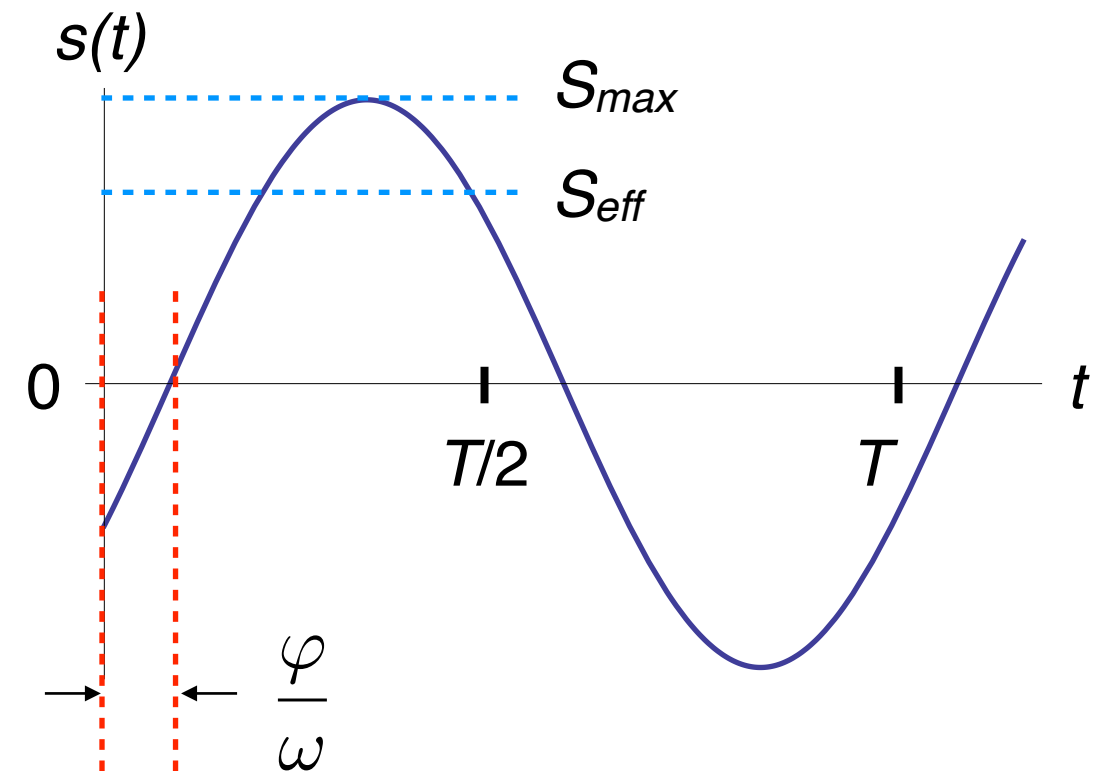
Nicolas Tesla

A photograph image of Nikola Tesla (1856-1943) at age 34 - Photographer: Napoleon Sarony (1821-1896)

Rappels : grandeurs sinusoïdales

$$s(t) = S_{max} \sin(\omega t - \varphi) = S_{eff} \sqrt{2} \sin(\omega t - \varphi)$$

- Pulsation : $\omega = 2\pi f$ en rad/s
- Fréquence : $f = \frac{\omega}{2\pi}$ en Hz
- Période : $T = \frac{1}{f} = \frac{2\pi}{\omega}$ en s
- Phase à l'origine : φ
- Valeur efficace :



$$S_{eff} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T s^2(t) dt} = \sqrt{\frac{S_{max}^2}{2\pi} \int_{-\varphi}^{2\pi-\varphi} \sin^2(\theta) d\theta} = \frac{S_{max}}{\sqrt{2}}$$

Rappels : tension et courant

- Dans le domaine temporel :

$$u(t) = U_{max} \sin(\omega t) = U\sqrt{2} \sin(\omega t)$$

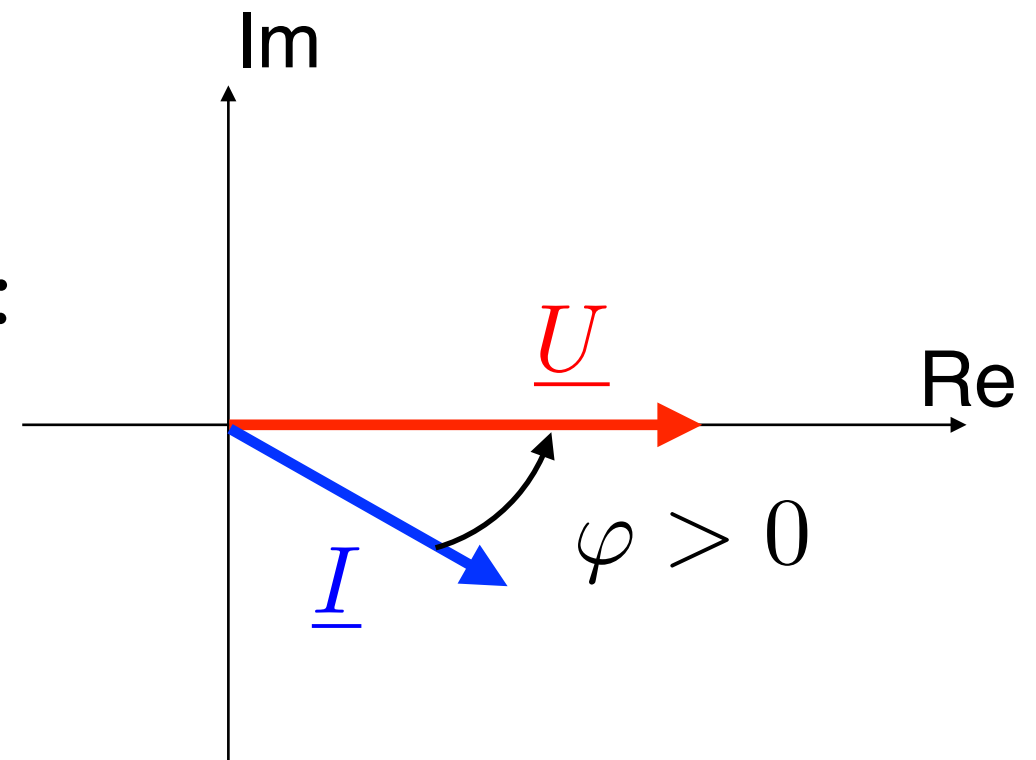
$$i(t) = I_{max} \sin(\omega t - \varphi) = I\sqrt{2} \sin(\omega t - \varphi)$$

- En notation complexe :

$$\underline{U} = U e^{-j0} = U$$

$$\underline{I} = I e^{-j\varphi}$$

- En représentation « vectorielle » :



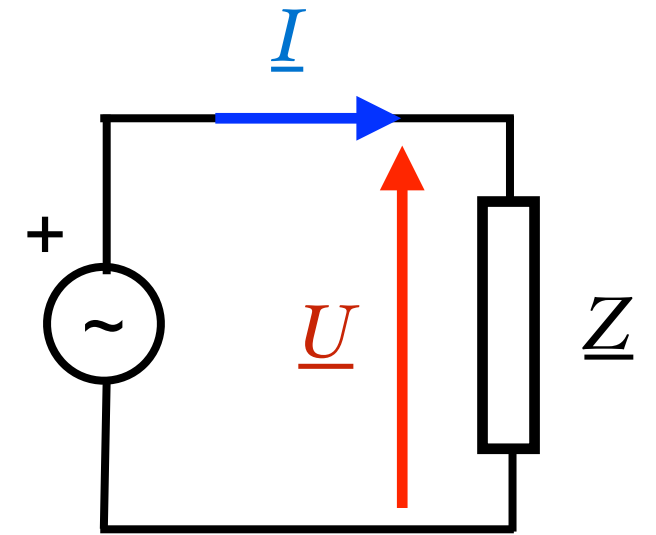
Puissance en régime sinusoïdal

- Grandeurs temporelles et complexes :

$$u(t) = U_{max} \sin(\omega t) = U\sqrt{2} \sin(\omega t)$$

$$i(t) = I_{max} \sin(\omega t - \varphi) = I\sqrt{2} \sin(\omega t - \varphi)$$

$$\underline{U} = U e^{-j0} = U \quad \underline{I} = I e^{-j\varphi}$$



- Puissance instantanée :

$$P(t) = U(t) I(t) = U\sqrt{2} \sin(\omega t) I\sqrt{2} \sin(\omega t - \varphi)$$

$$P(t) = UI \cos(\varphi) - UI \cos(2\omega t - \varphi)$$

$$\text{Rappel : } \sin a \sin b = \frac{1}{2} (\cos(a - b) - \cos(a + b))$$

Puissances en régime sinusoïdal

- Puissance fluctuante : de valeur moyenne nulle

$$p_f(t) = UI \cos(2\omega t - \varphi)$$

- Puissance active (en W) : elle accomplit le travail effectif

$$P = UI \cos(\varphi) = \frac{1}{T} \int_0^T P(t) dt = \operatorname{Re}[\underline{U} \underline{I}]$$

- Puissance apparente (en VA) :

$$S = UI$$

- Puissance réactive (en Volt-Ampère-Réactif ou VAR) :

$$Q = UI \sin(\varphi)$$

Relations utiles

- Facteur de puissance : $k = \frac{P}{UI} = \cos(\varphi) \leq 1$

- Courant nécessaire pour obtenir une puissance active donnée :

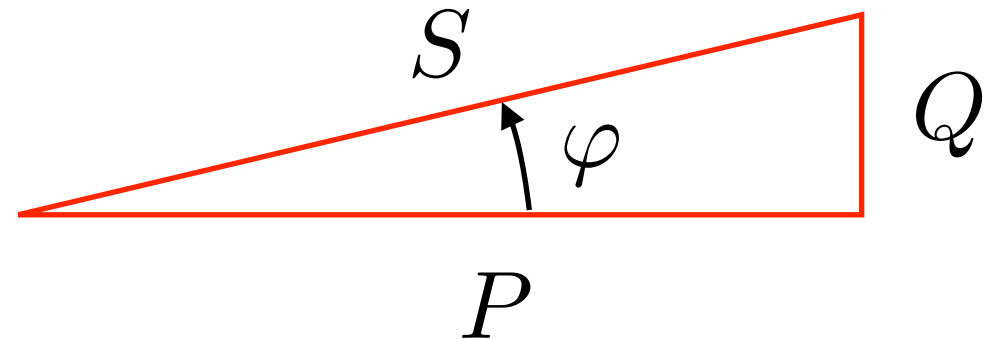
$$I = \frac{P}{U \cos(\varphi)} = \frac{P}{kU} \geq \frac{P}{U}$$

- Relation des puissances :

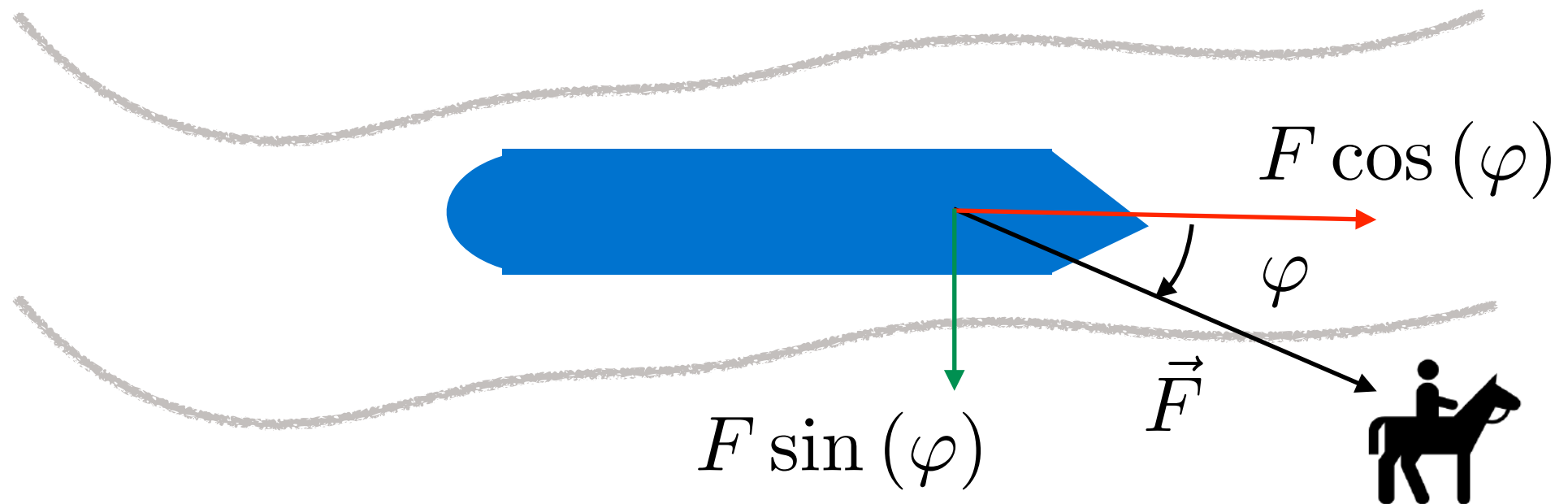
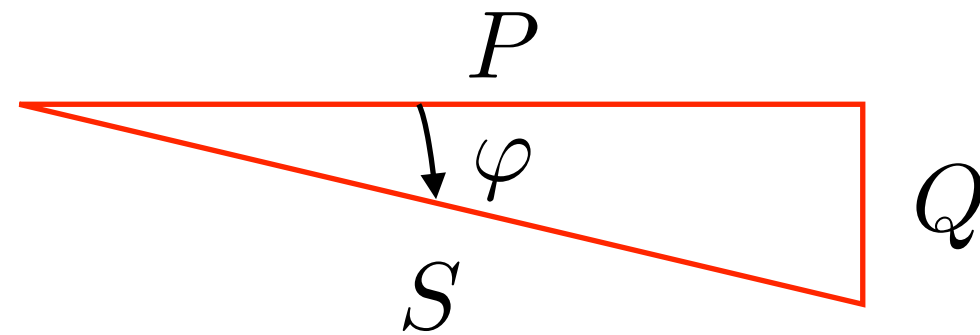
$$P^2 + Q^2 = S^2$$

- Relation supplémentaire :

$$Q = P \tan(\varphi)$$



Interprétation



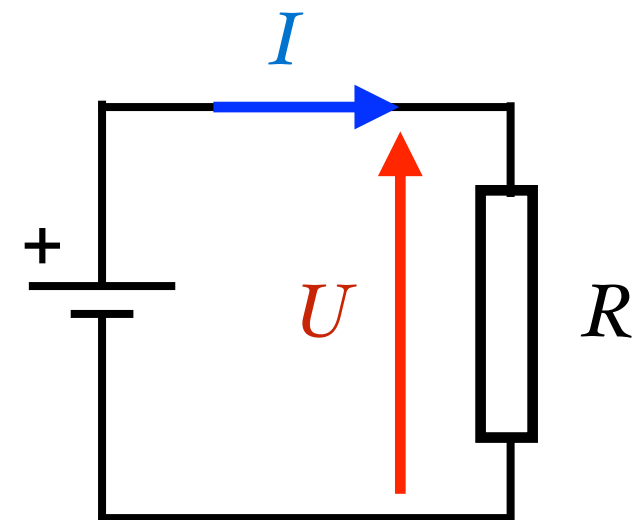
Puissance en continu (en W)

- Simple produit tension x courant

$$P = UI = RI^2 = \frac{U^2}{R}$$

$$I = \frac{P}{U} \text{ minimal}$$

- Égalité des valeurs :
 - instantanées
 - moyennes
 - efficaces



Le système choisi alors : l'alternatif

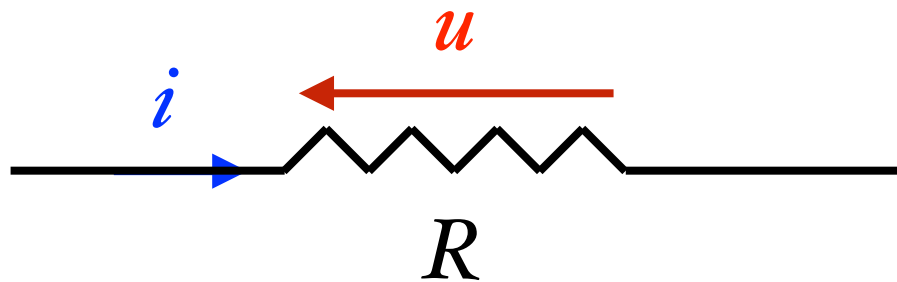
- La principale raison était la possibilité d'élever ou d'abaisser la tension à l'aide de transformateurs;
- une autre raison était liée à l'efficacité des génératrices et des moteurs dans ce régime;
- enfin, les chutes de tension étaient plus faibles en alternatif.



Credit:
Roger Taylor / NREL

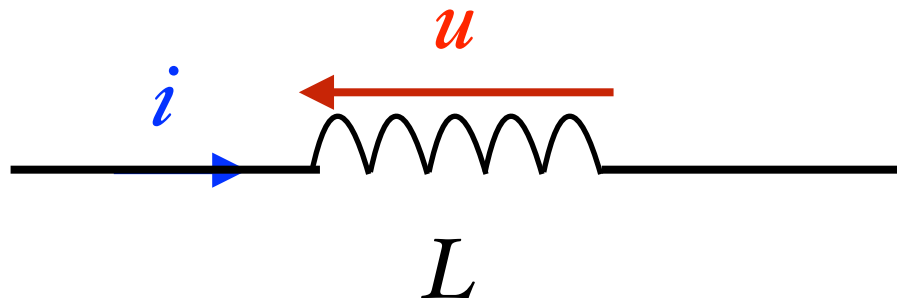
Dipôle récepteurs linéaires

- Résistance en Ohm (Ω) :



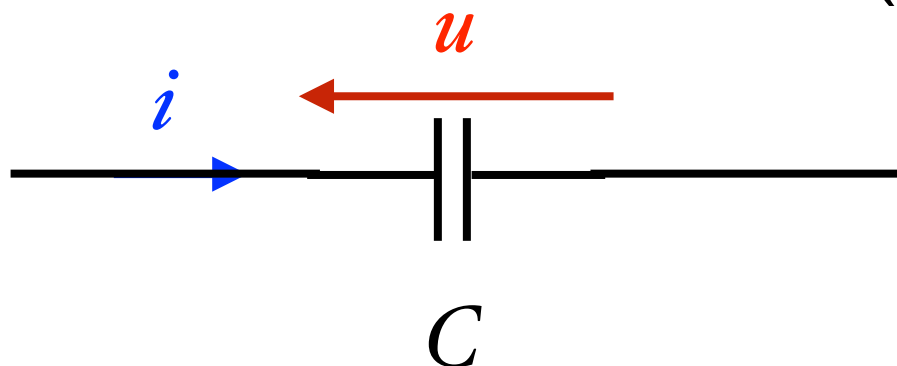
$$u(t) = Ri(t)$$

- Inductance en Henry (H) :



$$u(t) = L \frac{di(t)}{dt}$$

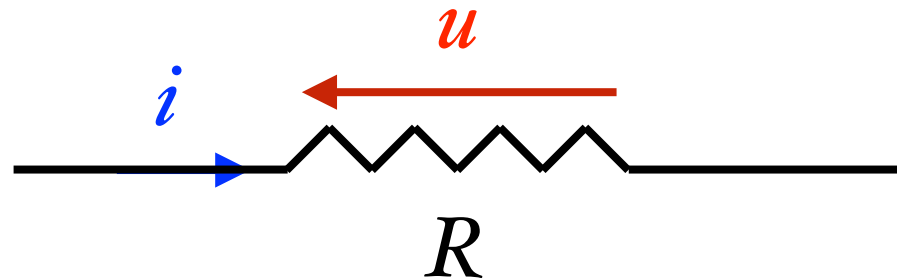
- Condensateur en Farad (F) :



$$i(t) = C \frac{du(t)}{dt}$$

Impédance d'une résistance

- Résistance en Ohm (Ω) :



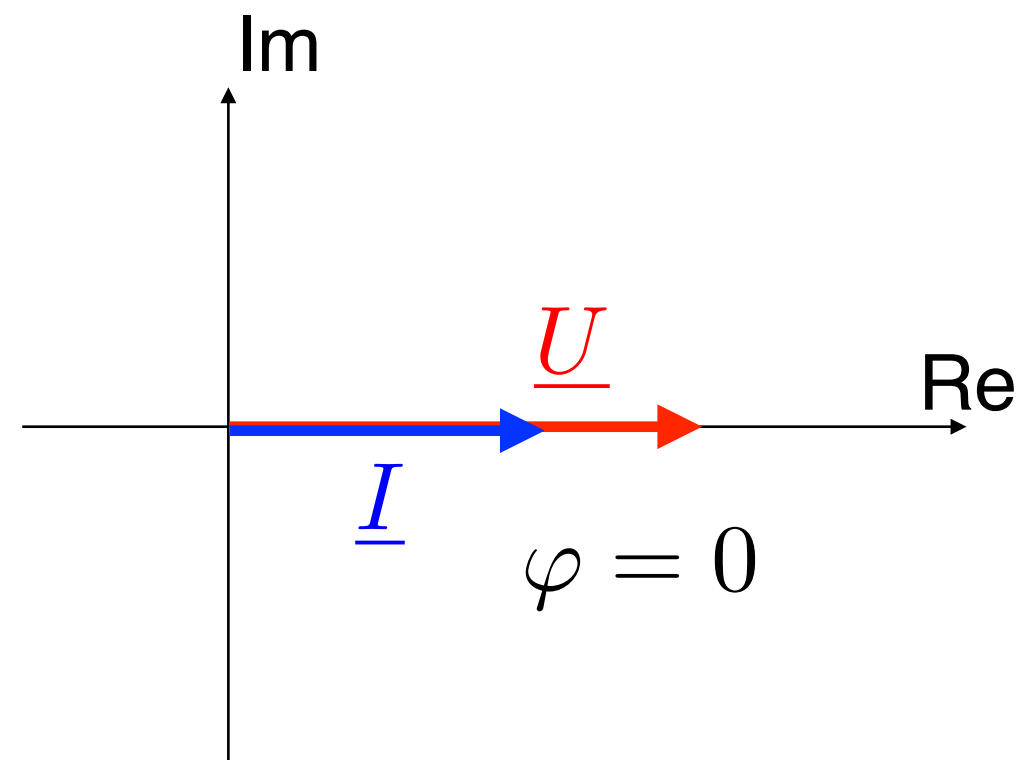
$$u(t) = U\sqrt{2}\sin(\omega t)$$

$$u(t) = Ri(t)$$

$$i(t) = \frac{U}{R}\sqrt{2}\sin(\omega t) = I\sqrt{2}\sin(\omega t)$$

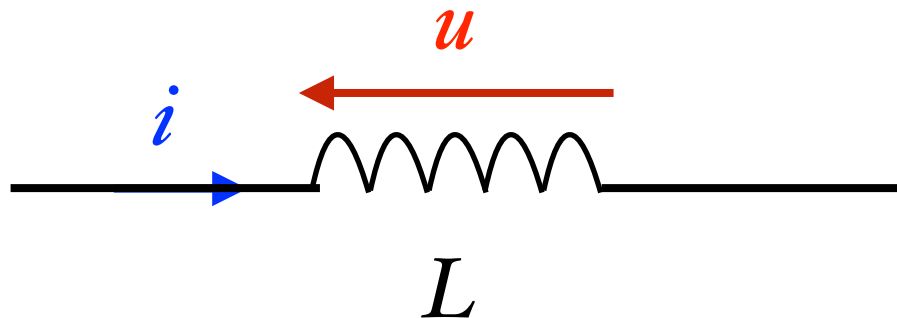
$$\underline{U} = \underline{Z} \underline{I} = R\underline{I}$$

$$\underline{Z} = \frac{\underline{U}}{\underline{I}} = R$$



Impédance d'une inductance

- Inductance en Henry (H) :



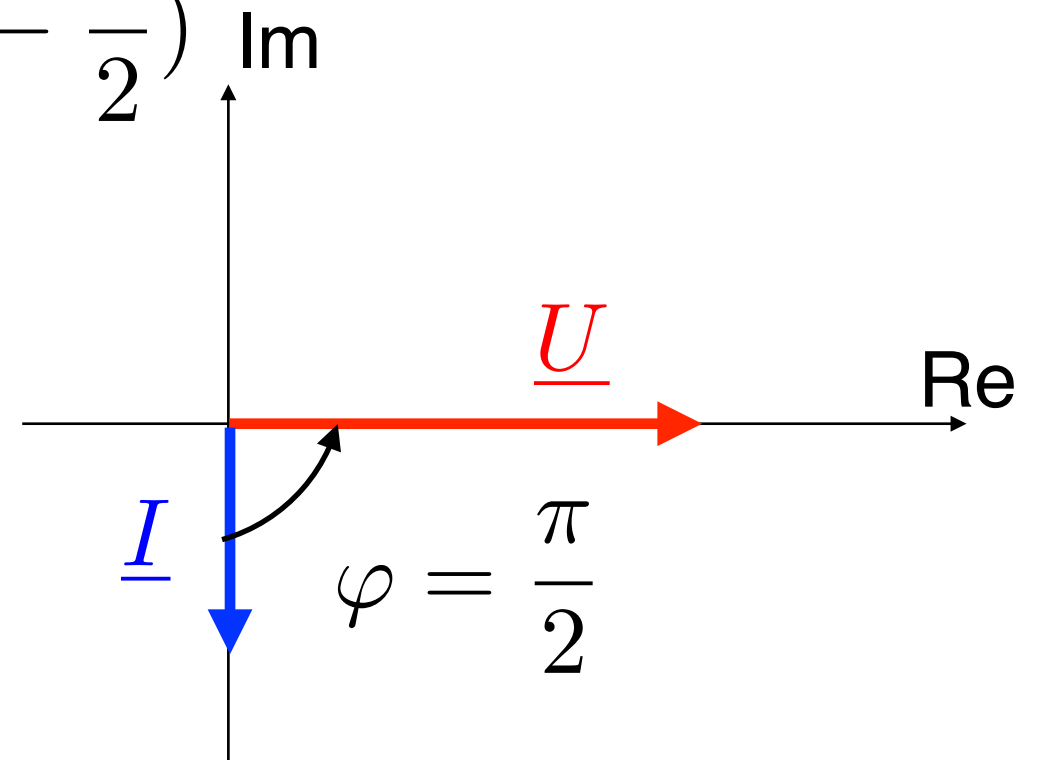
$$u(t) = U\sqrt{2}\sin(\omega t)$$

$$u(t) = L \frac{di(t)}{dt}$$

$$i(t) = -\frac{U\sqrt{2}}{L\omega} \cos(\omega t) = \frac{U\sqrt{2}}{L\omega} \sin\left(\omega t - \frac{\pi}{2}\right)$$

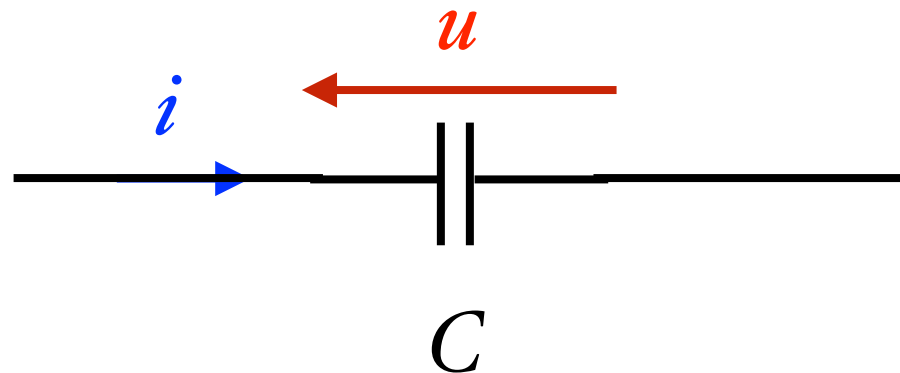
$$\underline{I} = \frac{U}{L\omega} e^{-j\frac{\pi}{2}} = \frac{U}{jL\omega} = \frac{\underline{U}}{jL\omega}$$

$$\underline{Z} = \frac{\underline{U}}{\underline{I}} = jL\omega$$



Impédance d'un condensateur

- Condensateur en Farad (F) :



$$u(t) = U\sqrt{2}\sin(\omega t)$$

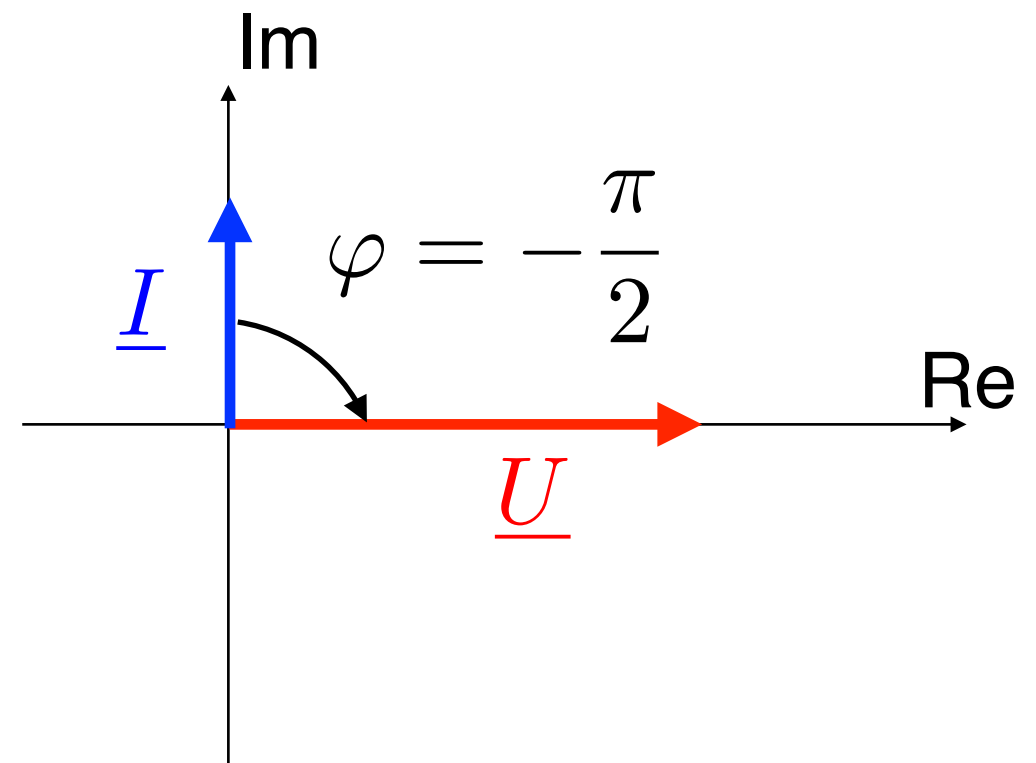
$$i(t) = C \frac{du(t)}{dt}$$

$$i(t) = C\omega U\sqrt{2}\cos(\omega t)$$

$$i(t) = C\omega U\sqrt{2}\sin\left(\omega t + \frac{\pi}{2}\right)$$

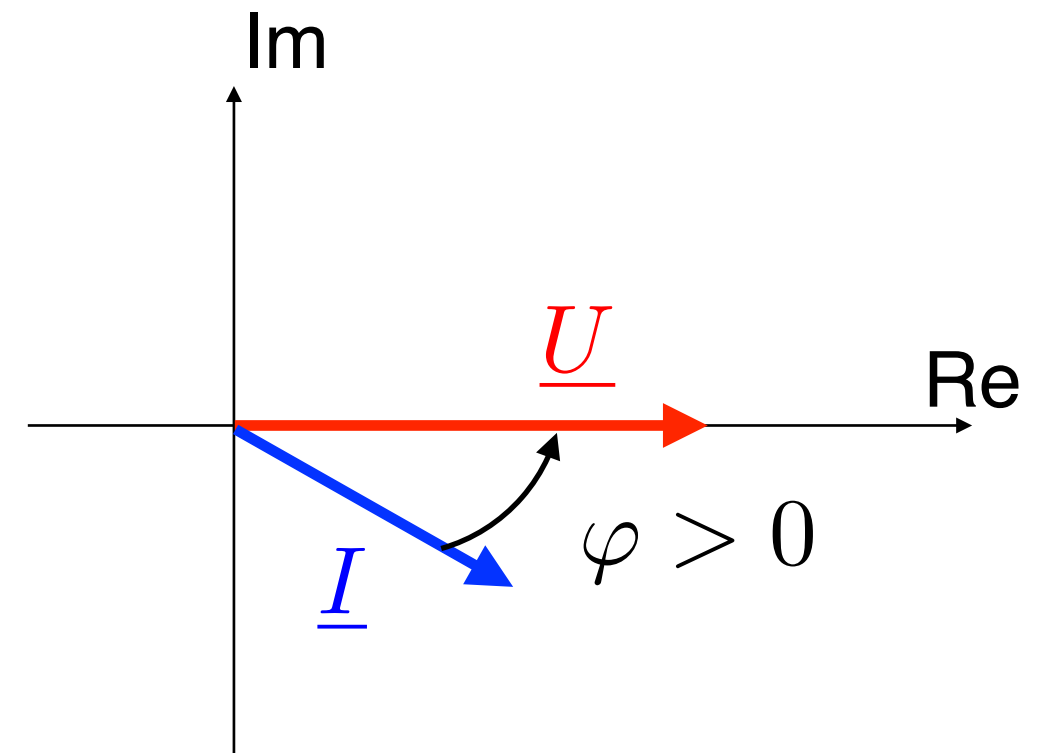
$$\underline{I} = C\omega U e^{j\frac{\pi}{2}} = jC\omega U = jC\omega \underline{U}$$

$$\underline{Z} = \frac{\underline{U}}{\underline{I}} = \frac{1}{jC\omega}$$

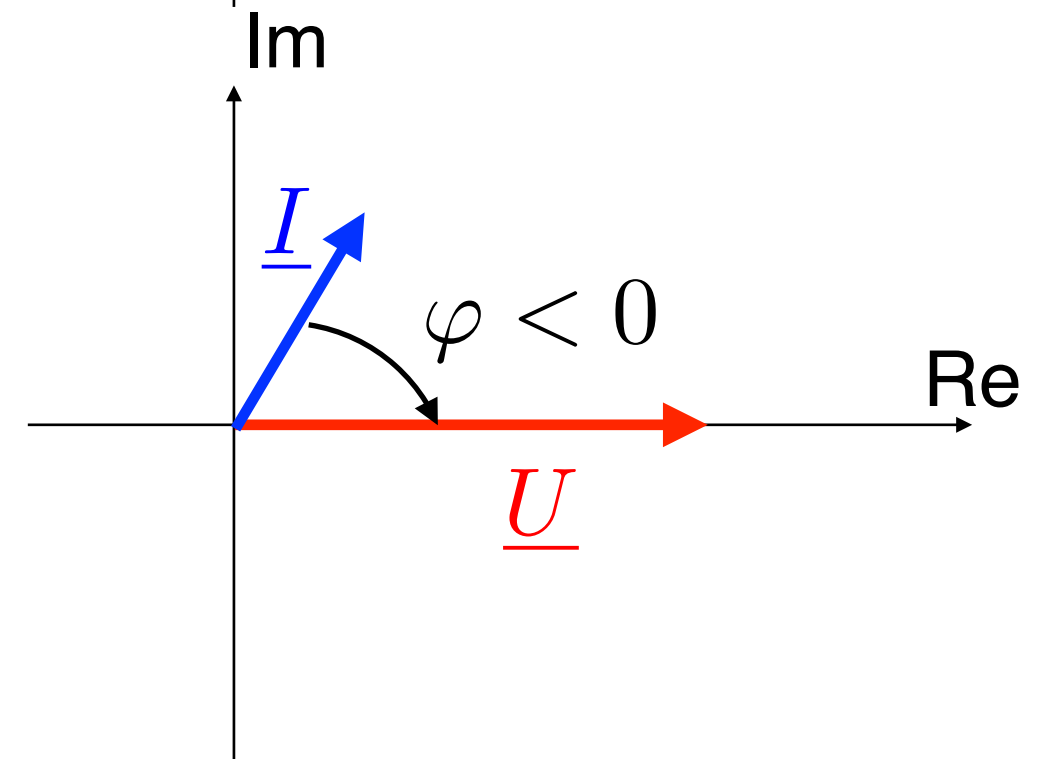
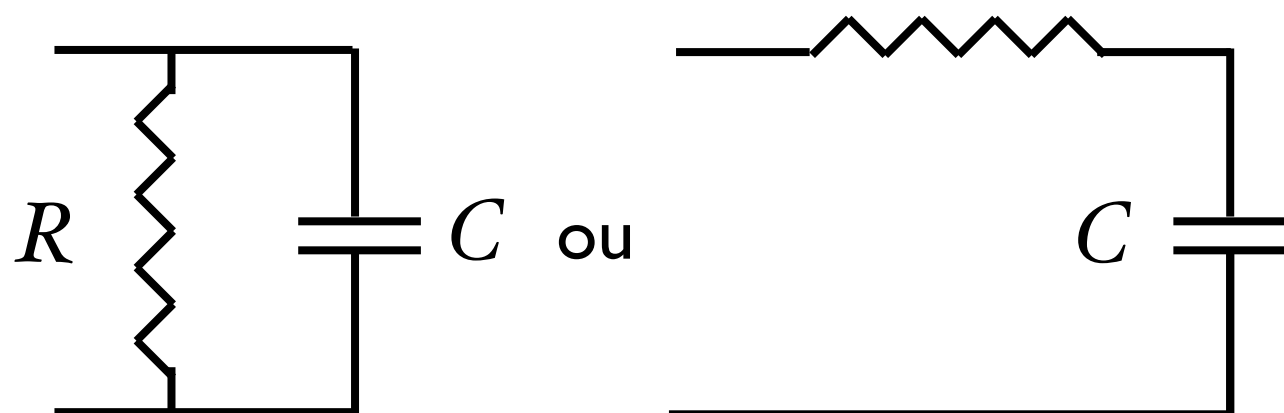


Dipôle « inductifs » et « capacitifs »

- Dipôles « inductifs »



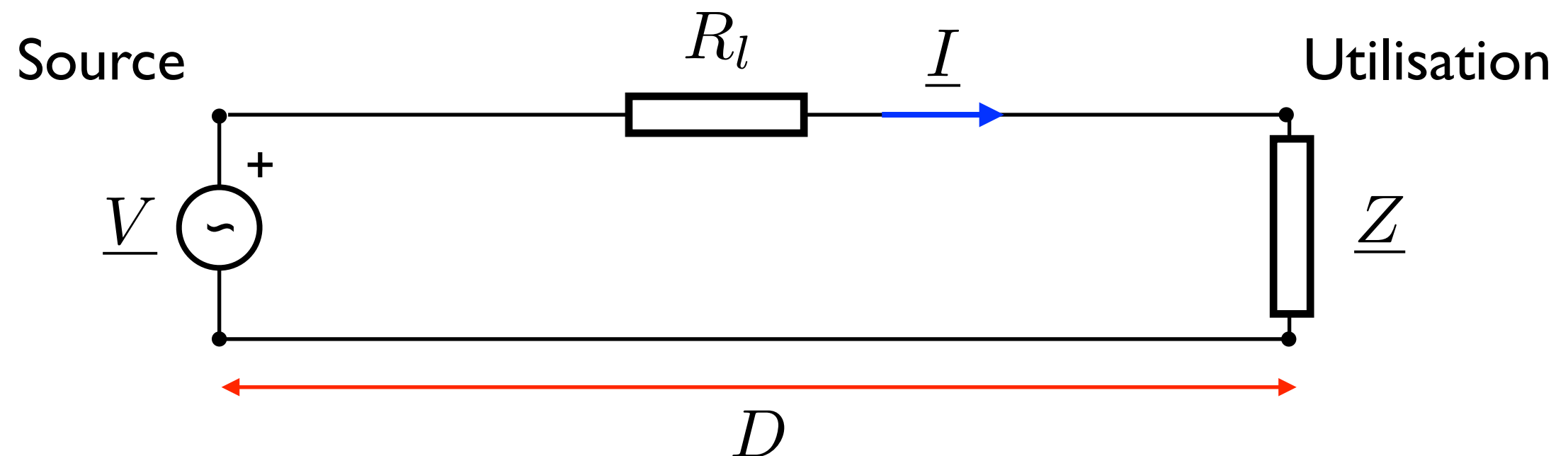
- Dipôles « capacitifs »



Existence de pertes en ligne



Credit: Warren Gretz / NREL



Conséquences

- Puissance à acheminer : $P = UI \cos(\varphi)$
- Puissance perdue dans la ligne : $P_l = R_l I^2$
- Courant transporté : $I = \frac{P}{U \cos(\varphi)}$
- ou encore puissance perdue : $P_l = R_l \frac{P^2}{U^2 \cos^2(\varphi)}$

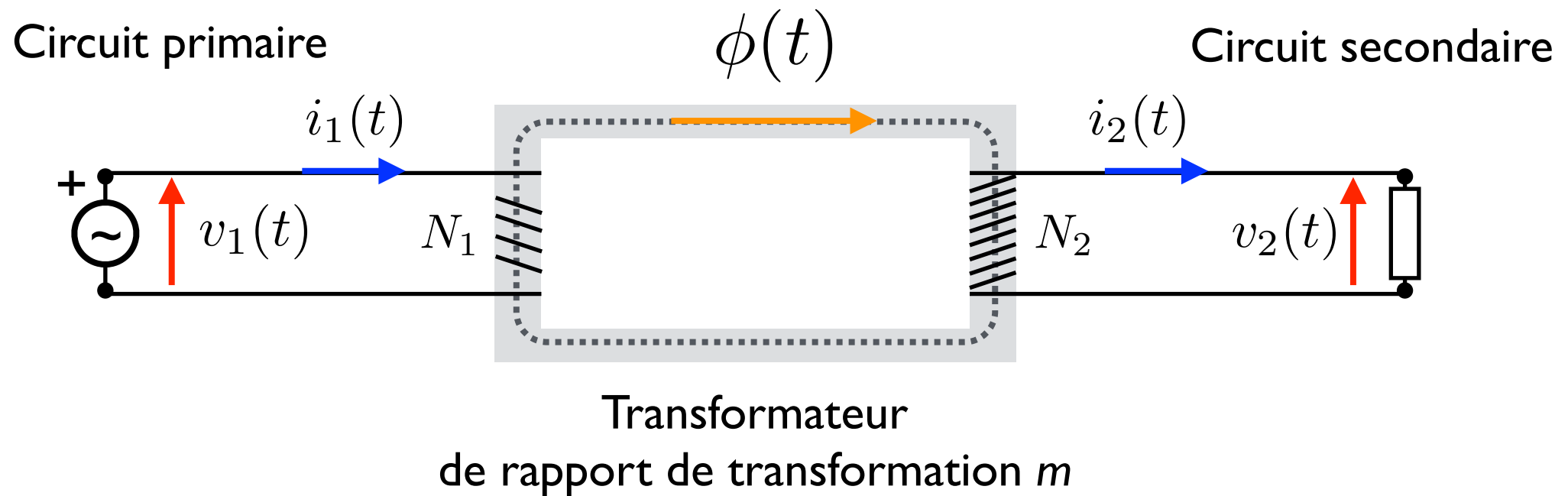
Conclusion : il faut avoir la **tension la plus élevée possible** et un **facteur de puissance aussi proche de l'unité** que possible.

Des transformateurs



Photographies : <http://www.aura-o.aura-astronomy.org/aura/content/new-transformer-pachon-0>

Le transformateur (idéal)



$$v_1(t) = N_1 \frac{d\phi}{dt}$$

$$v_2(t) = N_2 \frac{d\phi}{dt}$$

$$\frac{\underline{V}_2}{\underline{V}_1} = \frac{N_2}{N_1} = m$$

$$\frac{\underline{I}_2}{\underline{I}_1} = \frac{N_1}{N_2} = \frac{1}{m}$$

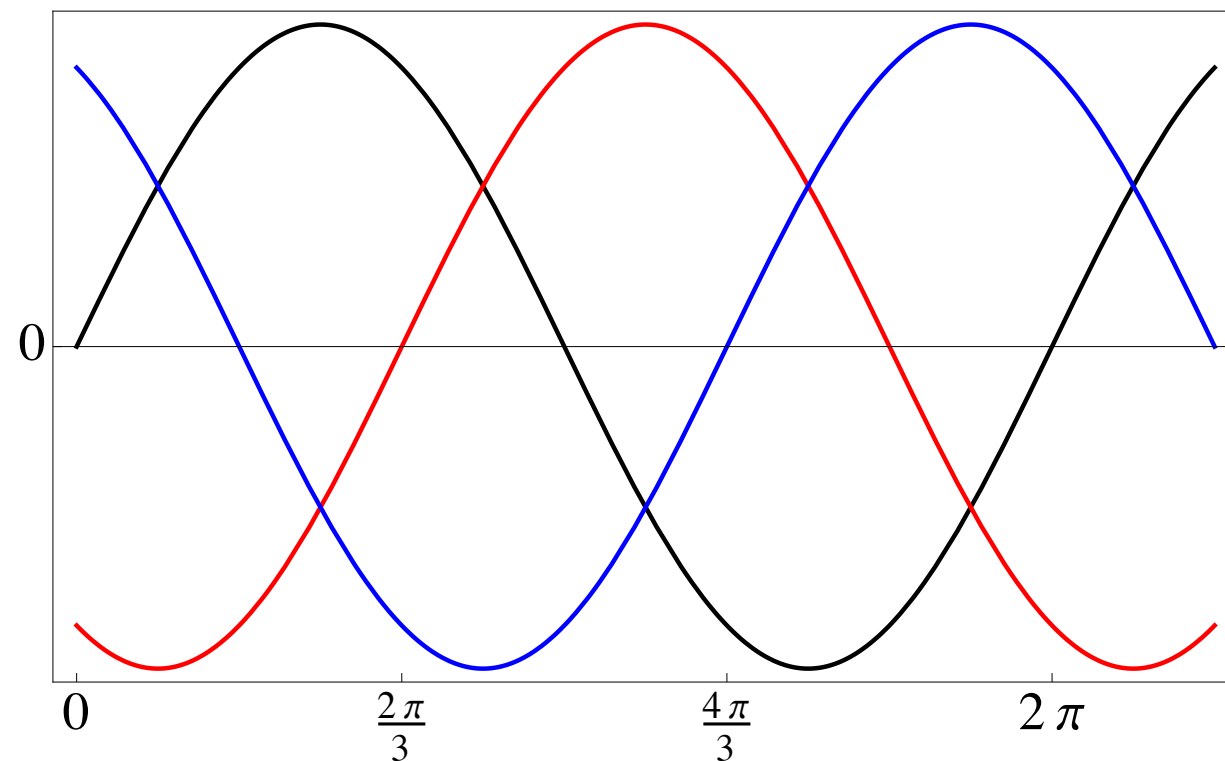
Difficultés

- Les lignes de transport d'énergie sont inductives;
- Les transformateurs présents dans le réseau sont inductifs;
- Les charges d'extrémité telles que des moteurs comportent des enroulements et sont inductives;
- Tout cela crée de la puissance réactive (inductive) qu'il convient de compenser localement :
 - batteries de condensateurs,
 - machines synchrones,
 - électronique de puissance : FACTS (*Flexible Alternating Current Transmission System*).

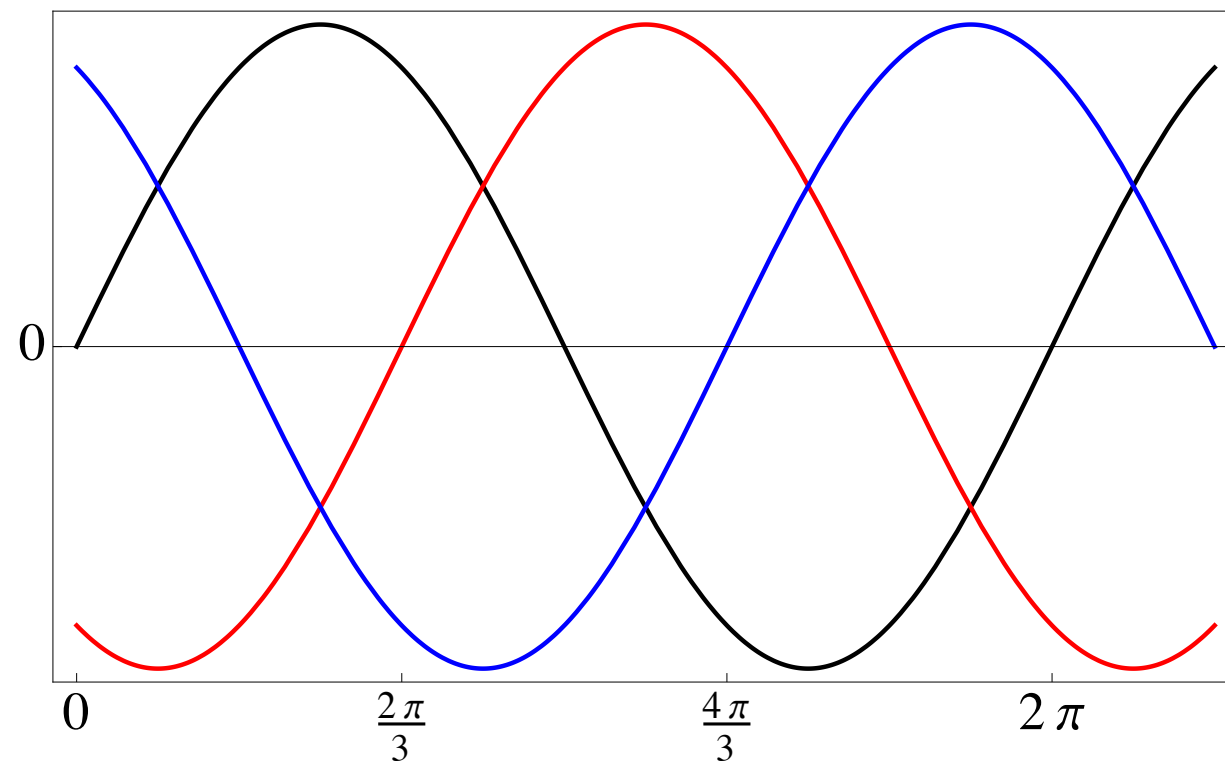
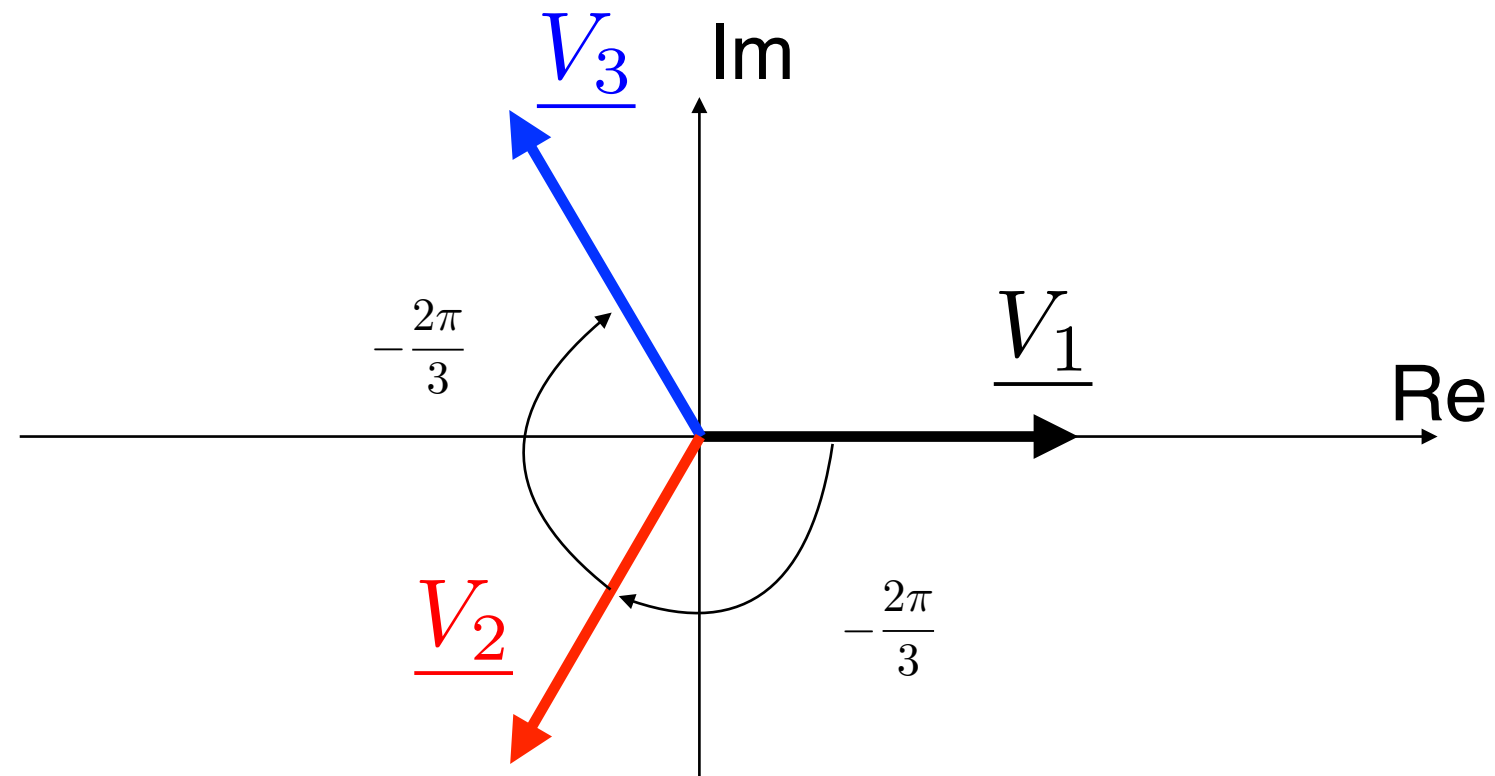
Système de tensions triphasé

- Système de tensions triphasé équilibré direct :

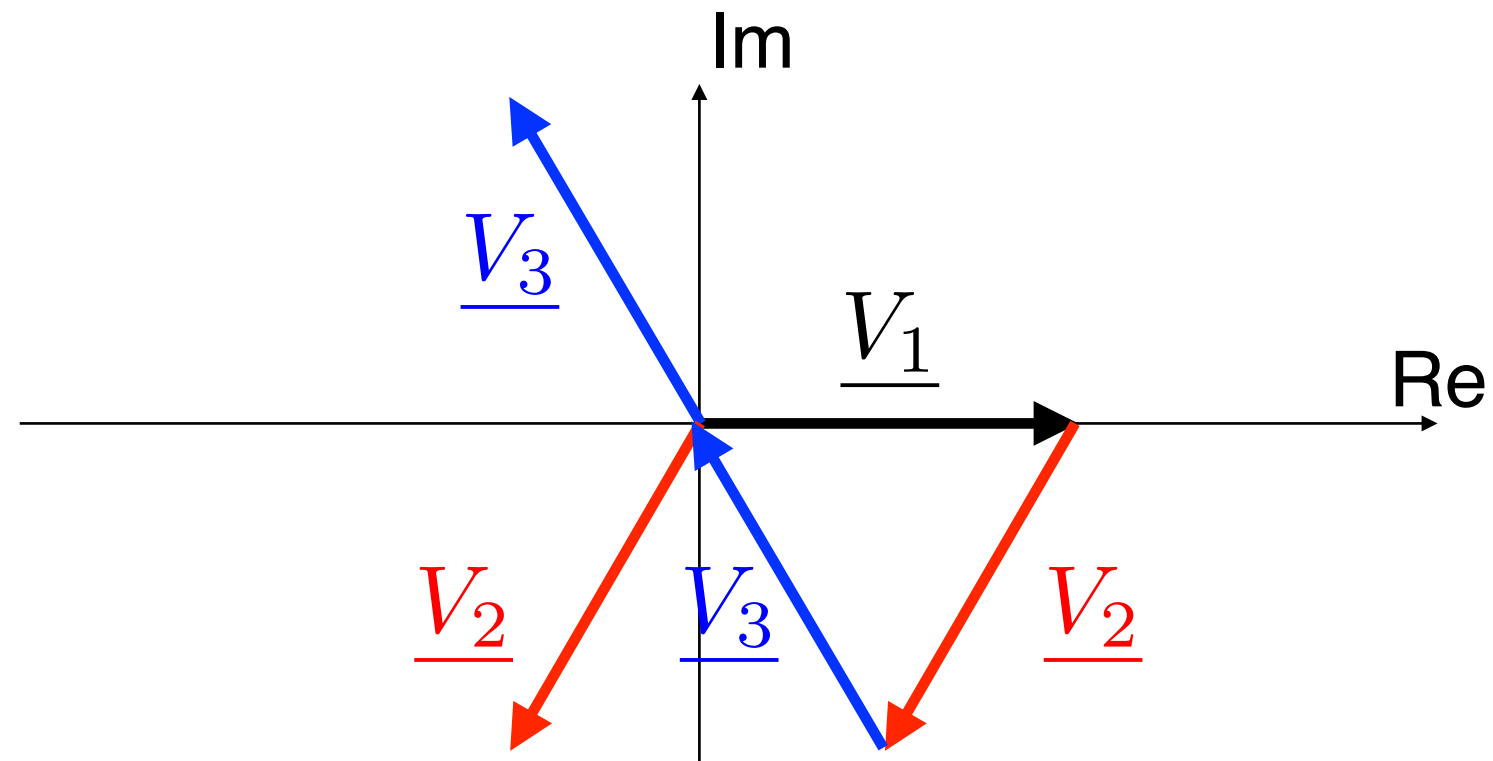
$$\begin{cases} v_1(t) = V\sqrt{2}\sin(\omega t) \\ v_2(t) = V\sqrt{2}\sin(\omega t - \frac{2\pi}{3}) \\ v_3(t) = V\sqrt{2}\sin(\omega t - \frac{4\pi}{3}) = V\sqrt{2}\sin(\omega t + \frac{2\pi}{3}) \end{cases}$$



Représentation vectorielle



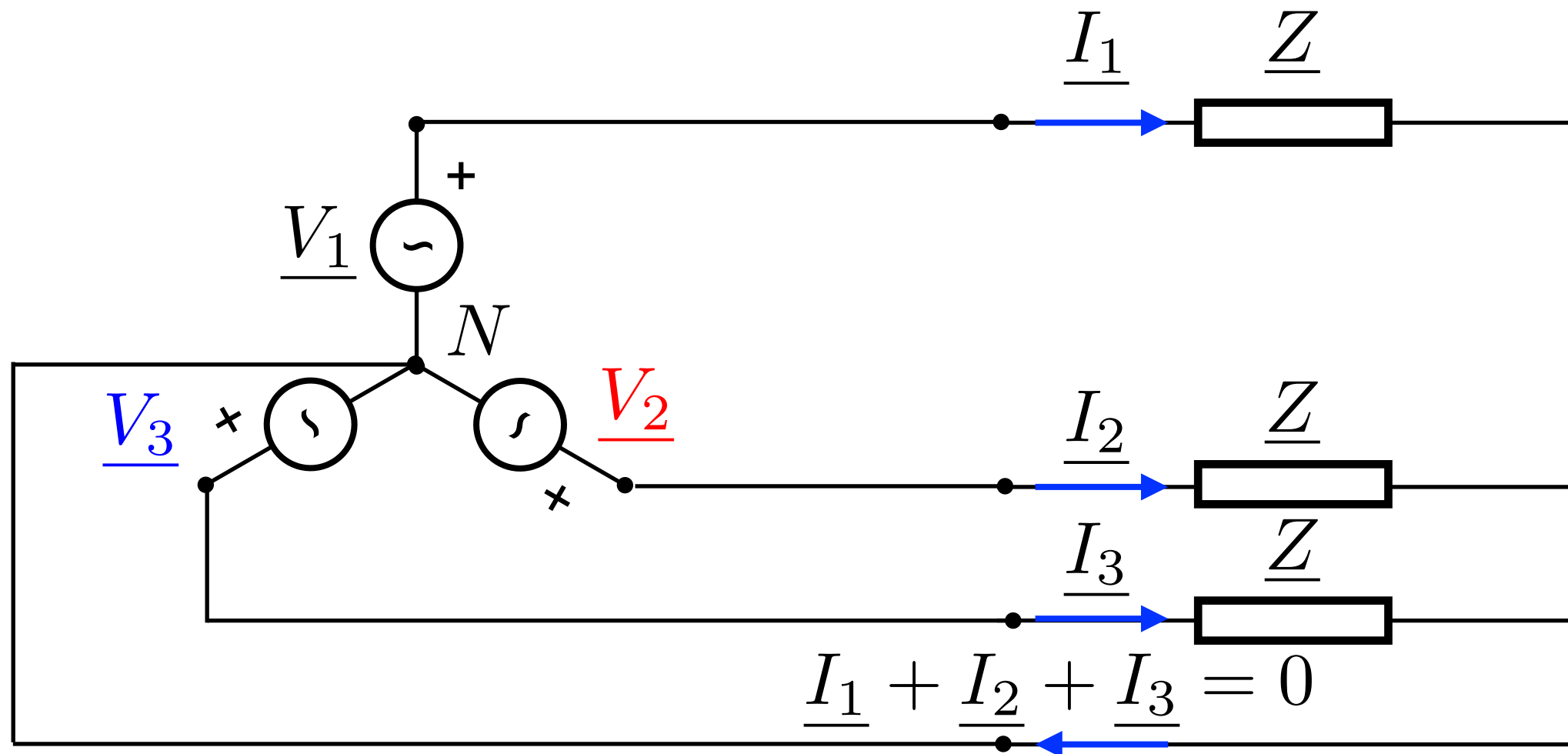
Remarque fondamentale



$$v_1(t) + v_2(t) + v_3(t) = 0$$

$$\underline{V}_1 + \underline{V}_2 + \underline{V}_3 = 0$$

Charge étoile équilibrée

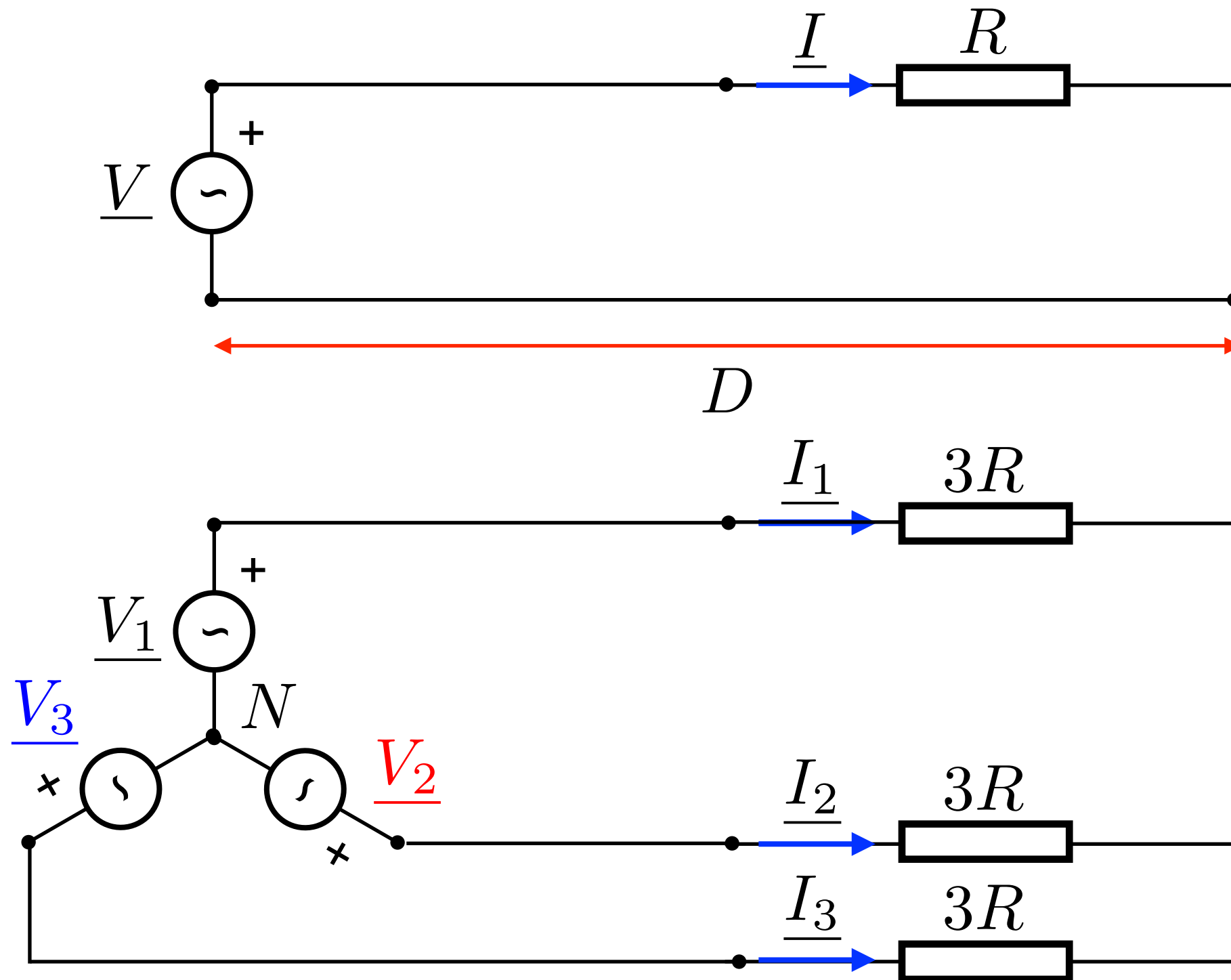


$$\underline{V}_1 + \underline{V}_2 + \underline{V}_3 = 0 \quad \underline{Z}\underline{I}_1 + \underline{Z}\underline{I}_2 + \underline{Z}\underline{I}_3 = 0$$

$$\underline{Z}(\underline{I}_1 + \underline{I}_2 + \underline{I}_3) = 0$$

$$\underline{I}_1 + \underline{I}_2 + \underline{I}_3 = 0$$

Comparaison monophasé/triphasé



Grandeurs

- Sur la ligne monophasée :

$$v(t) = V\sqrt{2}\sin(\omega t) \quad i(t) = \frac{V}{R}\sqrt{2}\sin(\omega t) \quad P = \frac{V^2}{R}$$

- Sur une phase du système triphasé :

$$v_1(t) = V\sqrt{2}\sin(\omega t) \quad i_1(t) = \frac{V}{3R}\sqrt{2}\sin(\omega t)$$

- Au total, la puissance active transportée est la même :

$$P = 3\frac{V^2}{3R} = \frac{V^2}{R}$$

Conclusion

- Courant dans les lignes : $I_{\text{mono}} = \frac{V}{R}$ $I_{\text{tri}} = \frac{V}{3R}$
- Section de câble monophasé : $\Sigma_{\text{mono}} = \frac{I_{\text{mono}}}{J_{\text{max}}}$
- Section de câble triphasé : $\Sigma_{\text{tri}} = \frac{I_{\text{tri}}}{J_{\text{max}}} = \frac{\Sigma_{\text{mono}}}{3}$
- Volumes de câbles : $\text{Vol}_{\text{mono}} = 2D \Sigma_{\text{mono}} = \frac{2VD}{J_{\text{max}}R}$

$$\text{Vol}_{\text{tri}} = 3D \Sigma_{\text{tri}} = \frac{VD}{J_{\text{max}}R} = \frac{\text{Vol}_{\text{mono}}}{2}$$

Principaux avantages

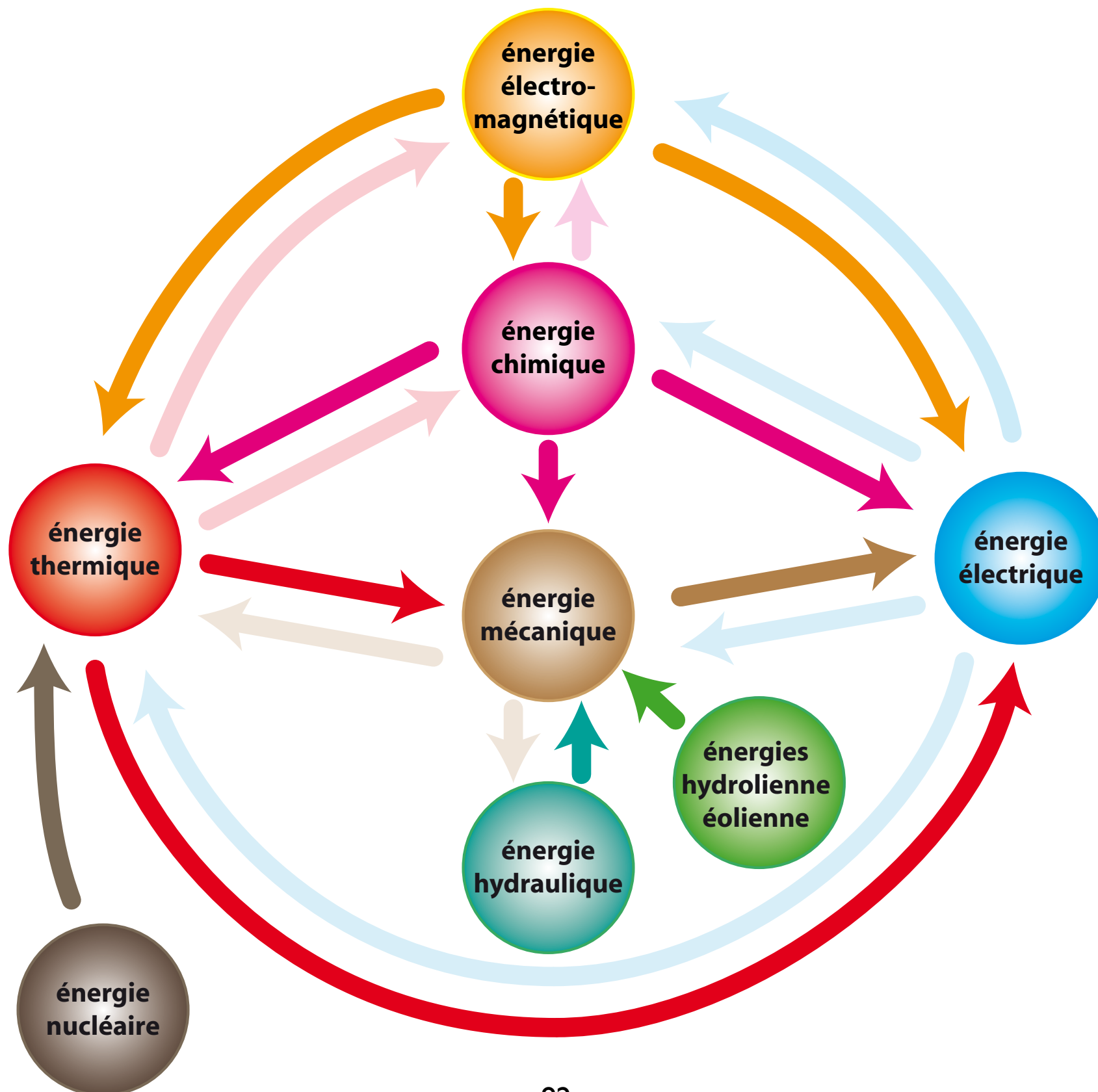
- À puissances actives transportées égales, le volume des conducteurs d'un réseau triphasé est la moitié de celui d'un réseau monophasé.
- Le courant retournant par le conducteur de neutre dans un réseau triphasé équilibré est nul : on peut donc se passer du conducteur de neutre.
- Dans un système triphasé parfaitement équilibré, la puissance fluctuante totale est nulle.
- Cela évite les vibrations et les phénomènes de « balourd » dans les machines tournantes (à la fréquence de 50 Hz).

$$P(t) = 3VI \cos(\varphi)$$

Constitution des réseaux électriques

Sources de production d'électricité

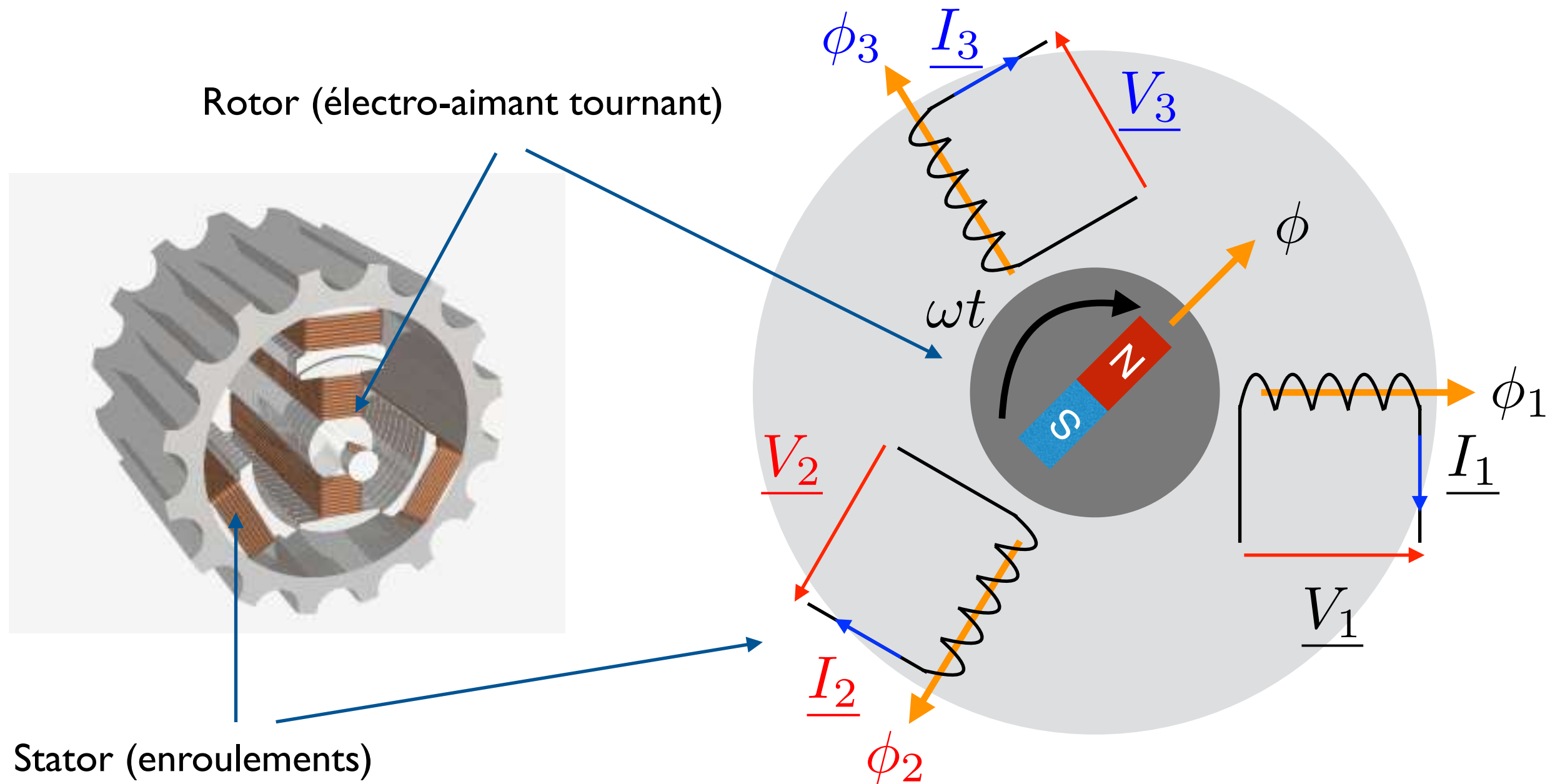
Production d'énergie électrique



Données publiques

<http://www.rte-france.com/fr/donnees-et-analyses/indicateurs-et-analyses/eco2mix/menu/appli-eco2mix-pour-smartphones-et-tablettes>

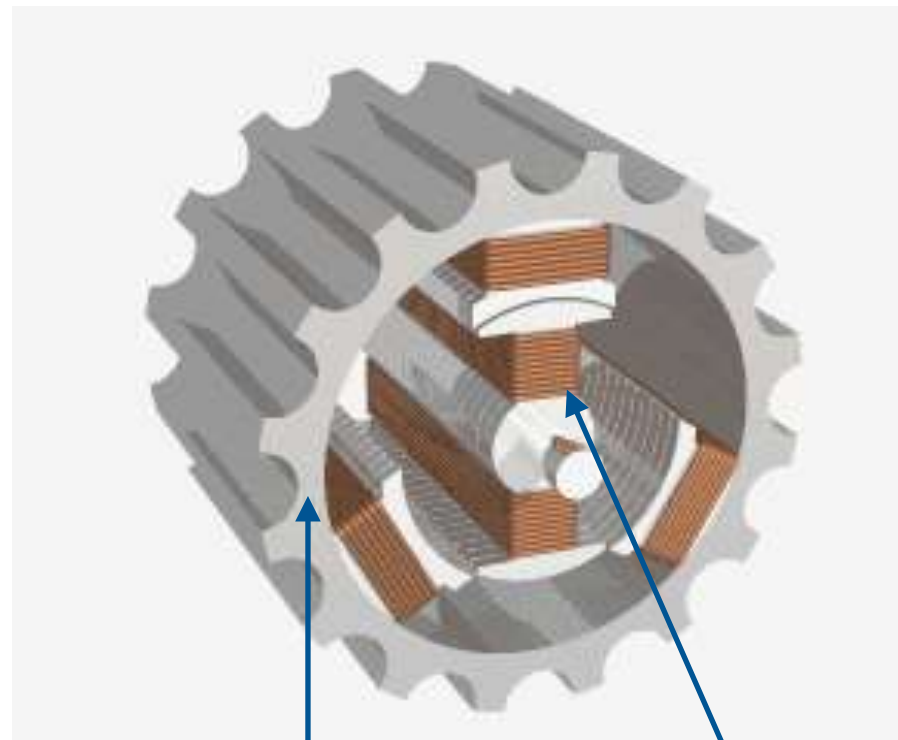
L'alternateur : principe physique



<http://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/0/03/Sink-320x240-3x-rot.gif?uselang=fr>

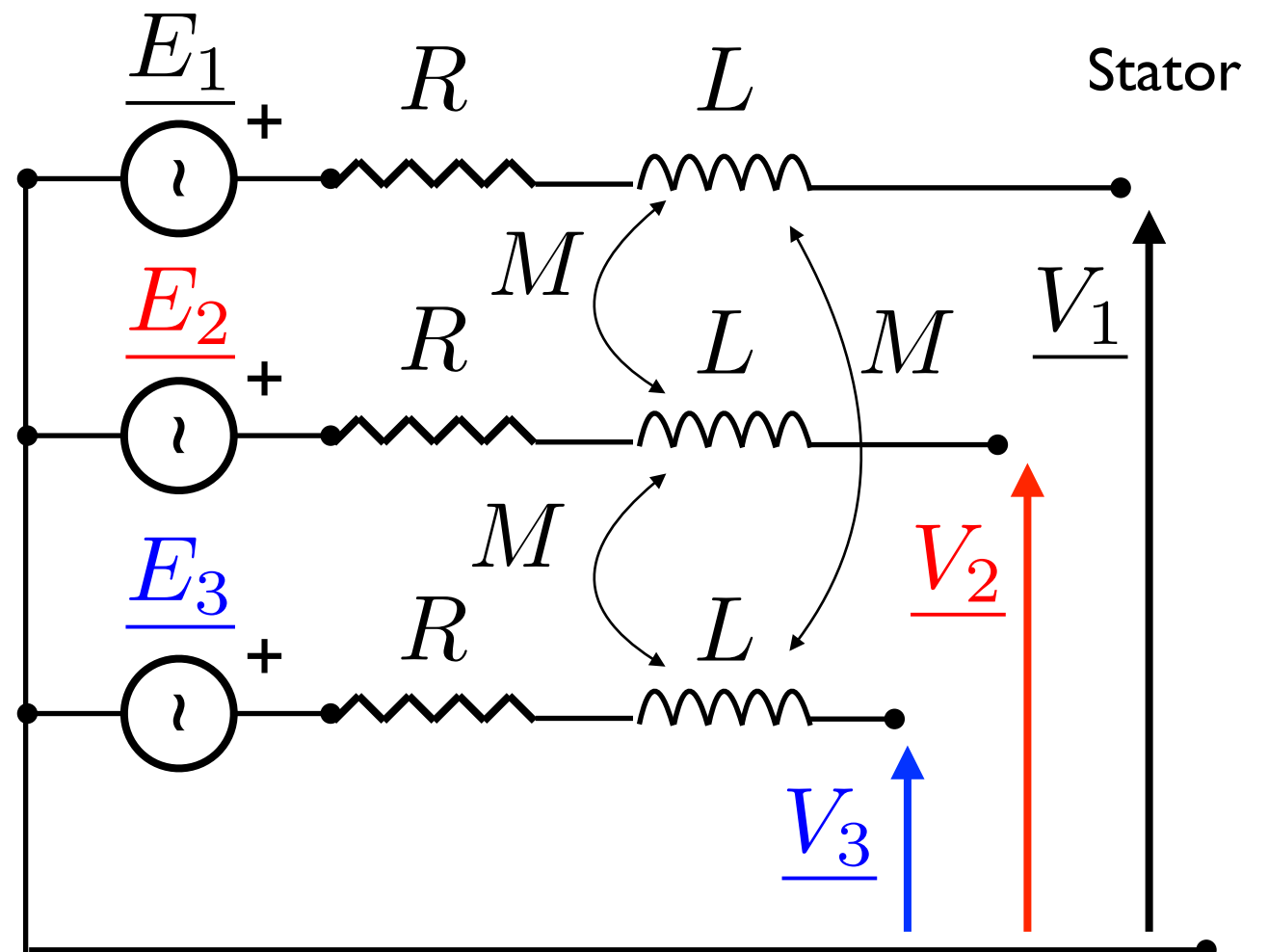
L'alternateur : schéma électrique

La fréquence électrique (50 Hz) est liée à la vitesse angulaire.



Stator (enroulements)

Rotor (électro-aimant tournant)

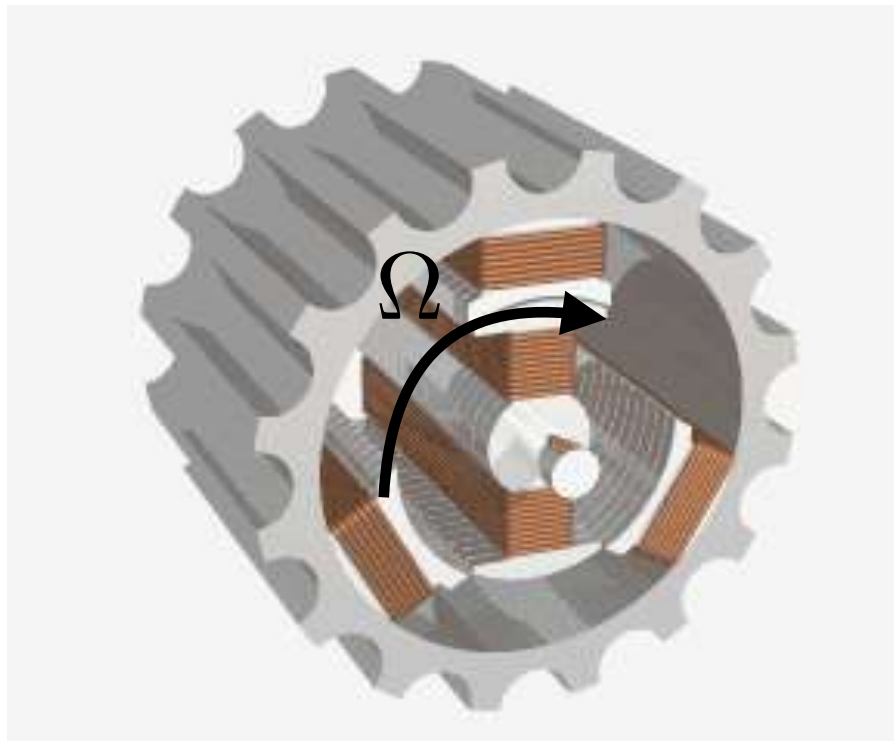


<http://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/0/03/Sink-320x240-3x-rot.gif?uselang=fr>

Fonctionnement des réseaux électriques (classiques)

L'alternateur : couples

$$C_{\text{méca}} - C_{\text{élec}} = \frac{P_{\text{méca}}}{\Omega} - \frac{P_{\text{élec}}}{\Omega} = J_{\text{inertie}} \frac{d\Omega}{dt}$$



La puissance électrique consommée augmente :

$\frac{d\Omega}{dt} < 0$ Freinage et baisse de la fréquence

La puissance électrique consommée diminue :

$\frac{d\Omega}{dt} > 0$ Accélération
et augmentation de la fréquence

<http://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/0/03/Sink-320x240-3x-rot.gif?uselang=fr>

Quelques principes

- Le **synchronisme** doit être maintenu : fonctionnement à 50 Hz de toutes les centrales interconnectées en Europe
- La **puissance électrique produite** doit être en permanence égale à la **somme de la puissance consommée et des pertes** : la production doit être capable de satisfaire la demande à tout instant
- Les pertes représentent 4 à 5 % de la puissance consommée
- La puissance réactive doit être la plus faible possible (facteur de puissance $> 0,8$ (taxes à payer en deçà de cette valeur)).

Ajustement de la production

- Utilisation de l'ensemble des énergies convertibles en énergie électrique;
- Grande diversification des sources : nucléaire, fioul, charbon, gaz, hydraulique, solaire, éolien...
- Des temps de réponse différents :
 - Quelques heures pour les centrales de production de masse (plusieurs GW), nucléaires ou thermiques
 - Moins de l'heure pour des centrales de production intermédiaire (< 1 GW), usuellement thermiques
 - Quelques minutes pour les centrales de production de pointe (100 MW), hydroélectriques en général

Quelques remarques

- Il n'est pas actuellement possible de stocker l'énergie électrique à l'échelle de tout un pays :
 - les installations, centralisées, n'ont pas été prévues pour cela,
 - les rendements de conversion seraient faibles,
 - les coûts élevés;
- **La production doit donc être égale à la consommation :**
 - il faut donc réguler la production,
 - stocker localement quand c'est possible.

La crainte : les pannes

Nord-est des États-Unis, 1965 (14 heures) : 30 millions de personnes

New York, 1977 (25 heures) : 10 millions de personnes

Canada, 1989 (9 heures) : 10 millions de personnes

États-Unis, 2003 (jusqu'à 24 heures) : 50 millions de personnes

Italie, 2003 : 57 millions de personnes

Indonésie, 2005 : 100 millions de personnes

Europe occidentale, 2006 (30 minutes) : dix millions de personnes

Colombie, 2007 (quelques heures) : 25 millions de personnes

Brésil et Paraguay, 2009 (7 heures) : 87 millions de personnes

Chili, 2010 (jusqu'à 2 semaines) : 13 millions de personnes

Partie III : L'idée des smart grids

Contexte

Une définition des smart grids

Avantages et bénéfices

Quelques outils, solutions et problèmes

Conclusion

Contexte

La 1^{ère} révolution industrielle : 1709-1849

- Exploitation des mines
- **Utilisation du charbon**
 - Machine à vapeur (T. Newcomen, 1710 et James Watt, 1769)
 - Métier à tisser mécanique (1764)
 - Usines
- Gains de productivité, croissance
- Rendement agricole amélioré
- Colonisation par les Européens, développement du commerce

La 2^e révolution industrielle : 1850-1993

- Triomphe de la mécanique
 - Développement des chemins de fer et bateaux à vapeur
 - Ouvrages d'art métalliques (Eiffel)
- **Exploitation du pétrole**
 - Naissance de l'industrie chimique
 - Moteur à explosion (automobile, aviation)
- Développement de l'électricité
 - Confort « moderne », modernisation des usines
 - Développement des télécommunications (sous contrôle étatique)
- Mondialisation
 - Développement des échanges internationaux, poursuite de la colonisation

La 2^e révolution industrielle

- Centralisation : pouvoir pyramidal
 - Concentration des sources d'énergie
 - Contrôle des télécommunications
- Grandes industries ou grandes sociétés de service
 - Usagers ou consommateurs captifs, acquéreurs d'objets
- Influence de la finance et des marchés : capitalisme concentré
 - Indicateur : la croissance du PIB, agences de notation
 - Économie concurrentielle
- Mondialisation massive

La 3^e révolution industrielle : maintenant ?

- **Pouvoir latéral et local**
 - Production décentralisée et répartie de l'énergie
 - Production des biens répartie
- **Partage des moyens de communication** (Internet...)
 - Exploitation de l'électronique, de l'informatique et des télécommunications, déploiement des réseaux
- **Intérêt plus pour l'usage que pour la propriété ?**
 - Capitalisme distribué (économie coopérative)
- **« Continentalisation » plus que mondialisation**

La 3^e révolution industrielle vue par Jeremy Rifkin

<http://www.actes-sud.fr/catalogue/pochebabel/la-troisieme-revolution-industrielle-babel>

Les 5 « piliers » de Jeremy Rifkin

1. Passage aux énergies renouvelables
2. Transformation du parc immobilier en ensemble de micro-centrales énergétiques
3. Déploiement des techniques de stockage de l'énergie (dont la filière hydrogène)
4. Développement d'un réseau de télécommunications dédié au partage de l'énergie (production et consommation)
5. Passage aux véhicules électriques

Le point de vue des industriels

- La demande d'électricité (et la consommation) doubleront d'ici 20 ans
- La dépendance aux énergies fossiles avec ses impacts environnementaux n'est pas soutenable
- La dérégulation et la commercialisation de l'électricité sont nécessaires à l'efficacité et à la compétitivité
- Les consommateurs (plus les usagers) attendent davantage et sont prêts à s'impliquer

Les défis à relever pour les industriels

- Une demande énergétique croissante face à la nécessité de réduire les dégradations environnementales
- Fournir de plus en plus d'électricité avec une infrastructure vieillissante
- Améliorer la disponibilité, la fiabilité et la qualité de la fourniture sans renoncer à la rentabilité
- Répondre aux besoins des consommateurs par la communication et l'interaction

Une réponse :

Les smart grids

ou (en français)

la gestion intelligente de l'énergie

Une définition des *smart grids*

Quelques définitions

- Un “*smart grid*” est un système électrique capable d’intégrer de manière intelligente les actions des différents utilisateurs, consommateurs et/ou producteurs afin de maintenir une fourniture d’électricité efficace, durable, économique et sécurisée.

(<http://www.developpement-durable.gouv.fr/Les-smart-grids-quels-enjeux.html>)

- L’intégration des nouvelles technologies de l’information et de la communication aux réseaux les rendra communicants et permettra de prendre en compte les actions des acteurs du système électrique, tout en assurant une livraison d’électricité plus efficace, économiquement viable et sûre.

(<http://www.smartgrids-cre.fr/index.php?p=definition-smart-grids>)

Pour résumer

Smart grid = réseau électrique
+ réseau de télécommunications
+ énergies renouvelables
+ stockage : véhicules électriques (et batteries), stations de transfert d'énergie par pompage (STEP) et hydrogène
+ domotique
+ « intelligence » (informatique)

Une priorité européenne



[Login](#) | [Register](#)

European technology platform for the electricity networks of the future

[ETP](#) ▾

[GET INVOLVED](#) ▾

[EU INITIATIVES](#) ▾

[EU PROJECTS](#) ▾

[FUNDING](#) ▾

[FAQ](#)

[LINKS](#)

[PRIVATE](#)

News & Events

Interested in receiving information about SmartGrids related activities? Please [register to the Newsletter](#) or visit the [News & Events](#) section.

For reference, you can also review the [past events and news](#) posted here.

This project has received funding from the European Union's Seventh Programme for research, technological development and demonstration under grant agreement No 308897.



Smart Grids European Technology Platform

The **European Technology Platform for Electricity Networks of the Future**, also called ETP SmartGrids, is the key European forum for the crystallisation of policy and technology research and development pathways for the smart grids sector, as well as the link between EU-level related initiatives.

Call for Members of Working Group Network Operations and Assets

1st Feb 2014, Brussels. The call for members of the Working Group Network Operations and Assets of the European Technology Platform for the Electricity Network of the Future (ETP SmartGrids) is already **closed**.

Thank you to all the applicants for your interest on it! You will receive more information soon.

Launch of Horizon 2020 - The new European Framework Programme for Research and Innovation

Running from 2014 to 2020, and with a budget of over €70 billion, the EU's new Programme for research and innovation is part of the drive to create new growth and jobs in Europe.

The adoption of work programme and publication of first calls for proposals will be published on **11 December 2013**.

Access to further information [here](#) or on the [H2020 website](#).



Avantages et bénéfices

Les avantages des “*smart grids*”

- Intégrer la production électrique venant des énergies renouvelables dans le réseau d'énergie électrique
- Moderniser le réseau pour avoir une distribution fiable
- Se servir des techniques de l'information et de la communication pour construire un réseau électrique plus efficace, plus « intelligent » et plus fiable
- Impliquer davantage les consommateurs grâce aux technologies AMI (“*advanced metering infrastructure*”)
- Améliorer la disponibilité et la fiabilité des systèmes nécessaires
- Gérer l'inconnu et les incertitudes

Quelques objectifs

- Améliorer la fiabilité de la distribution d'énergie et la qualité
 - Emploi de capteurs communicants
 - Établissement plus rapide d'un équilibre entre production et demande (limite les risques d'effondrement du réseau)
- Éviter de construire les centrales du « pic de demande »
 - Intermittence des énergies renouvelables (solaire, éolien)
 - Solution actuelle : centrales à gaz ou à charbon
 - Solution future : stockage et effacements programmés

Les bénéfices

- Amélioration de la résilience du réseau
- **Auto-réparation** du réseau de distribution (redondance)
- Développement des énergies renouvelables (moins de CO₂)
- Réduction des coûts d'entretien (à terme)
- Diffusion des véhicules électriques
- Souplesse plus grande pour le consommateur, confort et économies

« **Décarbonisation** »

Pour résumer

Le confort et la fiabilité
des années 2000

avec

la consommation d'énergie
des années 1960

Quelques outils, solutions et problèmes

L'effacement

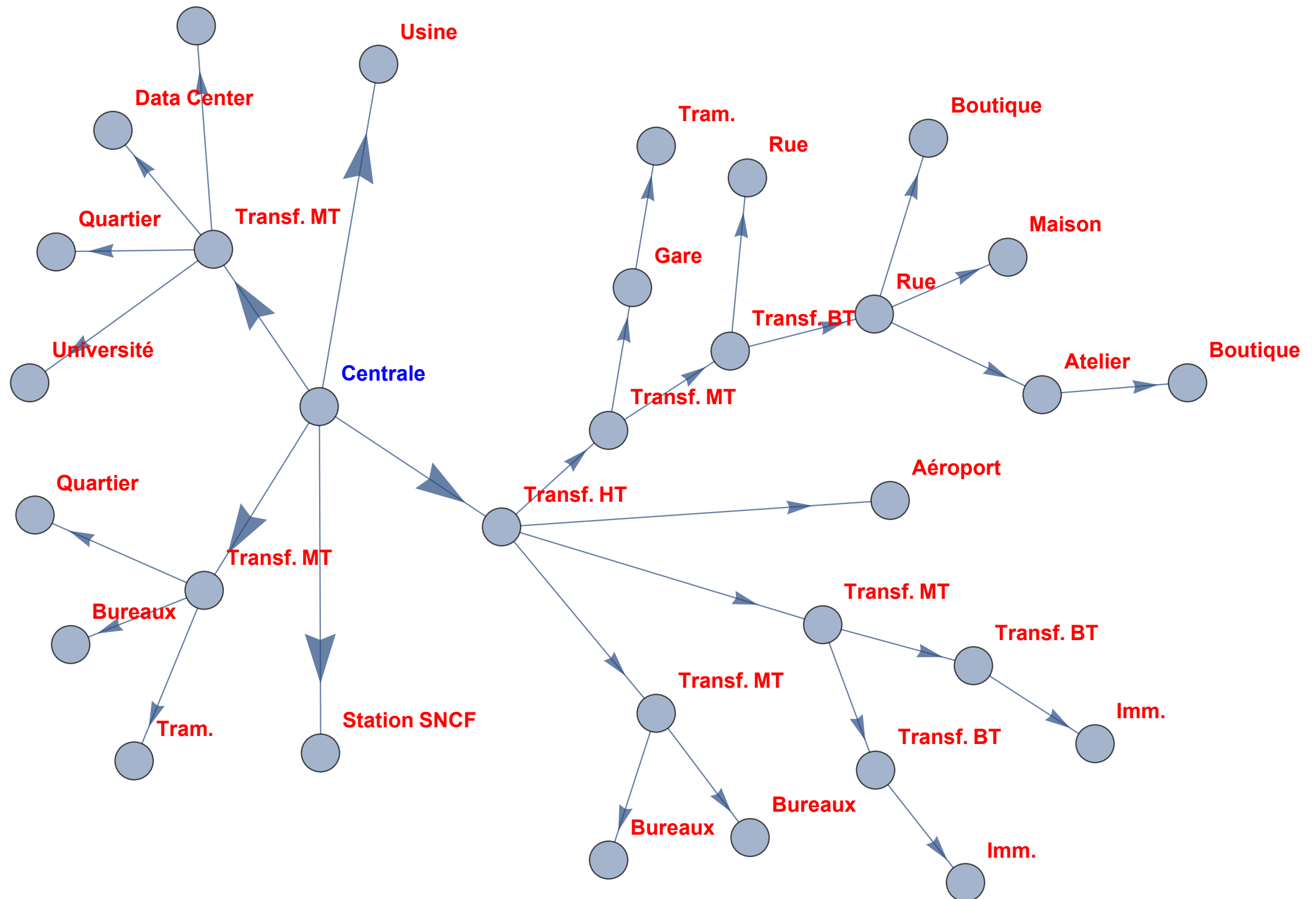
- Permet d'éviter de solliciter des capacités de production supplémentaires lorsqu'il existe un surcroît de demande
- Se répercute en économies sur la facture finale d'électricité
- Déjà proposé à des industriels clients de RTE, pour des capacités supérieures ou égales à 10 MW.
- A été expérimenté en Bretagne sur des capacités plus faibles (à partir du MW)
- Objectif à terme : collecter une somme d'effacements diffus issus des particuliers

Rouler ou stocker ?

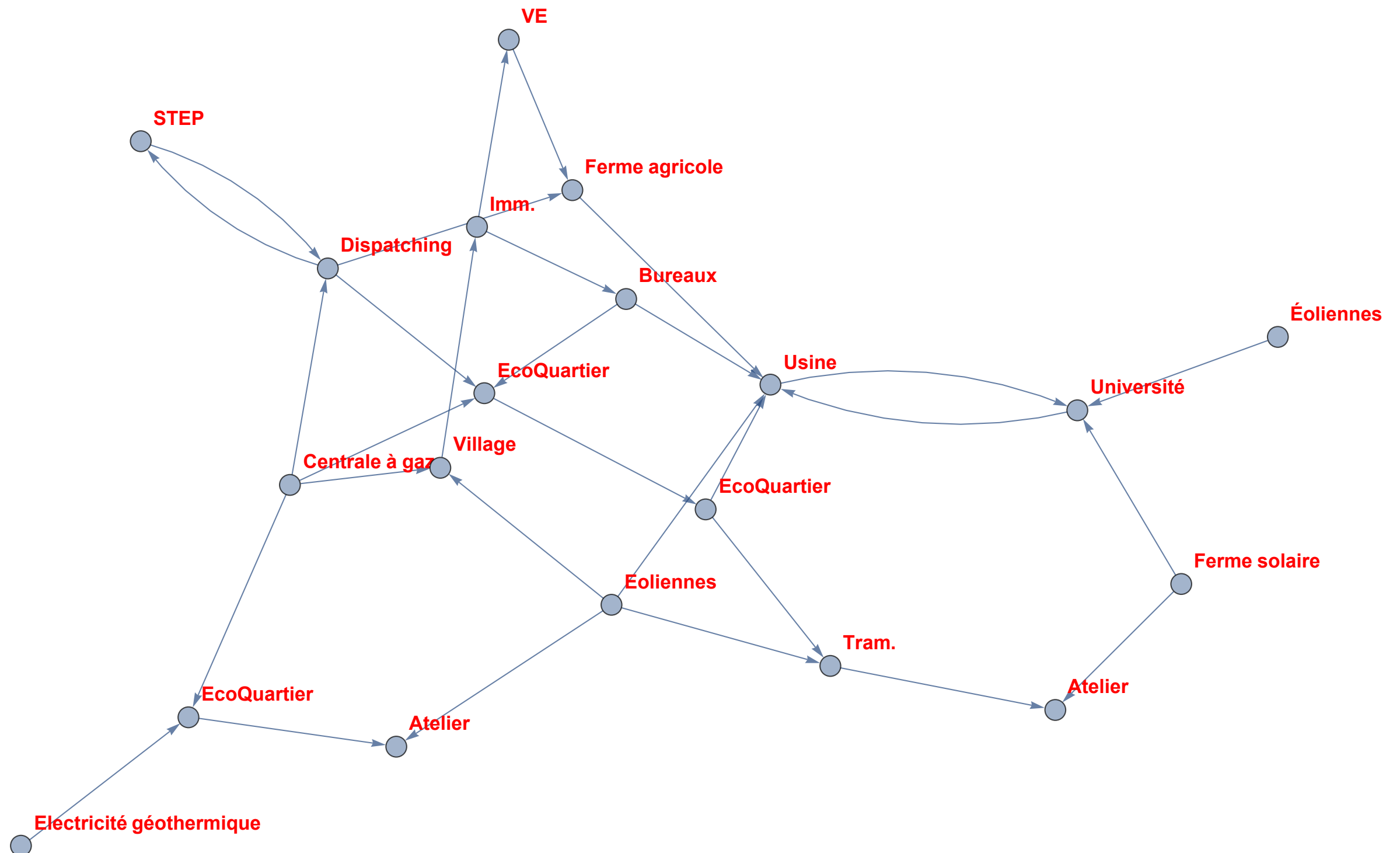


Credit: Dennis Schroeder / NREL

Un réseau traditionnel



Un réseau pour “smart grids”



Les problèmes à surmonter

- La transformation du réseau (qui doit devenir **bidirectionnel**)
- L'**intermittence** de l'éolien et du photovoltaïque
- Le développement de solutions de **stockage**
- L'obtention des **investissements financiers** indispensables
- La gestion d'un fonctionnement beaucoup plus **aléatoire** du réseau
- La **sécurité** et la fiabilité des capteurs communicants

Les défis

- La **prédiction** de la consommation et l'**ajustement** de la production :
 - des « millions » de producteurs intermittents et encore davantage de consommateurs
 - **des millions de variables et de contraintes**
 - à traiter en **temps réel**
- pas de solution statistique facilement envisageable (besoin d'**équilibrer le réseau à tout instant**)
- **La recherche de solutions de stockage**

Conclusion

Une perspective rassurante pour conclure :

Vers un mix électrique 100% renouvelable en 2050



Rapport final





Une confirmation à Stanford

Joule

Log in

ARTICLE | [VOLUME 1, ISSUE 1, P108-121, SEPTEMBER 06, 2017](#)

100% Clean and Renewable Wind, Water, and Sunlight All-Sector Energy Roadmaps for 139 Countries of the World

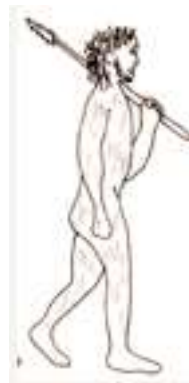
[Mark Z. Jacobson](#)  ⁵  • [Mark A. Delucchi](#) • [Zack A.F. Bauer](#) • ... [Jingfan Wang](#) • [Eric Weiner](#) •
[Alexander S. Yachanin](#) • [Show all authors](#) • [Show footnotes](#)

Published: August 23, 2017 • DOI: <https://doi.org/10.1016/j.joule.2017.07.005> •



Source : <https://www.cell.com/action/showPdf?pii=S2542-4351%2817%2930012-0>

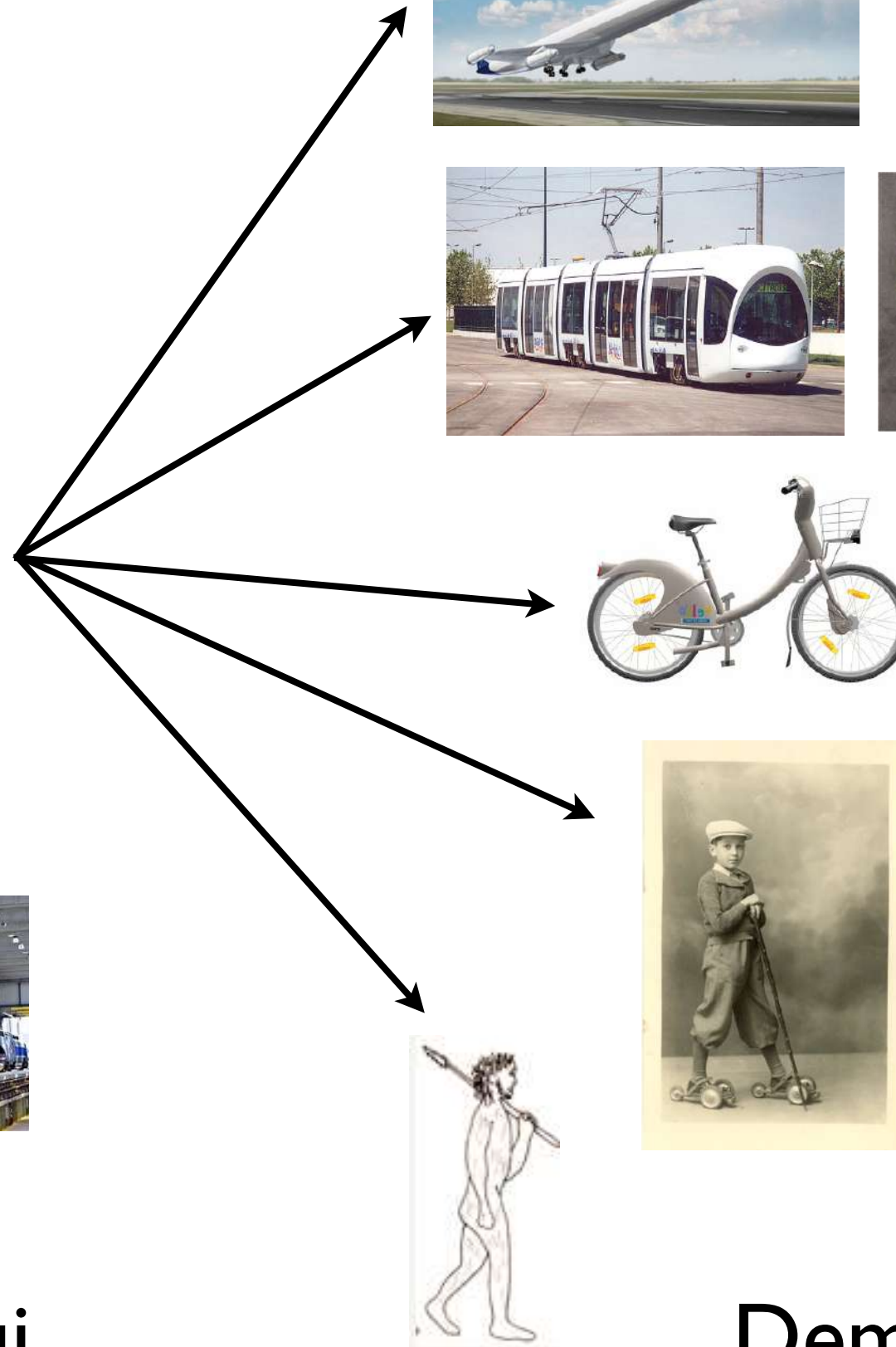
L'avenir ?



Hier

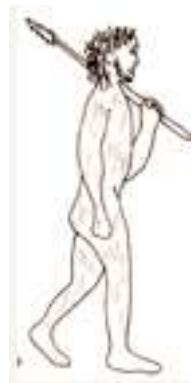


Aujourd'hui



Demain ?

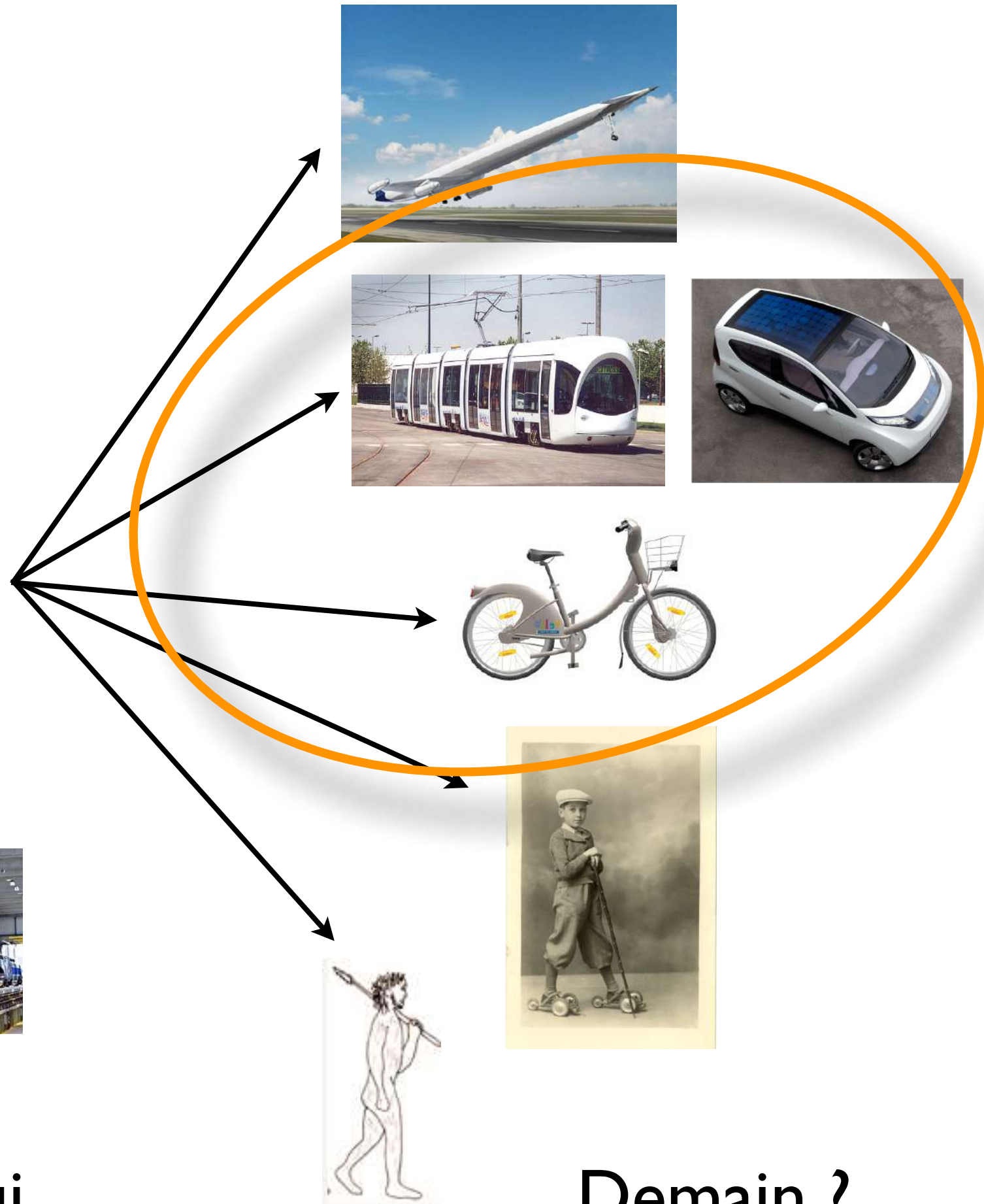
L'avenir ?



Hier



Aujourd'hui



Demain ?

Conclusion

Le problème de notre temps, c'est que le futur n'est plus ce qu'il a été.

Paul Valéry

Quelques références (à jour le 01/10/18)

- <https://www.cnil.fr/fr/linky-gazpar-quelles-donnees-sont-collectees-et-transmises-par-les-compteurs-communicants>
- <https://jancovici.com>
- <http://www.smartgrids-cre.fr>
- <http://modules-pedagogiques.cre.fr/m4/index.html>
- <https://www.rte-france.com/fr/actualite/rapport-rei-quelle-valeur-pour-les-smart-grids>
- http://www.gegridsolutions.com/smartgrid_overview.htm
- <https://www.enedis.fr/smart-grids-reseaux-intelligents>
- <http://www.smartgrids.eu>
- <https://www.smartgrid.gov>