

Fondation Tuck – Think tank IDées

Lundi 27 mai 2019

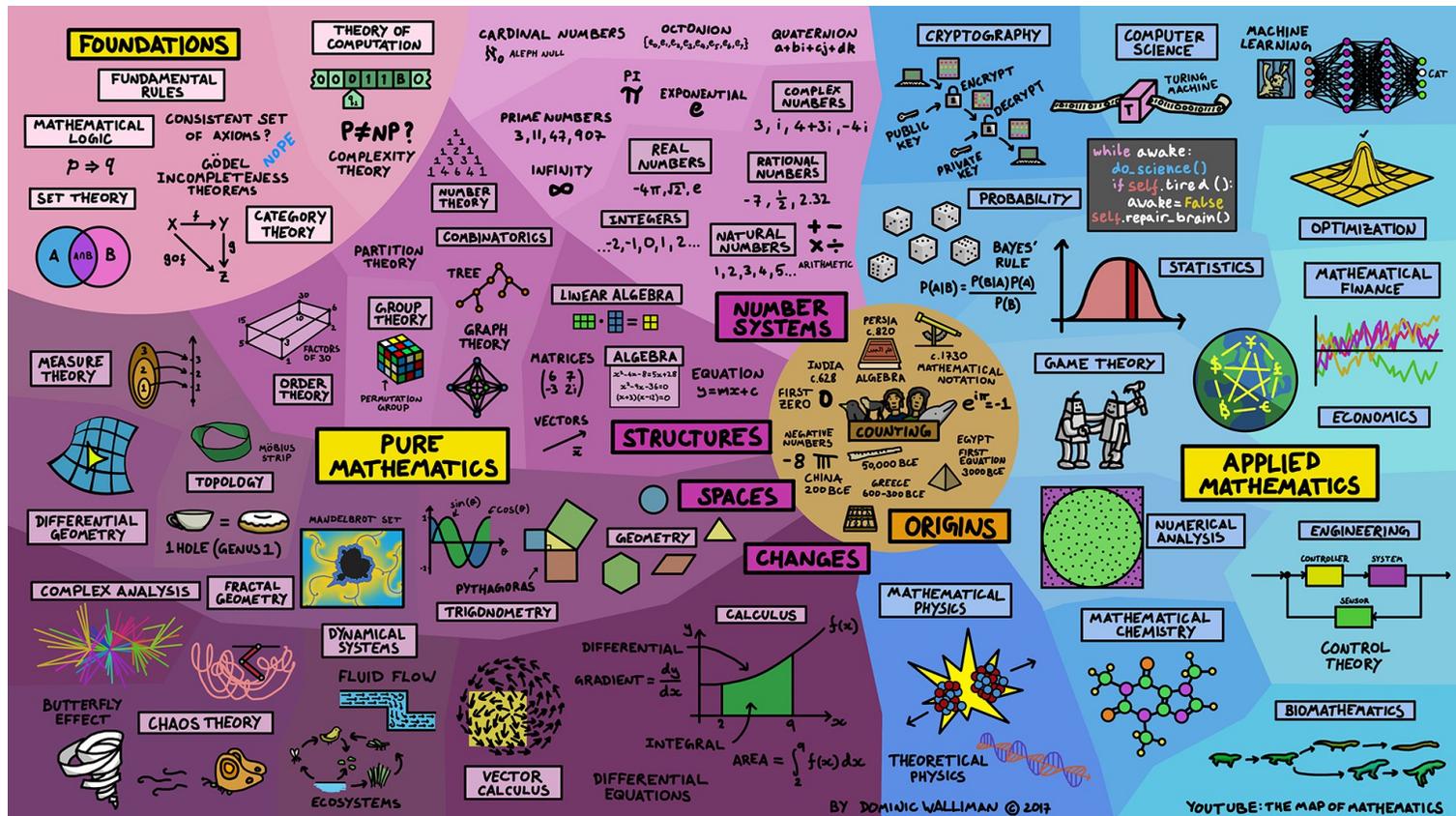
Les outils mathématiques de la transition énergétique

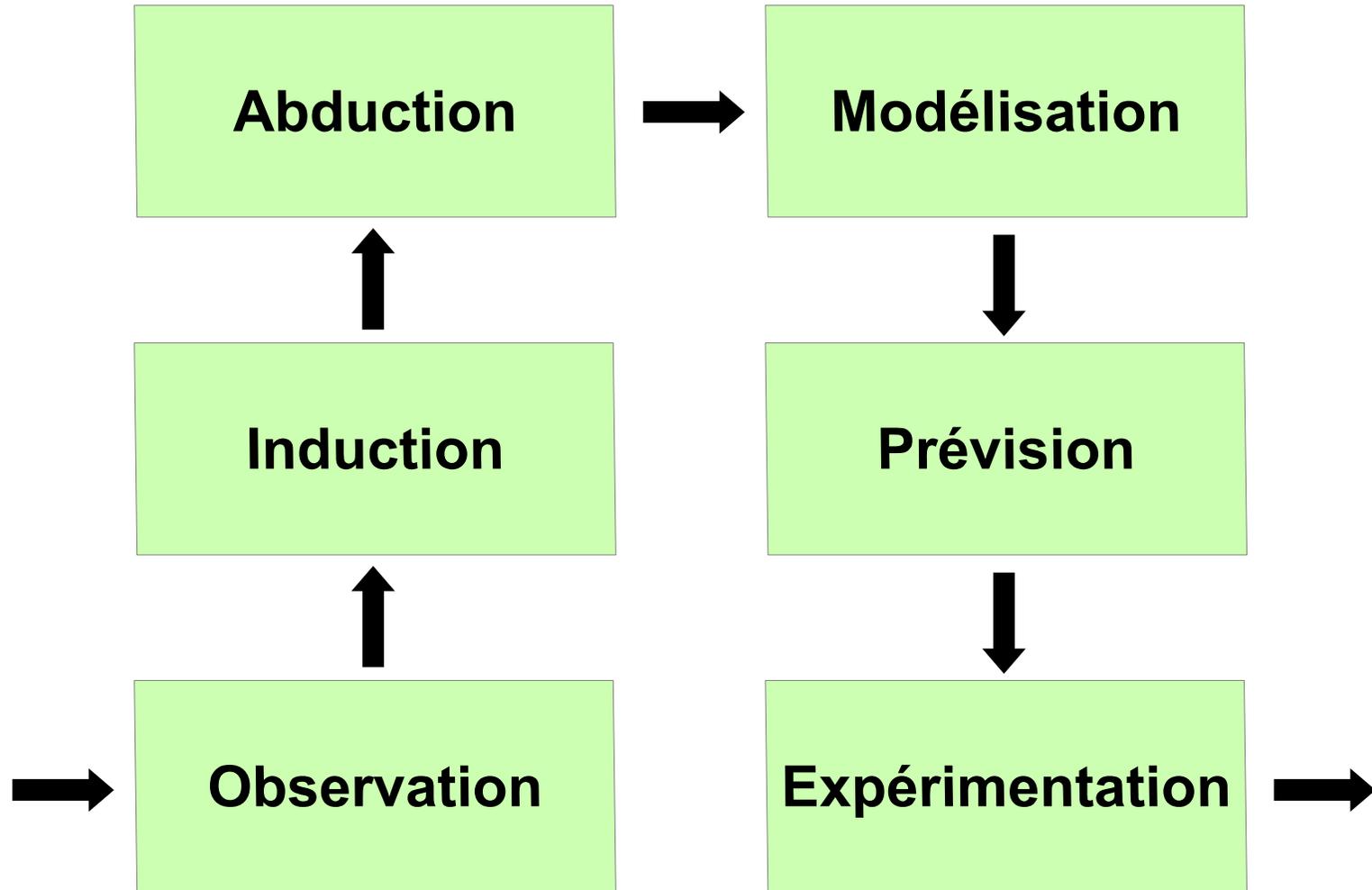
Jean-Louis LEGRAND

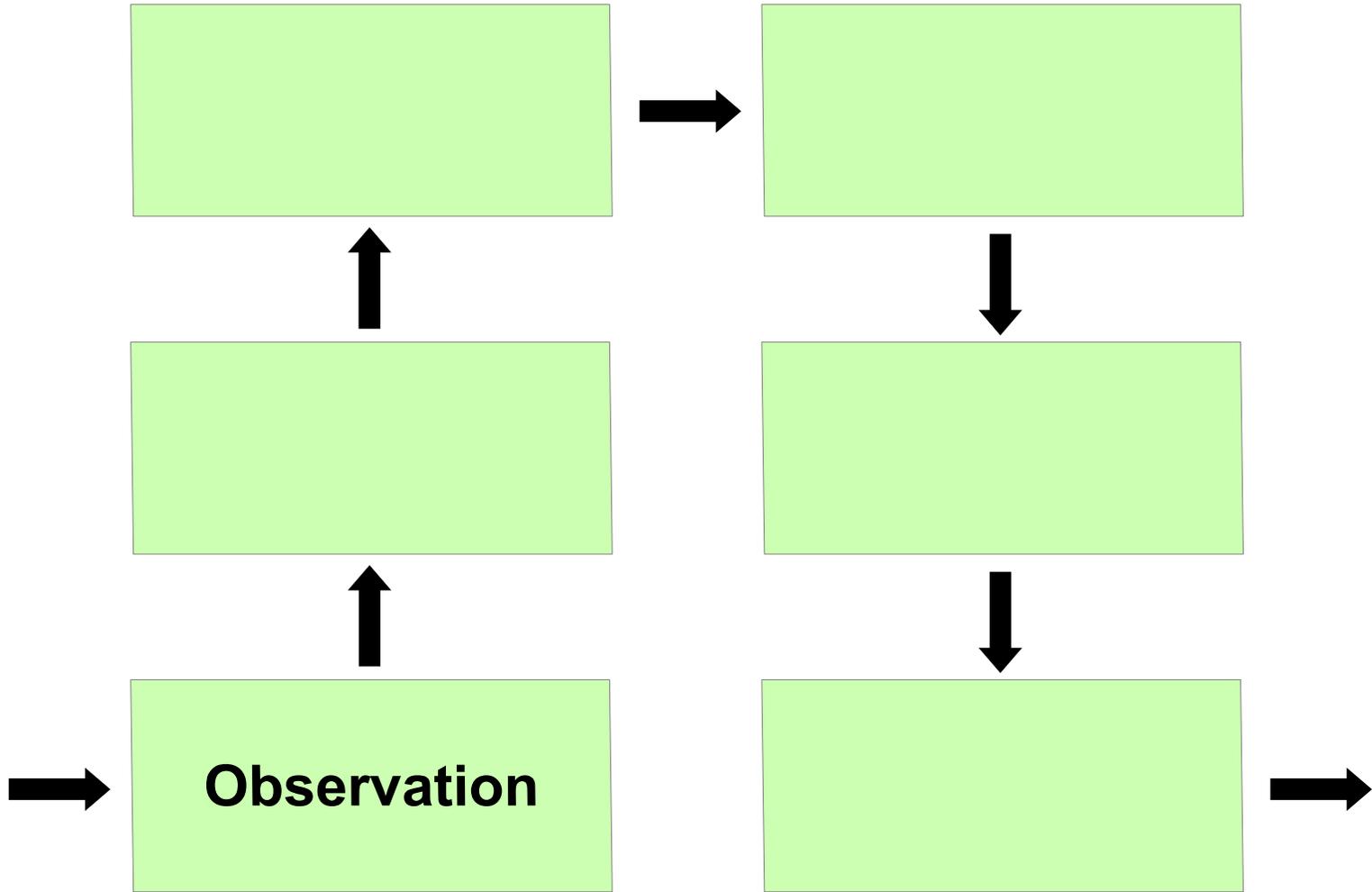
jimdlegrand@gmail.com

« Faire des mathématiques, c'est souvent se perdre dans une jungle et essayer d'utiliser toutes les informations que l'on peut rassembler pour trouver de nouvelles pistes. Avec un peu de chance, on s'en sort. »

Maryam Mirzakhani



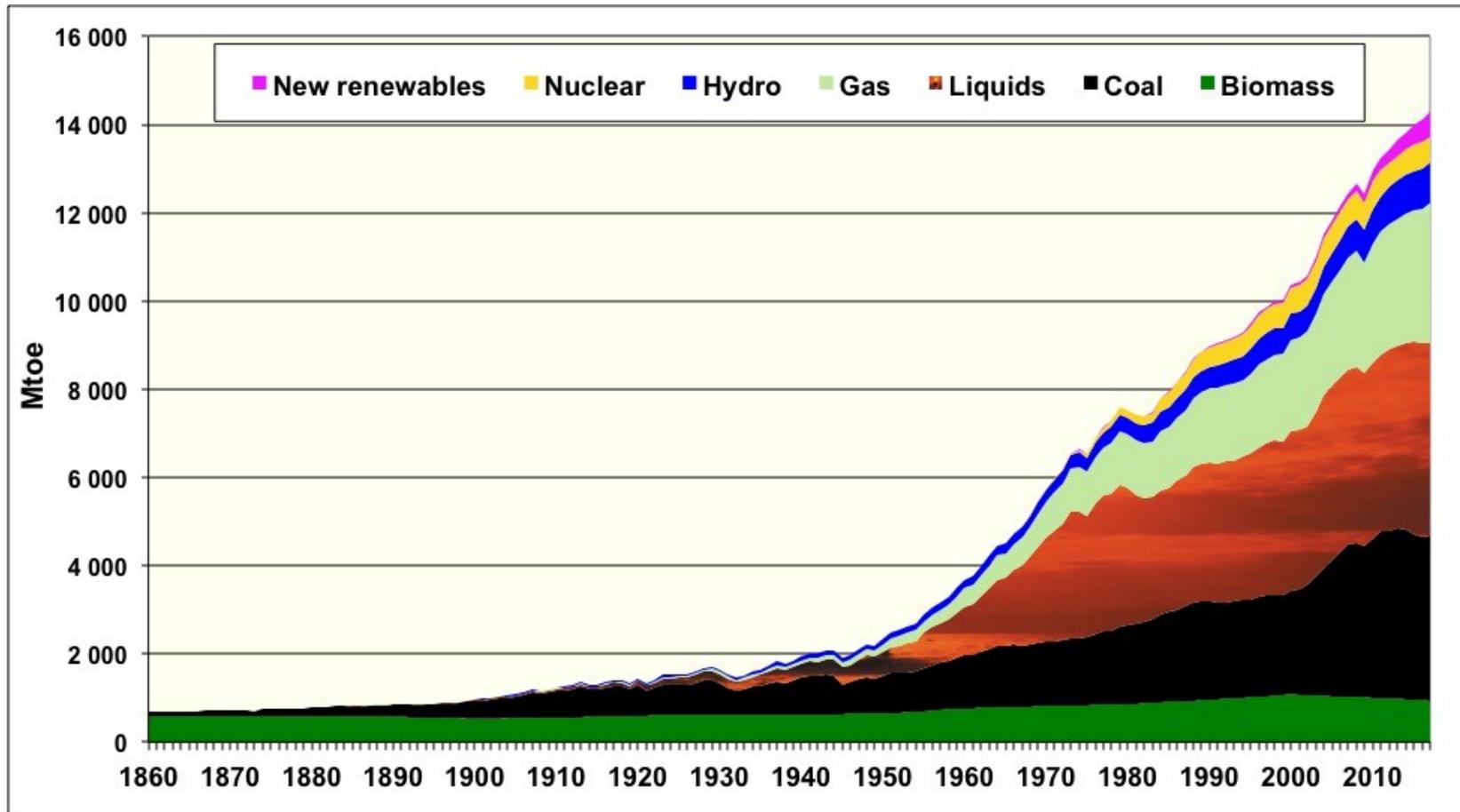




Une brève histoire des énergies

-	=	+
	450.000 - 300.000 av J.-C., feu, bois	
	8.500 av. J.-C., eau, agriculture, révolution néolithique	
114, Trajan conquête de la Mésopotamie, déforestation de l'empire romain		213 av J.-C., Archimède solaire, miroirs ardents au siège de Syracuse
1669, Colbert peak wood	1769, Watt, machine à vapeur 1825, Stephenson, locomotive 1858, Lenoir, moteur à explosion	
1850, chevaux 50% de l'énergie totale américaine 1868, 92% du tonnage de la marine marchande britannique encore mu par la voile	1886, Automobile, Benz	1895, 6 millions d'éoliennes (rotors) dans le Midwest 1900, 38% du marché auto électrique 1950, chauffe-eau solaire 80% des habitations de la Sun Belt

L'addition successive de nouvelles sources



16 novembre 2018 – Carbone 4

Réserves prouvées

Pétrole conventionnel : 3000 Gb, plateau de 2005 à 2025 et fin vers 2150

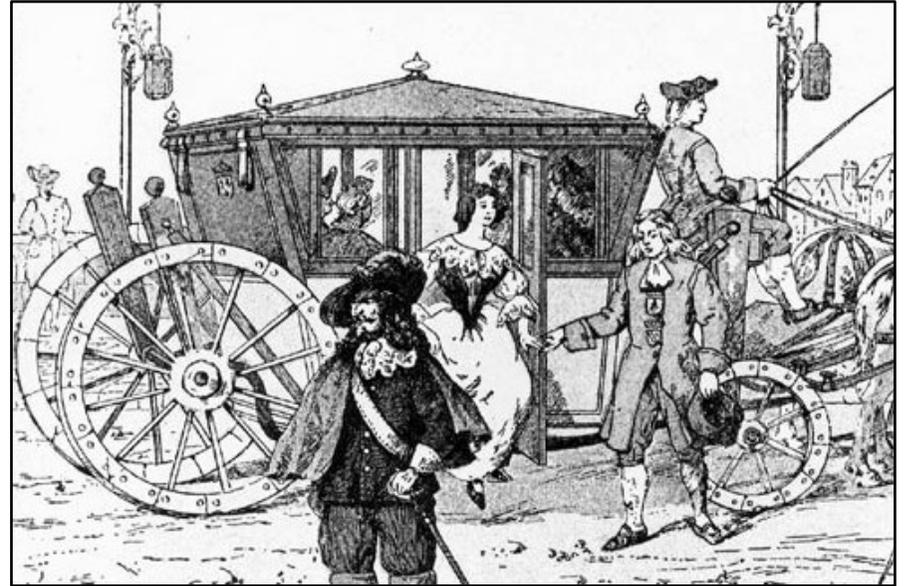
Gaz naturel : 2200 Gbpe, pic vers 2025 et fin vers 2150

Charbon : 5400 Gbpe, plateau de 2020 à 2080, fin après 2200

Le transport en commun



- France, 1610
 - Ravillac tue Henri IV dans sa voiture royale lors d'un embouteillage



- France, 1662
 - Blaise Pascal a inventé le « carrosse à 5 sols » avec itinéraire et tarif fixes, départs à intervalle régulier

La voie du rail plat (tramway)

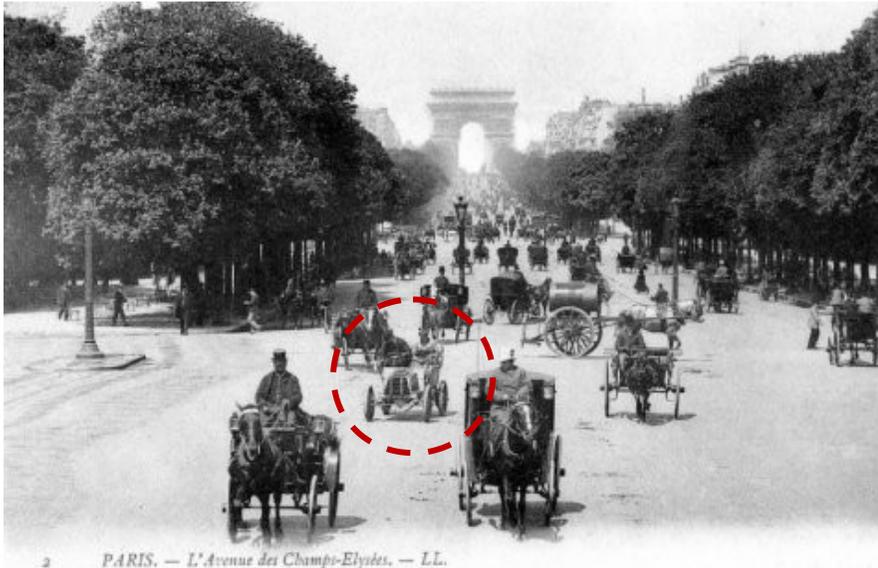


- USA, 1880
 - New-York, 20.000 chevaux à emmener à l'équarrissage



- USA, 1902
 - 5 milliards de trajets passagers sur 35.000 km de lignes électrifiées

Le pétrole



- Paris, 1900

- USA
 - Pétrole contre charbon et syndicats ouvriers

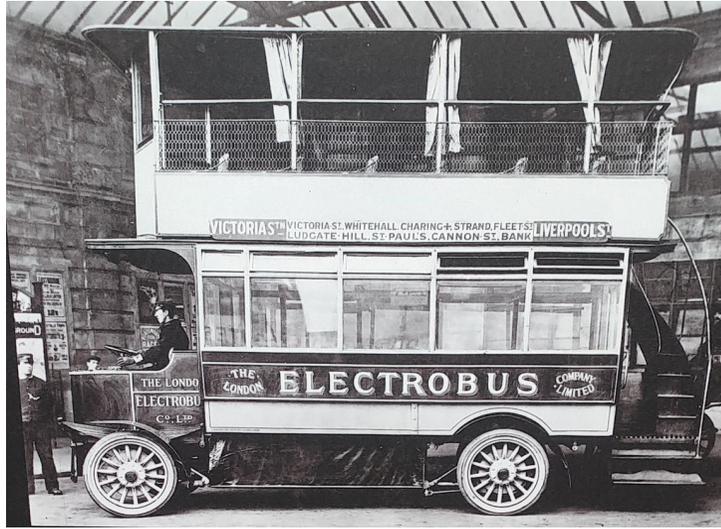


- Paris, 1915

- USA
 - Maison et voiture individuelles contre communisme

L'électromobilité

Londres, 1908



New-York, 1920



Paris, 1925



1925
LE PROGRES DES VEHICULES ELECTRIQUES (L'illustration, 3 octobre 1925)

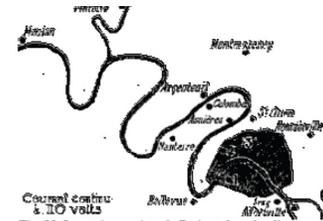


Fig. 29. Les quinze points de Paris et de sa banlieue sur lesquels une automobile électrique peut déjà se ravitailler de courant.

Paris ; (1). Electrostation, 40, rue d'Alleray ; (2). Equipement électrique, 17, rue du Débarcadere ; (3). Garage Mariotte, 9, rue Mariotte. Alfortville : Est-Lumière, 31, quai Blanqui. - Argenteuil : Union d'électricité, 101 bis, rue Saint-Fermain. - Asnières : Société pour le développement des véhicules électriques, 2, quai Aulagnier. - Bellevue : Office national des Inventions, 1, avenue Maréchal-Gallieni. - Colombes : Accumulateurs Monophaque, 27, boulevard Marceau. - Ivry : Accumulateurs Tudor, 12, rue Alexandre-Pilleaud. - Meulan : Le Triphasé, 20, Grande-Rue-du Fort. - Montmorency : Le Triphasé, 83, rue de Paris. - Nanterre : Accumulateurs Dinin, 22, route de Cherbourg. - Pontoise : Le Triphasé, 6, rue Taillepied. - Romainville : Accumulateurs S.A.F.T., route Nationale (pont de la Folie). - Saint-Ouen : Garage Paban, 27, rue Lieutades.

La terminologie

- **La transition écologique**

- « Trans » au-delà - « Ire » aller

- « Oikos » demeure - « Logos » discours

- « Ökologie » Ernst Haeckel (1866)

- Rob Hopkins

- Un enseignant britannique

- en permaculture (bio/éco mimétisme)

- Initiateur du mouvement international des villes en transition (2005)

- Auteur de plusieurs ouvrages dont « The Transition handbook » (2008)

- Un ensemble de principes et de pratiques

- Problématiques de résilience locale et d'économie circulaire

- **La transition énergétique**

- « Energeia » force en action

- Après le 1^{er} choc pétrolier (1973), Jimmy Carter, Trilatérale

- En 1980, « Energiewende », concept né en Allemagne et en Autriche

- Des prévisions et des propositions scientifiques élaborées par l'association allemande Öko-Institut

- Dans l'optique d'un abandon de la dépendance à l'atome et au pétrole

- « Klima » inclinaison → latitude

Le refroidissement climatique des années 1970

NATIONAL ACADEMY OF SCIENCES

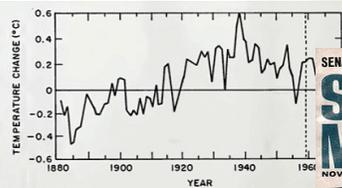


FIGURE A.6 Recorded changes of annual mean temperature in northern hemisphere as given by Budyko (1969) and as updated 1959 by H. Asakura of the Japan Meteorological Agency (unpublished results).

APPENDIX A

periods (or interglacials) has followed each of the terms of the major glaciations have had durations of 10,000±2000 years each case, a period of considerably colder climate has followed immediately after the interglacial interval. Since about 10,000 years elapsed since the onset of the present period of prominent warming question naturally arises as to whether we are indeed on the brink of a period of colder climate. Kukla and Matthews (1972) have called attention to such a possibility. There seems little doubt present period of unusual warmth will eventually give way to a colder climate, but there is no consensus with regard to its magnitude or rapidity of the transition. The onset of this climatic change could be several thousand years in the future, although it is finite probability that a serious worldwide cooling could be earth within the next hundred years.

SENATOR WARREN MAGNUSON WARNS AGAINST PRODUCTS THAT KILL!

Science & Mechanics

BODY LANGUAGE—NO ACTIONS SPEAK LOUDER THAN WORDS? PROSPECTING FROM SPACE!

STILL 35¢

NOVEMBER

EXPERTS SAY A NEW ICE AGE IS IMMINENT!

CHICAGO NEW YORK

ST. LOUIS BOSTON

JOE GUTTS AND BASIL THURSDAY TEST THE 1970s!

FORD TORINO COBRA

Science & Mechanics November 1969

SCIENCE

The Cooling World

There is mounting opinion that the world's weather patterns have begun to change drastically. A major climatic change could have serious effects on the world's food production—with serious political implications for the rest of every nation on earth.

The drop in sea level could mean a drop in the level of the great waterpans that are the source of the world's major rivers. The drop in sea level could mean a drop in the level of the great waterpans that are the source of the world's major rivers. The drop in sea level could mean a drop in the level of the great waterpans that are the source of the world's major rivers.

AS OF THE EARTH AFFECTED BY CLIMATIC CHANGE

Map showing the world with regions labeled: NORTH AMERICA, SOUTH AMERICA, AFRICA, EUROPE, ASIA, AUSTRALIA.

AVERAGE TEMPERATURE CHANGE

Line graph showing temperature change from 1880 to 1970. The y-axis is 'TEMPERATURE CHANGE (°C)' from -0.6 to 0.6. The x-axis is 'YEAR' from 1880 to 1970. The graph shows a general upward trend with significant fluctuations, peaking around 1958.

Newsweek, April 28, 1973

The Washington Post

U.S. Scientist Sees New Ice Age Coming
By Victor Colvin
The Washington Post, Times Herald (1959-1973), July 9, 1971, pp. 1-4.

U. S. Scientist Sees New Ice Age Coming

By Victor Colvin
Washington Post Staff Writer
The world could be as little as 50 or 60 years away from a disastrous new ice age, a leading atmospheric scientist predicts.

Dr. S. I. Rasool of the National Aeronautics and Space Administration says that:

"In the next 50 years, the fine dust man constantly puts into the atmosphere by fossil fuel-burning could screen out so much sunlight that the average temperature could drop by six degrees."

If sustained over "several years"—"five to 10," he estimates—"such a temperature decrease could be sufficient to trigger an ice age."

These conclusions—including his ominous exclamation point—are in a scientific publication—see page 10 of this week's issue of the Journal Science of today, signed by Rasool and co-worker Dr. S. H. Schneider.

They are also being presented by Schneider at an international study of man's impact on climate now being held in Stockholm as a prelude to a world environmental conference there next June.

Dr. Gordon F. MacDonald, scientist-member of President Nixon's three-man Council on Environmental Quality, said in an interview that these conclusions point up "one of the serious problems" U.S. and other delegates must address next year.

He called Rasool's "first-rate atmospheric physicist" whose estimate that fuel dust could drop temperatures by six degrees "incompatible with estimates I and others have made."

Whether this could cause an ice age "within five or 50 years or never more," he said, "I would want to guess."

But he "agreed completely" with Rasool that it is now urgent to start an international network for atmospheric study.

If his calculations prove correct, Rasool said, it may be the worst news since the

most simply necessary for men to stop most fossil fuel-burning—use of coal, oil, natural gas and automobile gasoline—and switch to the main nuclear energy, despite the atom's own disadvantages.

Pollution controls alone, he said, cannot do the job. "I think you have to stop the source."

A new ice age would flood the world's coastlines and further lower temperatures to build up new glaciers that could eventually cover huge areas.

Scientists have long debated whether man's activity is actually heating or cooling the earth, if either. A 1970 Study of Critical Environmental Problems concluded that the Rasool-Schneider kind of prediction was impossible to make yet.

"The area of greatest uncertainty," that study concluded, is "our current lack of knowledge" of the optical properties of man-made dust "in scattering or absorbing solar radiation."

But the "agreed completely" with Rasool that it is now urgent to start an international network for atmospheric study.

If his calculations prove correct, Rasool said, it may be the worst news since the



Global Ecology: Readings toward a Rational Strategy for Man by Reid Bryson (1971)

"The continued rapid cooling of the earth since World War II is in accord with the increase in global air pollution associated with industrialization, mechanisation, urbanisation and exploding population."

Living with Cancer
Personal Diets: Why? What? How? What's New? What's Next? What's the Future?

TIME

How To Survive The Coming Ice Age

57 Things You Can Do to Make a Difference

TIME

April 8, 1977

le Parisien Edition de Paris

LA VAGUE DE FROID CONTINUE

C'est la Sibérie!

Moins 22,7 °C hier à Troyes, jusqu'à - 11 °C à Atençon aujourd'hui (voir ci-contre), le Nord gèle et le Sud est sous la neige. Ports gelés, trains bloqués, autoroutes coupées, aéroports fermés - la France démente. 1.007 au minimum.

PAGE 3 A ET 4 ET DERNIERE PAGE

TIME

THE BIG FREEZE

1973

TIME

The Cooling of America

1979

The New York Times

NEW YORK, SATURDAY, JULY 18, 1970

U.S. and Soviet Press Studies of a Cold Arctic

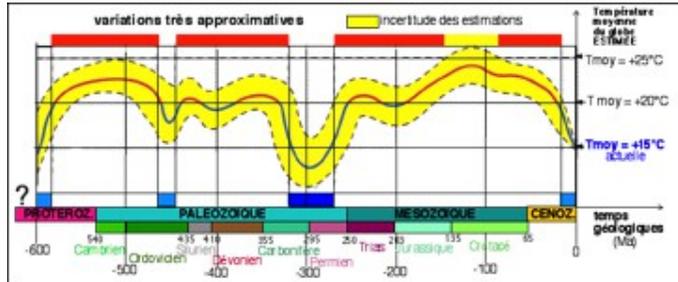
By WALTER SULLIVAN
The United States and the Soviet Union are mounting a heavy-duty investigation to determine whether the Arctic region is being developed by the Soviet Union as a major shipping route, the Soviet Ministry of Foreign Affairs said today.

The American plan, which has been developed by the National Science Foundation, is known as the Arctic Ice Experiment. In the pack ice some 300 square miles would be studied by Soviet planes and by Soviet research stations on the Arctic ice.

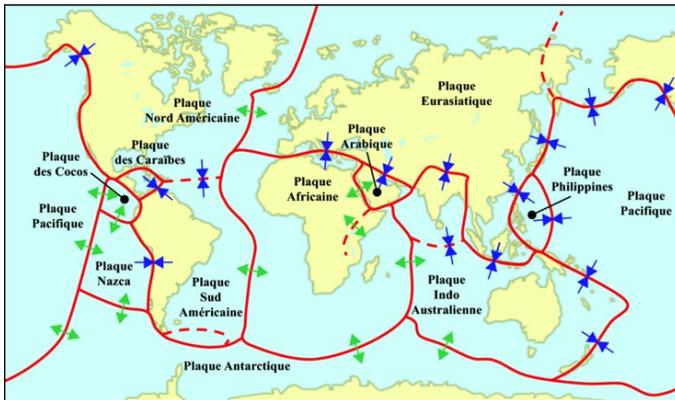
The project, which is to last at least seven years, would also operate two unmanned stations on five special weather balloons.

on Page 24, Column 6

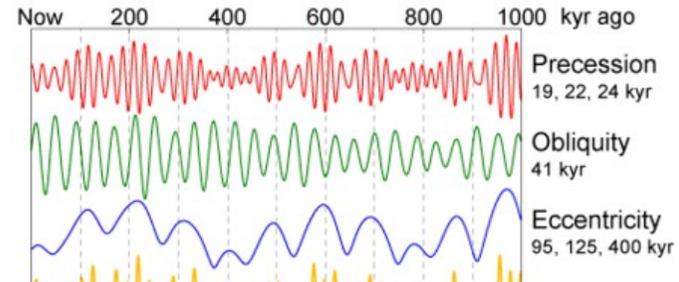
Des échelles et des cycles



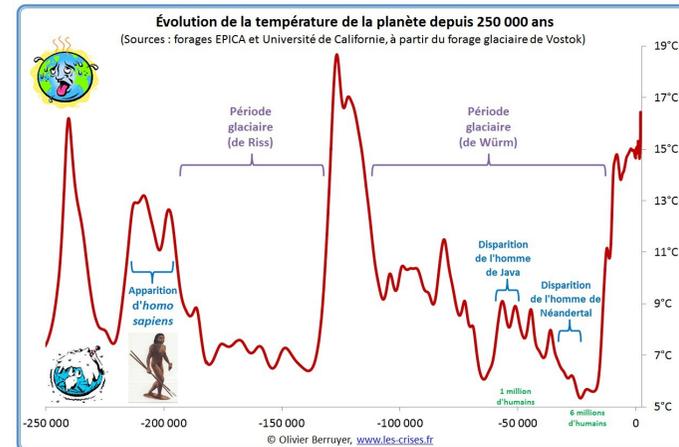
Depuis l'Ère primaire, conc. du CO₂ dans l'atm. divisée par 1000
 Depuis la fin du Jurassique, température - 15° C



La tectonique des plaques



L'évolution de l'orbite terrestre
 Cycles de Milanković



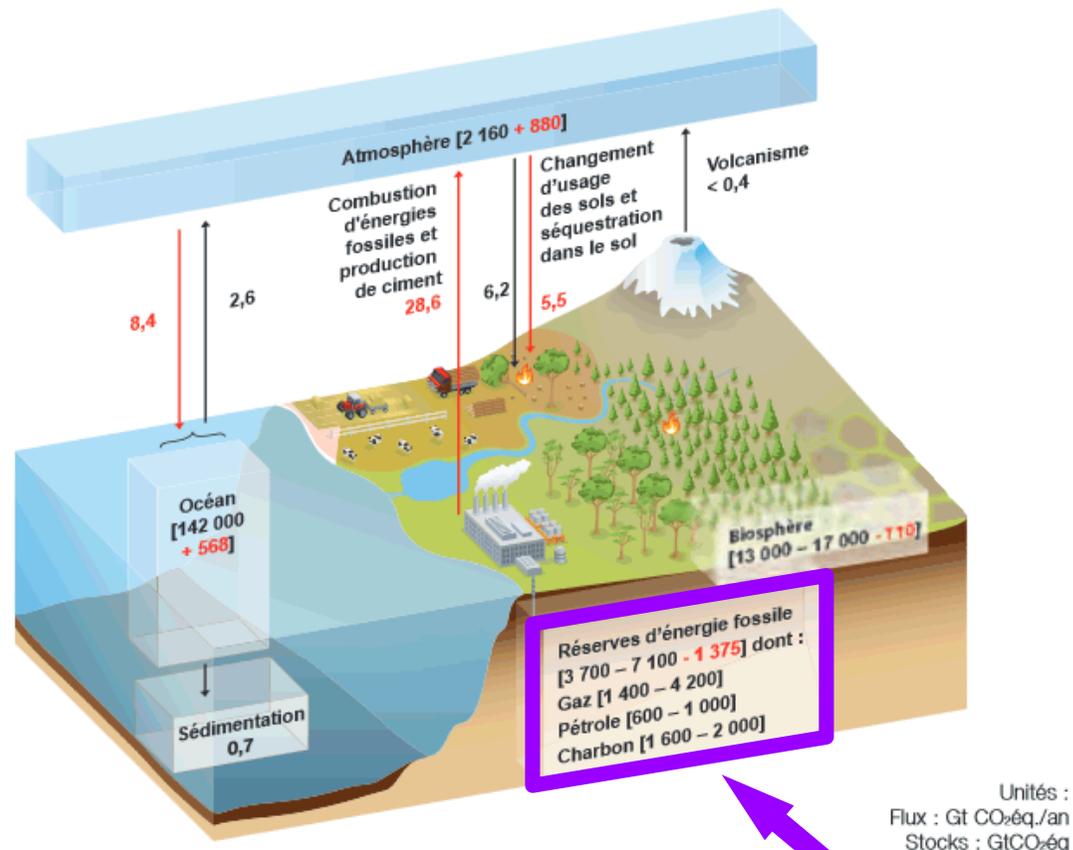
L'homme ?

L'écosystème

- « La France devrait dépenser chaque année une enveloppe correspondant à 2 % de son PIB, soit 45 milliards d'euros annuels, pendant 30 ans. »

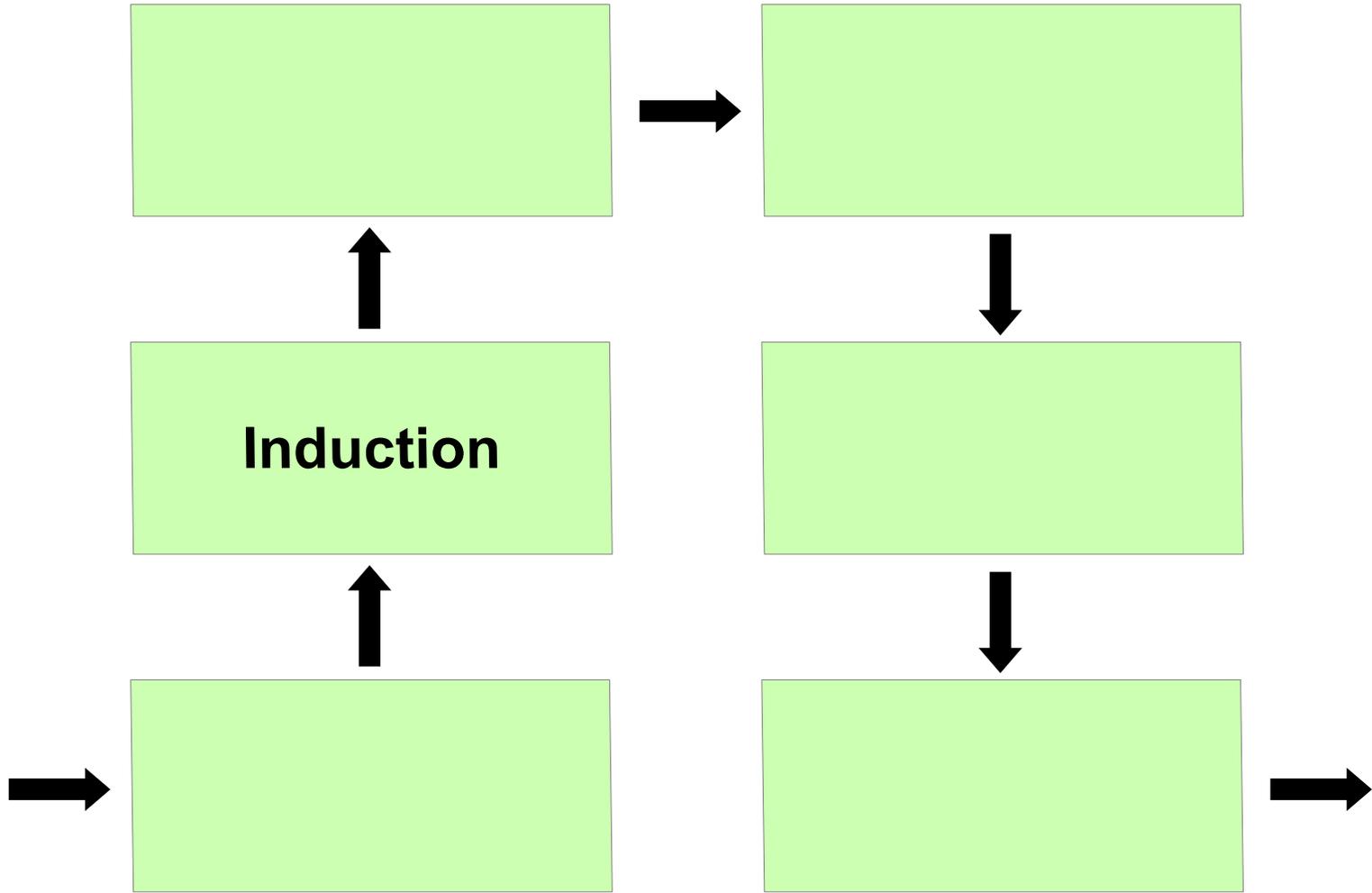
Jean Jouzel

- Émissions annuelles anthropiques de la France < 2 millièmes du CO₂ de la Terre



Variation des stocks de CO₂ depuis 1750
Flux annuels 2002 – 2011

notre-planete.info



La poule de Bertrand Russell

- L'inné



- L'acquis



La poule de Bertrand Russell

- L'inné

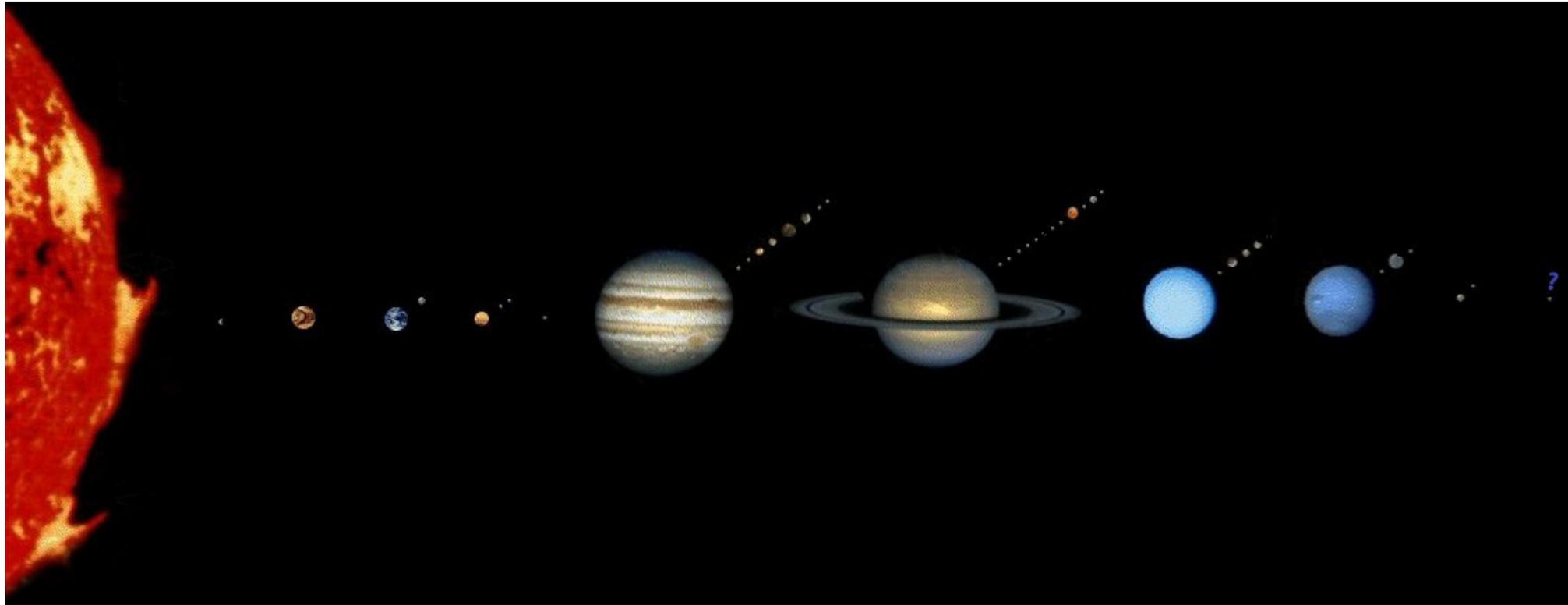


- L'acquis



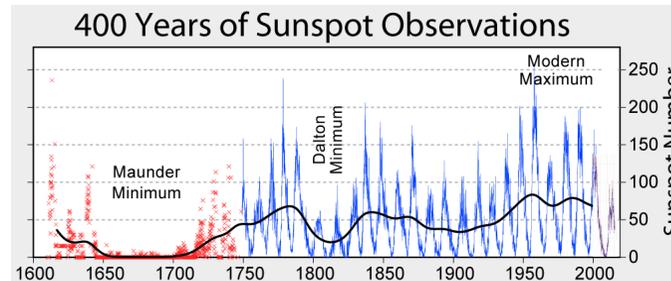
Le soleil

$$T_p = \frac{T_s}{\sqrt{2}} \sqrt{\frac{R_s}{D}}$$



$$4\pi R_p^2 \sigma T_p^4 = 4\pi R_s^2 \sigma T_s^4 \frac{\pi R_p^2}{4\pi D^2}$$

R rayon, T température
 Indices s soleil et p planète
 D distance soleil – planète
 constante de Stephan-Boltzmann

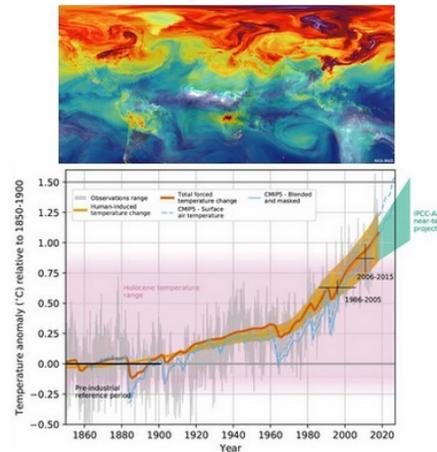
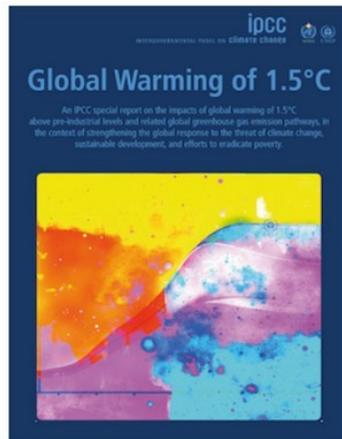


L'intensité solaire
 - Cycle de Schwabe 11,2 ans
 (effet dynamo)
 - Taches et nombre de Wolf
 (répartition)

La mesure de la température (en Kelvin)

- GIEC

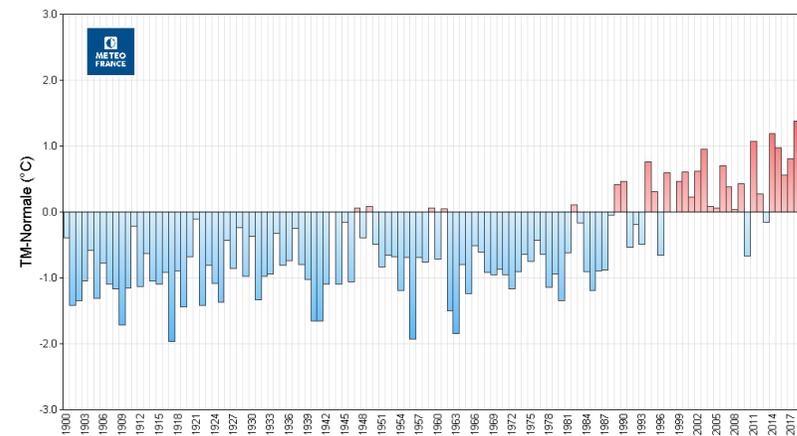
- Zéro mondial (15 °C) // 1900 -
- Terre = océans et continents, etc.



- Météo-France

- Zéro français (12 °C) // 30 ans
- France = 30 stations

Ecart à la normale 1981-2010 des températures moyennes de 1900 à 2018



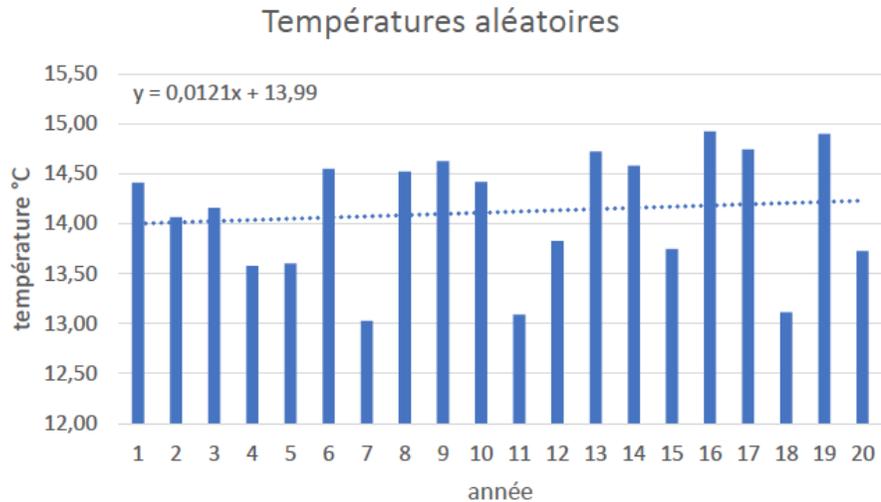
Diagnostic établi à partir de l'indicateur thermique

- 16 moyennes European Climate Assessment & Dataset (ECA&D)

Les moyennes



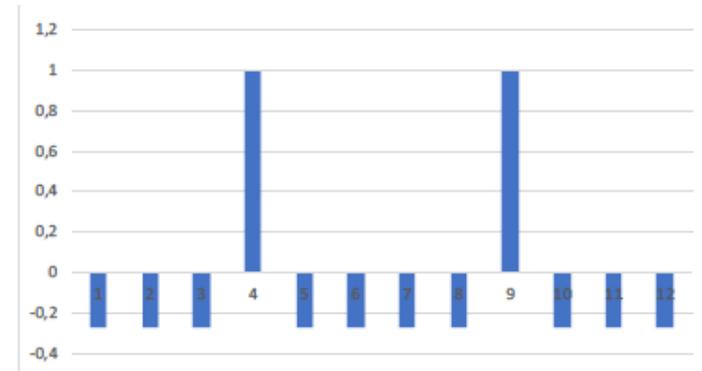
- En **probabilités**, un simple tirage aléatoire de 20 températures, selon une loi uniforme, donne plus d'une fois sur deux un pronostic inquiétant (± 3 °C) sur 100 ans



24ème anniversaire de la Société de Calcul Mathématique
SA (Bernard Beauzamy)

- En **arithmétique**, le cardinal des données détermine le résultat
 - $f(x, y) = x + y - 1 - \text{PGCD}(x, y)$

$x = 5$ et $y = 9$ donne $f(x, y) = 12$



- 0,26 °C et + 1 °C

« La rhétorique contemporaine se fonde sur un système de ” gouvernement par les nombres ” qui tend à neutraliser toute remise en question. Lorsqu’il prend la forme d’un chiffre, l’argument devient incontestable et contribue à former la vision du monde chez les citoyens, ce qui finit par transformer leurs actes pour les conformer aux objectifs poursuivis. »

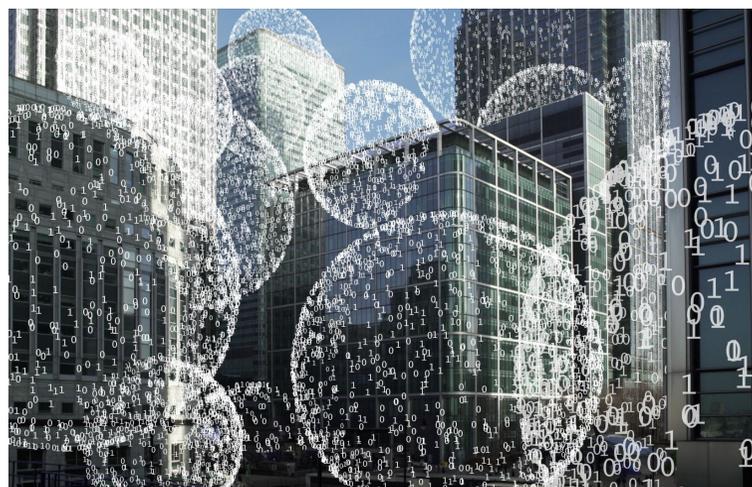
Alain Supiot

« Je ne crois aux statistiques que lorsque je les ai moi-même falsifiées. »

Winston Churchill

« Dans les situations critiques, quand on parle avec un calibre bien en pogne, personne ne conteste plus. Y'a des statistiques là-dessus. »

Michel Audiard



Les pièges de la statistique

Paradoxe de Simpson Inférence, échantillonnage

Une entreprise du bâtiment RGE étudie 2 solutions de rénovation énergétique, A et B. Dans l'im. N°1, A améliorerait 60% des logements diagnostiqués et B, 90%. Et, dans l'im. N°2, respectivement 10% et 30%. Pourtant, sur la résidence, A serait plus performante que B.

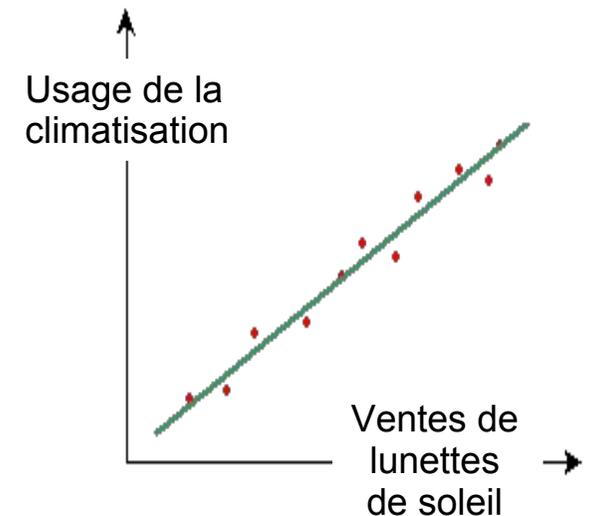
	Immeuble N°1	Immeuble N°2	Résidence
A	60/100 = 60 %	1/10 = 10 %	61/110 = 55,45 %
B	9/10 = 90 %	30/100 = 30 %	39/110 = 35,45 %

Probabilités conditionnelles Fréquentistes et bayésiens

Un problème d'origine domotique rare affecte 100 millions de compteurs électriques dans une proportion estimée à 1/10000. Il existe un test fiable dans 999 cas sur 1000 (bandes de fréquences). Le résultat du test appliqué à une certaine installation (choisie au hasard) est positif : quelle est la probabilité qu'elle soit réellement affecté par le problème (i.e. que le remplacement de la technologie CPL par une solution radio soit justifié) ?

≈ 9 %

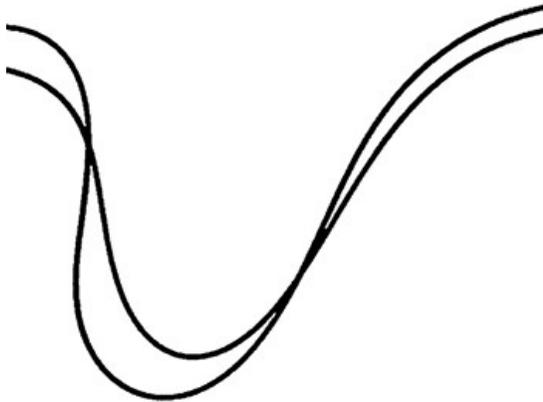
Corrélation et causalité Variable cachée, de confusion



La tangente

- Dans quel sens le cycliste roulait-il?

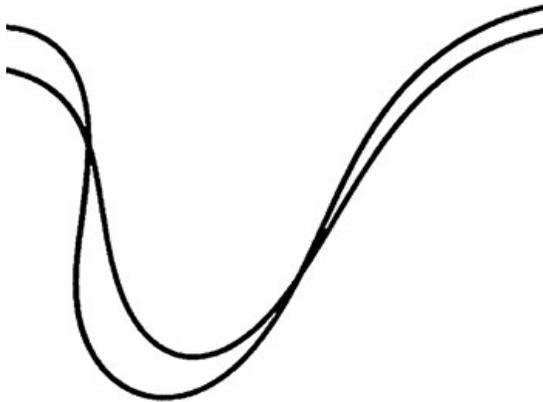
MAA, 1997



La tangente

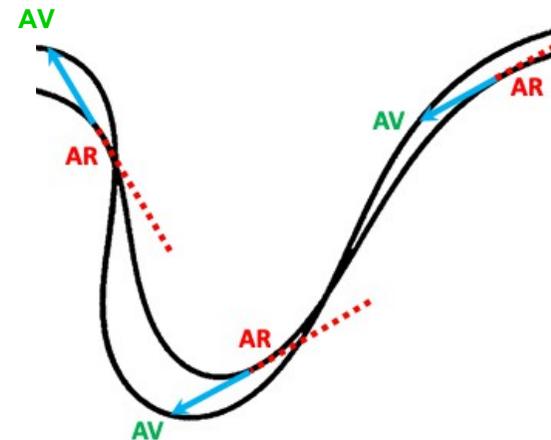
- Dans quel sens le cycliste roulait-il?

MAA, 1997



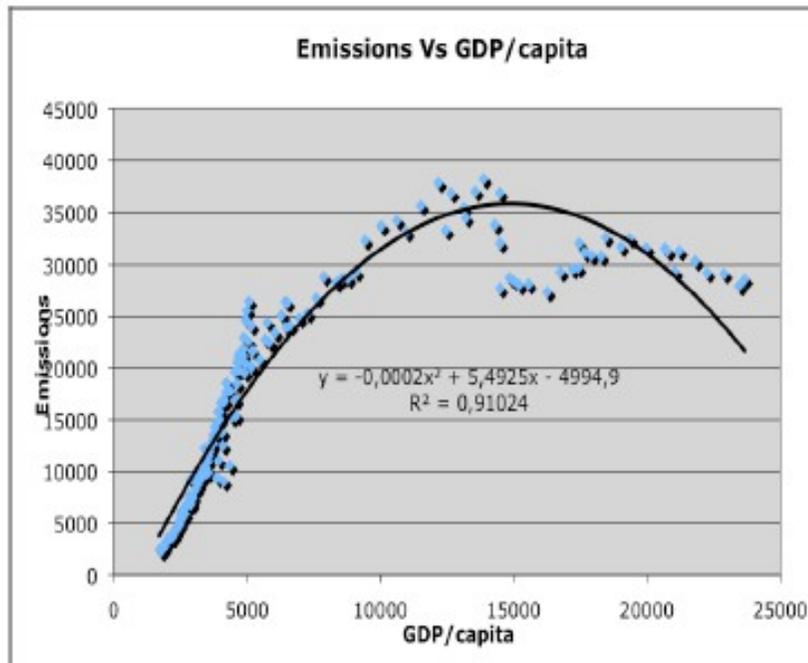
- Un antagonisme
- Un invariant

- De droite à gauche

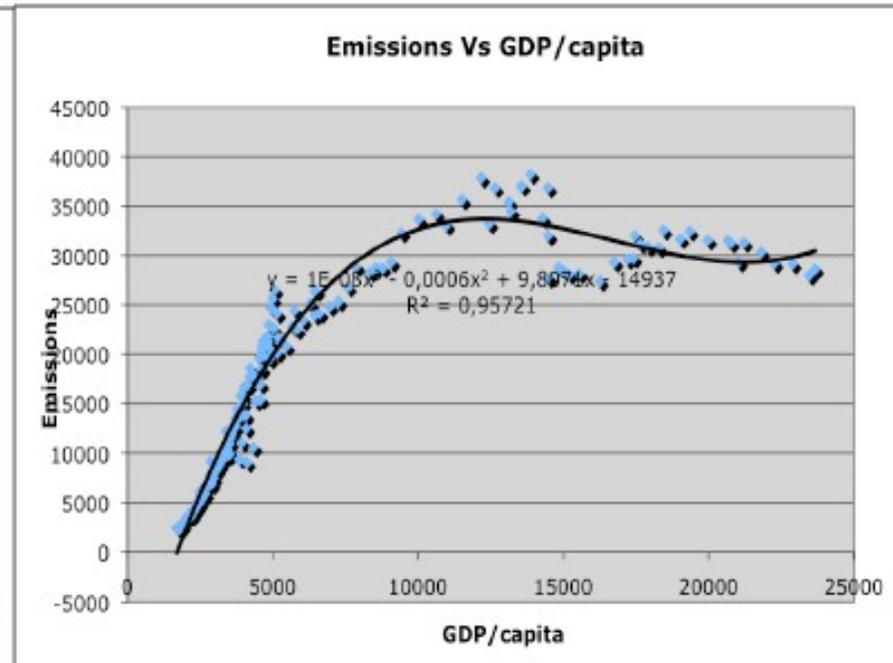


Courbe en U inversé (Kuznets) ou en N ?

Quadratique

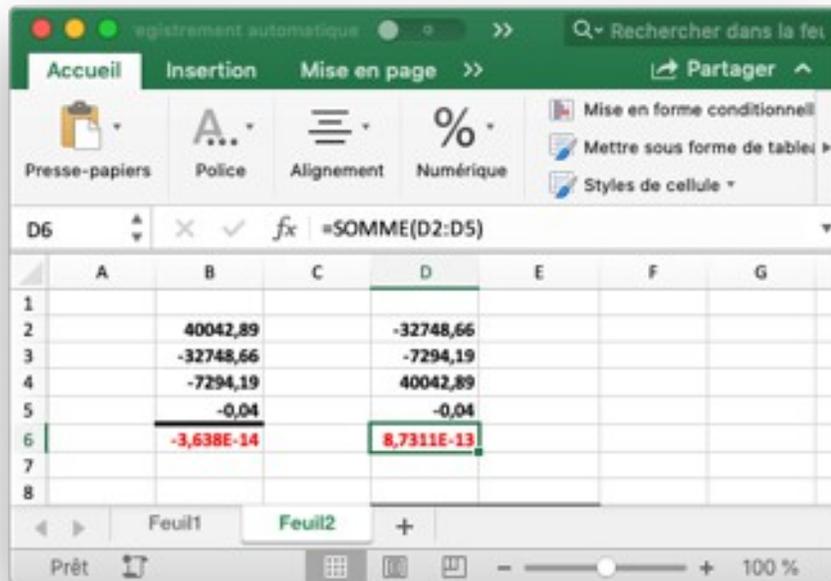


Cubique

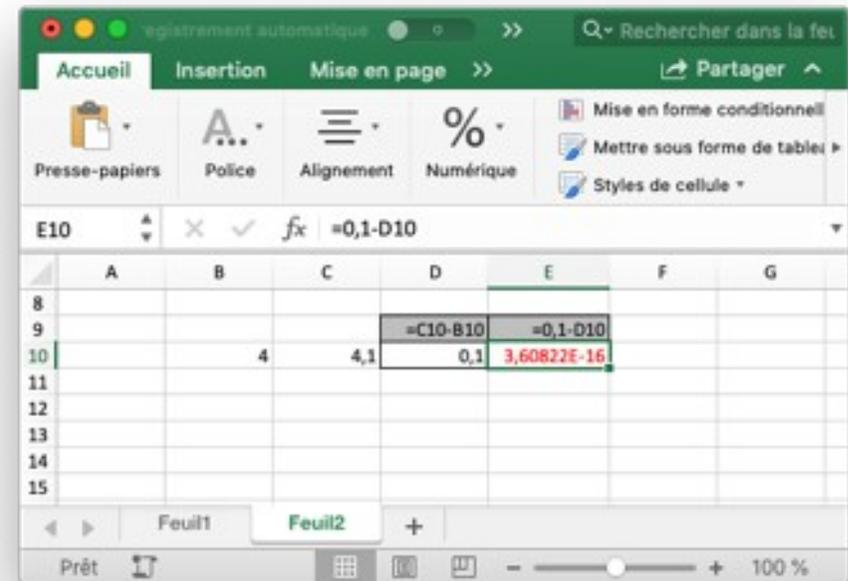


Belgique 1946 – 2008 (sources universitaires)

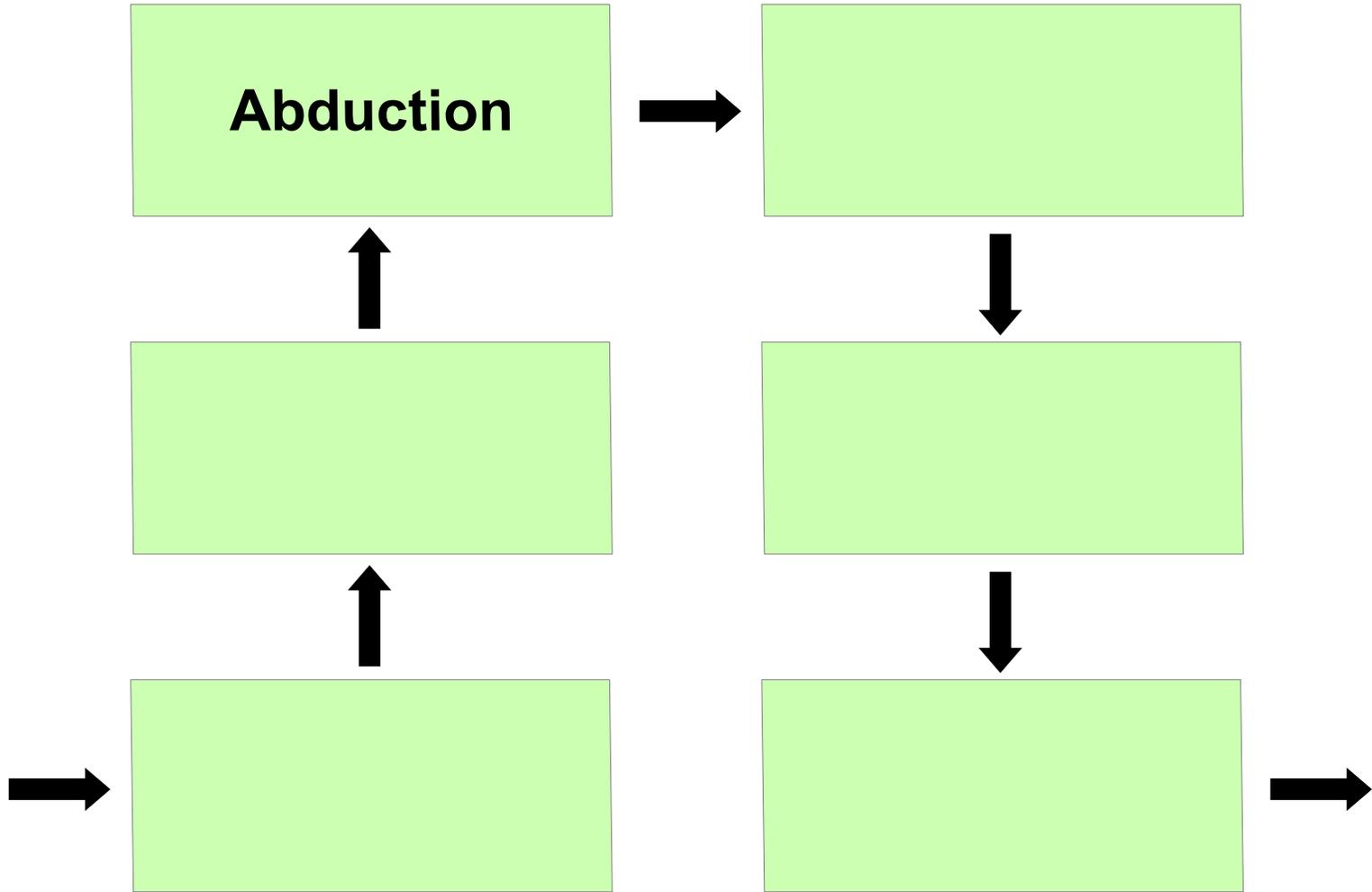
Le calcul



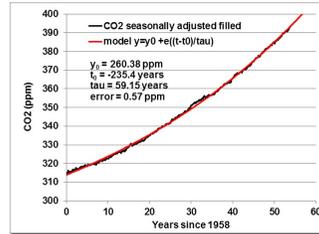
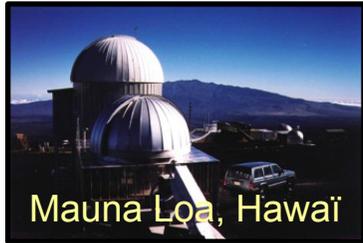
- Décimal → Hexadécimal → Décimal



- Quand l'ordinateur anticipe des erreurs, cela peut devenir pire



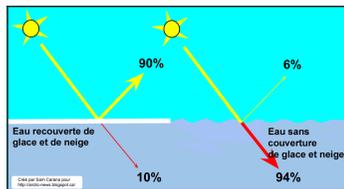
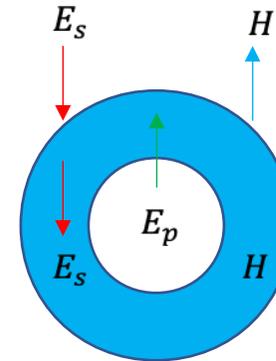
La température de la Terre et le CO₂



F flux thermique
 è $T = T/4 \times \text{è } F/F$
 C concentration de CO2
 Sens. Clim. $C/C_0 = 2$

Courbe de Keeling
 è $F = 5,35 \ln(C/C_0)$
 Arrhénius (1896)

$$T_p = \sqrt[4]{1 - a} \sqrt[4]{N(C) + 1} \frac{T_s}{\sqrt{2}} \sqrt{\frac{R_s}{D}}$$



$a \approx 0,31$ (entre 0,14 et 0,84)
 $a(Tt) = 0,495 - 0,205 \tanh[0,133(Tt - 275)]$

À l'interface entre l'espace et la couche de GES, $E_s = H$
 À l'interface entre la couche de GES et la planète, $E_s + H = E_p$
 $E_p = 2E_s$ donc T_p est multipliée par $\sqrt[4]{2} \cong 1,19$
 $N = 6$ (Tropo, Strato, Méso, Thermo, Iono et Exo sphères)
 T_p est multipliée par $\sqrt[4]{7} \cong 1,63$

La convection (vs conduction, rayonnement)

- Des gradients de température ou de concentration (masses volumiques) induisent un mouvement dans un fluide
 - Météorologie
 - Océanographie
 - Géologie

$$\frac{Du}{Dt} + 2f \times u + \frac{1}{\rho} \nabla p + g = v \nabla^2 u,$$

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho u) = 0,$$

$$C \frac{DT}{Dt} - \frac{RT}{\rho} \frac{D\rho}{Dt} = \kappa_h \nabla^2 T + S_h + LP,$$

$$\frac{Dq}{Dt} = \kappa_q \nabla^2 q + S_q - P,$$

$$p = \rho RT.$$

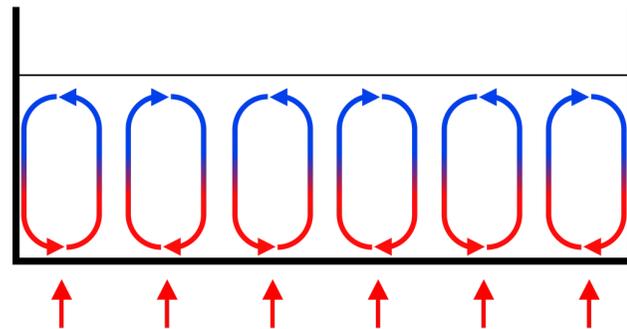
Motion

Density

Temperature

Moisture

Pressure



Les fonctions

- Exponentielle de Malthus

- Taux d'accroissement d'une population r

- $\frac{dN}{dt} = rN$

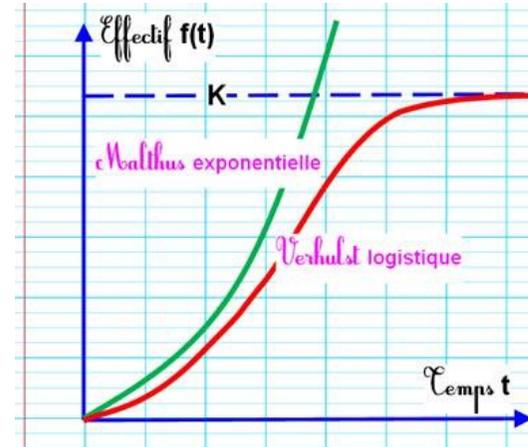
- Sigmoïde de Verhulst

- Frein environnemental
- Capacité d'accueil k

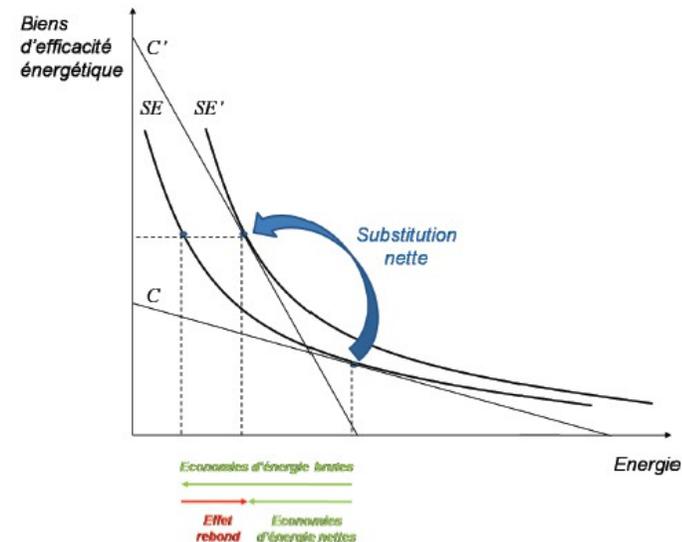
- Suite logistique (calcul pratique)

- $x_{i+1} = \alpha(1 - x_i)$ avec $x_0 \in [0; 1]$
- Convergente
- Soumise à oscillations (effet rebond de Jevons)
- Chaotique

- Bifurcations, catastrophes

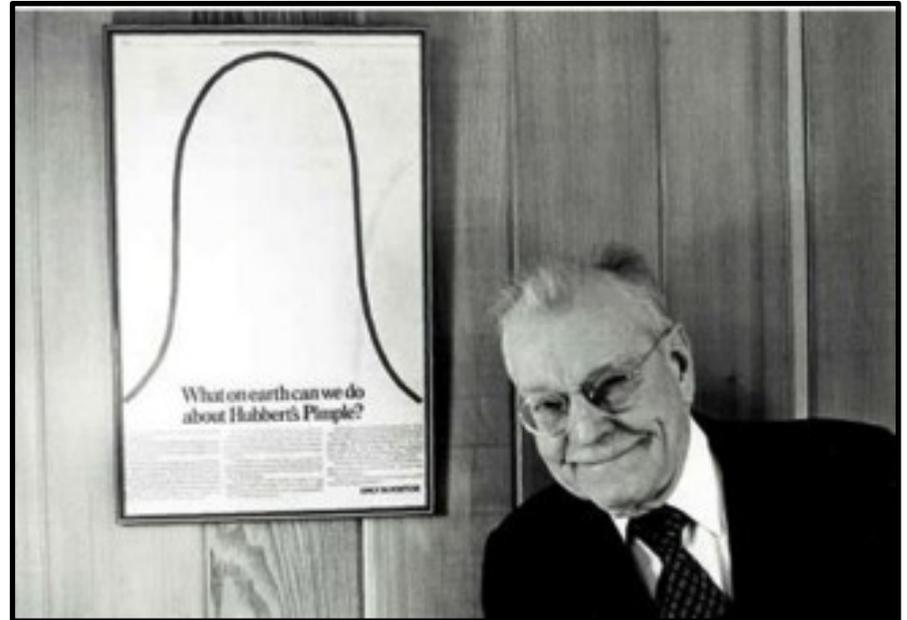


$$\frac{dN}{dt} = kN(1 - N)$$



La courbe de Hubbert

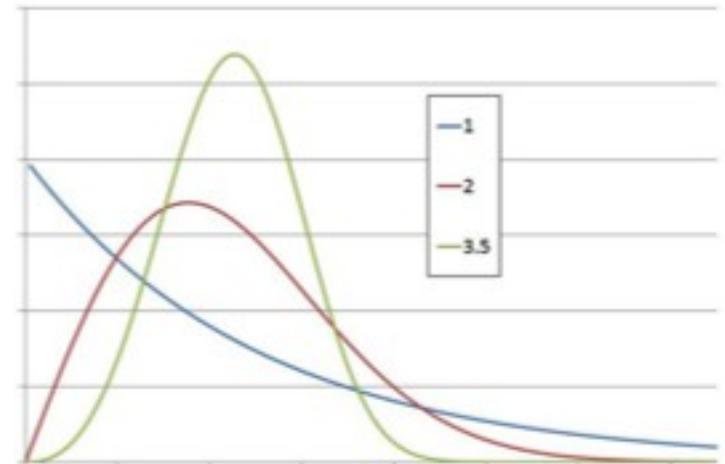
- Courbe en cloche suivie par la production de toute matière première
 - Les réserves d'une ressource « non-renouvelable » sur Terre sont exprimées, dans une certaine unité, par un nombre fini
 - L'aire de la courbe de consommation est finie
 - La fonction tend vers 0 à l'infini
 - Elle atteint un maximum si elle est continue



1956
Marion King Hubbert
géophysicien américain

Les lois de Weibull

- Fiabilité, résistance à la fatigue / rupture
- Mesures physiques (vitesse du vent, vagues de la mer)
- Une distribution qui a toujours la même allure
- Il est possible de trouver dans la famille une loi ne s'éloignant pas des données disponibles en calculant k et λ à partir de la moyenne et la variance observées
- On retrouve pour :
 - $k = 1$ la loi exponentielle
 - $k = 3,5$ une loi proche de la loi normale
 - $k = 2$ la loi de Rayleigh (processus stochastique)

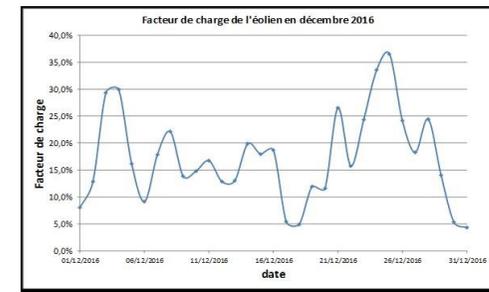
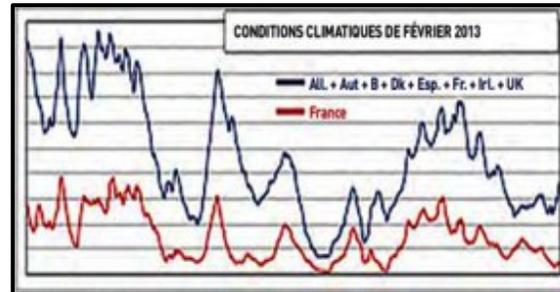
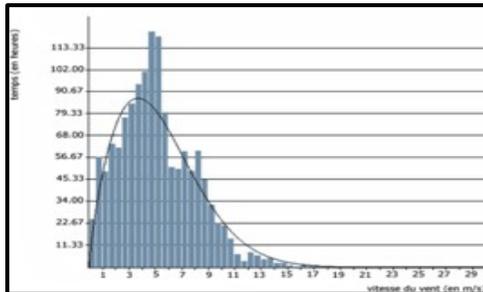


$$f(x; k, \lambda) = \frac{k}{\lambda} \left(\frac{x}{\lambda}\right)^{k-1} e^{-\left(\frac{x}{\lambda}\right)^k}$$

Le cas échéant, il est possible d'ajouter un paramètre de position (x est alors remplacé par $x-\theta$)
 $\lambda > 0$ est le paramètre d'échelle (aplatissement)
 $k > 0$ est le paramètre de forme

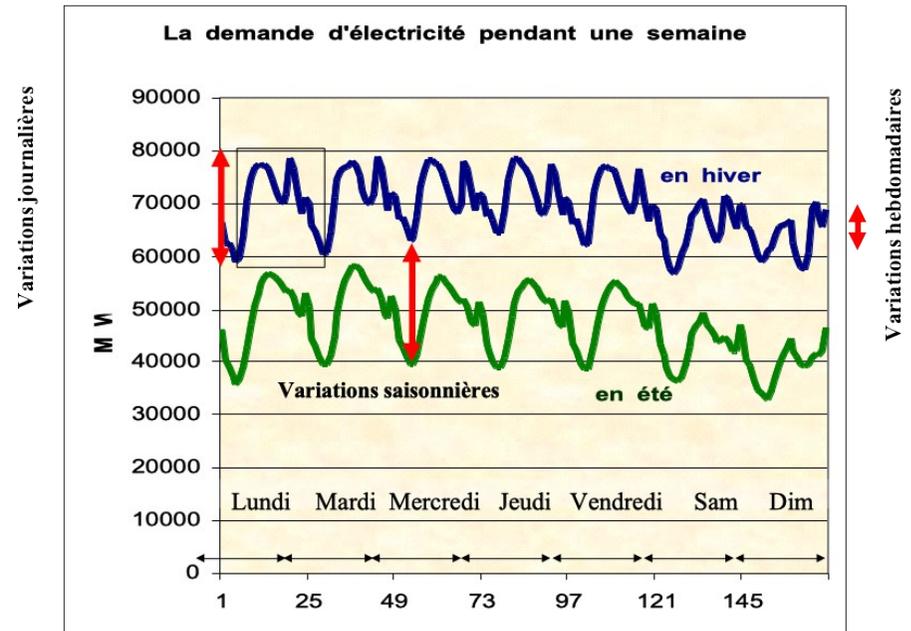
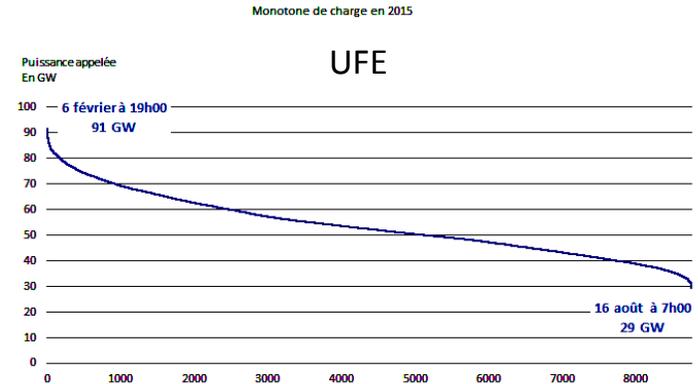
L'éolien

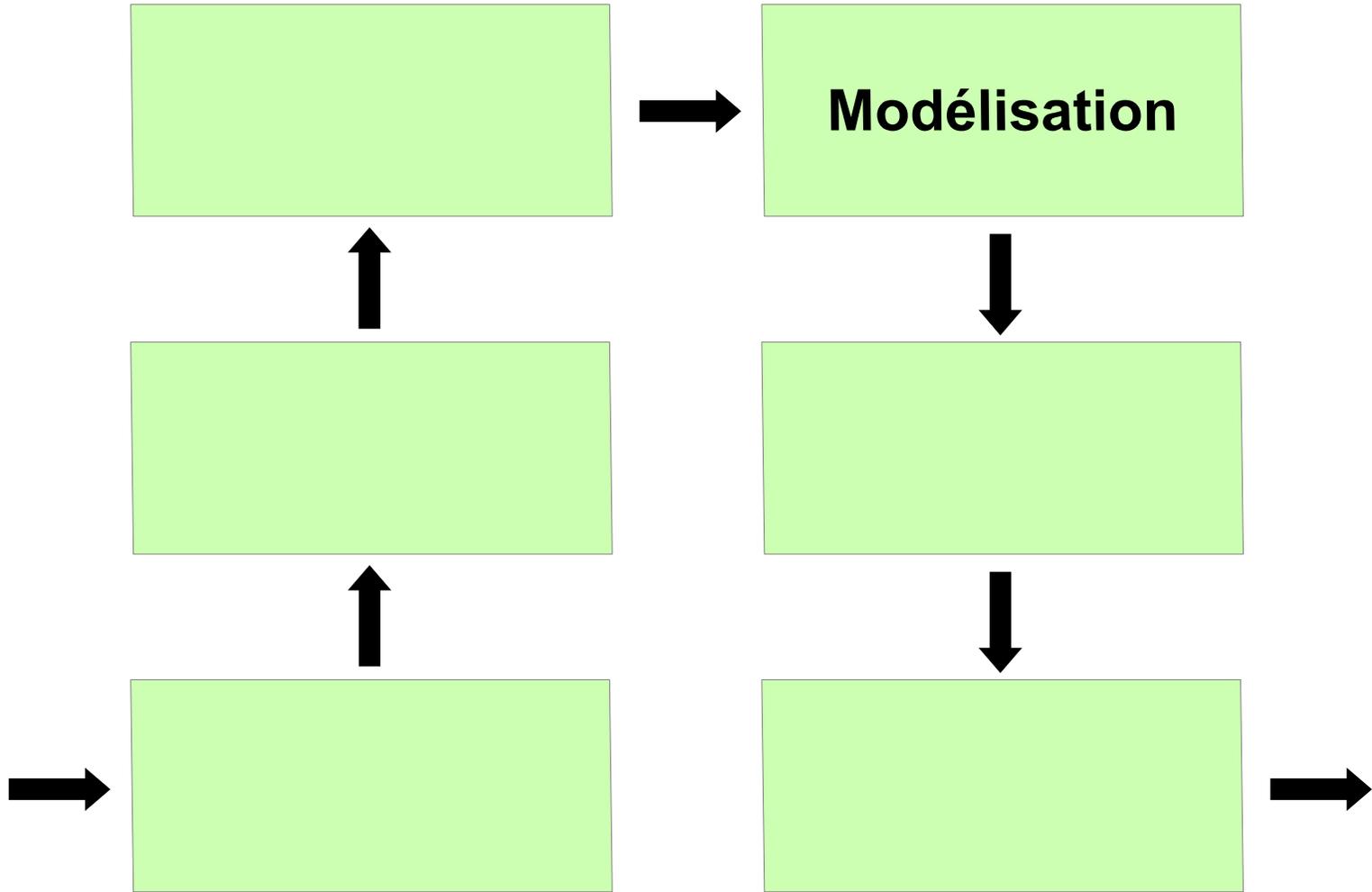
- Facteur de capacité $\cong 25 \%$
 - Puissance du vent = cube de la vitesse
 - Facteur de Betz $16/27 \cong 59 \%$
 - Rendement du dispositif 70%
 - Puissance délivrée par unité de surface indépendante de la taille
 - Foisonnement difficile d'une région à une autre de notre continent
 - Besoin de nouvelles lignes HT
- 150 GW dans 18 pays européens = en moyenne 33 GW = au minimum 6,5 GW soit 4,3 % (VGB PowerTech, 2016)
- Besoin d'une capacité « énorme » de systèmes de secours (moyen de production plus souple, barrage, Station TE Pompage, service système batterie)



La loi (a)normale

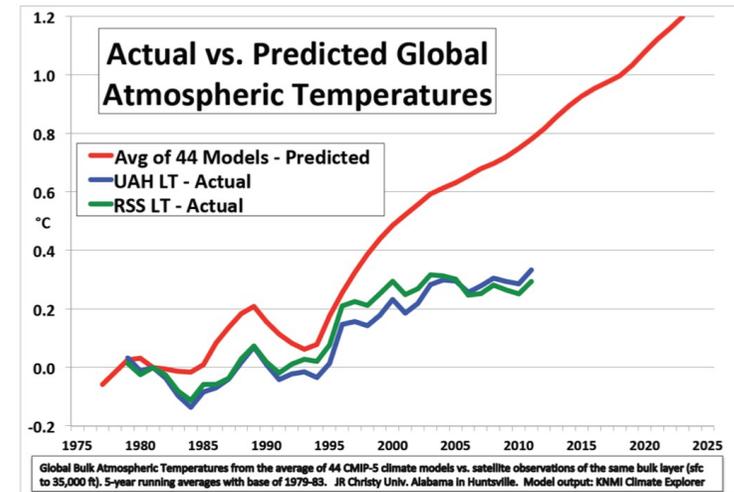
- **Électricité**
 - Une monotone de puissance (courbes de charge)
 - Trois grosses variations de la demande
 - Une demande instantanée
- Il faut éliminer par principe toute méthode statistique qui repose sur une hypothèse a priori
 - Les centiles 90% et 95%, la MED \pm 2 MAD (Median Absolute Deviation, la boîte à moustaches (Tukey) sont des concepts qualitatifs qui ne peuvent devenir quantitatifs que si on fait l'hypothèse d'une loi particulière, par exemple une loi normale
 - Définition des seuils de contamination du sol par le BRGM (Cf. lettre de la SCM en mars)





La granulométrie des modèles climatiques

- Une maille est un parallélépipède de 100 à 200 kilomètres sur deux côtés, mais d'épaisseur de plus en plus fine lorsque l'on se rapproche de la surface du globe
- Divergences dues aux phénomènes dits « sous maille »
 - Échanges radiatifs
 - Végétation
 - Turbulences de l'air
 - Nuages
 - Aérosols et vapeur d'eau
 - Courants maritimes
 - Etc.



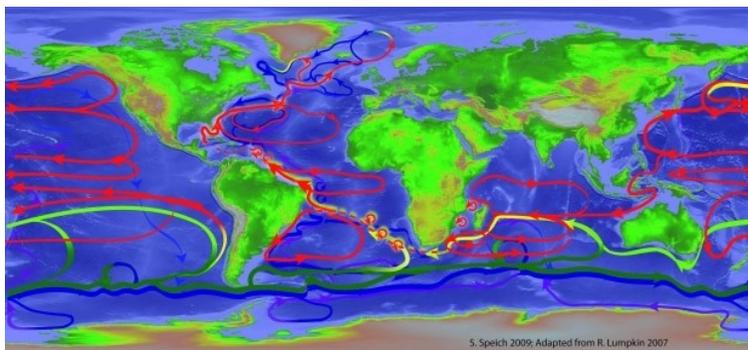
RSS : Remote Sensing Systems
UAH : University of Alabama in Huntsville
Sénat USA (satellite dataset)



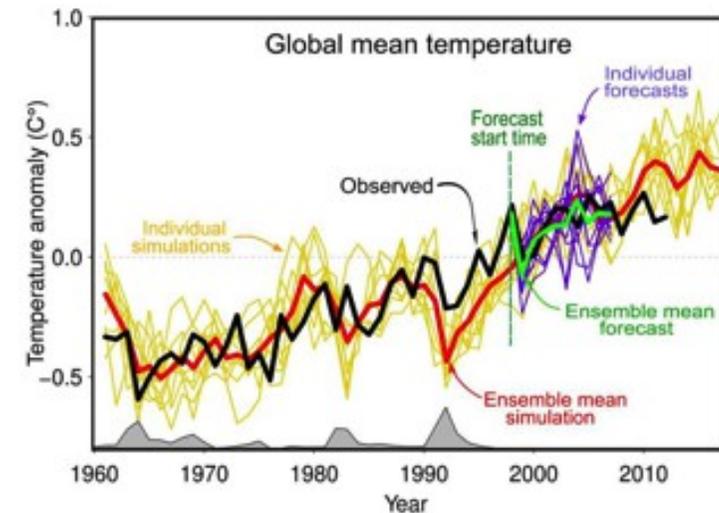
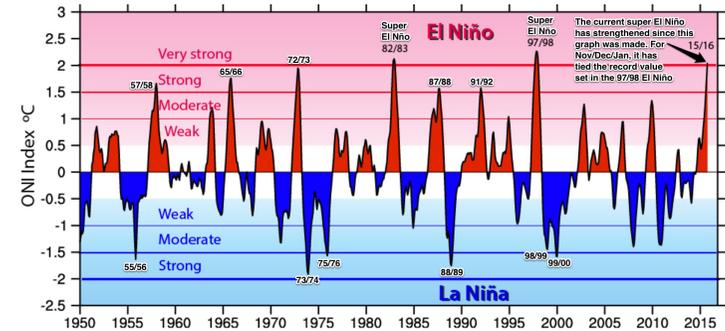
Argos

Les océans et les aérosols des volcans

- « Hiatus » 1998 – 2012 du GIEC
 - Erreurs de méthodologie
 - Pacifique équatorial Est (8 % de la surface terrestre, mais « El Niño »)
 - Éruptions volcaniques Pinatubo (1991)
- Circulation thermo haline



CNRS



© Giec, 2013

Les probabilités

- Le problème de Fermi
 - Quelle est la probabilité que, lors de votre dernière inspiration, vous ayez respiré une « molécule d'air » que Roland souffla dans son cor le 15 août 778 à Roncevaux ?



Les probabilités

- Le problème de Fermi
 - Quelle est la probabilité que, lors de votre dernière inspiration, vous ayez respiré une « molécule d'air » que Roland souffla dans son cor le 15 août 778 à Roncevaux ?



- 5 litres d'air passés par le cor de Roland
- 4×10^{21} litres d'air dans l'atmosphère terrestre
- 1 litre d'air par inspiration
- $2,7 \times 10^{22}$ molécules par litre d'air

- Loi binomiale de paramètres $1,25 \times 10^{-21}$ et $2,7 \times 10^{22}$
- Espérance de 33,75
- Loi de Poisson
- $1 - e^{-33,75} \cong 99,99999999999998 \%$

Les éléments

Stockage

Hydrogène 1 H 1,007975

Helium 2 He 4,002602

Bore 5 B 10,8135

Carbone 6 C 12,0106

Azote 7 N 14,006455

Oxygène 8 O 15,9994

Fluor 9 F 18,99840316

Neon 10 Ne 20,1797

Sodium 11 Na 22,98976928

Magnésium 12 Mg 24,3055

Aluminium 13 Al 26,9815385

Silicium 14 Si 28,0855

Phosphore 15 P 30,97376200

Soufre 16 S 32,0675

Chlore 17 Cl 35,453

Argon 18 Ar 39,948

Potassium 19 K 39,0983

Calcium 20 Ca 40,078

Scandium 21 Sc 44,955908

Titane 22 Ti 47,867

Vanadium 23 V 50,9415

Chrome 24 Cr 51,9961

Manganèse 25 Mn 54,938044

Fer 26 Fe 55,845

Cobalt 27 Co 58,933194

Nickel 28 Ni 58,6934

Cuivre 29 Cu 63,546

Zinc 30 Zn 65,38

Galium 31 Ga 69,723

Germanium 32 Ge 72,630

Arsenic 33 As 74,921595

Sélénium 34 Se 78,971

Brome 35 Br 79,904

Krypton 36 Kr 83,798

Rubidium 37 Rb 85,4678

Strontium 38 Sr 87,62

Yttrium 39 Y 88,90584

Zirconium 40 Zr 91,224

Niobium 41 Nb 92,90637

Molybdène 42 Mo 95,95

Technétium 43 Tc [98]

Ruthénium 44 Ru 101,07

Rhodium 45 Rh 102,90550

Palladium 46 Pd 106,42

Argent 47 Ag 107,8682

Cadmium 48 Cd 112,414

Indium 49 In 114,818

Étain 50 Sn 118,710

Antimoine 51 Sb 121,760

Tellure 52 Te 127,60

Iode 53 I 126,90447

Xénon 54 Xe 131,293

Césium 55 Cs 132,905450

Baryum 56 Ba 137,327

Lanthanides 57-71

Hafnium 72 Hf 178,49

Tantale 73 Ta 180,94788

Tungstène 74 W 183,84

Rhénium 75 Re 186,207

Osmium 76 Os 190,23

Iridium 77 Ir 192,217

Platine 78 Pt 195,084

Or 79 Au 196,966569

Mercure 80 Hg 200,592

Thallium 81 Tl 204,3835

Plomb 82 Pb 207,2

Bismuth 83 Bi 208,98040

Polonium 84 Po [209]

Astato 85 At [210]

Radon 86 Rn [222]

Francium 87 Fr [223]

Radium 88 Ra [226]

Actinides 89-103

Rutherfordium 104 Rf [261]

Dubnium 105 Db [268]

Seaborgium 106 Sg [269]

Bohrium 107 Bh [277]

Hassium 108 Hs [277]

Méitnerium 109 Mt [288]

Darmstadtium 110 Ds [288]

Roentgenium 111 Rg [288]

Copernicium 112 Cn [285]

Nihonium 113 Nh [286]

Flerovium 114 Fl [289]

Moscovium 115 Mc [289]

Livermorium 116 Lv [293]

Tennesse 117 Ts [294]

Oganesson 118 Og [294]

Lanthane 57 La 138,90547

Cérium 58 Ce 140,116

Praséodyme 59 Pr 140,90766

Neodyme 60 Nd 144,242

Prométhium 61 Pm [145]

Samarium 62 Sm 150,36

Europium 63 Eu 151,964

Gadolinium 64 Gd 157,25

Terbium 65 Tb 158,92535

Dysprosium 66 Dy 162,50

Holmium 67 Ho 164,93033

Erbium 68 Er 167,259

Thulium 69 Tm 168,93402

Ytterbium 70 Yb 173,045

Lutétium 71 Lu 174,9668

Actinium 89 Ac [227]

Thorium 90 Th 232,0377

Protactinium 91 Pa 231,03688

Uranium 92 U 238,02891

Neptunium 93 Np [237]

Plutonium 94 Pu [244]

Américium 95 Am [243]

Curium 96 Cm [247]

Berkélium 97 Bk [247]

Californium 98 Cf [251]

Einsteinium 99 Es [252]

Fermium 100 Fm [257]

Mendelevium 101 Md [268]

Nobelium 102 No [259]

Lawrencium 103 Lr [260]

Fossile

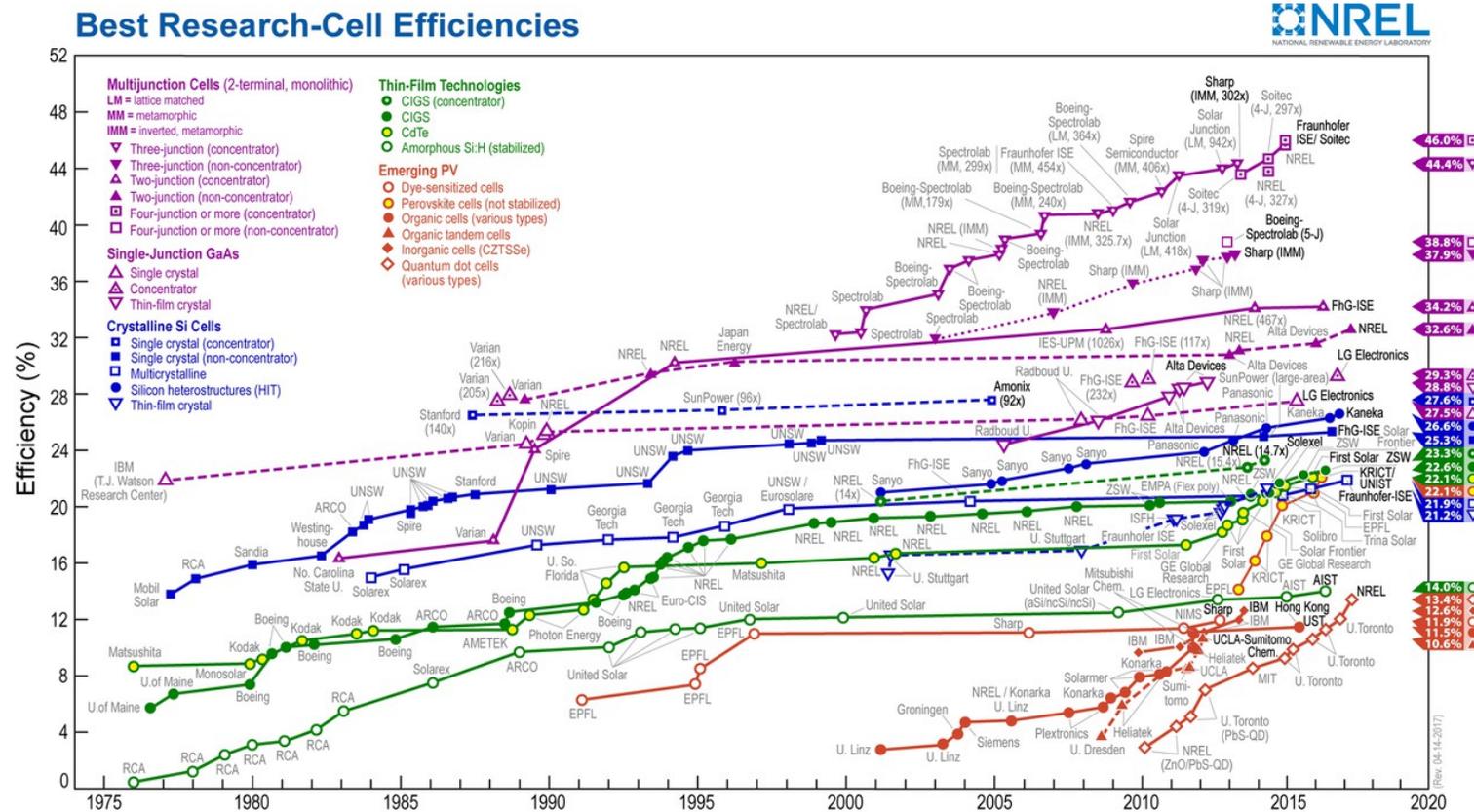
(Terres rares)
EnR

Nucléaire



- ✓ Global Energy Perspective 2019 Reference Case 2050 McKinsey : doublement de la demande électrique, énergie nécessaire x 5 x 2 et ressources estimées de 20 ans pour le cuivre (y.c. Recyclage)
- ✓ Superficie (Richard Lavergne, CGE mars 2019) : 20% de stockage saisonnier (1 m³ de pétrole) pour 200 m² de panneaux photovoltaïques par personne

La limite de Shockley-Queisser de l'efficacité d'une cellule solaire mono-jonction



Les unités de base du système international

20 mai 2019

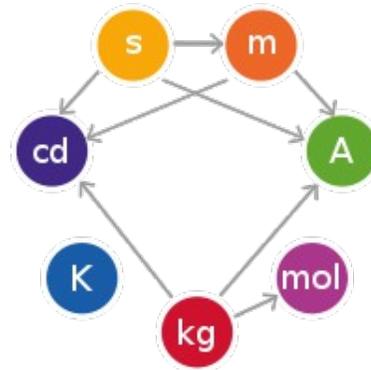
Fréquence de la transition hyperfine
de l'état fondamental de l'**atome** de
césium 133 non perturbé

Vitesse de la lumière dans le vide
Équivalence masse-énergie

Efficacité lumineuse
d'un rayonnement monochromatique
d'une certaine fréquence

Constante de Boltzmann
 $1,380649 \times 10^{-23} \text{ kg m}^2 \text{ s}^{-2} \text{ K}^{-1}$

Entropie
Température thermodynamique



Charge élémentaire

Constante d'Avogadro

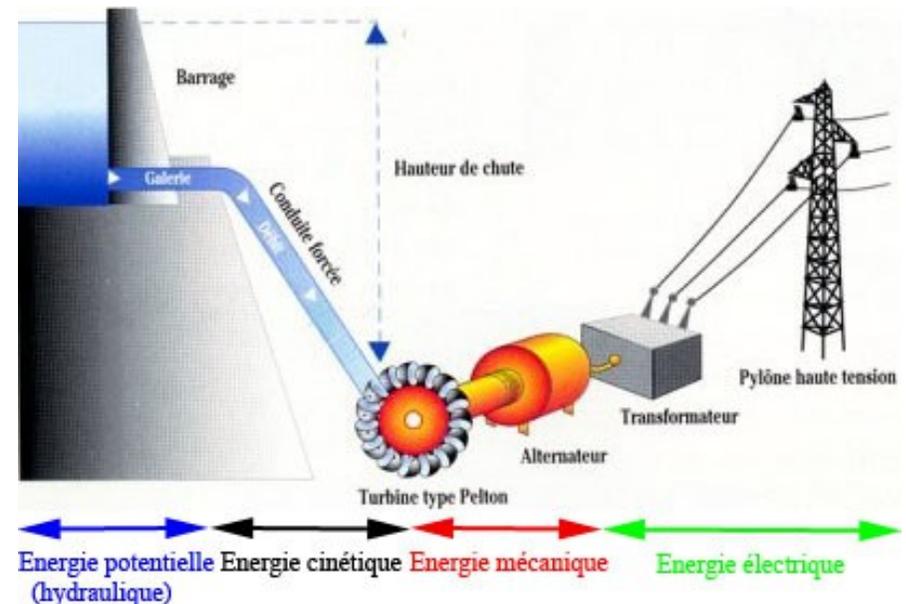
Constante de Planck
Énergie d'un photon

- ✓ L'entropie n'est pas homogène à une énergie
- ✓ Le Kelvin est une unité indépendante des autres

L'énergie

- L'énergie est la capacité d'un système à produire un travail
- Le travail est l'énergie fournie par l'action d'une force sur une distance
- De ce point de vue
 - L'énergie est un flux (que nous avons tendance à interrompre) de déstockage
 - La reconstitution du stock nécessite du temps (Cf. constante de temps), de la surface, de l'énergie, etc.

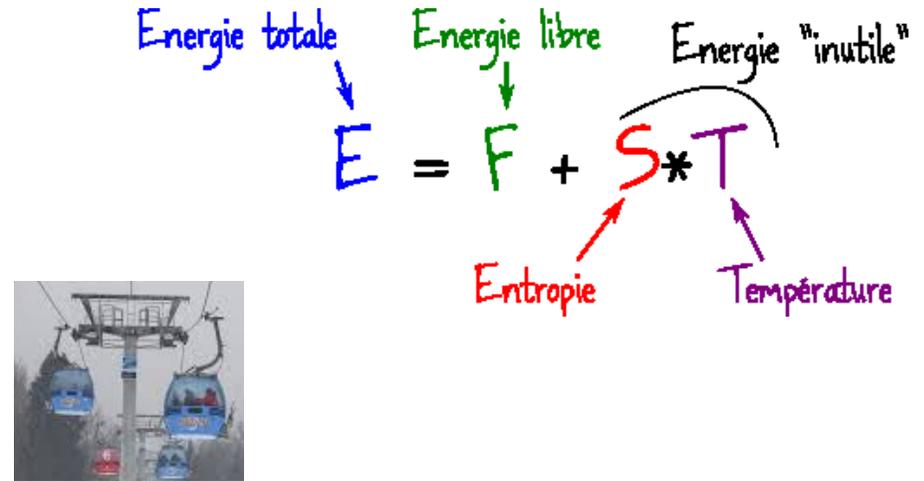
$$\text{Énergie} = \int \oint_A^B \vec{F} \cdot d\vec{l}$$



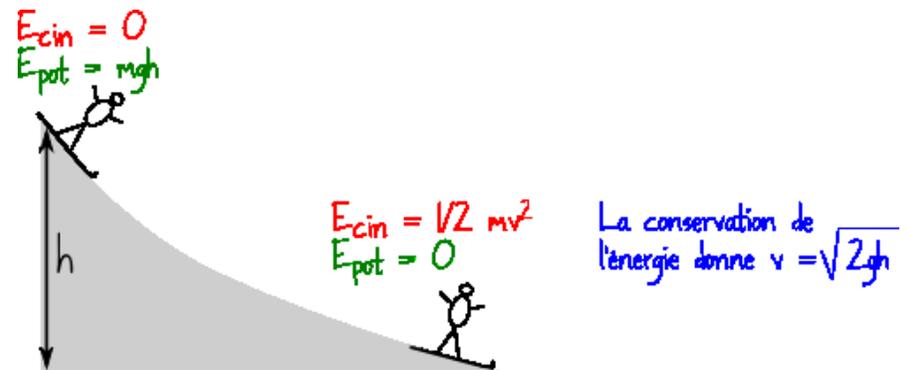
Cycle de l'eau

L'entropie

- Consommer de l'énergie, ce n'est pas la faire disparaître, c'est créer de l'entropie
 - Quand le skieur freine, les frottements avec la neige produisent de la chaleur, la température des skis et de la neige s'élève



- ✓ Projections du projet de PPE -17% de consommation d'énergie finale d'ici 2030 en retrait par rapport à l'objectif législatif de -20% et au projet de loi énergie : efforts supplémentaires d'économie d'énergie sur les énergies les plus vertueuses ?



La loi de Moore

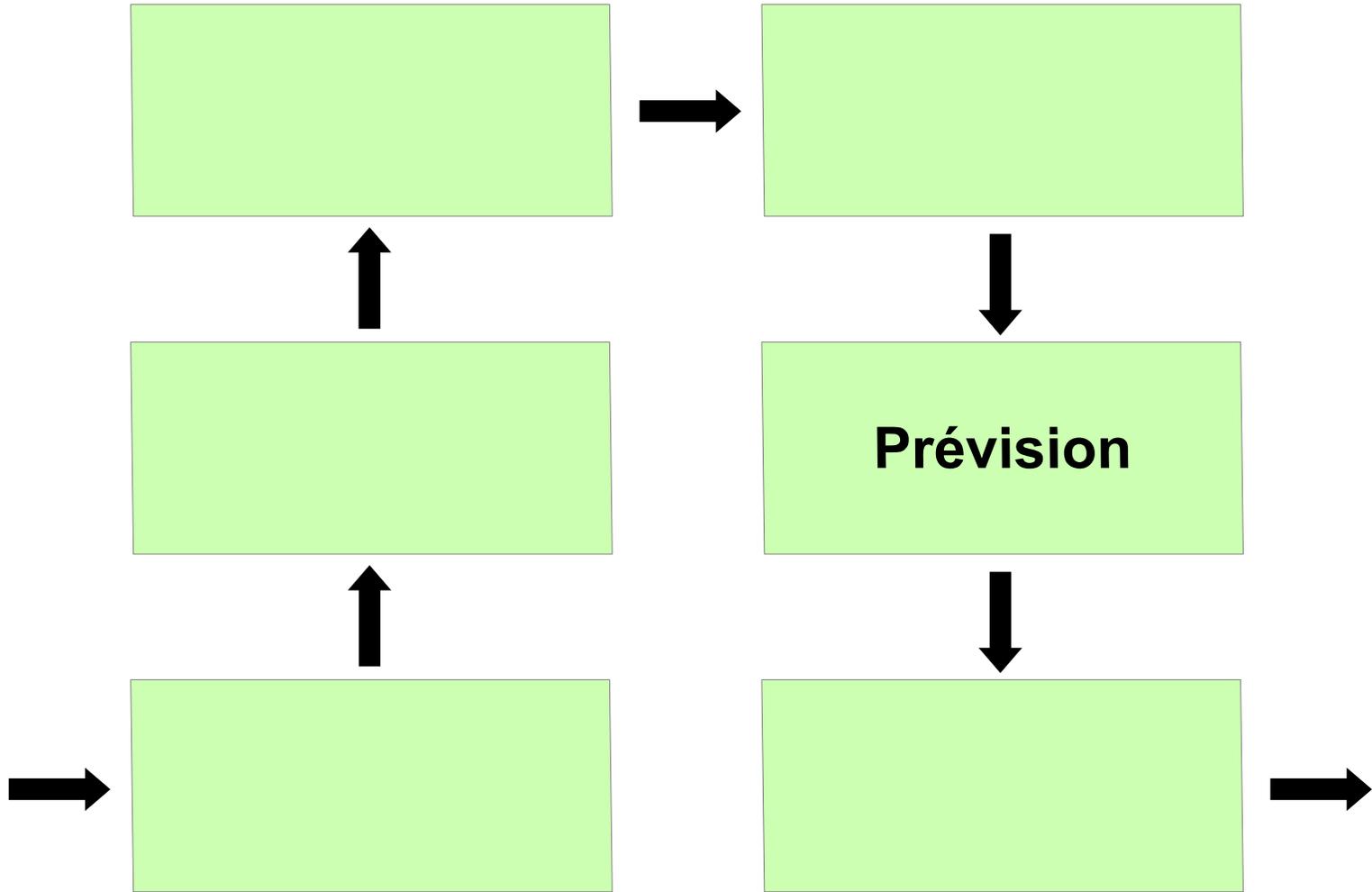
- 5 Mo (10^6), 1956



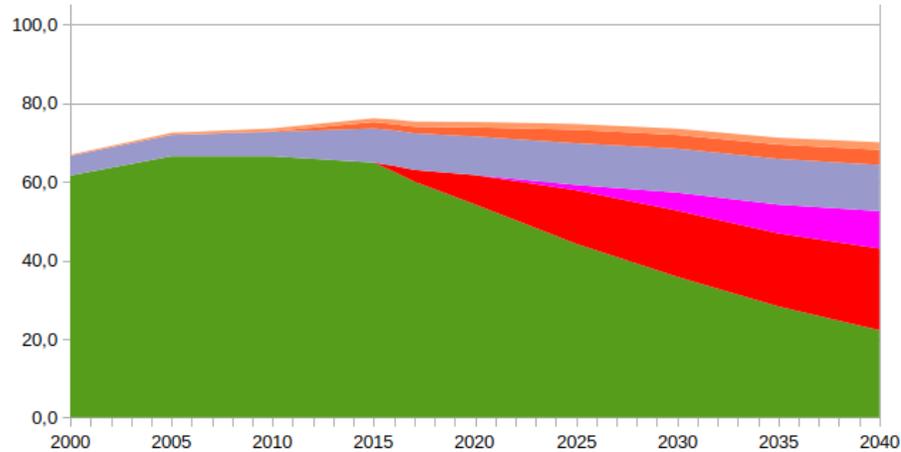
- 2 To (10^{12}), 2016



- Centres de données (40 Zo (10^{21}) en 2018)
 - 700 TWh/an = 3% cons. élec. mond.
 - + 10 %/an = 40% de la crois. Élec. → 2040
- ✓ Smart Grid (Ademe - Capgemini)

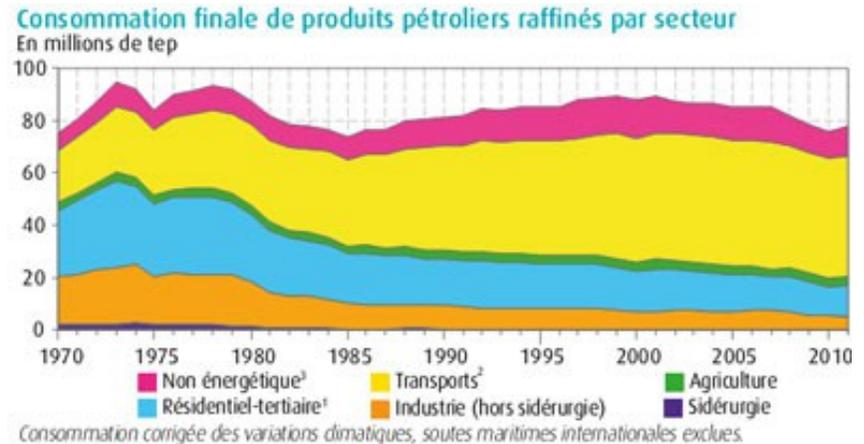


Les pétroles liquides et les transports



Mboe/d – IEA WEO 2018 / Antonio Turiel

-  Huile de schiste
-  Extra lourd et sables bitumineux
-  Gaz naturel liquéfié
-  Champs à découvrir
-  Champs à développer
-  Champs existants



France – SoeS

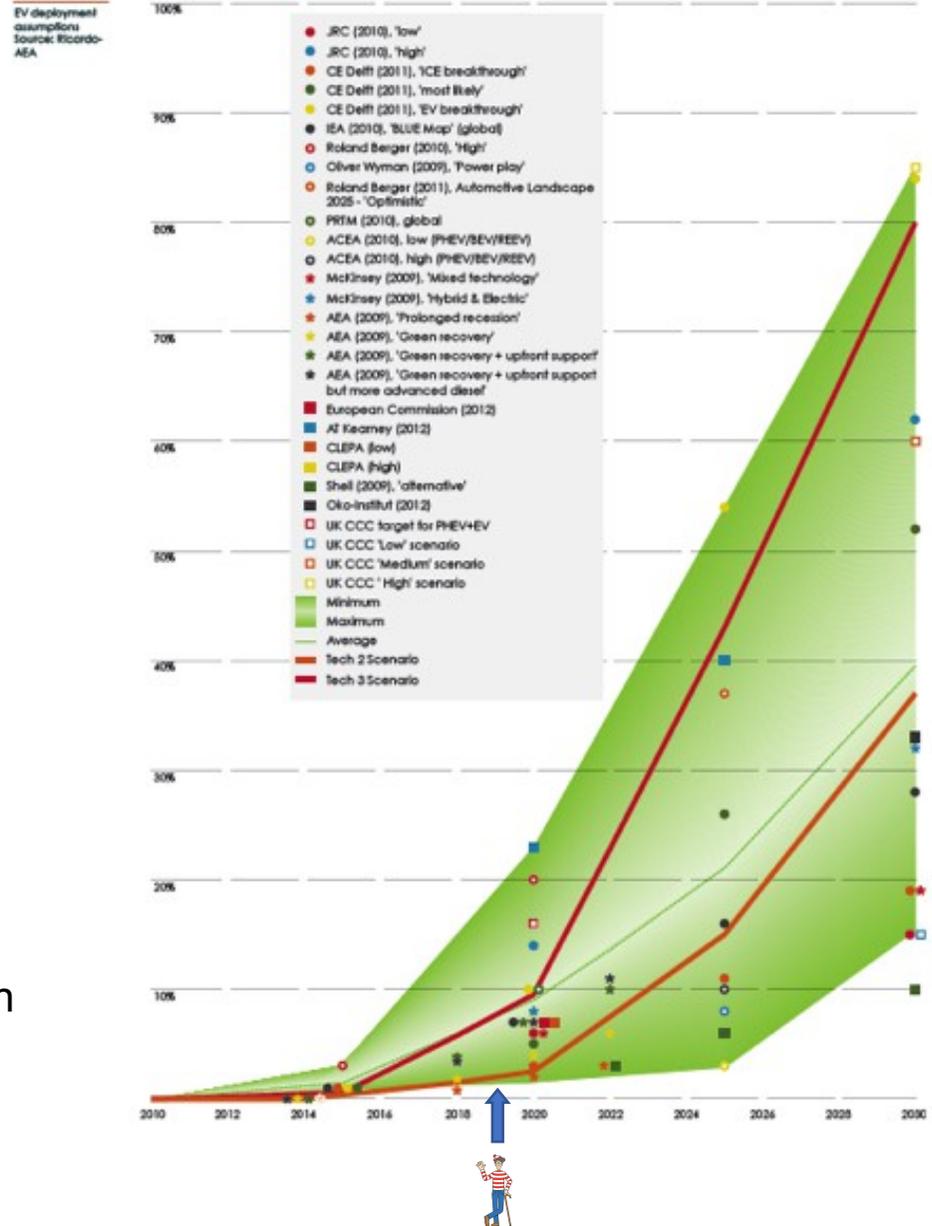
Transports : 



- Pic de la demande (nouveaux usages de l'électricité)
- Pic du prix (spéculation = 35 x production)

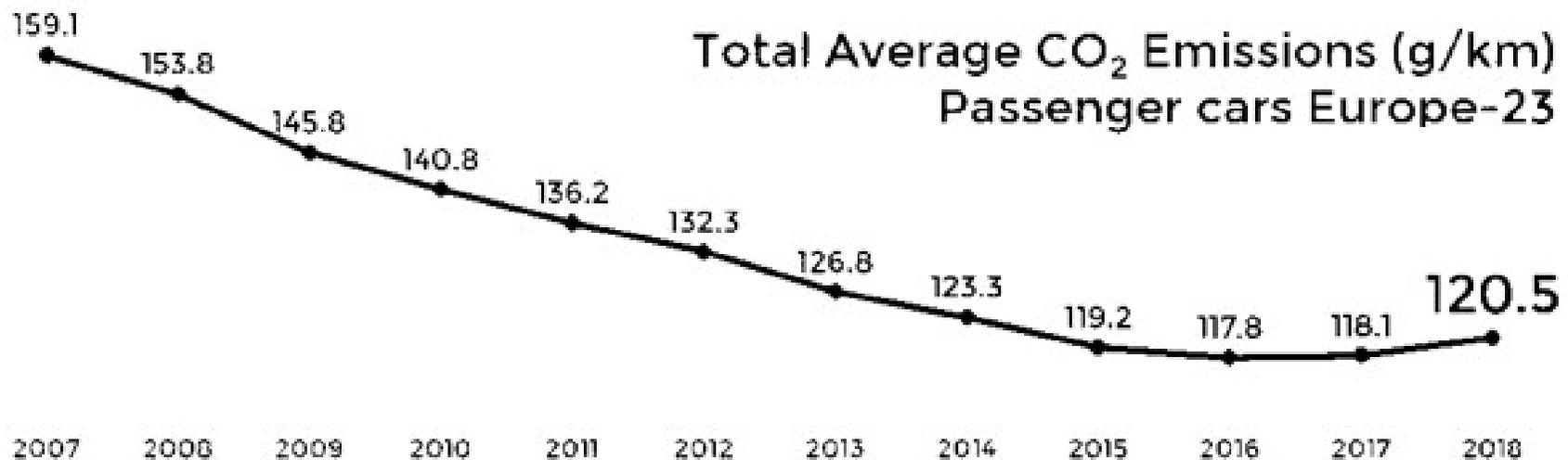
Fuelling Europe's Future

- 2013 Ci-contre
- 2018 Cambridge Econometrics et Element Energy Scenario Tech
6% de BEV en 2025, 15% en 2030
- WEO 2018 à l'horizon 2030 IEA Scénario bas (NPS)
8 % des 100 Millions de VP et VUL du marché 2025
- Retro-planning sur la batterie
16 giga-usines de 0,5 Millions VEx / an
 $16 \times 4,5 = 72$ Mds d'euros de CAPEX



Piloter l'offre ou la demande ?

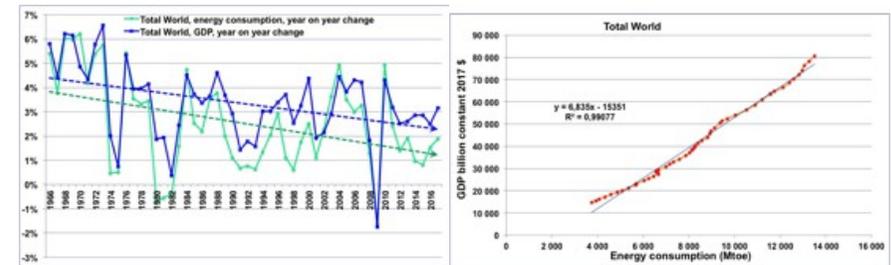
- Progrès des motorisations contrebalancés par 30 % de poids en plus sur 20 ans (sécurité et confort)
- Marché orienté vers une taille plus grande aujourd'hui (SUV)
- Qualité de l'air
 - Diesel
- Évolution des cycles d'homologation et conditions de conduite réelles



Institut Jato Dynamics

Croissance économique = Énergie disponible

- L'énergie n'est pas le facteur de production d'un modèle de Solow (capital K et travail L, « résidu »)
- Le PIB est une fonction affine de l'énergie disponible car l'efficacité énergétique est « constante » et faible
- Les chocs pétroliers résultent d'un transfert entre acteurs économiques et n'induisent pas une réduction des émissions carbonées
- La politique énergétique est coupée en deux, entre l'énergie qui est une optimisation des flux et l'environnement qui limite la consommation de matières



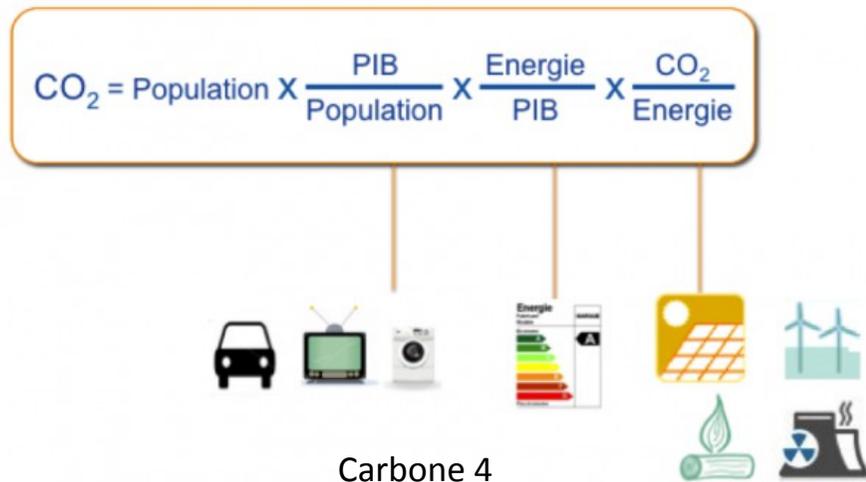
BP statistical review - Banque Mondiale 2015

	PIB / Population	Énergie / PIB	
Avant 1980	+ 3,3 %	- 0,8 %	+ 2,5 %
Après 1980	+ 1,2 %	- 0,8 %	+ 0,4 %

Gaël Giraud, Victor Court

L'électricité

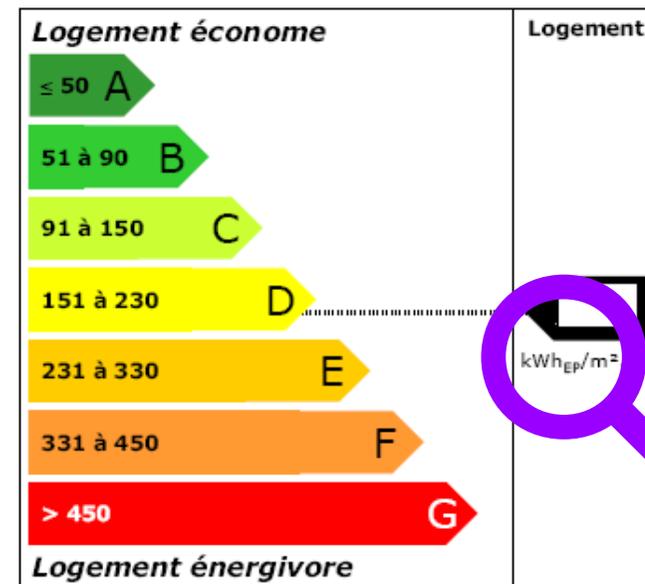
- L'équation de Kaya



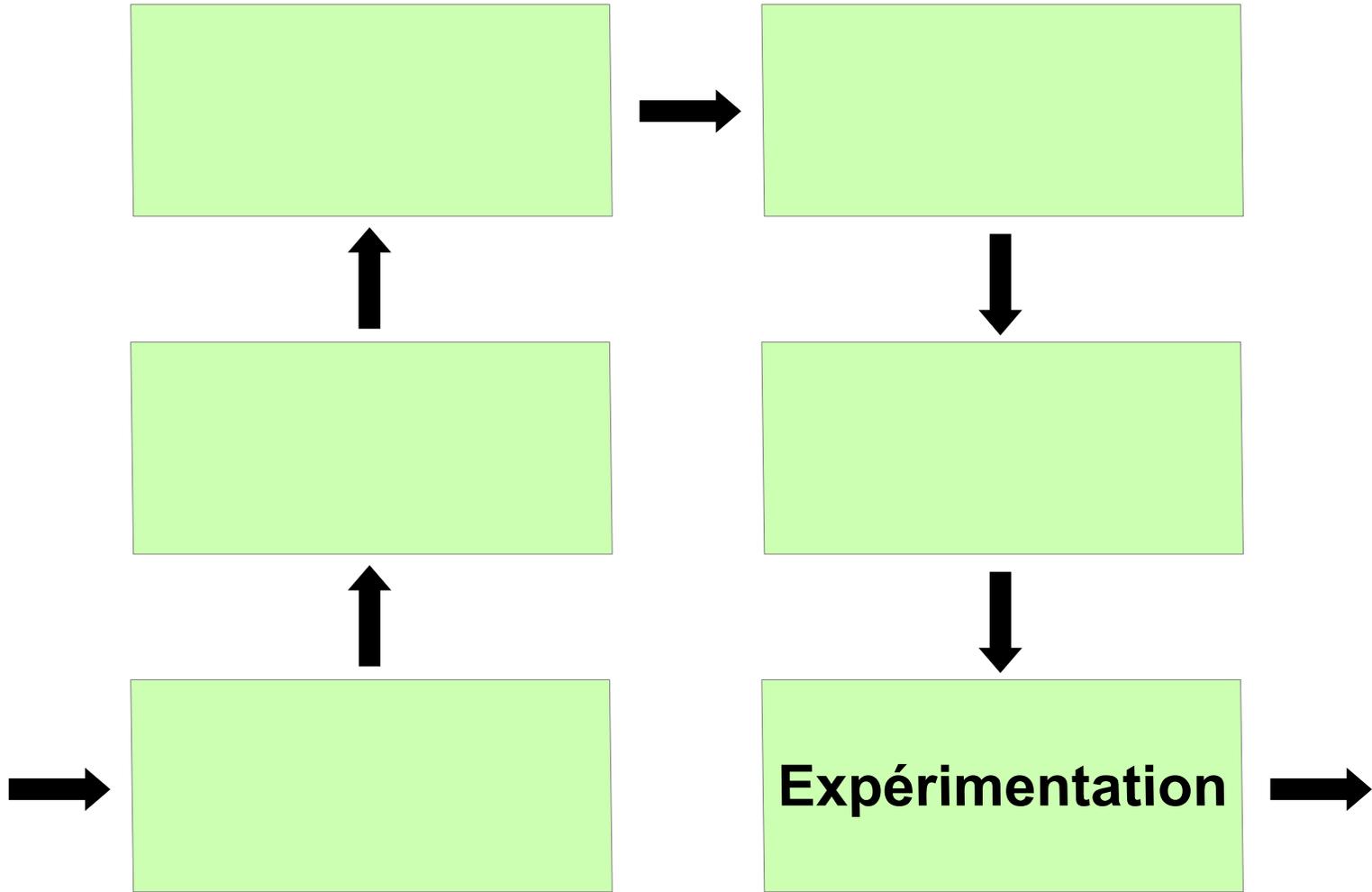
- Un produit de luxe, pénalisé par la taxation et par la tarification (20% abonnement et 80% consommation)

- Diagnostic de Performance Énergétique – DPE

Facteur de conversion de l'électricité dans la RT



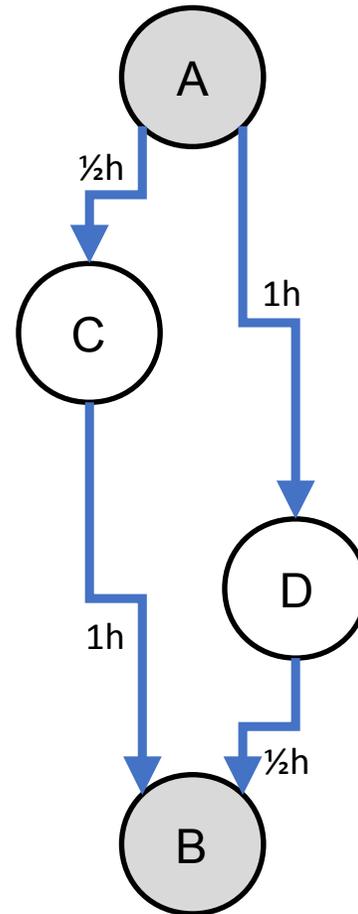
EP
x 2,58



Le paradoxe de Braess (théorie des jeux)

- Principe de Wardrop sur le coût des chemins origine-destination utilisés
- La collaboration ne peut pas toujours être imposée (feu rouge)
- L'équilibre de Nash d'un système n'est pas nécessairement optimal

Débit régulier en A
1h sur CB ou AD
Temps // trafic sur AC ou DB
Premier équilibre : 1h ½



Le paradoxe de Braess (théorie des jeux)

- Principe de Wardrop sur le coût des chemins origine-destination utilisés
- La collaboration ne peut pas toujours être imposée (feu rouge)
- L'équilibre de Nash d'un système n'est pas nécessairement optimal

Débit régulier en A

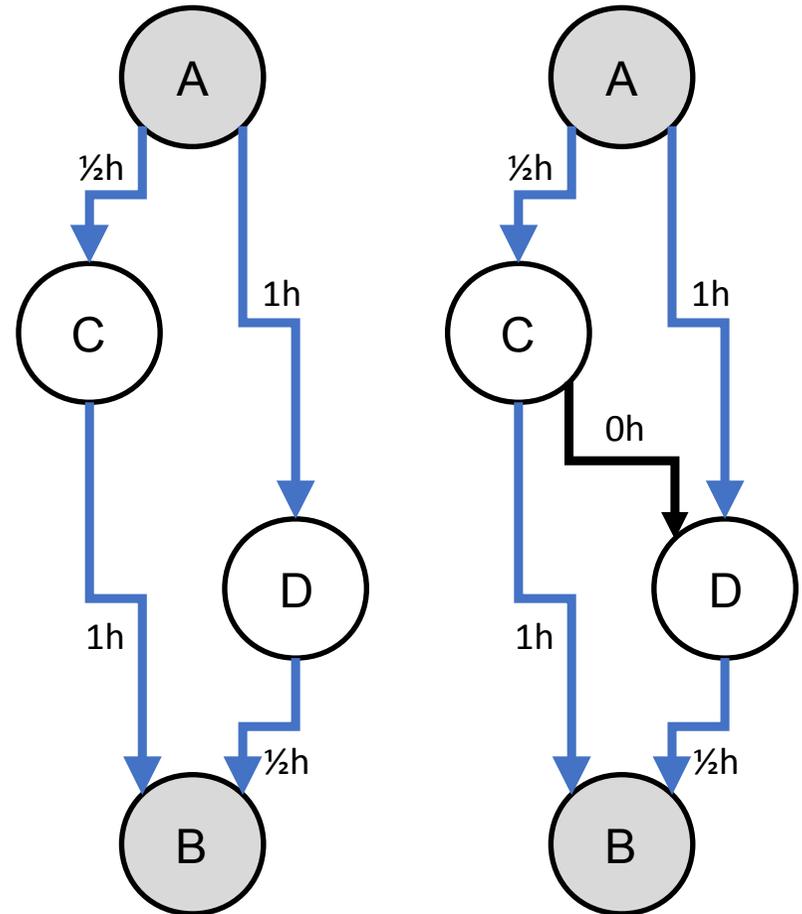
1h sur CB ou AD

Temps // trafic sur AC ou DB

Premier équilibre : 1h ½

On crée la liaison CD (0h)

Comme CDB est toujours au moins aussi rapide que CB, et ACD que AD,



Le paradoxe de Braess (théorie des jeux)

- Principe de Wardrop sur le coût des chemins origine-destination utilisés
- La collaboration ne peut pas toujours être imposée (feu rouge)
- L'équilibre de Nash d'un système n'est pas nécessairement optimal

Débit régulier en A

1h sur CB ou AD

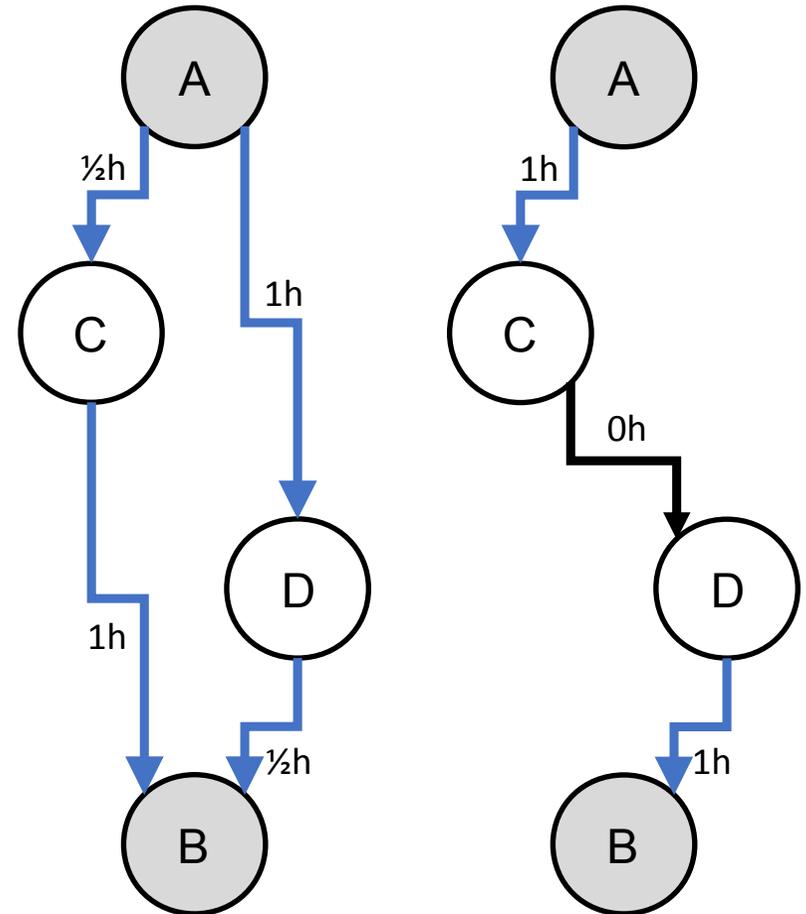
Temps // trafic sur AC ou DB

Premier équilibre : 1h ½

On crée la liaison CD (0h)

Comme CDB est toujours au moins aussi rapide que CB, et ACD que AD, tous les véhicules passent par C

Second équilibre : 2h



La combinatoire



$$n! \sim \sqrt{2\pi n} \left(\frac{n}{e}\right)^n$$

Formule de Stirling

• Linky

- 10 index
- Mesure à un pas de 30 min
- Relevé à distance une fois par jour
- 7 contacts en aval
- Pointe mobile sur plage horaire

Grille tarifaire Tempo d'EDF TTC - à jour au 2 avril 2019

Puissance souscrite	Abonnement annuel	Prix du kWh					
		Bleu HC	Bleu HP	Blanc HC	Blanc HP	Rouge HC	Rouge HP
9 kVA	147,96 €						
12 kVA	172,92 €						
15 kVA	183,60 €						
18 kVA	200,88 €	0,1104 €	0,1329 €	0,1255 €	0,1558 €	0,1323 €	0,5413 €
30 kVA	286,68 €						
36 kVA	328,56 €						

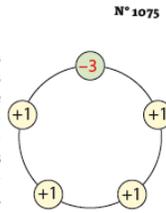
La couverture de graphe

- L'autopartage

Procédures auto-matiques

La flotte de voitures d'un opérateur d'auto-partage est répartie entre cinq parcs situés autour d'une grande ville. Les réservations, faites la veille sur Internet, sont limitées par un programme à un total strictement inférieur au nombre de voitures. Le nombre de chaque parc est ajusté durant la nuit *via* une procédure automatique. Chaque opération de la procédure consiste à choisir un parc où il manque N voitures, puis à transférer vers lui 2N voitures, prélevées moitié moitié sur chacun des deux parcs voisins (le programme fait en sorte que ce soit toujours possible). Cette nuit-là, au vu des réservations, il manque trois voitures dans le parc vert et il y en a une de trop dans les jaunes. L'objectif est de faire en sorte que, dans chaque parc, il ne manque aucune voiture.

- Combien d'opérations, au minimum, permettront d'atteindre l'objectif ?
- L'objectif pourra-t-il être toujours atteint quelles que soient les réservations ?

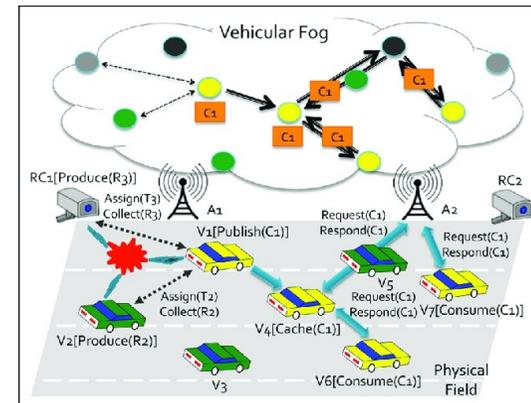
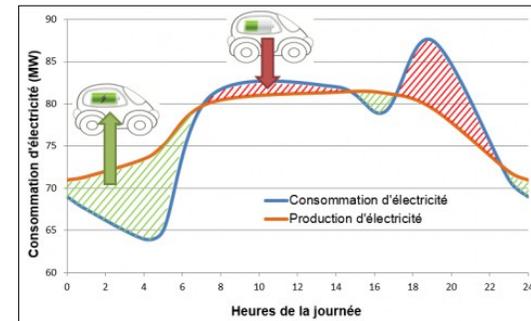


Le Monde, 07/11/18



- Le Vehicle to Grid

- À partir d'une fonction objectifs qui ne se contente pas de lisser la courbe de production, la réservation des véhicules

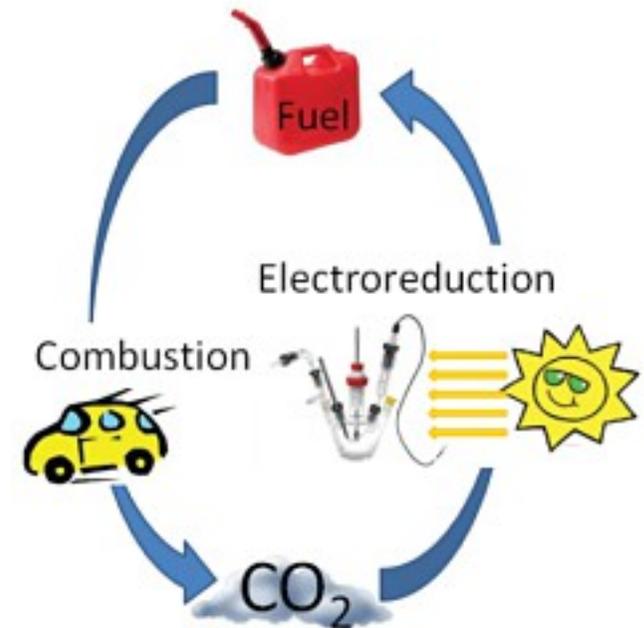
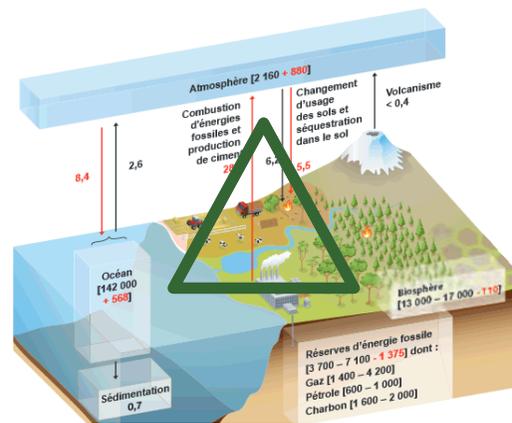


Merci pour votre attention !



Réinventer Paris, 13e arrondissement
XTU Architects

- Culture de microalgues dans les façades



- Électrocatalyse
On « craque » l'eau
puis on réduit le CO₂ en hydrocarbures