

# ELÉMENTS DE BASE SUR L'ÉNERGIE AU XXI SIÈCLE

Objet du cours : énergie et changement climatique

Date : mai 2019

## SOMMAIRE

### I L'énergie

Chapitre 01 - Retour aux basiques : qu'est-ce que l'énergie ?

Chapitre 02 - Un monde de machines

Chapitre 03 - Passage des énergies renouvelables aux énergies fossiles

Chapitre 04 - Les effets de l'abondance énergétique sur les secteurs économiques

Chapitre 05 - Les effets de l'abondance énergétique sur les modes de vie

Chapitre 06 - Une théorie économique hors-sol

Chapitre 07 - Baisse de l'approvisionnement énergétique et conséquences

### II Les énergies fossiles

Chapitre 08 - Les énergies fossiles et leurs usages dans le monde et en France

Chapitre 09 - Génèse des hydrocarbures

Chapitre 10 - Production et extraction des hydrocarbures

Chapitre 11 - Les réserves

Chapitre 12 - Pic pétrolier

Chapitre 13 - Prospectives

### III Le changement climatique 1/2

Chapitre 14 - Changement climatique : qu'est-ce que l'effet de serre ?

Chapitre 15 - Les émissions humaines de Gaz à Effet de Serre

Chapitre 16 - Mesurer l'émission de GES

Chapitre 17 - Poids respectif des différents GES

### IV Le changement climatique 2/2

Chapitre 18 - L'action des aérosols et précurseurs d'aérosols  
Chapitre 19 - La logique d'une simulation climatique du GIEC  
Chapitre 20 - Les scénarii du GIEC  
Chapitre 21 - Comparaisons avec les changements de températures passés  
Chapitre 22 - Les impacts du changement climatique  
    A / L'augmentation de la température de l'atmosphère et de l'océan  
    B / La variation des précipitations  
    C / Impacts du changement climatique sur les écosystèmes  
    D / Les impacts du changement climatique : santé humaine  
    E / Les impacts du changement climatique : la montée des océans  
    F / Impact du réchauffement climatique sur la circulation des courants océaniques  
    G / Impact du changement climatique sur l'intensification des phénomènes météorologiques extrêmes  
    H / Impact du changement climatique : l'acidification des océans  
    I / Impact du changement climatique pour l'espèce humaine  
Chapitre 23 - Les retro-actions positives du système climatique

## V Les économies d'énergie

Chapitre 24 - Pourquoi faire des économies d'énergie ?  
Chapitre 25 - Optimiser la chaîne des énergies primaire, finale et utile  
Chapitre 26 - L'équation de Kaya  
Chapitre 27 - Considérations sur l'organisation des démocraties et le fonctionnement des médias  
Chapitre 28 - La séquestration du CO<sub>2</sub>  
Chapitre 29 - Faire des économies en fin de chaîne : réglementation et planification  
Chapitre 30 - La variable prix à l'épreuve du temps  
Chapitre 31 - Cas pratique : décarbonisation de l'UE

## VI Le nucléaire

Chapitre 32 - Qu'est-ce que l'énergie nucléaire ?  
Chapitre 33 - La fission nucléaire  
Chapitre 34 - Les contreparties du nucléaire  
Chapitre 35 - Avenir du nucléaire

## VII Les énergies renouvelables

## VIII La comptabilité carbone

# LEÇON I - L'ÉNERGIE

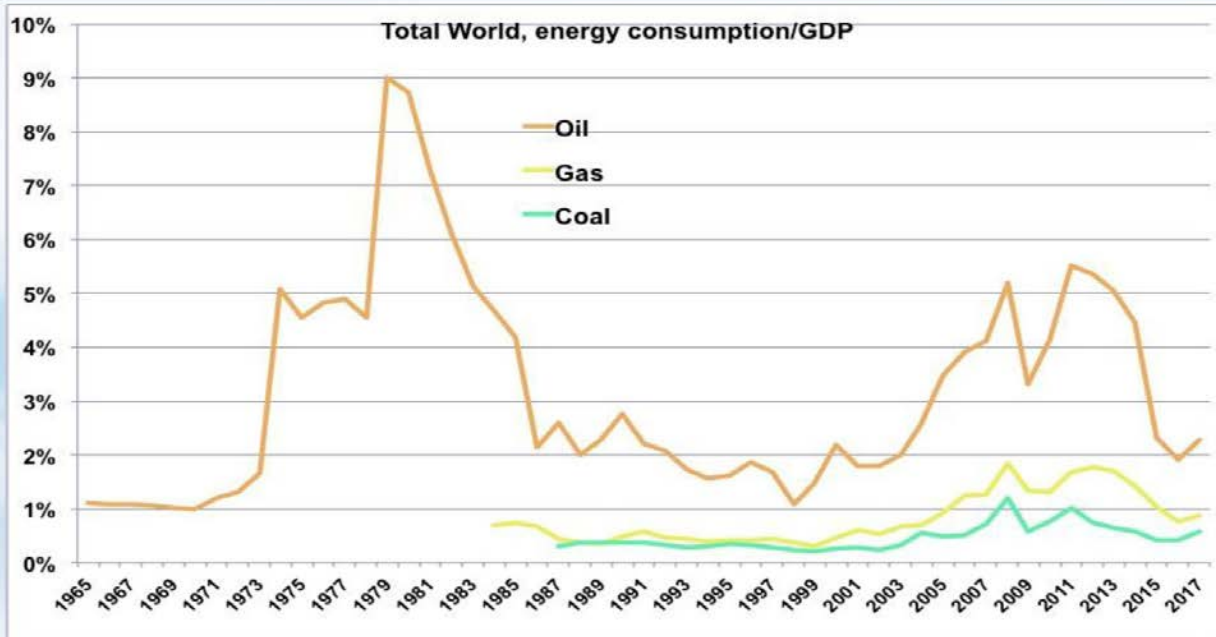
## Chapitre 01 - Retour aux basiques : qu'est-ce que l'énergie ?



Question 01 - Selon vous, qu'est-ce que l'énergie ?

- Raisonnement de type économique = Ma facture d'électricité ou de gaz

### Si l'énergie n'est qu'une facture (bis)...



Fraction du revenu consacré à l'achat d'énergie brute en moyenne mondiale. Calculs Jancovici sur données BP Statistical Review et World Bank.

Jean-Marc Jancovici - Mines ParisTech mai-juin 2019 - [www.jancovici.com](http://www.jancovici.com)

On passe à côté de l'essentiel si on associe énergie et facture d'énergie.

Car le coût de l'énergie - pétrole, gaz, charbon - est infime par rapport aux fonctions remplies.

## On ne va quand même pas passer la nuit sur 5% de nos couts

Jean-Marc Jancovici - Mines ParisTech mai-juin 2019 - www.jancovici.com

Un raisonnement en part de camembert est impropre pour appréhender la question de l'énergie car il ne tient pas compte du fait que les parts puissent être asservies les unes aux autres.  
Exemple typique : l'agriculture représente 2% du PIB, on pourrait s'en passer.  
Les 95% du PIB qui ne sont pas de l'achat d'énergie dépendent en réalité à 100% des 5% en question.

- Il faut l'économiser, mais pourquoi ?  
L'énergie c'est ce qu'on doit économiser. C'est un paradoxe car la société thermo-industrielle repose précisément sur l'abondance énergétique.
- C'est ce qu'on ressent le matin lorsqu'on est en forme.
- C'est ce qui permet de transformer l'environnement

### Back to basics : qu'est-ce que l'énergie ?

**L'énergie est la grandeur physique qui permet de caractériser un changement d'état dans un système :**

**Modification de température**



**Modification de la vitesse**



**Modification de forme**



**Modification de la composition chimique**



**Modification de la position dans un champ (magnétique, électrique, gravitationnel...)**



**Changement de composition atomique**



**Modification de l'énergie ou du nombre de photons**



**L'énergie n'est donc rien d'autre que l'unité de compte de la transformation du monde qui nous entoure**

Jean-Marc Jancovici - Mines ParisTech mai-juin 2019 - www.jancovici.com

L'énergie est la grandeur physique qui permet de caractériser un changement d'état dans un système :  
L'énergie est ce qui quantifie / calcule le changement d'état d'un système.

Objets qui transforment l'environnement dans la vie courante :

- modification de température, réchauffer / refroidir (frigo, radiateur)
- modification de vitesse (voiture, trains, camions)
- modification de forme (pelleteuse, presse)
- modification de la composition chimique d'un système (système digestif humain sert à fournir de l'énergie)
- modification de la position dans un champ magnétique, électrique, gravitationnel... (consomme dans un moteur / en fournit dans un alternateur)
- changement de composition atomique (exemple le soleil qui est une grosse bombe thermo-nucléaire et qui assemble des noyaux d'hydrogène pour fabriquer des noyaux d'hélium)
- modification de l'énergie ou du nombre de photons (interaction matière / rayonnement)

=> l'énergie c'est transformer le monde qui nous entoure et inversement transformer le monde qui nous entoure suppose nécessairement qu'il y ait de l'énergie qui soit entrée en jeu.

## Chapitre 02 - Un monde de machines

### 500.000 ans de transition énergétique !

→ **-500.000 ans : domestication du feu.**

→ **L'antiquité : toutes les renouvelables ont été utilisées ! Bois, vent, soleil, hydraulique, traction animale...**

→ **Le pétrole est connu des Sumériens (-3.000 av. JC environ), bien avant Drake et son premier forage (1859 à Tittusville).**

→ **Le charbon est exploité dans la Chine antique 1000 ans avant notre ère.**

→ **Ce qui caractérise l'ère « moderne », ce n'est pas l'utilisation de sources « nouvelles » (sauf le nucléaire et le photovoltaïque), mais le **changement d'ordre de grandeur** dans leur usage.**

Jean-Marc Jancovici - Mines ParisTech mai-juin 2019 - [www.jancovici.com](http://www.jancovici.com)

500 000 ans de transitions énergétiques :

- 1ère énergie extracorporelle : le feu, il y a 500 000 ans
- toutes les énergies renouvelables ont été mises au point pendant l'Antiquité (bois, vent, soleil, hydraulique, traction animale, ... et même les énergies fossiles dans des petits volumes : le pétrole connu des Sumériens, le charbon connu des Chinois au début du 1er millénaire avant l'ère chrétienne)
- à partir du XVIII et de la révolution industrielle, pas de nouvelles sources d'énergie mais un changement d'ordre de grandeur dans leur usage
- il faut attendre le XXe avec le nucléaire et le photovoltaïque pour que soient exploitées de nouvelles sources d'énergie

> la transition énergétique, un état permanent des sociétés humaines

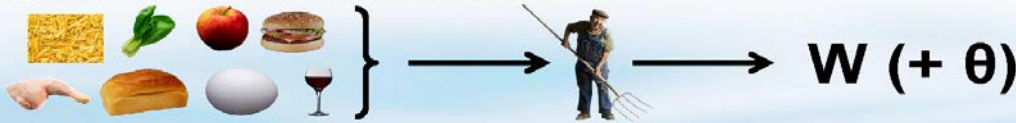
> la Révolution industrielle marque une rupture avec l'exploitation massive et en un laps de temps très court des énergies fossiles

## Oubliez « énergie », pensez « machines »

L'énergie, c'est ce qui **quantifie** la transformation de l'environnement

A cause de la loi de conservation de l'énergie, « utiliser de l'énergie », c'est en pratique **extraire de l'énergie de l'environnement (où elle se trouve déjà)** et la transformer avec un convertisseur.

La seule énergie que les hommes peuvent convertir en direct, c'est la biomasse et ses dérivés comestibles



Pour utiliser « plus puissant que soi » il faut un autre convertisseur, et l'énergie qui l'alimente



**« Utiliser de plus en plus d'énergie », c'est aujourd'hui en pratique « commander de plus en plus de machinerie »**

Jean-Marc Jancovici - Mines ParisTech mai-juin 2019 - [www.jancovici.com](http://www.jancovici.com)

L'énergie est une grandeur physique, elle est par conséquent gouvernée par des lois physiques immuables Utiliser de l'énergie consiste à extraire de l'énergie de l'environnement (une énergie primaire) et la transformer avec un "convertisseur"

- énergies primaires directement convertissables par l'homme : la nourriture et la chaleur du soleil
- puis domestication par l'homme d'autres convertisseurs d'énergie, tous renouvelables :
  - le bois
  - les animaux de trait
  - l'eau puis le vent avec les moulins
  - les esclaves
- puis avec la Révolution industrielle, mise au point de convertisseurs non renouvelables (machines faites de métal et qui convertissent des énergies fossiles)

> conclusion :

- l'énergie ne se consomme pas, elle se convertit
- abus de langage fâcheux qui minore le rôle des convertisseurs, et singulièrement dans nos sociétés modernes, les machines
- systématiquement traduire
  - "consommation d'énergie" par "utilisation de machines"
  - "nous consommons de plus en plus d'énergie" par "nous utilisons de plus en plus de machines"

Exemples de mobilisation de machines

- industrie textile

## Enfiler une culotte ? De l'énergie !



En coton



En synthétique



Tout le temps



Dès qu'elle est rose (ou bleue)



Tout le temps



Tout le temps



Tout le temps

Jean-Marc Jancovici - Mines ParisTech mai-juin 2019 - [www.jancovici.com](http://www.jancovici.com)

une armée de machines pour qu'on puisse enfiler un vêtement

- champs mécanisés pour les vêtements naturels (par exemple coton)
- installations pétrolières (plateformes pétrolières, vapocraqueur, raffinerie) pour les vêtements contenant des fibres synthétiques
- industrie mécanique pour le tissage
- industrie chimique pour les teintures
- industrie du transport pour les différentes étapes de la productions, jusqu'à la vente
- industrie du bâtiment pour la construction des usines et installations requises par la filière
- centrales électriques

- dentifrice

## Se laver les dents devant la glace ? De l'énergie !



Sorbitol



Plastique



Mise en forme



La glace à sa naissance...



Tout transport d'un maillon au suivant



Filtration de l'eau potable



Construction des usines, magasins, entrepôts...

Jean-Marc Jancovici - Mines ParisTech mai-juin 2019 - [www.jancovici.com](http://www.jancovici.com)

se laver les dents, une armée de machines pour un geste du quotidien

- industrie chimique pour la pâte (amidonerie pour fabriquer le Sorbitol)
- industrie pétrolière pour le plastique du tube (plateforme, raffinerie, vapocraqueur)





## Le grand bazar des unités

Il existe de multiples unités pour « compter » l'énergie :

La seule orthodoxe (normalement) : le joule. Un Français utilise (directement et indirectement) environ 170 GJ par an

La plus usuelle pour un Français : le kWh (3,6 MJ), ou... le litre de carburant (soit  $\approx 10$  kWh). Un Français utilise 50.000 kWh par an

La plus fréquente chez l'énergéticien « global » : la tonne équivalent pétrole (tep) et ses multiples ; une tep  $\approx 41,8$  GJ  $\approx 11.600$  kWh.

Celle du physicien des particules : l'électron-volt.  $1 \text{ ev} \approx 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ J}$

La mienne (vous verrez pourquoi) : l'équivalent esclave ; un EE = 100 kWh.

Jean-Marc Jancovici - Mines ParisTech mai-juin 2019 - www.jancovici.com

### Comparaison

- énergie mécanique produite par le corps humain
  - 100 kWh par an avec les muscles des jambes
  - 10 kw/h par an avec les muscles des bras
- énergie obtenue d'1 litre d'essence
  - énergie thermique 10 kw/h
  - énergie mécanique une fois passée dans un convertisseur comme un moteur de voiture, 2 à 4 kw/h

## Nietzsche voulait des surhommes : le carbone l'a fait



>> un moteur qui brûle 1 L d'essence équivaut à 10 à 100 jours de travail humain

>> dit autrement 1 moteur qui brûle 1 litre d'essence est capable de remplacer 100 travailleurs qui utilisent la force musculaire de leurs bras

- >> dit autrement il est bien plus rentable de faire travailler des machines (différentiel se situe entre quelques centaines à quelques milliers de fois moins cher)
- >> différentiel de coût entre le travail humain et celui des machines explique la mécanisation et la robotisation systématique de l'industrie
- >> d'autres avantages : disponibilité 24h, docilité des machines
- >> c'est également une des causes profondes de l'abolition de l'esclavage

Données

- 1000 litres d'essence consommés par an par chaque français

Les énergies primaires

- pour obtenir de l'énergie, l'homme doit extraire de l'énergie primaire de son environnement
- la molécule d'hydrogène est présente partout dans l'environnement mais sous forme liée, donc l'hydrogène n'est pas disponible en tant que source d'énergie primaire.  
Pour fabriquer de l'énergie à partir de l'hydrogène il faut casser les liaisons (par exemple hydrolyse de l'eau), ce qui nécessite d'employer plus d'énergie que ce qu'il est possible d'en obtenir sous forme d'hydrogène.  
Même réflexion pour la pile à combustible ... ce n'est pas une énergie primaire, c'est un "moteur"

Les externalités

L'utilisation de l'énergie transforme l'environnement, c'est sa définition. Par conséquent aucune énergie n'est propre ou sale par nature :

- leur exploitation a toujours un impact / une contrepartie sur l'environnement
- c'est donc le niveau d'utilisation / d'exploitation de l'énergie qui peut la rendre "sale", nocive pour l'environnement
- choisir une énergie plutôt qu'une autre, c'est arbitrer entre les inconvénients que l'on considère supportables

### **La physique sera toujours plus forte que les slogans**

**La loi de conservation impose que l'homme ne peut rien faire d'autre que d'exploiter à son profit une source d'énergie déjà existante dans l'environnement**

**L'énergie étant par définition la marque de la transformation, il n'existe aucune énergie propre ou sale dans l'absolu : choisir une énergie, c'est choisir les contreparties, pas les supprimer**

**Toutes les énergies primaires sont gratuites : personne n'a rien payé pour que se forment le pétrole, le gaz, l'uranium, le soleil ou le vent. Les hydrocarbures sont aussi gratuits que les renouvelables.**

**Le « coût de l'énergie » représente uniquement les revenus humains qu'il a fallu payer pour extraire l'énergie de l'environnement. La nature ne se fait jamais payer.**

**Plus une énergie est diffuse et non pilotable, plus elle coûtera cher à extraire. C'est juste de la physique.**

Jean-Marc Jancovici - Mines ParisTech mai-juin 2019 - [www.jancovici.com](http://www.jancovici.com)

Le prix de l'énergie primaire

L'énergie primaire est gratuite : le soleil, le vent mais également les énergies fossiles qui se sont accumulées à différentes périodes géologiques.

Le coût des énergies fossiles provient du coût d'accès, partagé entre :

- une "rente" foncière : le consentement du propriétaire du sol à se défaire de la matière première
- et une rémunération, pour le travail d'extraction, de prospection etc.

>> la Nature n'a jamais envoyé de facture à qui que ce soit

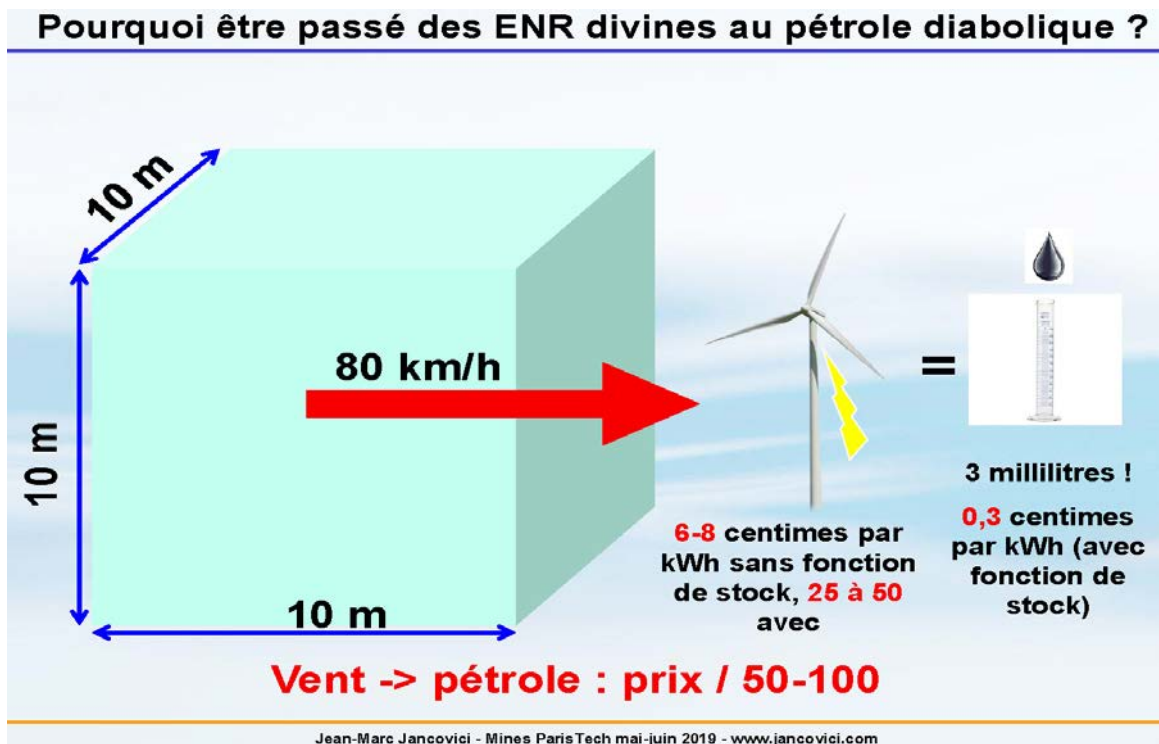
La fixation du prix des énergies primaires n'est pas liée à son abondance ou à sa rareté mais à la facilité d'extraction

- elle doit être très concentrée et non pas diffuse dans l'environnement
- elle doit être facilement accessible dans le sous-sol

>> typiquement, le pétrole

Autre variable dans le prix : la capacité à piloter l'énergie (la stocker)

---



Pourquoi être passé des ENR aux énergies fossiles ?

- 1000 m<sup>3</sup> d'air à 80 km/h produit via une éolienne équivaut à l'énergie obtenue en brûlant 3 ml de pétrole
- outre la concentration, aspect pratique :
  - il est plus simple d'extraire du pétrole que de construire un parc d'éoliennes
  - le pétrole est stockable / pilotable

Comparaison prix :

- 6 à 8 cts le kw/h éolien
- avec coût de stockage 25 à 50 cts le kw/h
- pétrole : 0,3 cts le kw/h

>> différentiel de prix de l'énergie stockée : x50 à 100

>> différentiel encore plus grand si on devait construire le parc éolien avec des éoliennes plutôt que l'industrie fossile (extraction des minerais, métallurgie, assemblage, transport, béton ...)

Deux siècles de transition des énergies renouvelables vers les énergies fossiles en raison de la supériorité des caractéristiques physiques des énergies fossiles

Conséquence prévisible :

>> faire le chemin inverse sans toucher au niveau de vie / de consommation sera impossible

>> et en plus avec la problématique de la population 1 milliard en 1800 > 7 milliards aujourd'hui

## Pourquoi être passé des ENR divines au pétrole diabolique ?



Jean-Marc Jancovici - Mines ParisTech mai-juin 2019 - [www.jancovici.com](http://www.jancovici.com)

## Pourquoi être passé des ENR divines au pétrole diabolique ?



Jean-Marc Jancovici - Mines ParisTech mai-juin 2019 - [www.jancovici.com](http://www.jancovici.com)

## Pourquoi être passé des ENR divines au pétrole diabolique ?



Jean-Marc Jancovici - Mines ParisTech mai-juin 2019 - [www.jancovici.com](http://www.jancovici.com)

## Pourquoi être passé des ENR divines au pétrole diabolique ?



Jean-Marc Jancovici - Mines ParisTech mai-juin 2019 - [www.jancovici.com](http://www.jancovici.com)

## Pourquoi être passé des ENR divines au pétrole diabolique ?



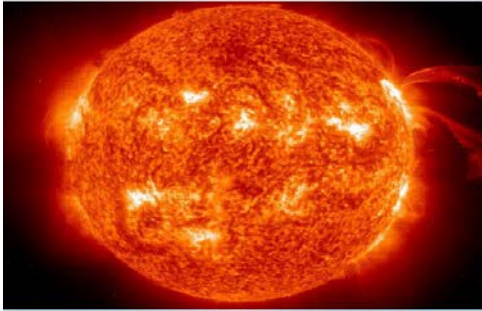
Jean-Marc Jancovici - Mines ParisTech mai-juin 2019 - [www.jancovici.com](http://www.jancovici.com)

## Pourquoi être passé des ENR divines au pétrole diabolique ?



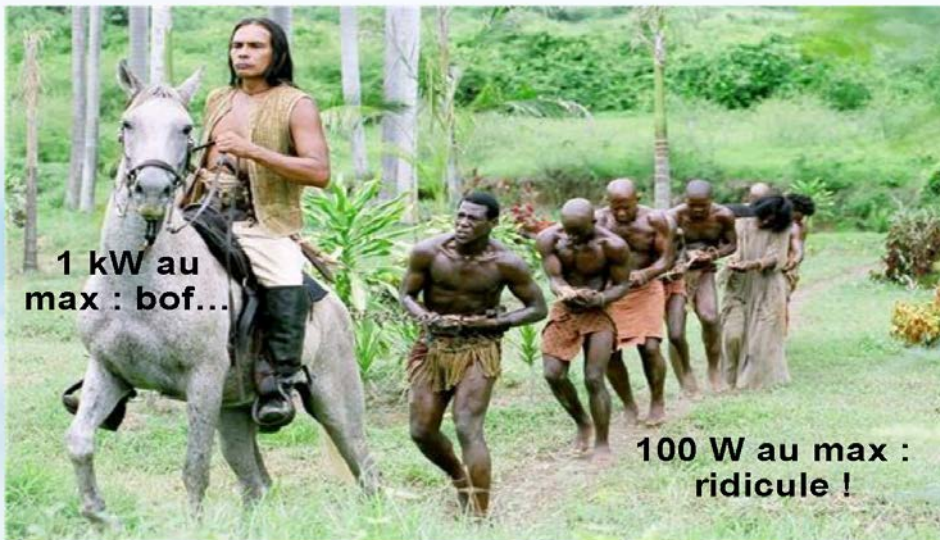
Jean-Marc Jancovici - Mines ParisTech mai-juin 2019 - [www.jancovici.com](http://www.jancovici.com)

## Pourquoi être passé des ENR divines au pétrole diabolique ?



Jean-Marc Jancovici - Mines ParisTech mai-juin 2019 - [www.jancovici.com](http://www.jancovici.com)

## Avant pétrole & co : ni moral ni efficace, mais très durable



Jean-Marc Jancovici - Mines ParisTech mai-juin 2019 - [www.jancovici.com](http://www.jancovici.com)

---

## L'homme produit avec machine, ou la machine produit avec hommes ?



 = 100 W pour les jambes, 10 W pour les bras

 = 60 kW  $\approx$  600 paires de jambes

  = 100 kW  $\approx$  10.000 paires de bras

 = 400 kW  $\approx$  4.000 paires de jambes

 = 100 MW  $\approx$  1.000.000 paires de jambes...

 = 100 MW  $\approx$  10.000.000 paires de bras !

 **Un autre auxiliaire de l'agriculture qui vaut quelques millions de paires de bras...**

Jean-Marc Jancovici - Mines ParisTech mai-juin 2019 - [www.jancovici.com](http://www.jancovici.com)

Raisonnement en terme de puissance et non plus énergies

- 100 Watts produits par la puissance musculaire des jambes / 10 watts pour les bras
- 1 tracteur = 60 kw = 600 paires de jambes = plusieurs dizaines d'animaux de trait
- 1 engin de chantier = 100 kW = 10 000 paires de bras
- 1 camion = 40 kW = 4000 paires de jambes
- 1 avion = 100mW = 1 000 000 de paires de jambes
- 1 laminoire industriel = 100 mW = 10 000 000 de paires de bras

>> la mécanisation des champs (et la chimie organique également liée aux énergies fossiles) explique

- l'augmentation de la productivité des agriculteurs
- l'exode rural et l'urbanisation

----

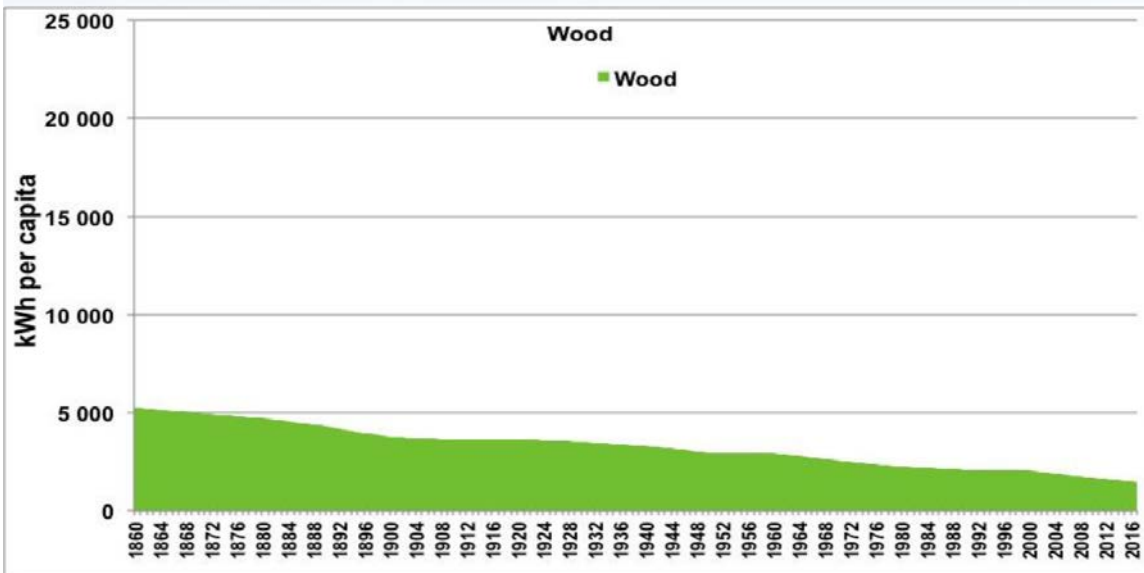
Rappels :

- 1) L'énergie quantifie la transformation
- 2) Pour utiliser de l'énergie il faut un convertisseur
- 3) L'essentiel des convertisseurs aujourd'hui ne sont plus nos propres corps mais des machines

Quantification du parc de machines par individu



## Il fut une époque où nous étions renouvelables et durables...



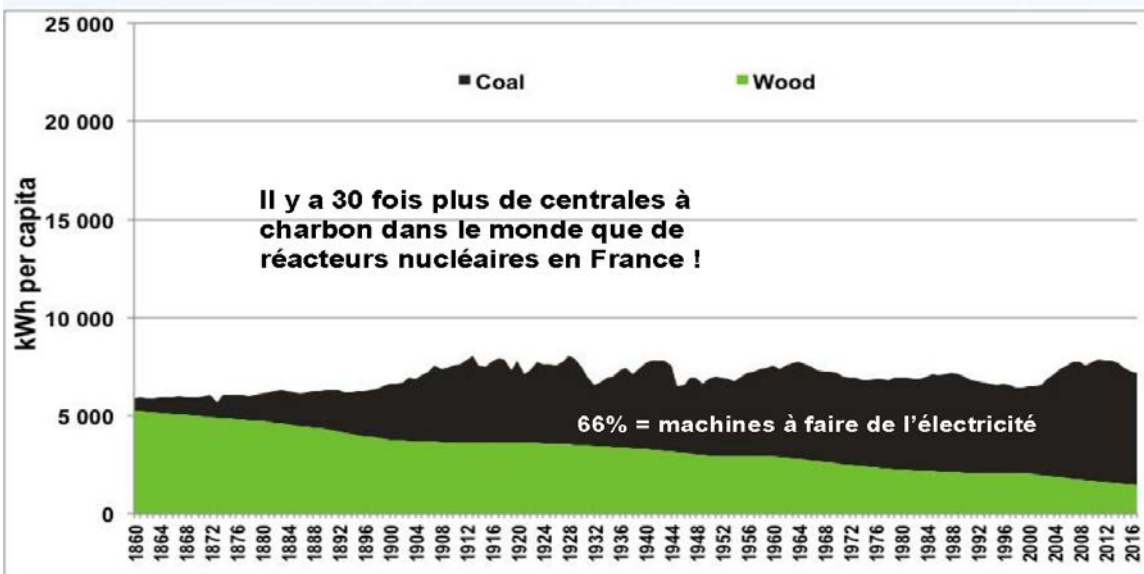
Consommation d'énergie par personne, moyenne mondiale 1860-2017. Jancovici, 2018

Jean-Marc Jancovici - Mines ParisTech mai-juin 2019 - www.jancovici.com

### BOIS

- 1860, 5000 kw/h de bois par an par individu pour les poêles, les forges, les premières machines à vapeur (pas de données sur les autres énergies renouvelables utilisées à l'époque, le vent et l'eau)
- depuis 1860, baisse constante utilisation du bois / personne. C'est la seule énergie qui suit cette courbe

## Il fut une époque où nous étions renouvelables et durables...



Consommation d'énergie par personne, moyenne mondiale 1860-2017. Jancovici, 2018

Jean-Marc Jancovici - Mines ParisTech mai-juin 2019 - www.jancovici.com

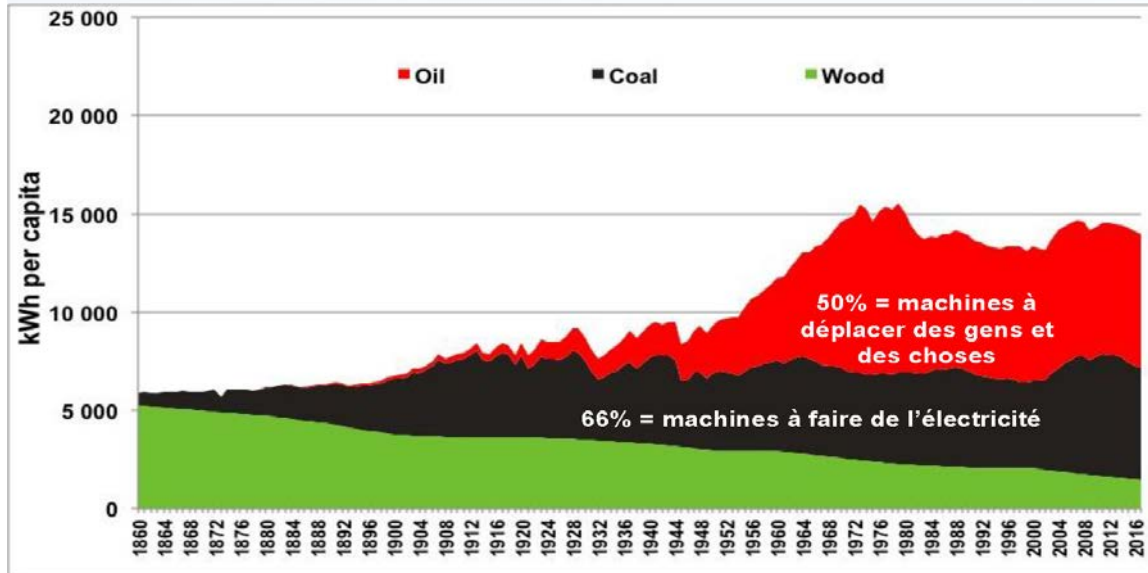
### CHARBON

- le charbon de terre a progressivement remplacé en Europe le charbon de bois pour faire fonctionner les forges puis les machines à vapeur
- atteint aujourd'hui 5000 kw/h par personne et par an
- en hausse constante, n'a jamais baissé, le charbon n'a jamais été une énergie du passé
- "Made in China" = "Made in Charbon" / près de la moitié de la production de charbon dans le monde
- les 2/3 du charbon extrait sert à alimenter des centrales électriques
- 10% pour la métallurgie (charbons à coke)
- le reste, consacré aux réseaux de chaleur, poêles, chauffage domestique ...

Chiffre repère :

- il y a 30 fois plus de centrales à charbon dans le monde que de réacteurs nucléaires en France
- 60 gigawatts d'énergie nucléaire en France / 2000 gigawatts d'énergie charbon dans le monde
- Accords de Paris prévoit la disparition des centrales à charbon en 2050

## Il fut une époque où nous étions renouvelables et durables...



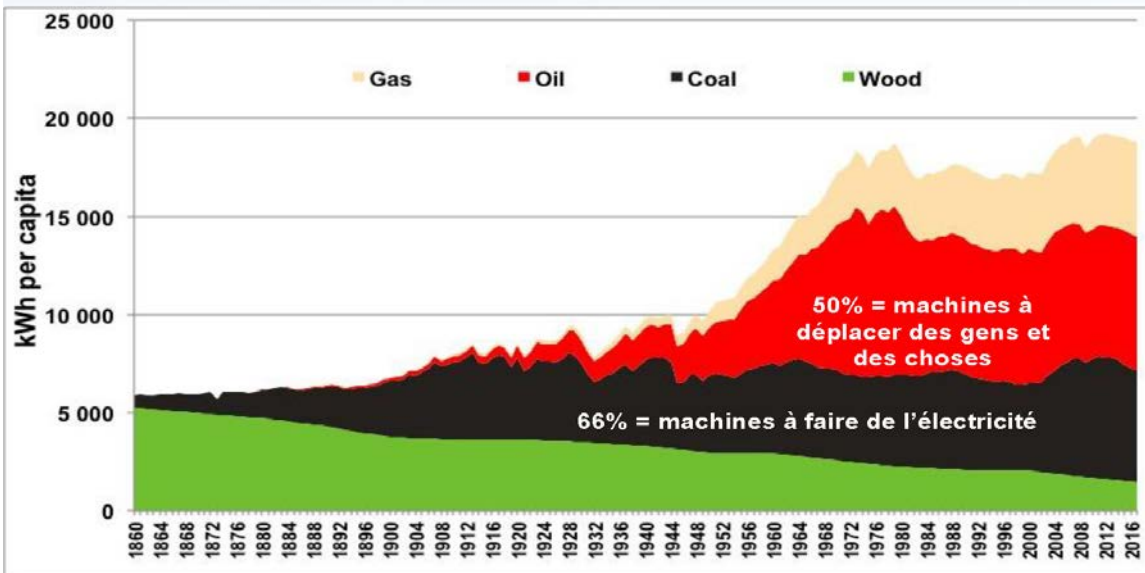
Consommation d'énergie par personne, moyenne mondiale 1860-2017. Jancovici, 2018

Jean-Marc Jancovici - Mines ParisTech mai-juin 2019 - [www.jancovici.com](http://www.jancovici.com)

## PETROLE

- le pétrole n'a jamais remplacé le charbon, il s'est ajouté à l'utilisation du charbon
- le pétrole a un usage complètement différent du charbon : pétrole = énergie de la mobilité car
  - a le meilleur ratio énergie transportée par unité de volume, cette densité permet l'autonomie, d'emporter son énergie avec son moyen de transport (contrairement à l'électricité, dont les moteurs sont pourtant plus efficaces)
  - facilement stockable et manipulable
  - 98% de ce qui roule, vole ou navigue utilise du pétrole
- années 70 :
  - "épisodes" des chocs pétroliers, arrêt soudain de l'augmentation de la quantité de pétrole disponible par personne
  - les chocs pétroliers ne sont pas un épisode de prix, c'est l'arrêt d'un monde en expansion rapide

## Il fut une époque où nous étions renouvelables et durables...



Consommation d'énergie par personne, moyenne mondiale 1860-2017. Jancovici, 2018

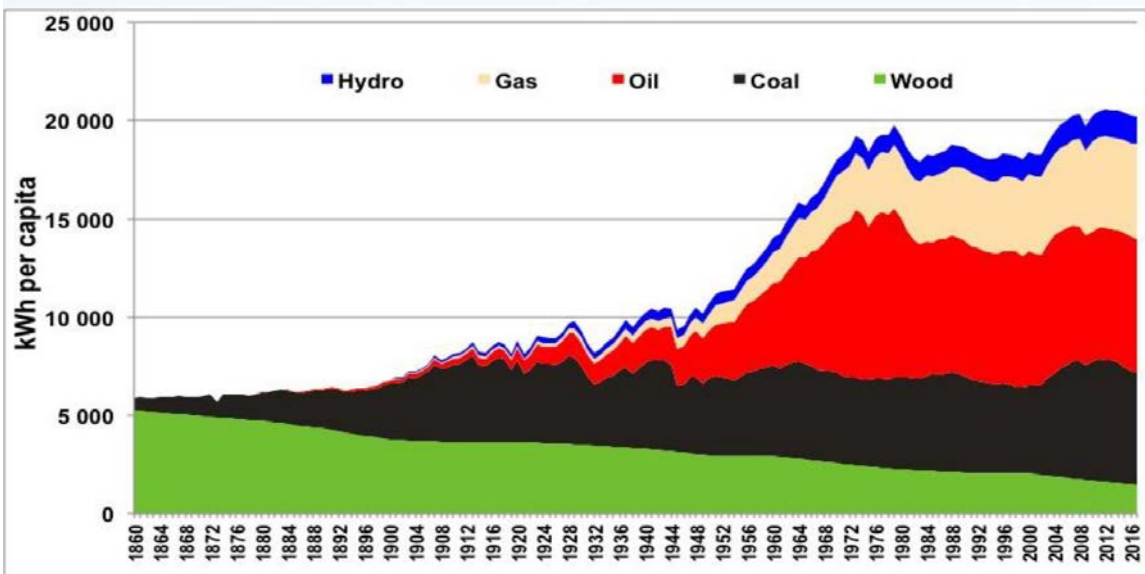
Jean-Marc Jancovici - Mines ParisTech mai-juin 2019 - [www.jancovici.com](http://www.jancovici.com)

GAZ

- le gaz arrive après le pétrole, s'y ajoute sans s'y substituer

HYDROELECTRICITE,

## Il fut une époque où nous étions renouvelables et durables...

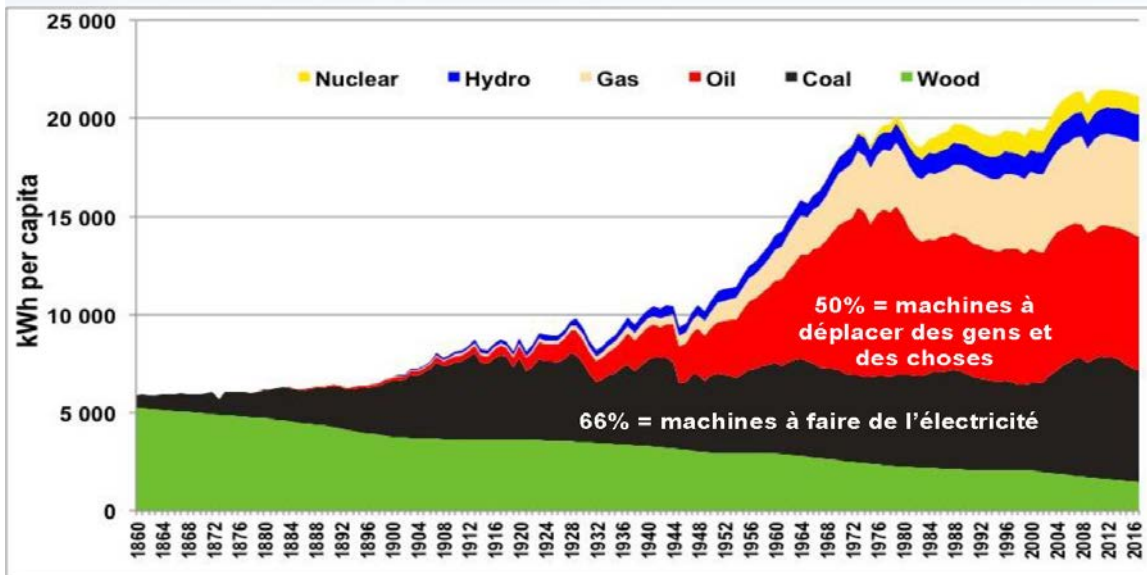


Consommation d'énergie par personne, moyenne mondiale 1860-2017. Jancovici, 2018

Jean-Marc Jancovici - Mines ParisTech mai-juin 2019 - [www.jancovici.com](http://www.jancovici.com)

NUCLEAIRE,

## Il fut une époque où nous étions renouvelables et durables...

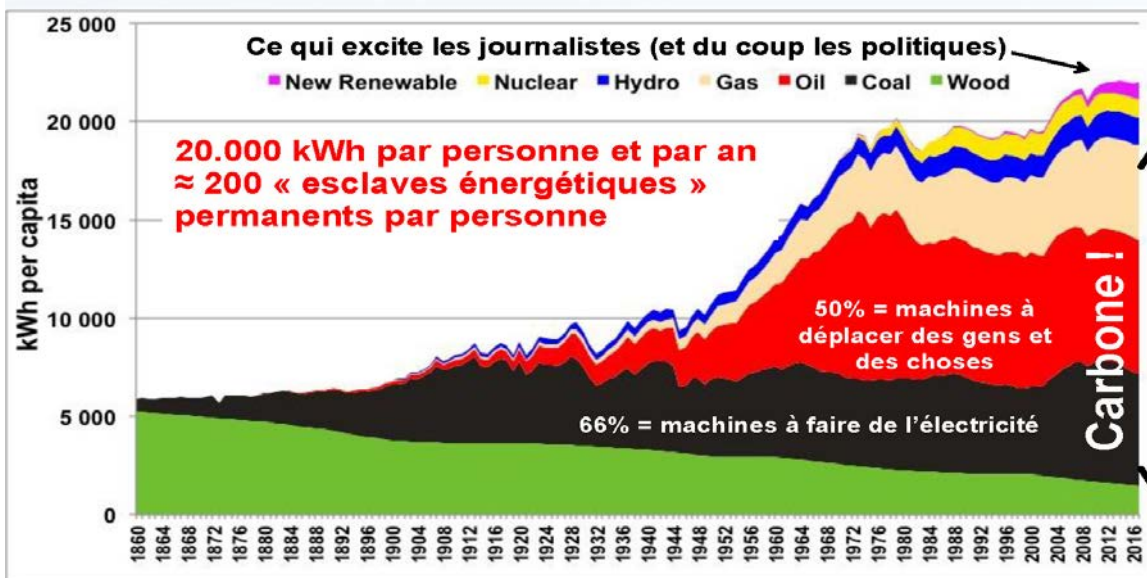


Consommation d'énergie par personne, moyenne mondiale 1860-2017. Jancovici, 2018

Jean-Marc Jancovici - Mines ParisTech mai-juin 2019 - www.jancovici.com

LES NOUVELLES ENERGIES RENOUVELABLES (faible réalité p/r à la place accordée dans l'actualité)

## Miam miam kWh



Consommation d'énergie par personne, moyenne mondiale 1860-2017. Jancovici, 2018

Jean-Marc Jancovici - Mines ParisTech mai-juin 2019 - www.jancovici.com

CONCLUSION SUR L'ÉVOLUTION DES SOURCES D'ÉNERGIE

## Les voici, nos esclaves des temps modernes !



Jean-Marc Jancovici - Mines ParisTech mai-juin 2019 - [www.jancovici.com](http://www.jancovici.com)

### Tendance

- augmentation de l'énergie thermique extracorporelle "consommée" par chaque individu par an : 5000 kw/h en 1860 / 20 000 kw/h aujourd'hui
- soit en énergie mécanique, 200 esclaves énergétiques (moyenne mondiale, 600 pour un Français)
- dit autrement, le parc de machines mis à notre service, notre "exosquelette" revient à multiplier notre force musculaire par 200
- dit encore autrement, la production des machines est celle de 1400 milliards d'individus

### Part des énergies fossiles domine de très loin

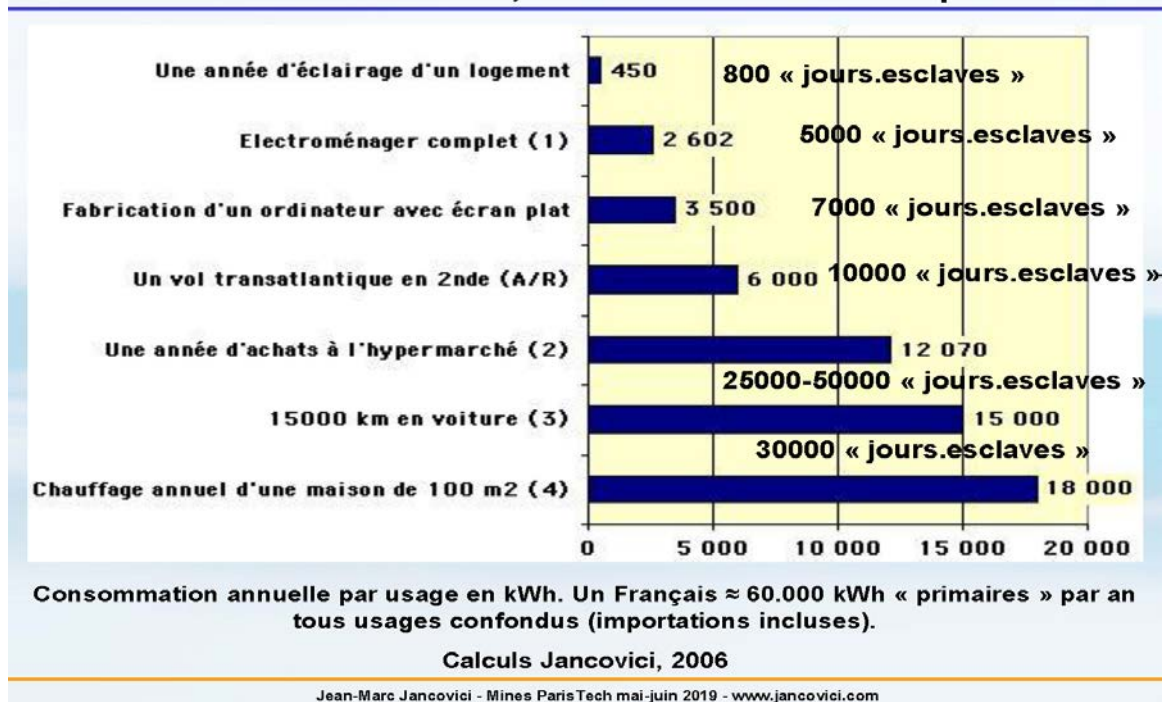
- fossile = "reste de vie ancienne"
- charbon : fossilisation de fougères à l'ère du carbonifère
- pétrole et gaz : fossilisation de planctons et de micro-algues entre plusieurs millions d'années et quelques centaines de milliers d'années
- c'est aux énergies fossiles et au parc de machines que les humains doivent
- leur exosquelette
- leur espérance de vie supérieur à 30 ans
- leurs conditions de vie et la protection sociale
- Les hommes aujourd'hui ne sont nécessaires à la production que pour piloter des machines.
- Autre avantage procuré par les énergies fossiles extraites du sous-sol : elles libèrent toute la surface pour les activités humaines (plus besoin de surface pour les animaux de trait ou de transport).
- Les machines "mangent" du sous-sol et revenir aux énergies renouvelables fait ressurgir la question de conflits d'usage des sols (exemple conflit cultures à usage énergétique en conflit avec cultures à usage alimentaire)
- les énergies fossiles sont les énergies qui continuent à augmenter le plus fortement dans le monde, et en premier le charbon (14 fois plus que le solaire et 6 fois plus que l'éolien)
- parts des énergies primaires en 2017 :
  - pétrole : 34,2%
  - charbon : 27,6 %
  - gaz : 23,4 %
  - hydroélectricité : 6,8 %
  - nucléaire : 4,4 %

- éolien : 1,9 %
- géothermie et biomasse : 1 %
- solaire : 0,7 %

---

## POSTES DE DEPENSE DE L'ENERGIE

### En kWh, les hommes sont très primaires...



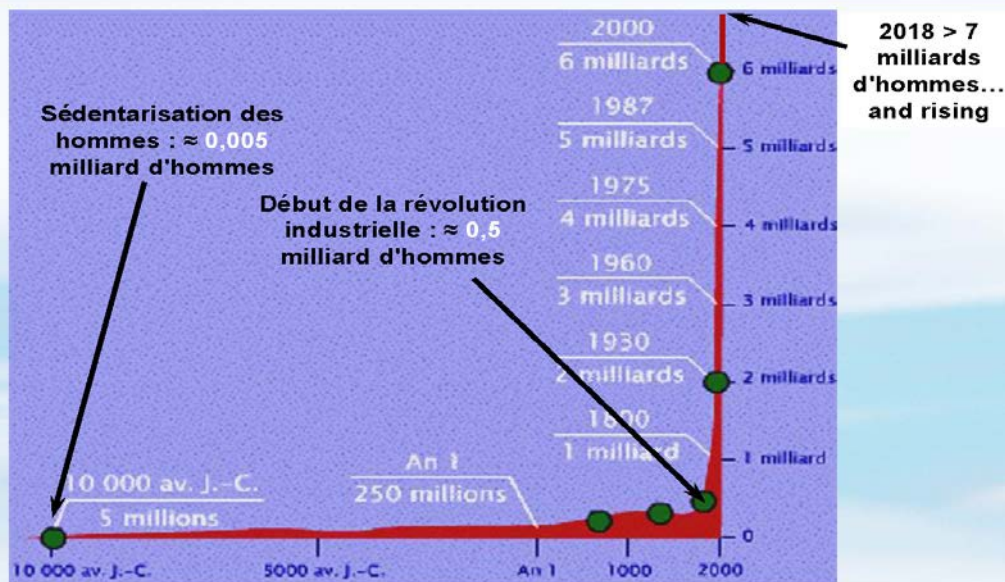
Ce n'est pas avec des petits gestes qu'on évite de gros problèmes.

- la fréquence des achats / déplacements, la façon de se déplacer et le nombre de kilomètres
- chauffage, taille du logement

---

## QUESTION DE L'EXPLOSION DEMOGRAPHIQUE

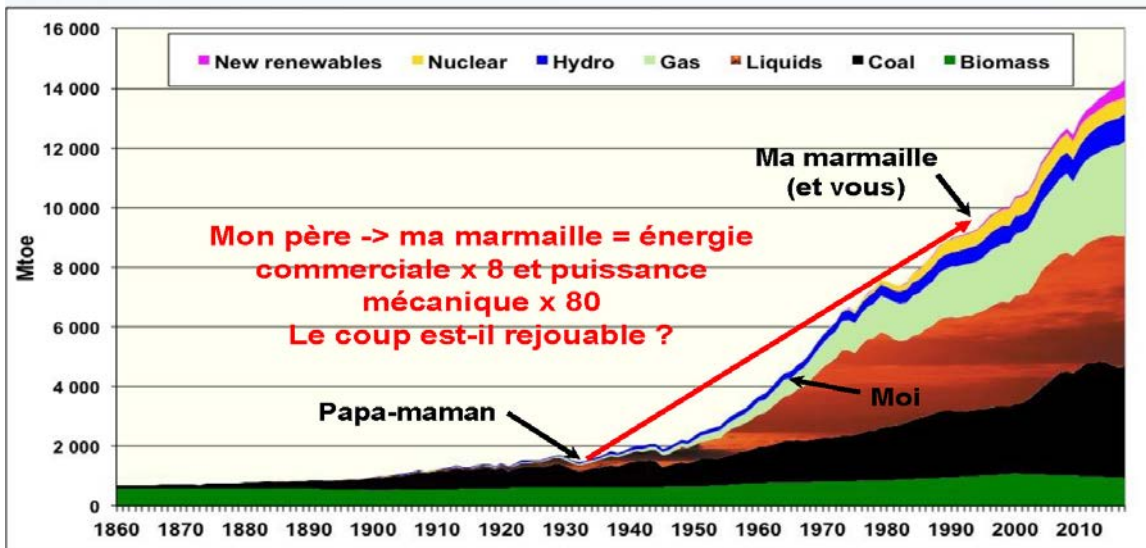
## Un autre changement d'ordre de grandeur : la population



Jean-Marc Jancovici - Mines ParisTech mai-juin 2019 - www.jancovici.com

- 10000 ans néolithique, sédentarisation des hommes permise par une très forte stabilité du climatique : quelques millions d'hommes sur terre
- 1800 : 1 milliard
- 2020 : 7 milliards

## Gaz et électricité à tous les étages : au résultat



Parc de machines en service  $\div 10$  dans le monde 1860-2016. Jancovici, 2017

Jean-Marc Jancovici - Mines ParisTech mai-juin 2019 - www.jancovici.com

- > explosion démographique est 1 des conséquences de l'exploitation des énergies fossiles
  - augmentation des rendements agricoles
  - facilité de transport des denrées alimentaires
  - capacité à conserver les aliments dans le temps
  - mise à disposition de l'eau potable et assainissement des centres urbains
  - ...

## Population x 1000 + énergie x 10 = croissance attitude

La « taille de la boîte »  
(l'environnement) **est en**  
**train de devenir un**  
**problème majeur**

La « taille de la boîte »  
(l'environnement) **n'est pas**  
**vraiment un problème**

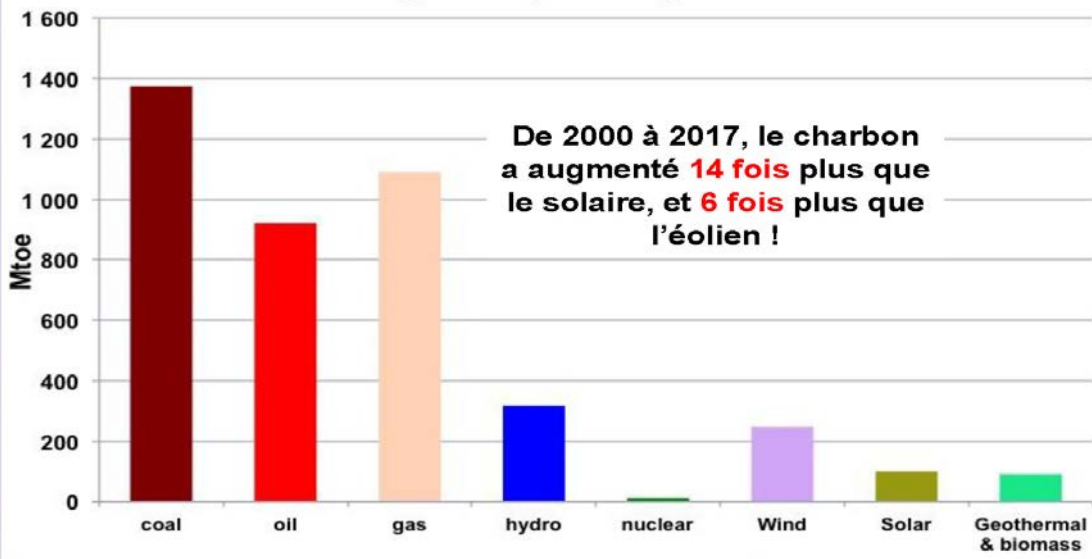
Si l'énergie, c'est - par définition - la modification d'un système, voici l'évolution de notre marque sur l'environnement

Jean-Marc Jancovici - Mines ParisTech mai-juin 2019 - www.jancovici.com

> inversement, à partir du moment où on entre en décreue énergétique forte :  
-- se pose la question de la faculté à nourrir 7 milliards d'individus

## King coal is back

Total World, energy consumption change 2000 - 2017, Mtoe

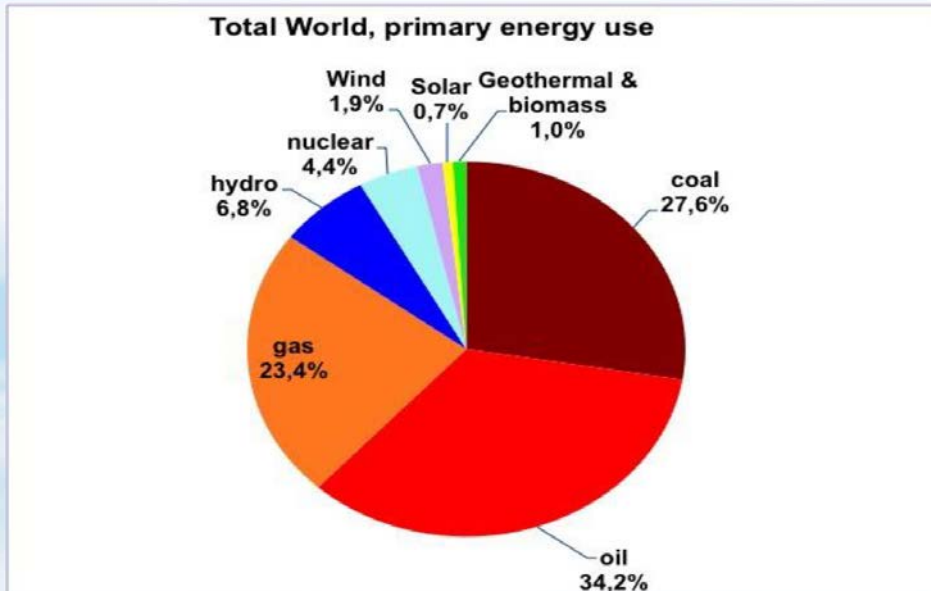


Surplus de consommation mondiale par énergie entre 2000 et 2016. Jancovici, sur données BP Statistical Review 2017 & divers

Jean-Marc Jancovici - Mines ParisTech mai-juin 2019 - www.jancovici.com



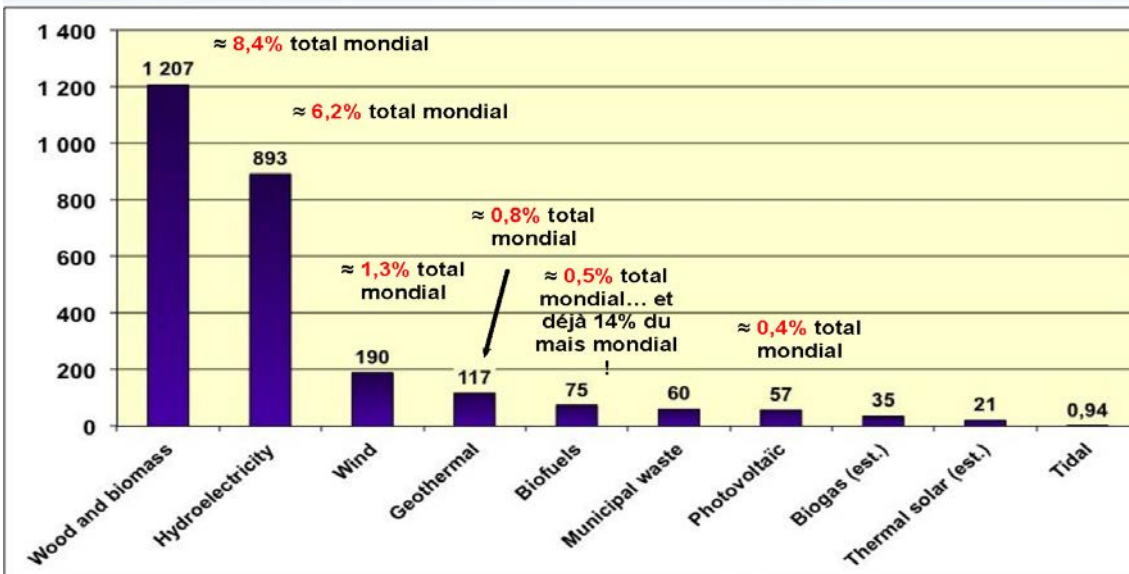
## Gaz et électricité à tous les étages : au résultat (bis)



Décomposition de la consommation mondiale d'énergie primaire en 2017. Données BP statistical review

Jean-Marc Jancovici - Mines ParisTech mai-juin 2019 - www.jancovici.com

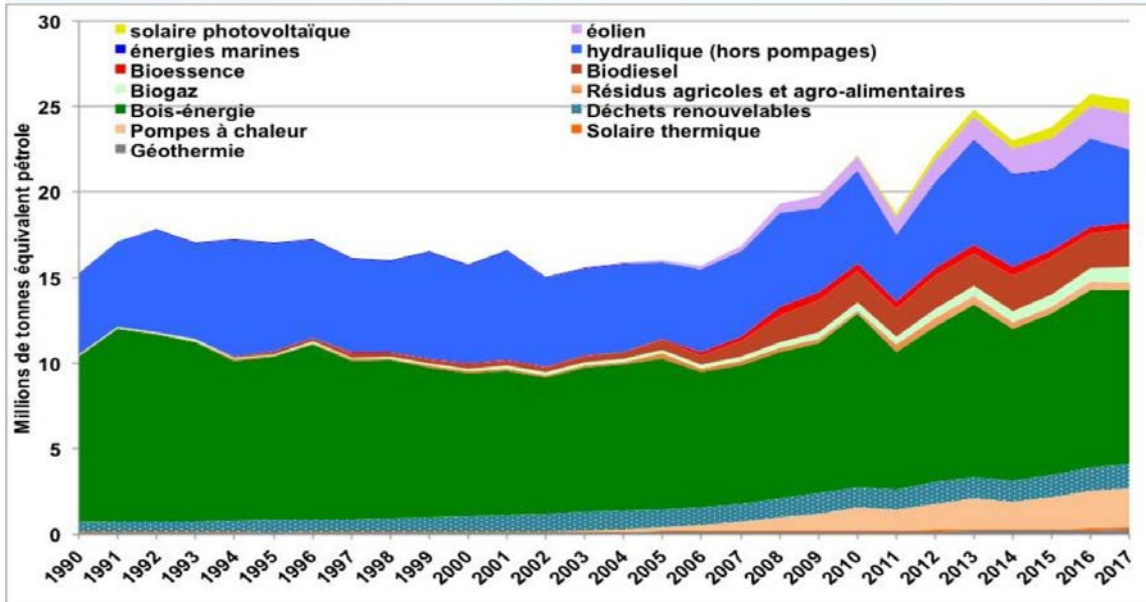
## Quid des énergies renouvelables ?



Contribution des énergies renouvelables au bilan énergétique mondial en 2015. Toutes les sources purement électriques sont en équivalent primaire. Compilation de l'auteur.

Jean-Marc Jancovici - Mines ParisTech mai-juin 2019 - www.jancovici.com

## Quid des énergies renouvelables tricolores ?



Energies renouvelables « produites » en France. Toutes les sources purement électriques sont en équivalent primaire. Ministère de la transition écologique, 2019

Jean-Marc Jancovici - Mines ParisTech mai-juin 2019 - [www.jancovici.com](http://www.jancovici.com)

Consommation d'énergie + augmentation de la population = impact sur l'environnement  
-- un problème d'ordres de grandeur  
-- système climatique mis en instabilité

## Chapitre 04 - Les effets de l'abondance énergétique sur les secteurs économiques

--- Fixation des prix de l'énergie

## L'énergie plus chère ? Allons donc !



Prix du baril de 1861 à 2017 en \$ de 2017.  
Source BP Statistical Review, 2018



Reconstruction du PIB par habitant aux USA depuis 1860 (le PIB est une notion qui date du début du 20<sup>e</sup> siècle)

Source : Historical Statistics for the World Economy, Angus Maddison, 2007

**En 100 ans, le prix d'un kWh mécanique a été divisé par 30 à 50 en occident -> diviseur identique sur le cout de création d'un flux physique**

Jean-Marc Jancovici - Mines ParisTech mai-juin 2019 - www.jancovici.com

> pas lié à l'abondance ou à la rareté mais à son accessibilité et également prix asservi à celui du pétrole

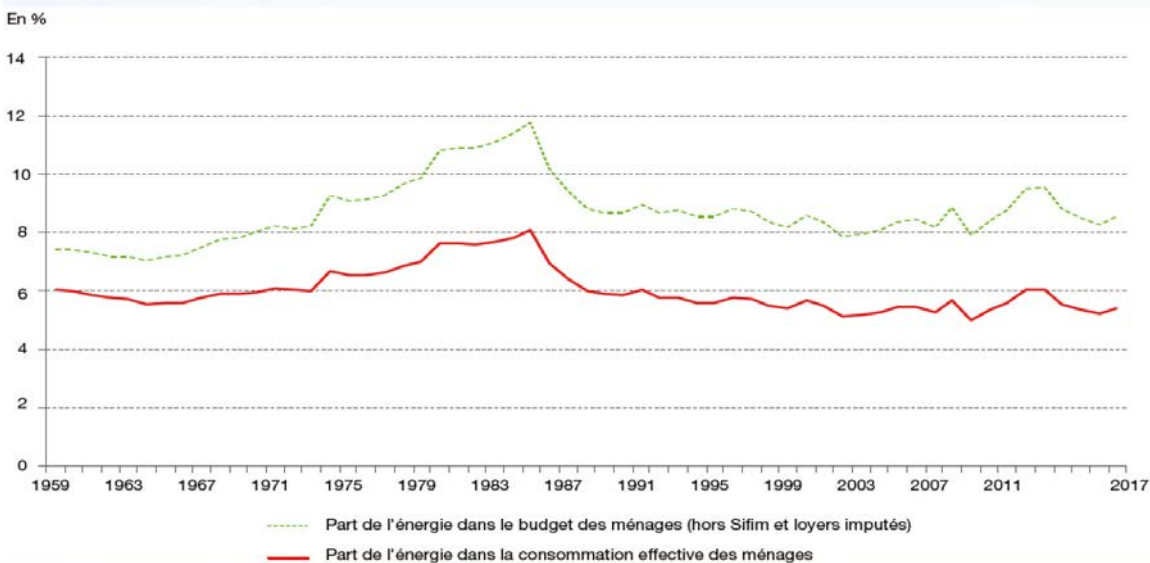
Rapporter le prix du pétrole au PIB par personne permet de mesurer la véritable évolution :

- du prix du baril de pétrole, divisé par 15 à 20 entre 1860 et aujourd'hui
- avec l'augmentation dans le même temps de l'efficacité des machines, le prix du kw/h mécanique a été divisé par 50 à 100 en Occident

> 50 à 100 correspond au différentiel de prix entre

- les énergies renouvelables anciennes
- les énergies fossiles modernes

## Plus chère l'énergie ? La bonne blague ! (bis)



Général au Développement Durable, 2017

Jean-Marc Jancovici - Mines ParisTech mai-juin 2019 - www.jancovici.com

> multiplication par plusieurs dizaines voire centaines de la capacité de transformation de l'environnement par l'homme équipé de machines

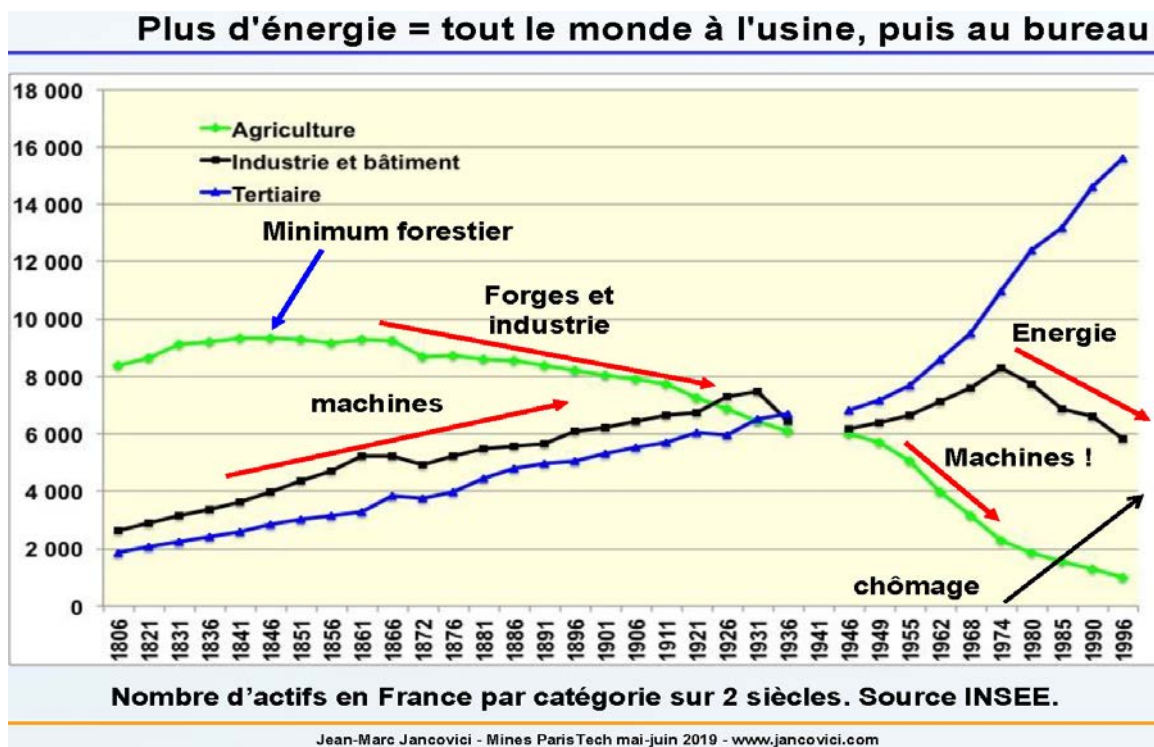
> avec pour corollaire, la multiplication des effets indésirables :

- suppression de surfaces pour la faune et flore sauvage = perte de biodiversité

- dispersion de substances polluantes dans l'environnement, en quantités de plus en plus grandes au fur et à mesure que l'homme augmente les flux de transformation

--- Evolution dynamique des secteurs d'activité en France

Bouleversement des secteurs d'activité économique consécutif au développement de l'énergie abondante



• début XIX, 2/3 de la population dans les champs. La productivité est donc : se nourrir lui + 1/2 personne d'un autre secteur d'activité

• la population paysanne cesse d'augmenter dans la première moitié du XIXe, alors que

--- la productivité des paysans n'a pas beaucoup augmenté

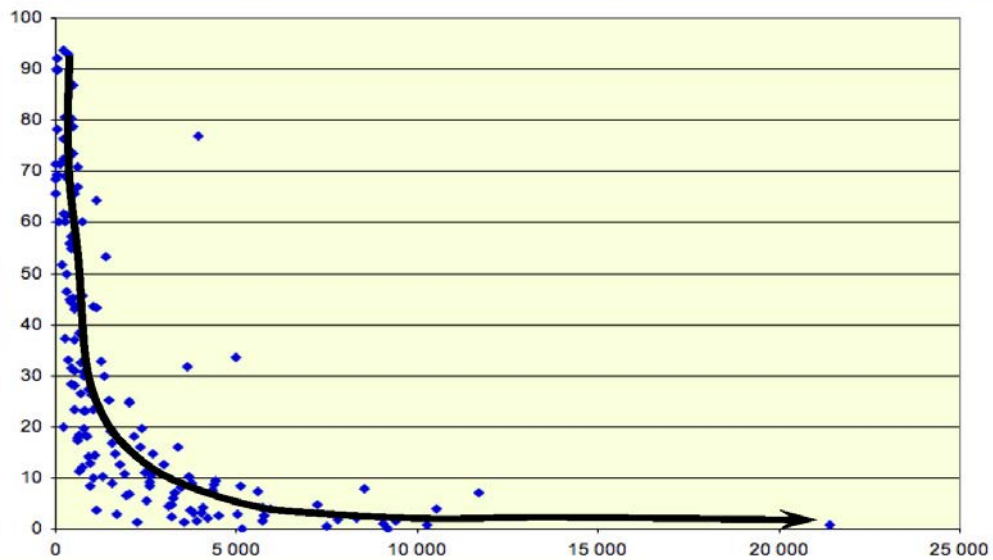
--- et la population augmente

> cette évolution s'explique par l'augmentation des surfaces cultivées via la déforestation

> en 1850 le minimum forestier est atteint en France avec 15% de la surface du territoire, et souvent parce qu'inexploitable par l'agriculture comme les montagnes (aujourd'hui : 25%)

• la population rurale commence à baisser à partir du milieu du XIXe

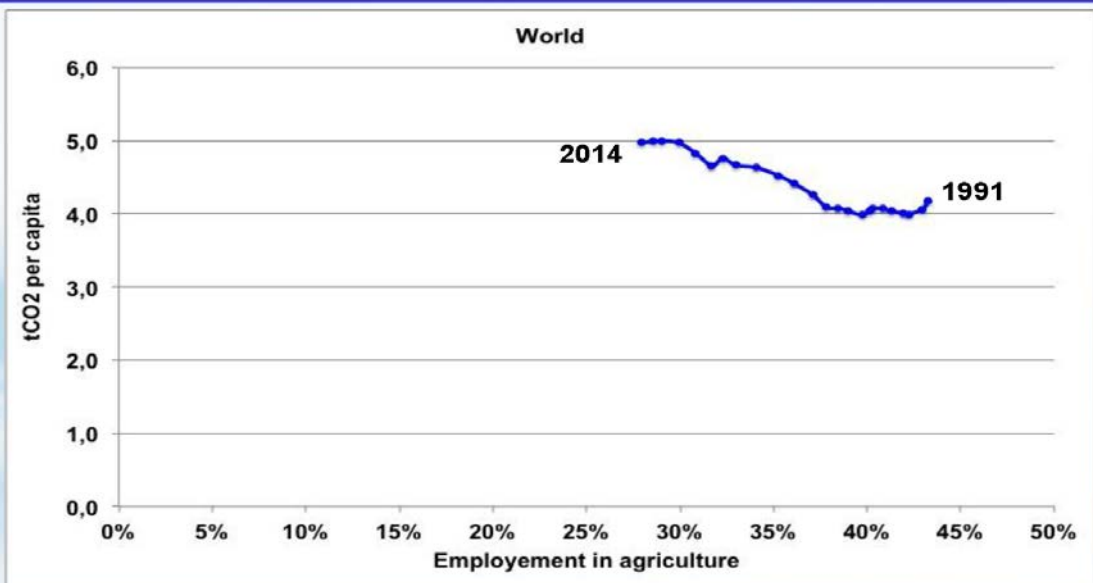
## Plus d'énergie = moins de paysans



Consommation d'énergie par personne et par an (kep) vs. % de l'emploi dans l'agriculture. Sources WRI, US DOE

Jean-Marc Jancovici - Mines ParisTech mai-juin 2019 - [www.jancovici.com](http://www.jancovici.com)

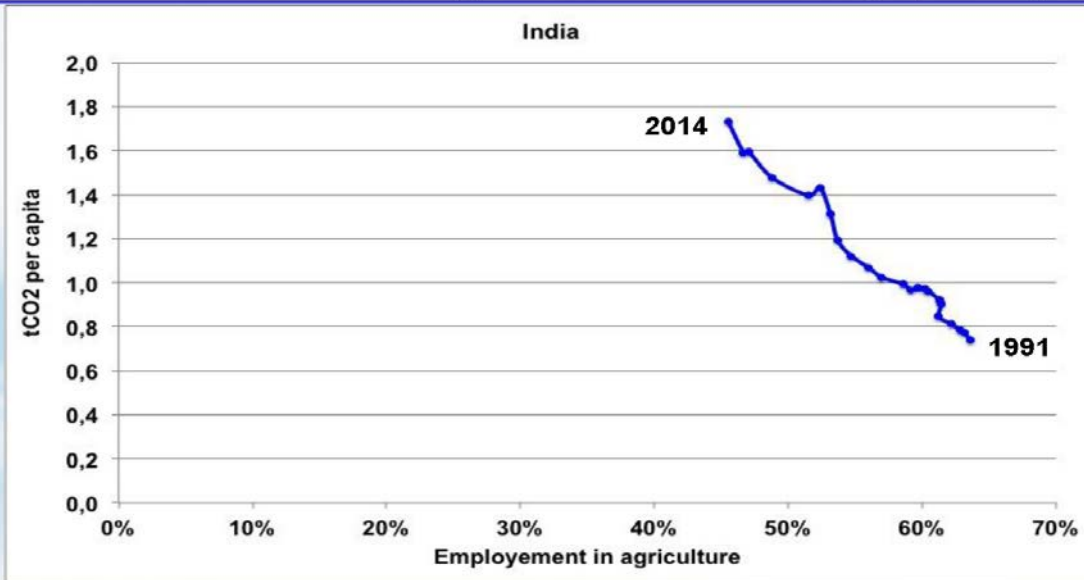
## Plus d'énergie fossile = moins de paysans



Emissions de CO<sub>2</sub> par personne vs. % de l'emploi dans l'agriculture dans le monde. Sources World Bank

Jean-Marc Jancovici - Mines ParisTech mai-juin 2019 - [www.jancovici.com](http://www.jancovici.com)

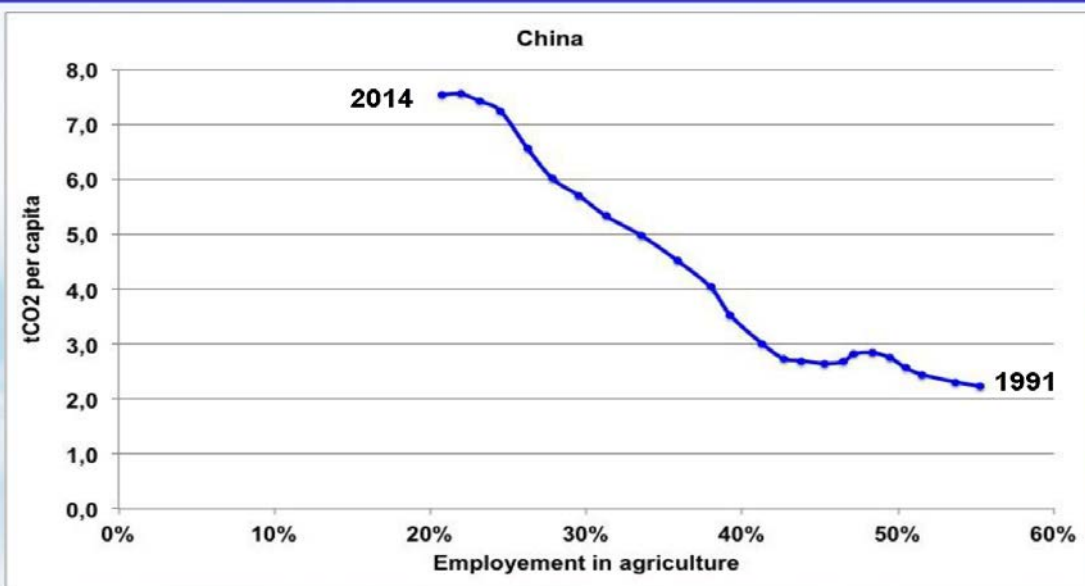
## Plus d'énergie fossile = moins de paysans (bis)



Emissions de CO<sub>2</sub> par personne vs. % de l'emploi dans l'agriculture en Inde. Sources World Bank

Jean-Marc Jancovici - Mines ParisTech mai-juin 2019 - [www.jancovici.com](http://www.jancovici.com)

## Plus d'énergie fossile = moins de paysans (ter)



Emissions de CO<sub>2</sub> par personne vs. % de l'emploi dans l'agriculture en Inde. Sources World Bank

Jean-Marc Jancovici - Mines ParisTech mai-juin 2019 - [www.jancovici.com](http://www.jancovici.com)

--- l'industrie et ses forges fournissent des équipements pour la culture des champs (développement des colliers de traits, des charrues, ...)

--- la productivité augmente grâce aux auxiliaires "machines" apportés dans les champs

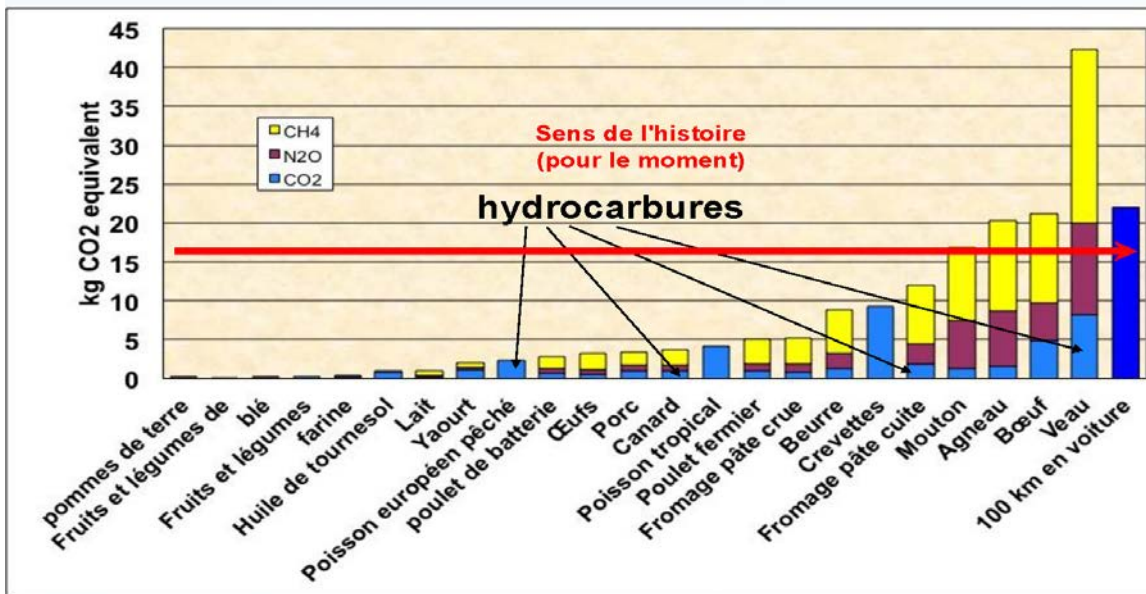
--- cela "libère des bras" pour les autres secteurs de l'économie

• mi-XXe, chute sensible des effectifs du secteur primaire

--- du fait des tracteurs et des engrais made in usa

--- entre 1945 et 1975, le rendement céréalier en Beauce a été multiplié par 7

## Miam miam kWh pour de vrai



Source : Jancovici/Ademe, 2009

Jean-Marc Jancovici - Mines ParisTech mai-juin 2019 - www.jancovici.com

Approvisionnement énergétique croissant

> mise en route d'une quantité croissante de machines

> création d'emplois dans le secteur secondaire pour "piloter" ces nouvelles machines (exemple : travail à la chaîne)

L'approvisionnement énergétique augmente plus vite par personne que la taille unitaire de la machine

> dans ce contexte, la création de machines de plus en plus grosses n'empêche pas de créer de plus en plus d'emplois

Les chocs pétroliers mettent fin à la croissance exponentielle de l'approvisionnement énergétique

> l'approvisionnement énergétique par personne augmente moins vite que la taille unitaire de la machine  
> la taille unitaire de la machine continue d'augmenter, il y a besoin de moins en moins de personnes pour piloter les machines, de plus en plus grosses / qui produisent plus  
(la production industrielle a doublé en France entre 1974 et 2007)

> baisse des effectifs du secteur secondaire

> et apparition d'une nouvelle catégorie de population : les chômeurs

--- l'approvisionnement énergétique par personne n'augmentant plus

--- la productivité du travail (= adjoindre des machines) augmente peu

--- les emplois existants sont trop productifs pour que dans une économie qui a cessé de croître rapidement, il y ait des emplois pour tous les salariés

--- dit autrement, la seule solution pour éliminer le chômage, serait de diminuer la productivité au travail (système libéraux anglais, Etats-Unis et allemand des petits boulots ou chômage de masse)

Le secteur tertiaire

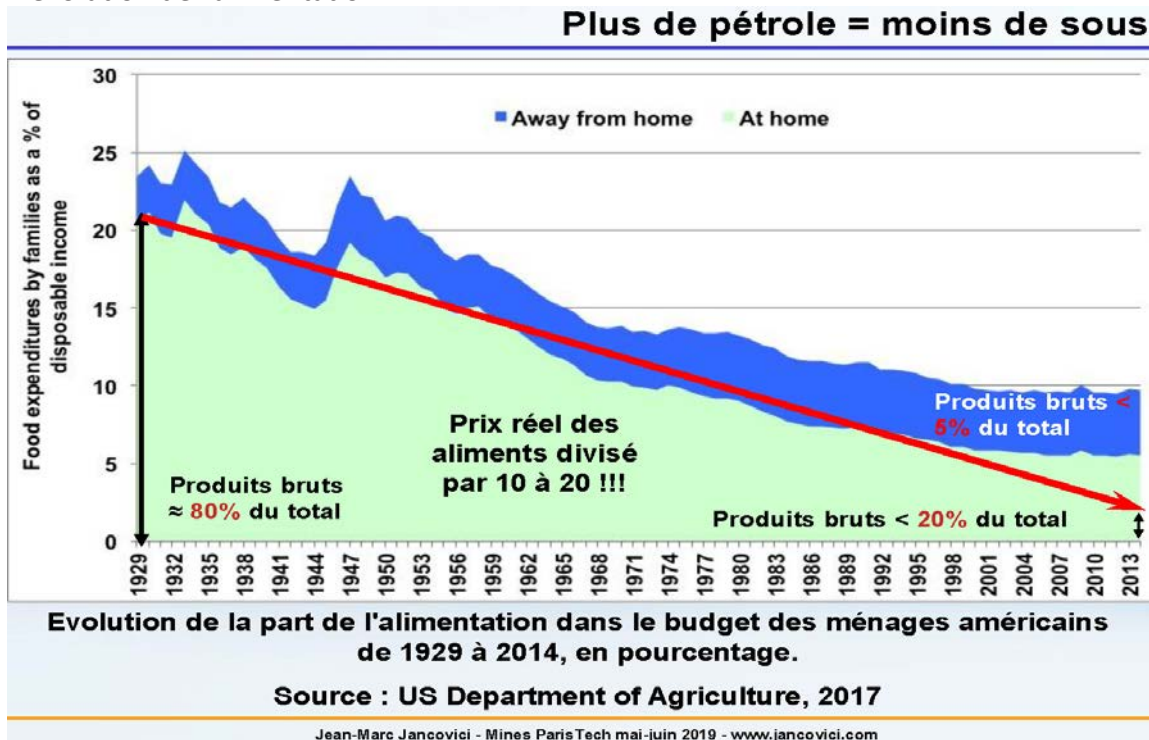
= emplois asservis à l'industrie : les emplois de services n'existent pas sans flux physiques

= un secteur tertiaire n'est absolument pas dématérialisé, c'est l'inverse : il s'agit d'une société occupée à gérer de très nombreux flux physiques

A partir de 2007, date à laquelle la production industrielle cesse d'augmenter, on observe un impact sur le nombre d'emplois dans les services

---- Correspondances

- Consommation d'énergie par personne par an vs le % d'actifs dans l'agriculture
  - plus la quantité d'énergie utilisée par personne est élevée
  - moins le secteur primaire est important
  - > la quantité d'énergie utilisée par personne = nb de machines à sa disposition)
- Emissions de CO2 par personne vs le % d'actifs dans l'agriculture
  - plus les émissions augmentent, moins il y a d'agriculteurs dans la population active
  - > dit autrement, augmenter le parc de machines = fonte des effectifs du secteur primaire, exode rural
- évolution de l'alimentation

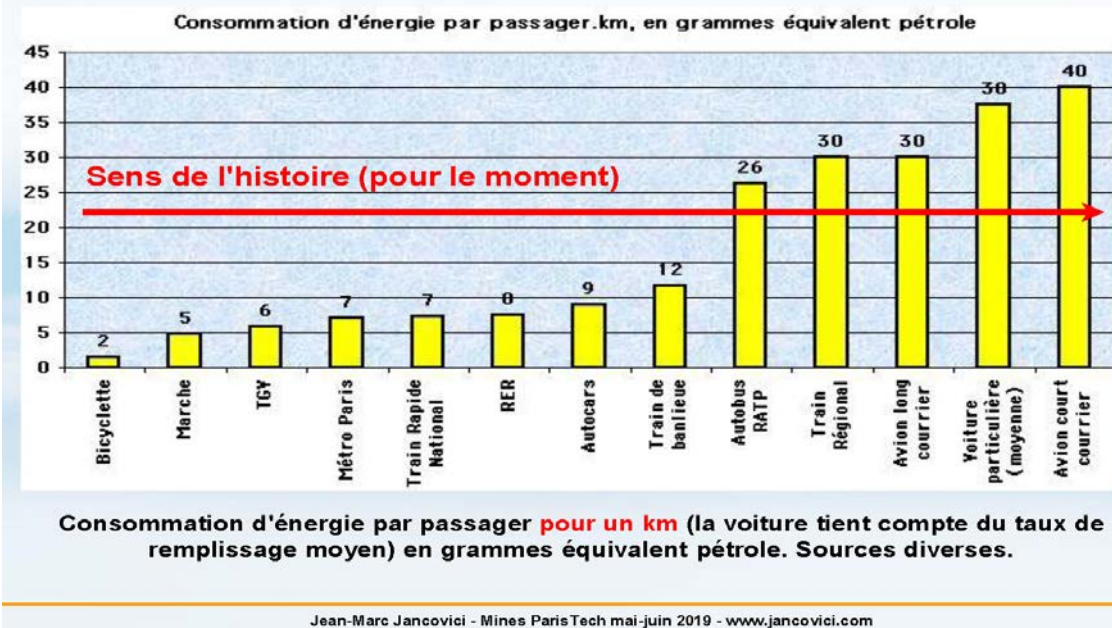


- 80% de ce qui pousse dans les pays occidentaux sert à nourrir des animaux (100% prairies, quasiment tout le maïs, quasi-totalité du soja cultivé dans le monde, 50% du blé ...)
- la possibilité de manger des animaux de plus en plus gros, est la marque d'une société sous perfusion énergétique
- productivité accrue du fait des machines rend l'alimentation (dont l'alimentation carnée) de moins en moins chère
- 25% du budget d'un ménage américain en 1930
- 10% aujourd'hui et dans ces 10%, 80% est acheté au supermarché et donc le coût est celui
- > des salaires (caissières, transporteurs, intermédiaires, ...)
- > le produit brut représente entre 1/3 de la facture et 3%
- > exemple oeuf vendu 25cts dans un supermarché est acheté en sorti de ferme 6 cts
- > le vrai prix de la nourriture en fait divisé par un facteur 20 en 1 siècle, grâce à l'abondance énergétique
- 80% de produits bruts en 1930 / moins de 20% aujourd'hui

## Chapitre 05 - Les effets de l'abondance énergétique sur les modes de vie



**Transports : plus c'est moderne, et plus cela pompe...**



--- L'abondance énergétique permet la diversification et le développement des moyens de transport.

Consommation d'énergie par passager.km en grammes équivalent pétrole :

- vélo 2 gr
- marche 5 gr
- TGV 6 gr
- Autocars 9 gr
- Trains de banlieue 12 gr
- Trains régionaux 30 gr
- Avions longs courriers 30 gr
- Voiture particulière 38 gr
- Avions courts courriers 40 gr

>> Classer ces modes de transport du plus énergivore au moins énergivore.

Marche / Vélo / Bus / Train / Avion / Voiture

> plus un moyen est moderne, plus sa consommation d'énergie est élevée

> parce que l'énergie était abondante, l'évolution des transports a consisté à aller des moyens de locomotion économes vers des moyens toujours plus énergivores

## Qu'est-ce qu'une voiture exactement ?

Une voiture, ce n'est qu'un moyen de transport ? Pas vraiment ! C'est aussi :

Une pièce supplémentaire sur roulettes, avec ses objets, sa radio, ses odeurs, ses repères.... (« service » majeur oublié dans les calculs)



Et... un objet de statut social (« service » majeur oublié dans les calculs)

Jean-Marc Jancovici - Mines ParisTech mai-juin 2019 - [www.jancovici.com](http://www.jancovici.com)

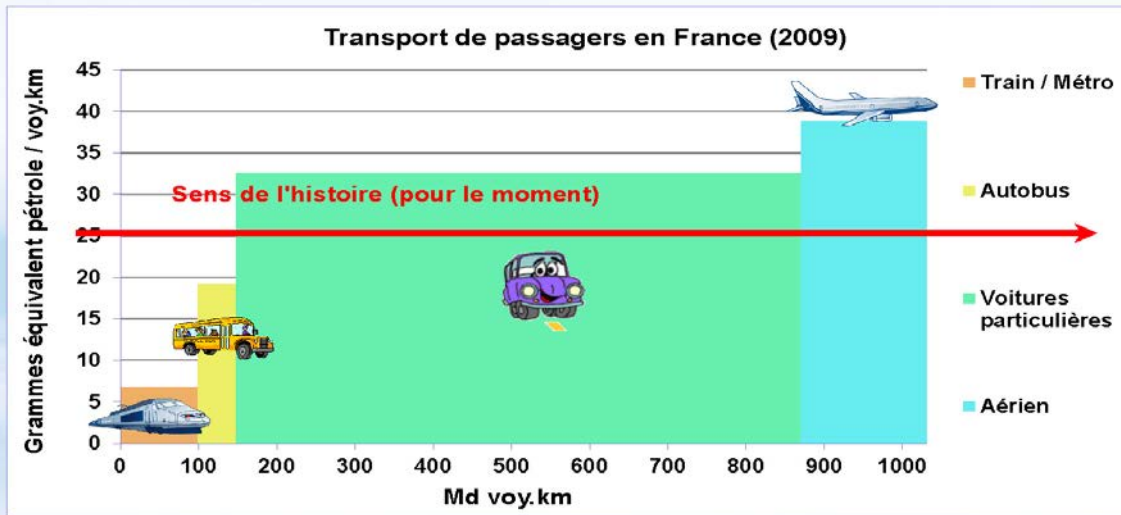
## Qu'est-ce qu'une voiture exactement ? (bis)



Est-ce : une voiture, accessoirement autonome ? Un salon, accessoirement mobile ? Un poste de travail, accessoirement mobile ? Un ordinateur sur roues, qui accessoirement transporte du monde ? Un truc inutile mais qui sert à afficher son statut ?

Jean-Marc Jancovici - Mines ParisTech mai-juin 2019 - [www.jancovici.com](http://www.jancovici.com)

## Et je dirais même plus : plus c'est moderne, plus ça pompe...

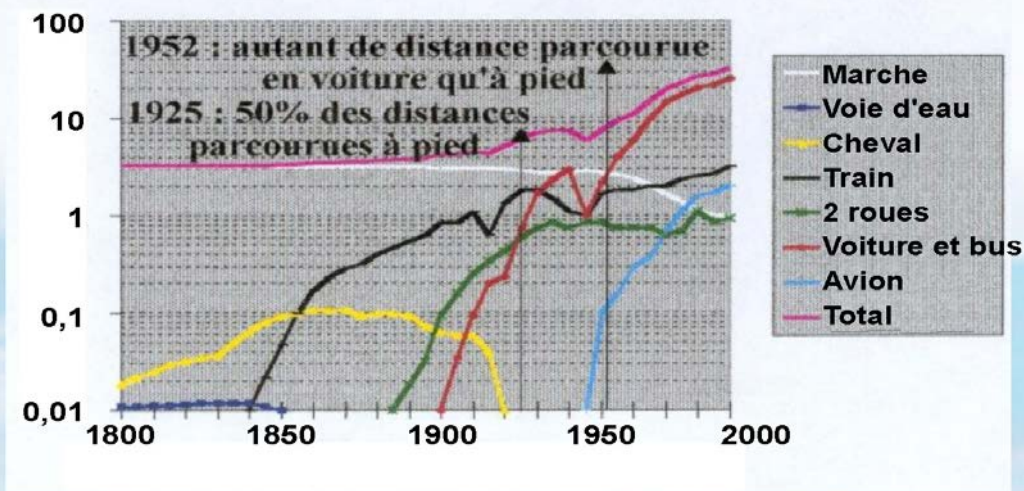


Source des données : Compte des transport 2009, Mémento du tourisme 2009, Calculs Carbone 4

Jean-Marc Jancovici - Mines ParisTech mai-juin 2019 - www.jancovici.com

Un aller / retour Paris - New-York équivaut à 400 / 500 litres de pétrole par voyageur. Cela correspond à la consommation annuelle d'un automobiliste.

## Transports : plus loin, plus vite, moins cher (pour l'instant)



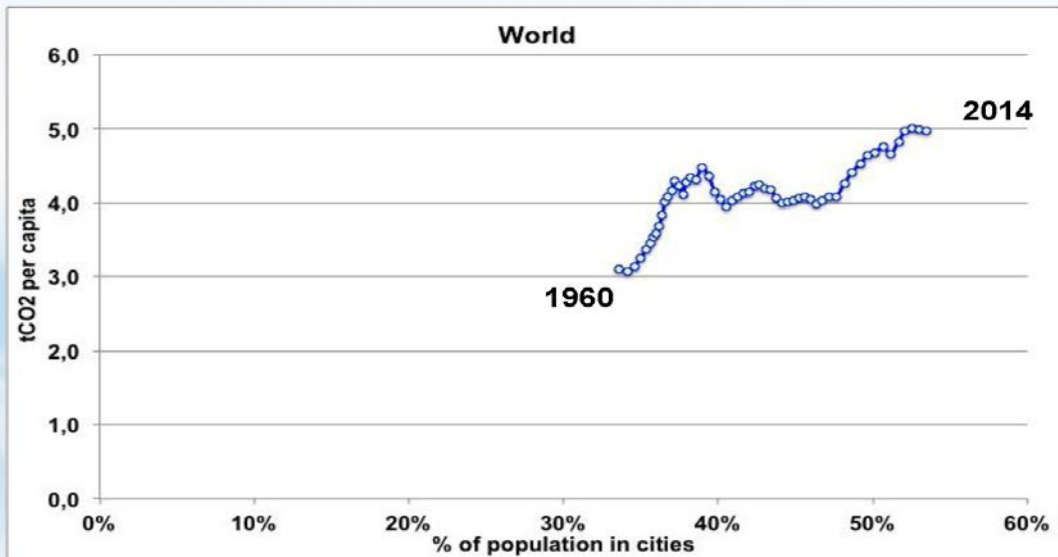
Evolutions des distances parcourues par personne et par jour, en France, depuis 1800.

Grübler & Nakicenovic, 1991 et estimations de Francis Papon pour la marche

Jean-Marc Jancovici - Mines ParisTech mai-juin 2019 - www.jancovici.com

MODE DE VIE URBAIN

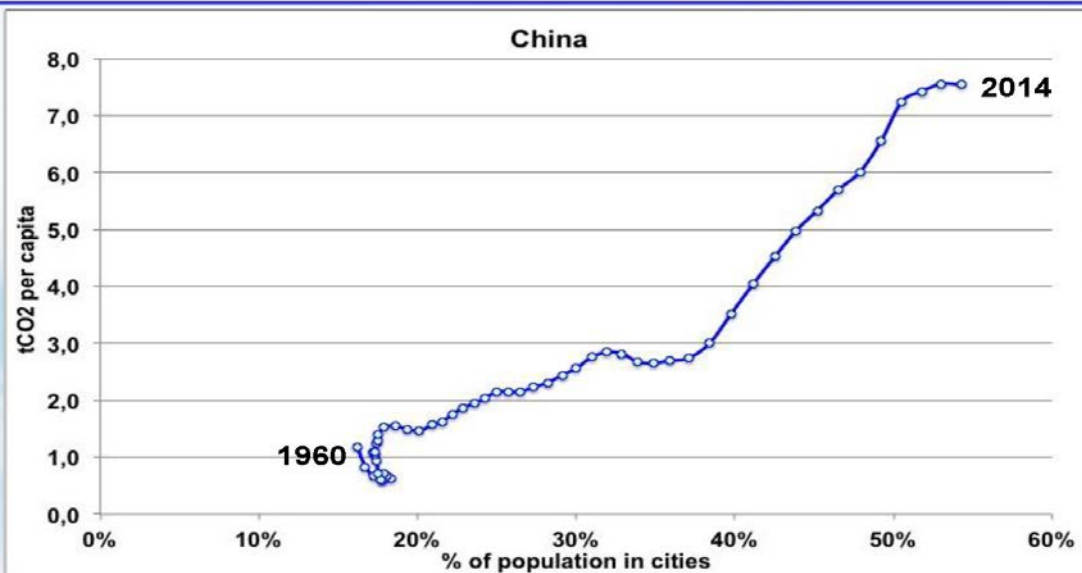
## Plus d'énergie fossile = plus de villes !



Fraction de la population dans les villes vs émissions de CO2 par personne dans le monde. Données Banque Mondiale

Jean-Marc Jancovici - Mines ParisTech mai-juin 2019 - [www.jancovici.com](http://www.jancovici.com)

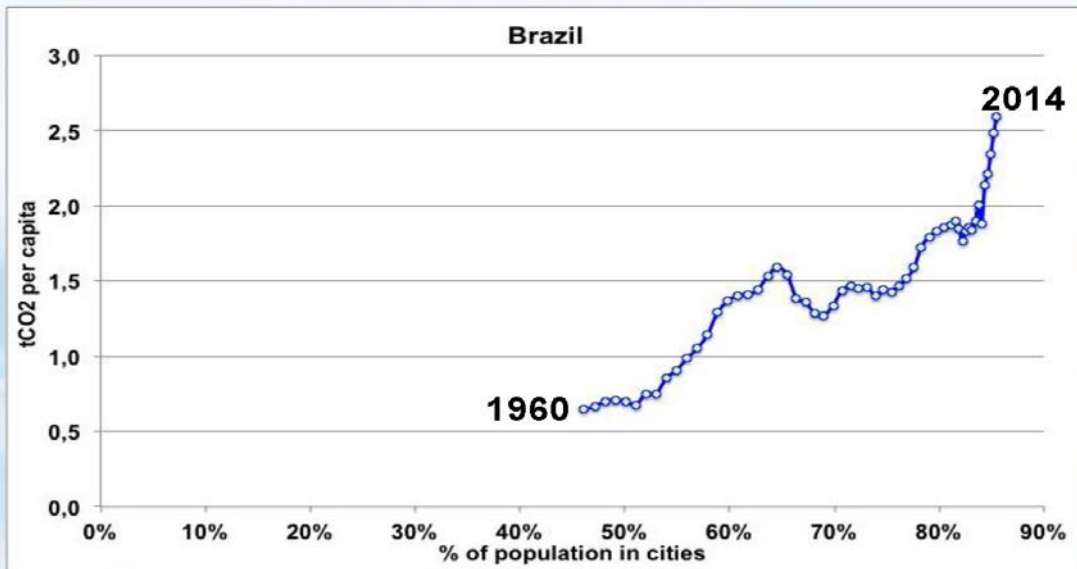
## Plus d'énergie fossile = plus de villes !



Fraction de la population dans les villes vs émissions de CO2 par personne en Chine. Données Banque Mondiale

Jean-Marc Jancovici - Mines ParisTech mai-juin 2019 - [www.jancovici.com](http://www.jancovici.com)

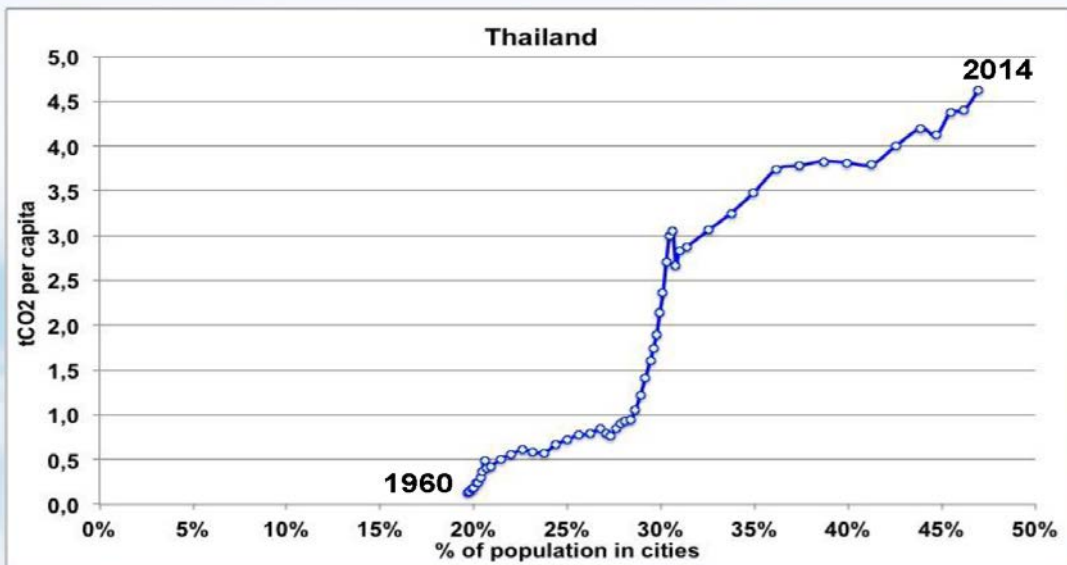
## Plus d'énergie fossile = plus de villes !



Fraction de la population dans les villes vs émissions de CO2 par personne au Brésil. Données Banque Mondiale

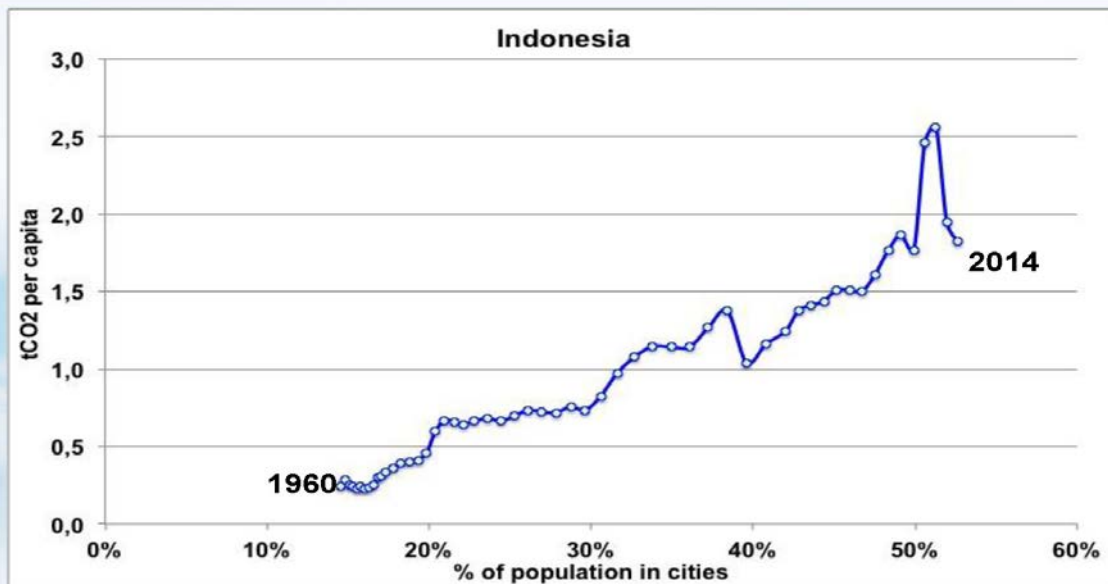
Jean-Marc Jancovici - Mines ParisTech mai-juin 2019 - [www.jancovici.com](http://www.jancovici.com)

## Plus d'énergie fossile = plus de villes !



Fraction de la population dans les villes vs émissions de CO2 par personne en Thaïlande. Données Banque Mondiale

Jean-Marc Jancovici - Mines ParisTech mai-juin 2019 - [www.jancovici.com](http://www.jancovici.com)



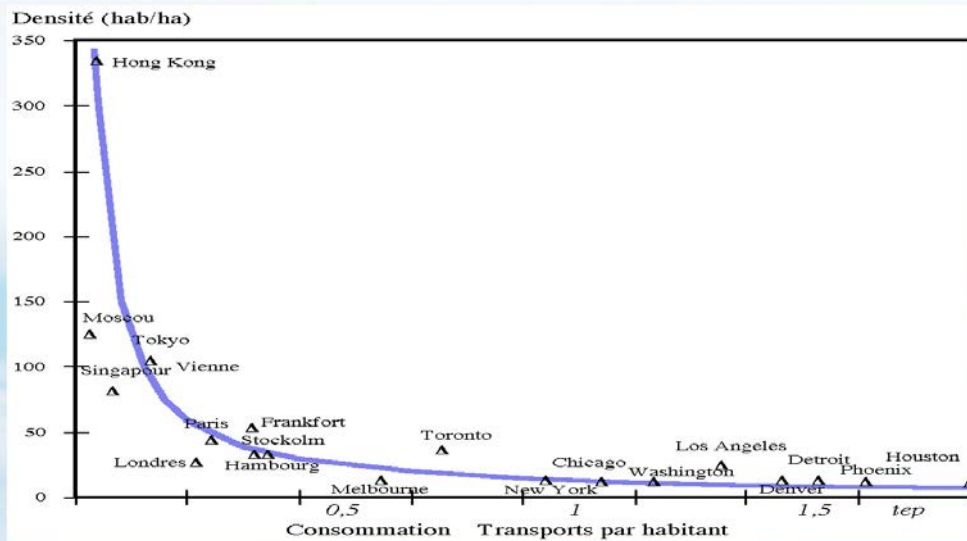
**Fraction de la population dans les villes vs émissions de CO2 par personne en Indonésie. Données Banque Mondiale**

Jean-Marc Jancovici - Mines ParisTech mai-juin 2019 - www.jancovici.com

En augmentant la disponibilité de l'énergie,

- on augmente la productivité des agriculteurs
- on met à disposition des moyens de transports plus efficaces
- on crée les conditions pour un exode rural et un monde de plus en plus urbain

### Si je suis moderne, je m'étale...



**Consommation énergétique par habitant liée aux transports urbains (axe horizontal, en tonnes équivalent pétrole par an) en fonction de la densité de la zone urbaine (axe vertical, en habitants à l'hectare).**

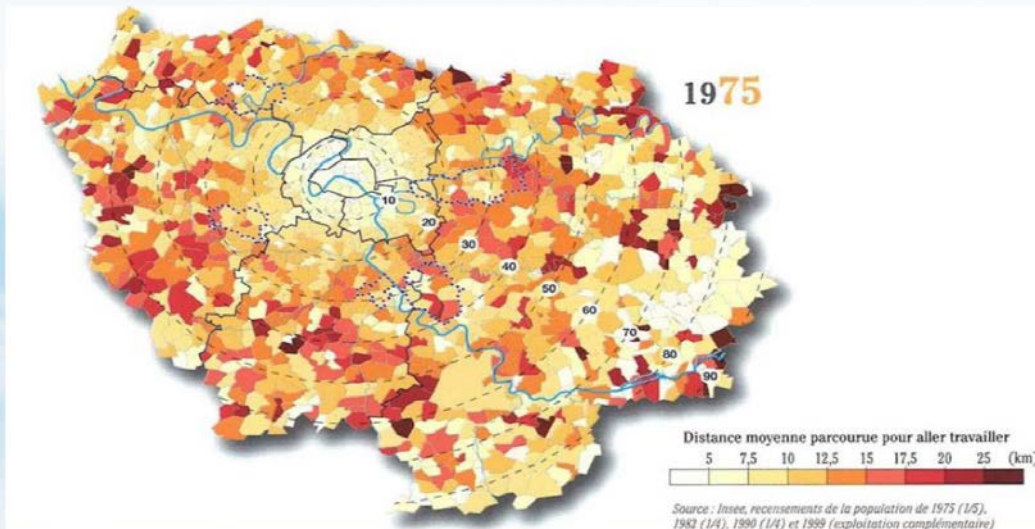
Source : Newman and Kenworthy, "Cities and automobile dependence", Gower, 1989

Jean-Marc Jancovici - Mines ParisTech mai-juin 2019 - www.jancovici.com

L'accès à l'énergie abondante détermine non seulement l'accroissement de la population urbaine mais également la superficie des villes

- déplacement en mode mécanisé facilité
- les villes s'étalent en zones péri-urbaines

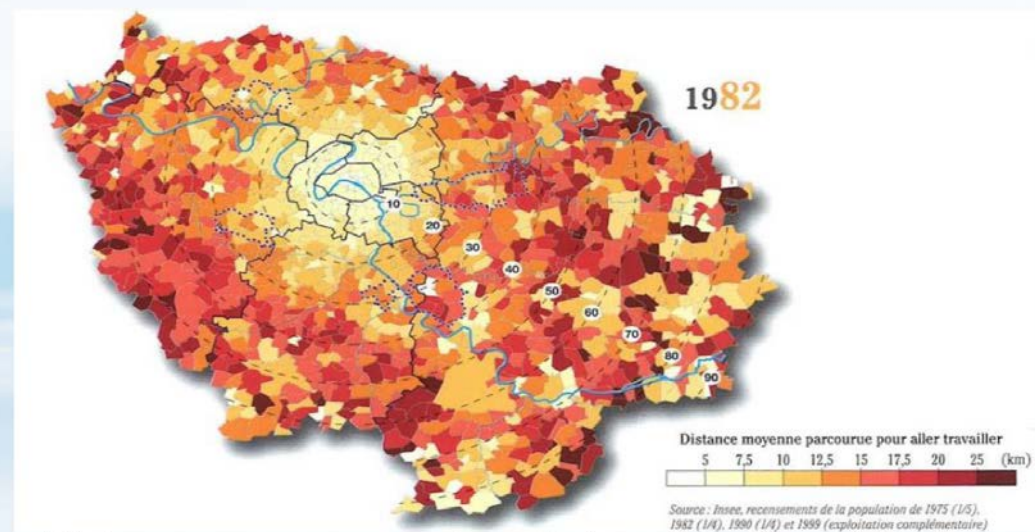
## Energie à gogo = la ville à la campagne pour de vrai



**Distance moyenne au travail dans le « Grand Paris ».**  
**Source INSEE**

Jean-Marc Jancovici - Mines ParisTech mai-juin 2019 - [www.jancovici.com](http://www.jancovici.com)

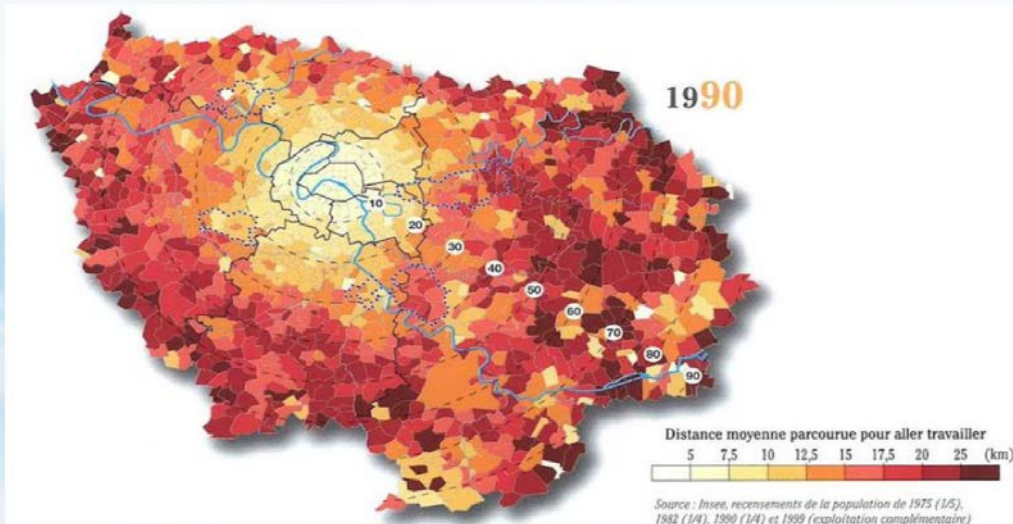
## Energie à gogo = la ville à la campagne pour de vrai



**Distance moyenne au travail dans le « Grand Paris ».**  
**Source INSEE**

Jean-Marc Jancovici - Mines ParisTech mai-juin 2019 - [www.jancovici.com](http://www.jancovici.com)

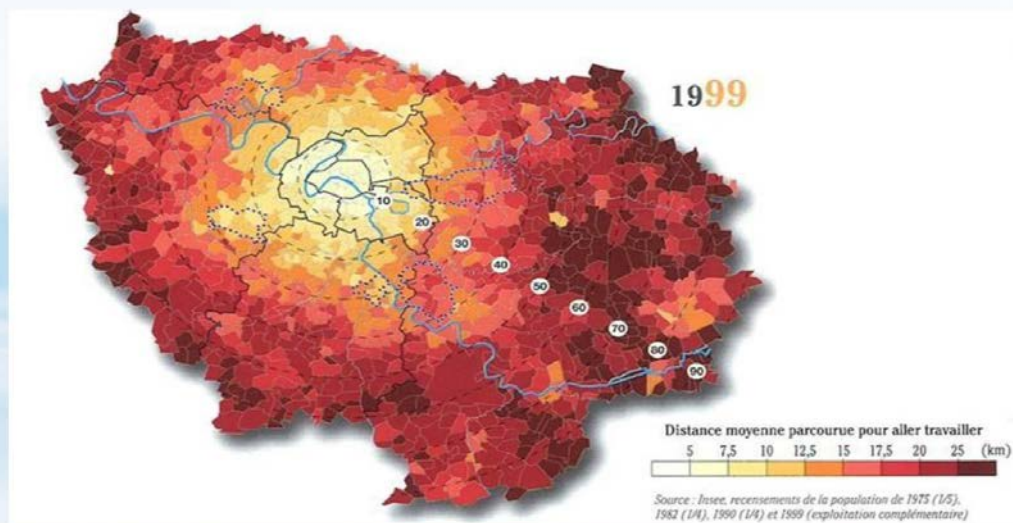
## Energie à gogo = la ville à la campagne pour de vrai



**Distance moyenne au travail dans le « Grand Paris ».**  
**Source INSEE**

Jean-Marc Jancovici - Mines ParisTech mai-juin 2019 - [www.jancovici.com](http://www.jancovici.com)

## Energie à gogo = la ville à la campagne pour de vrai

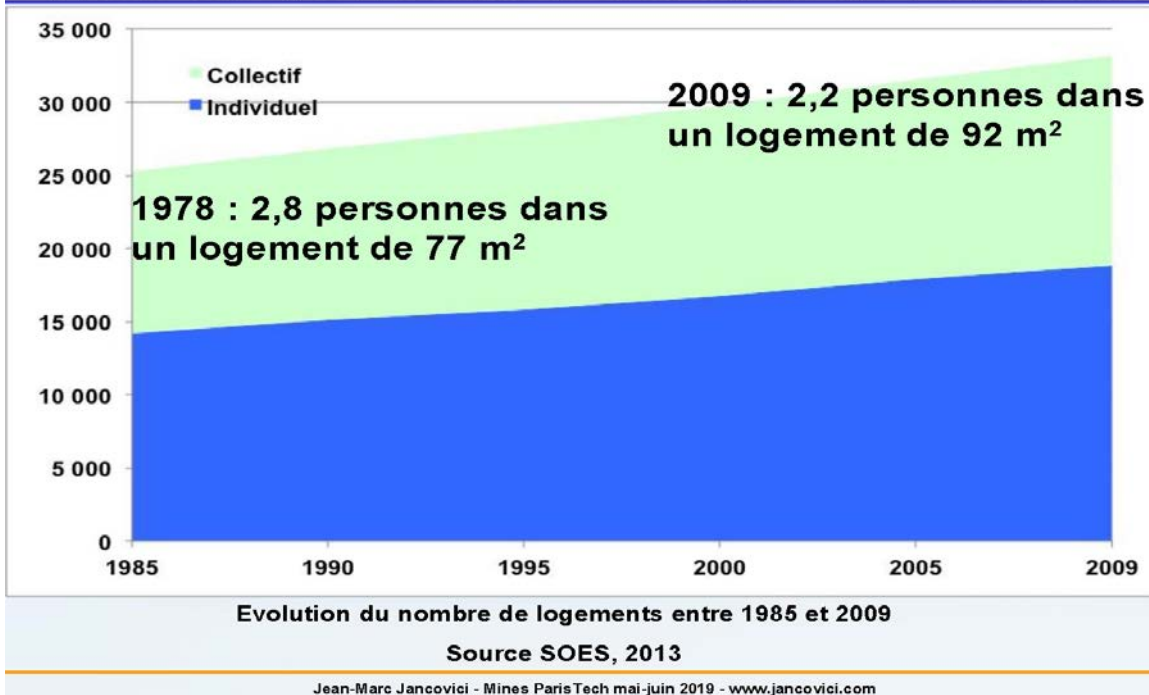


**Distance moyenne au travail dans le « Grand Paris ».**  
**Source INSEE**

Jean-Marc Jancovici - Mines ParisTech mai-juin 2019 - [www.jancovici.com](http://www.jancovici.com)



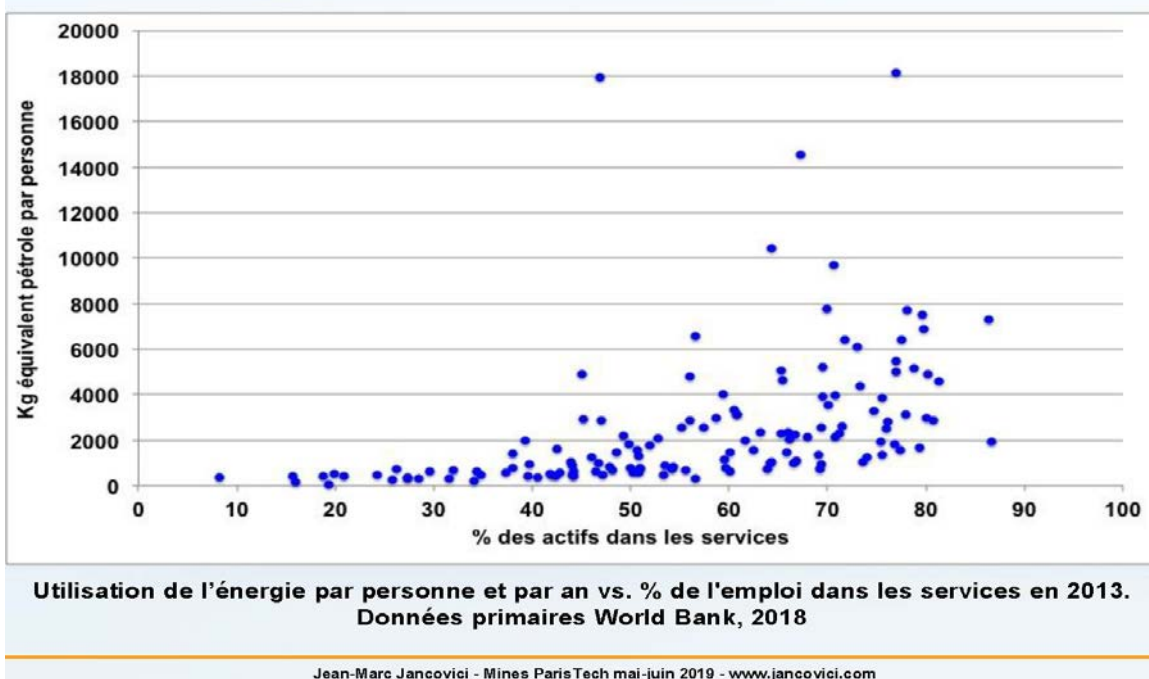
## Utiliser des hydrocarbures sans se déplacer, c'est possible !



L'énergie abondante permet d'augmenter

- le parc de logements (et plus vite que la population)
- la taille des logements (moins de densité au m<sup>2</sup>)

## Vous avez dit dématérialisation ?

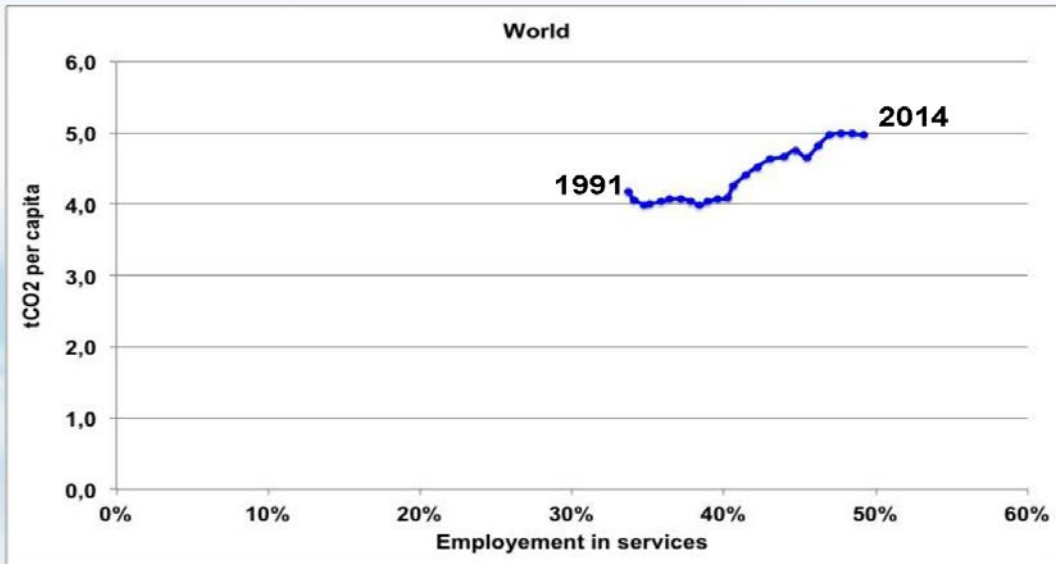


L'augmentation des effectifs du secteur tertiaire et de son corollaire du gonflement des villes ne diminue pas les émissions de CO<sub>2</sub>.

C'est tout l'inverse. La dématérialisation de l'économie est un leurre.

L'abondance énergétique a augmenté les flux de marchandises.

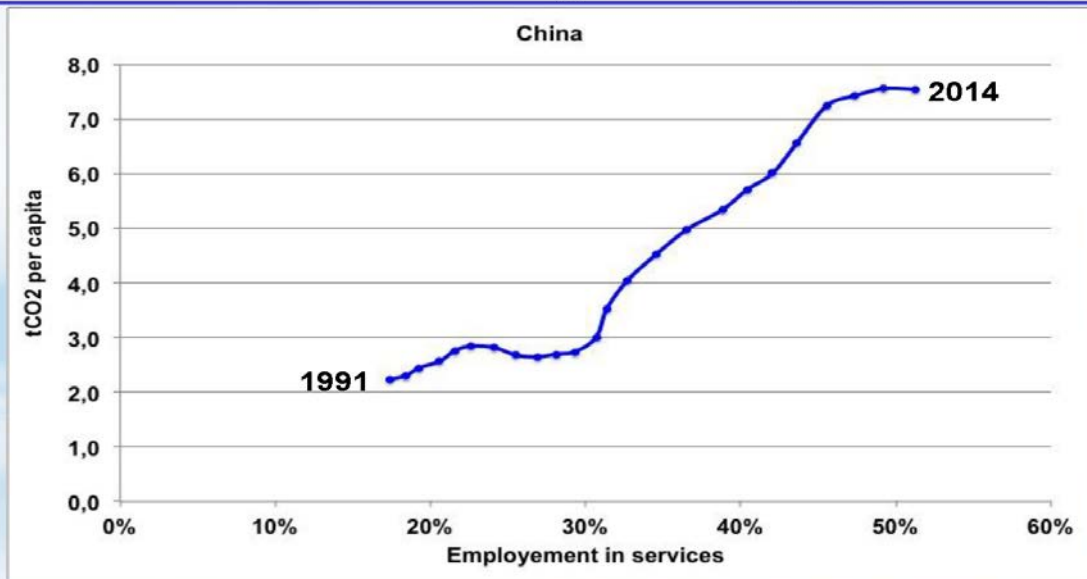
## Plus d'énergie fossile = plus de services !



Fraction de la population active dans les services vs émissions de CO2 par personne dans le monde. Données Banque Mondiale

Jean-Marc Jancovici - Mines ParisTech mai-juin 2019 - [www.jancovici.com](http://www.jancovici.com)

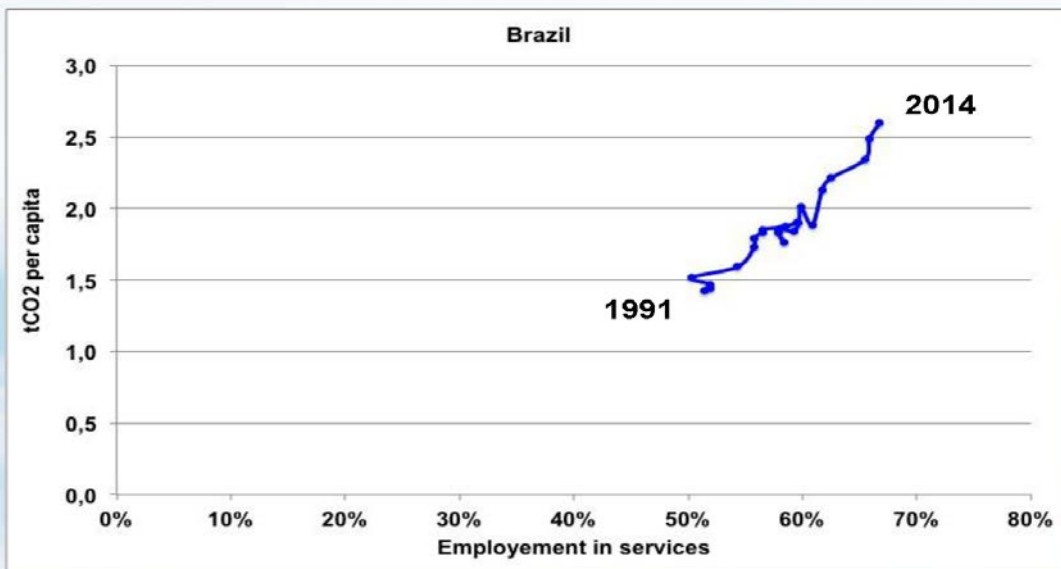
## Plus d'énergie fossile = plus de services !



Fraction de la population active dans les services vs émissions de CO2 par personne en Chine. Données Banque Mondiale

Jean-Marc Jancovici - Mines ParisTech mai-juin 2019 - [www.jancovici.com](http://www.jancovici.com)

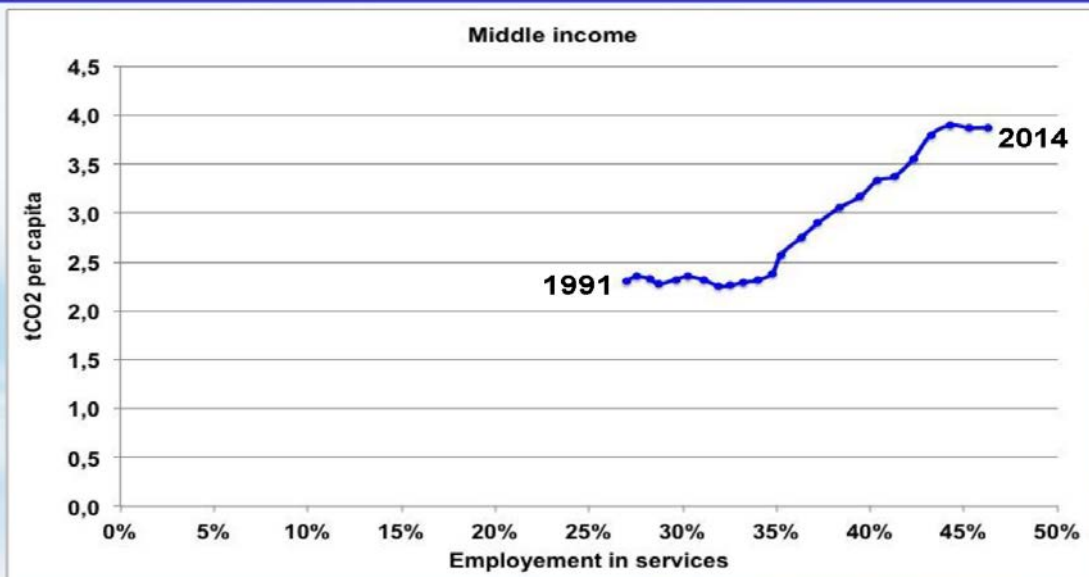
## Plus d'énergie fossile = plus de services !



Fraction de la population active dans les services vs émissions de CO2 par personne au Brésil. Données Banque Mondiale

Jean-Marc Jancovici - Mines ParisTech mai-juin 2019 - [www.jancovici.com](http://www.jancovici.com)

## Plus d'énergie fossile = plus de services !



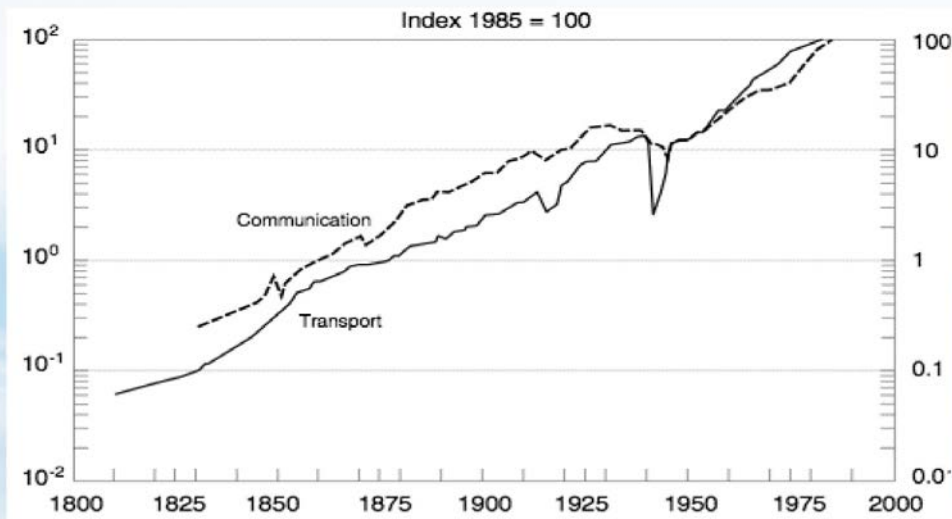
Fraction de la population active dans les services vs émissions de CO2 par personne au Brésil. Données Banque Mondiale

Jean-Marc Jancovici - Mines ParisTech mai-juin 2019 - [www.jancovici.com](http://www.jancovici.com)

L'augmentation des flux d'information ne permet pas la dématérialisation de l'économie, les deux augmentant de concert.

L'idée reçue selon laquelle faire circuler plus d'informations permettrait de faire circuler moins de personnes et moins de marchandises est fautive, cela ne se vérifie pas à l'échelle macroscopique.

## Les kilo-octets n'ont pas tué les kilomètres !



Evolution comparée des flux d'information et des flux de transport de 1800 à 1990.

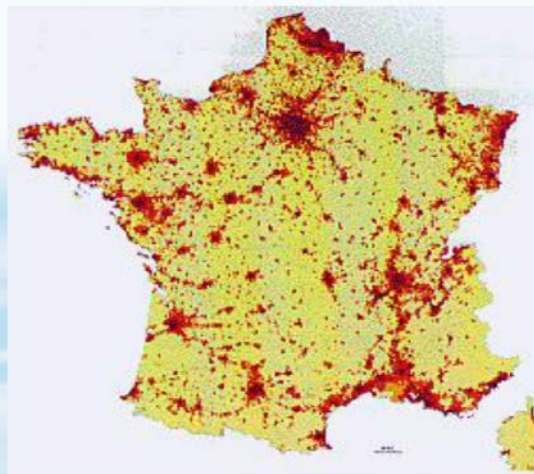
Source : Arnulf GRÜBLER, *the Rise and Fall of Infrastructures*, 1990

Jean-Marc Jancovici - Mines ParisTech mai-juin 2019 - [www.jancovici.com](http://www.jancovici.com)

## Plus d'énergie = des campagnes vides et des villes étalées



1936, 42 millions d'habitants



2000, 59 millions d'habitants

Source DATAR

Jean-Marc Jancovici - Mines ParisTech mai-juin 2019 - [www.jancovici.com](http://www.jancovici.com)

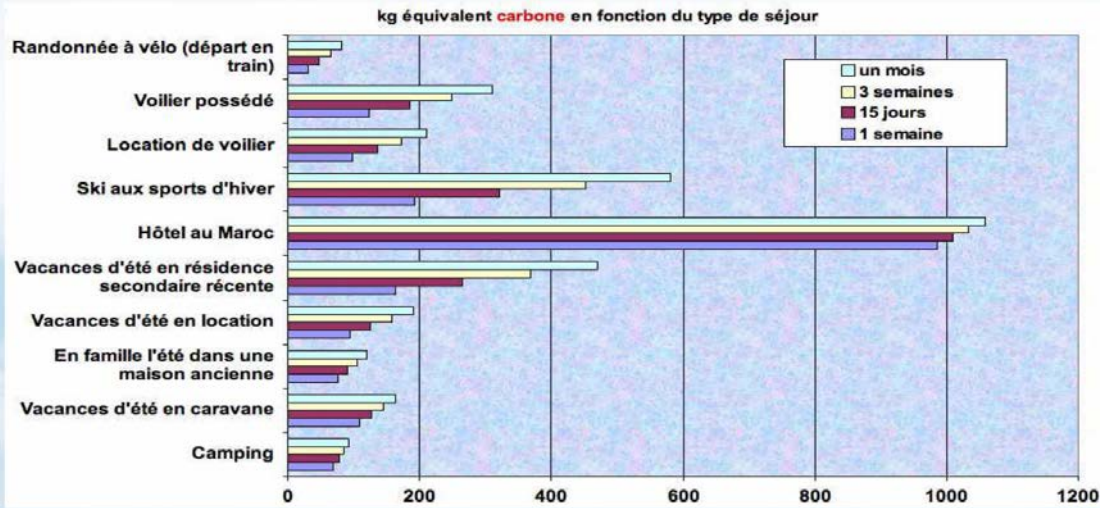
Tous les pays ayant eu accès à une énergie abondante ont été restructuré de la même manière :

- passage de campagnes peuplées et de villes moyennes
- à des villes plus peuplées et plus grandes et des campagnes vides

Exception en raison d'obstacles géographique, par exemple la Suisse où les villes ne peuvent pas s'étaler dans l'espace (fond de vallées)

TEMPS LIBRE

## Vacances pour tous = du carbone, encore !



**Emissions de gaz à effet de serre liées au séjour d'une famille de 4 personnes selon le type de tourisme et la durée. Source Jancovici, 2004**

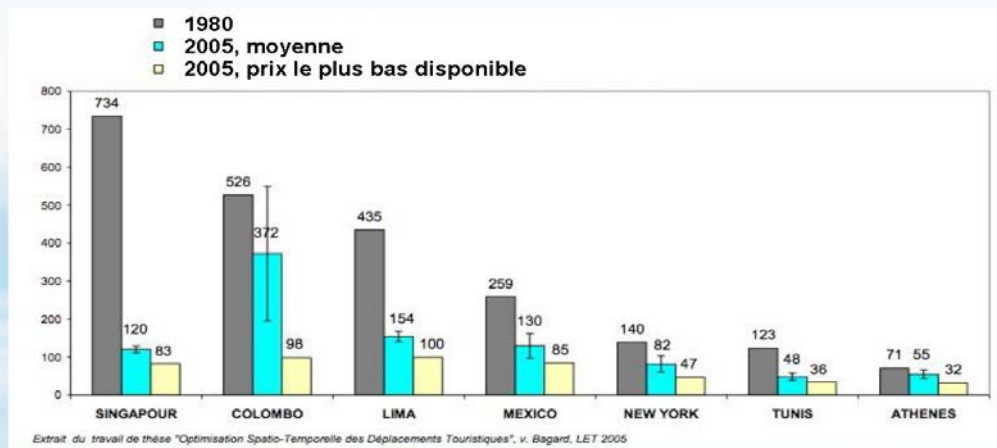
Jean-Marc Jancovici - Mines ParisTech mai-juin 2019 - www.jancovici.com

Vacances pour tous permises par l'énergie abondante :

- temps libre obtenu grâce au travail des machines pour les études, les retraites, les vacances, limiter le temps de travail hebdomadaire à 35h ...
- une des conséquences de la contrainte énergétique à venir, l'augmentation séculaire du temps libre risque d'être remis en cause

Tourisme

## Le carbone aéroporté est lui aussi en solde



**Prix d'un billet d'avion exprimé en heures de SMIC**

**Source LET, 2005**

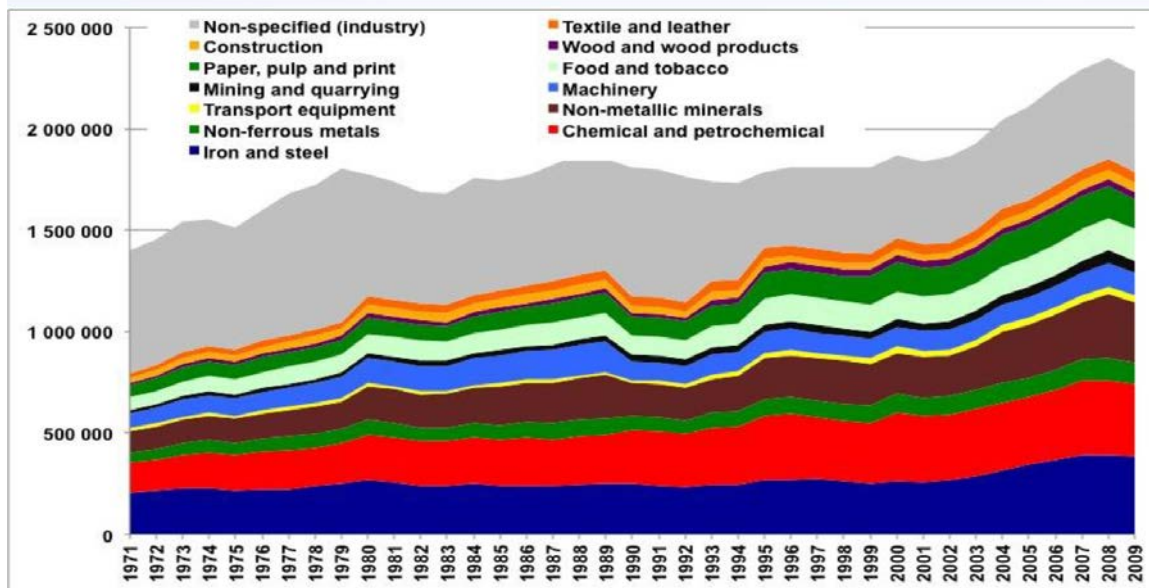
Jean-Marc Jancovici - Mines ParisTech mai-juin 2019 - www.jancovici.com

- évolution vers plus d'émissions de CO2 du fait du tourisme par avion
- les types de vacances les plus anciens (= congés payés de 1936 : vélo, camping) sont les moins émetteurs
- très forte diminution du prix du transport aérien :  
--- il fallait par exemple 140 heures de smic en 1980 pour acheter un billet pour New York

--- il n'en faut plus que 70 environ aujourd'hui

## EQUIPEMENTS MATERIEL

### Matériaux pour pas cher... et objets qui vont avec



Énergie utilisée par secteur industriel (total monde) de 1971 à 2009, en milliers de tonnes équivalent pétrole. Source AIE

Jean-Marc Jancovici - Mines ParisTech mai-juin 2019 - [www.jancovici.com](http://www.jancovici.com)

La composante non énergétique de l'énergie (usages non énergétiques du pétrole et du gaz) sert de matière première pour la chimie organique.

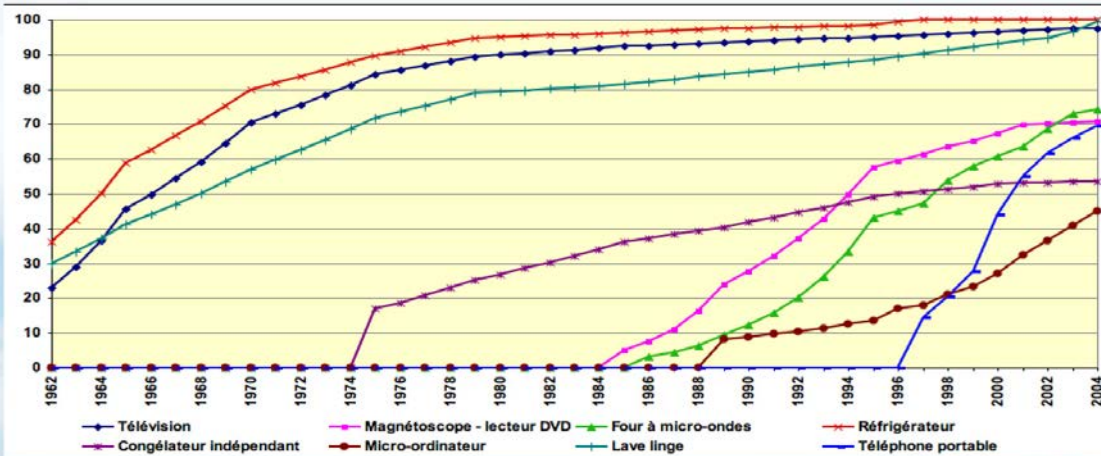
- le pétrole est la base de la chimie organique pour fabriquer la quasi-totalité des produits du quotidien

### Se passer de pétrole ou vider son logement, c'est pareil



Jean-Marc Jancovici - Mines ParisTech mai-juin 2019 - [www.jancovici.com](http://www.jancovici.com)

## Plus d'électrons pour les français aussi



Evolution du taux d'équipement des ménages français en appareils électroménagers de 1962 à 2004. Source : INSEE, 2010

Jean-Marc Jancovici - Mines ParisTech mai-juin 2019 - www.jancovici.com

Le taux d'équipement des ménages augmente dans tous les domaines et tout le temps. Ces objets

- ont eu besoin d'énergie et de chimie organique pour être fabriqués
- et nécessitent encore de l'énergie pour fonctionner

## RELATIONS DE COUPLE

### Et encore...

#### Divorcer = +60% d'énergie par ex-conjoint

2 fois plus de logements (à construire, à chauffer) -> énergie

2 fois plus d'objets à fabriquer (et utiliser) : électroménager, meubles, véhicule, etc -> énergie

Et quelques déplacements supplémentaires pour les enfants...

La retraite, les études, les vacances, l'assurance chômage = le fruit de la formidable hausse de la productivité du travail -> énergie

1 employé du National Health Service (en Grande Bretagne) « utilise » 14 tonnes équivalent CO<sub>2</sub> par an -> l'hôpital est sous perfusion d'énergie !

Jean-Marc Jancovici - Mines ParisTech mai-juin 2019 - www.jancovici.com

Divorcer est énergivore :

- besoin de fabriquer plus de logements / probablement un des plus importants facteurs de pression sur les prix de l'immobilier
- doublement des logements = augmentation de la consommation énergétique
- doublement de l'équipement ménager
- déplacements supplémentaires induits par la garde alternée des enfants

## SYSTEME DE SOINS

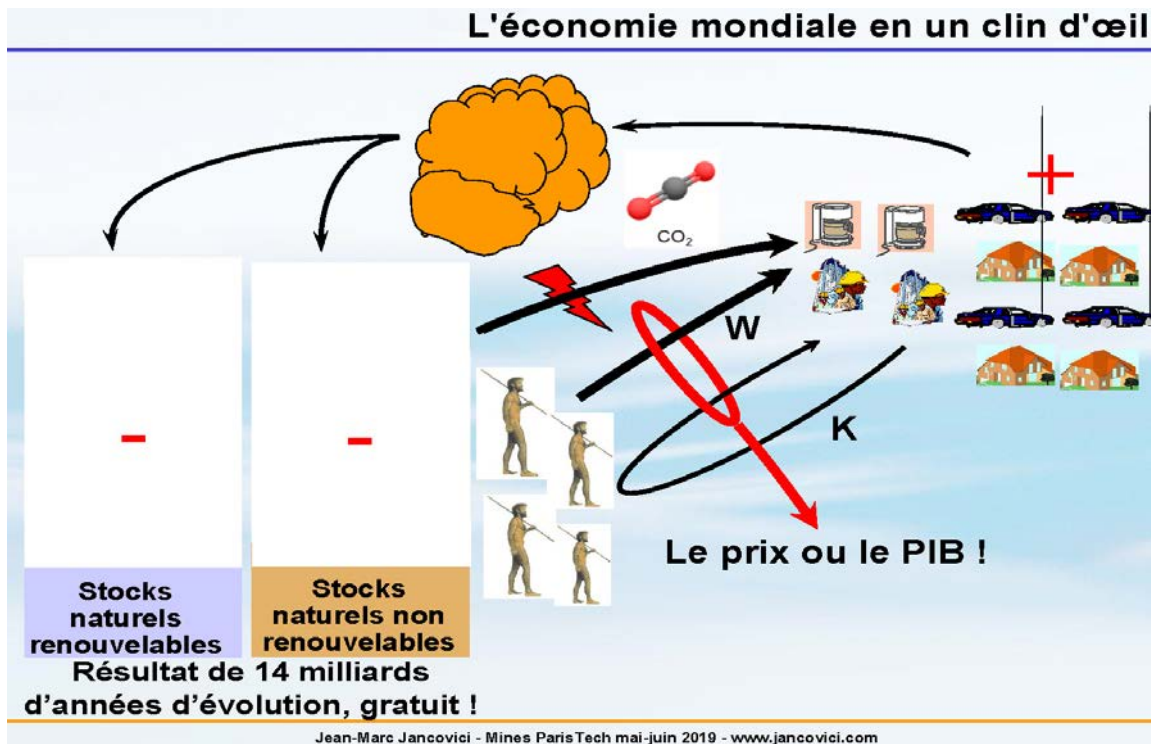
### Système de soins

- 5% de l'empreinte carbone en France provient de l'hôpital
- question éthique se posera dans un monde à l'énergie contrainte, arbitrage à faire entre soins aux personnes âgées nécessitant un appareillage très lourd et les soins à apporter aux autres malades

>> l'abondance énergétique a déformé / fait évolué nos modes de vie

## Chapitre 06 - Une théorie économique hors-sol

Evolution de l'empreinte de l'activité humaine sur les ressources naturelles



- dans un premier temps, les hommes ont épuisé très lentement les ressources non renouvelables (silex, ...) et prélevé une part très faible des ressources renouvelables, sans impact sensible sur leur régénération
- la mise au point de convertisseurs d'énergie a progressivement augmenté la capacité de l'humanité à prélever les ressources naturelles.
  - Le stock des ressources non renouvelables a commencé à se réduire de plus en plus vite
  - et à affecter le stock des ressources renouvelables lui-même (forêt, biodiversité, surpêche ...)
- phénomène concomittant à l'extractivisme, le rejet d'externalité dans l'environnement, la pollution engendrée notamment par les énergies fossiles



Si nous sommes ici, c'est un peu à cause de lui...

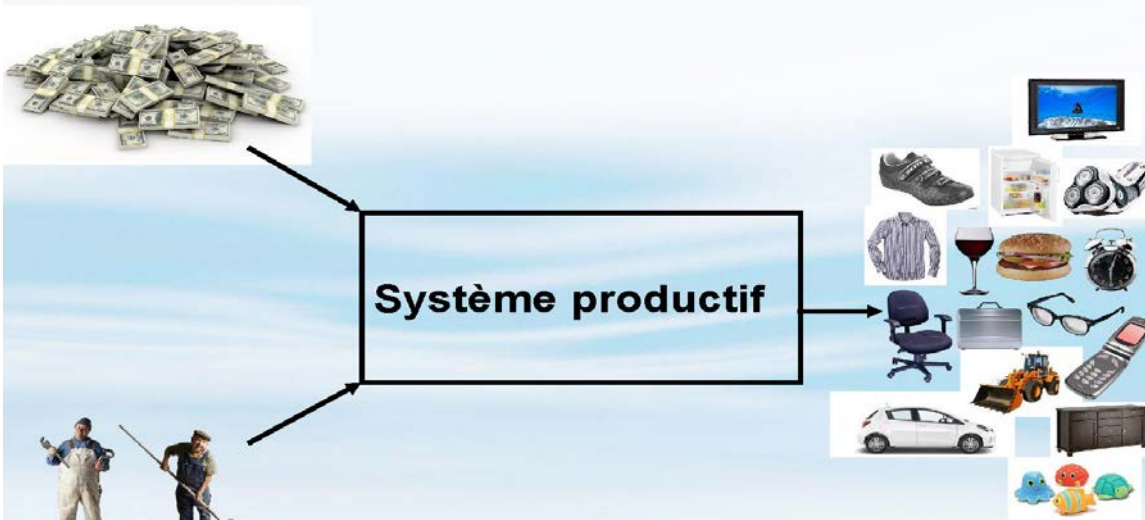


**Les ressources naturelles sont inépuisables**, car sans cela, nous ne les obtiendrions pas gratuitement. Ne pouvant ni être multipliées ni épuisées, **elles ne sont pas l'objet des sciences économiques**

Traité d'économie politique (1803)

Jean-Marc Jancovici - Mines ParisTech mai-juin 2019 - [www.jancovici.com](http://www.jancovici.com)

L'économie vue par Super Mario (ou Super Manuel !)



Jean-Marc Jancovici - Mines ParisTech mai-juin 2019 - [www.jancovici.com](http://www.jancovici.com)

> ni les phénomènes de réduction des stocks de ressources naturelles ni les externalités des activités humaines sur l'environnement ne sont pris en compte par la théorie économique classique, qui

- ne s'intéresse qu'à l'étape de transformation et à son coût
- ne considère que deux facteurs, l'humain et le capital

## L'ingénieur avait tout compris à la force des machines !

Comparaison faite par le Baron Charles Dupin (X 1801) sur les « forces productives » françaises et anglaises en 1820



	France	Grande-Bretagne
Moulins et machines hydrauliques	1 500 000 hommes.	1 200 000 hommes.
Moulins à vent	253 333	240 000
Vent et navigation	3 000 000	12 000 000
Machines à vapeur	480 000	6 400 000
<b>TOTAUX</b>	<b>5 233 333</b>	<b>19 840 000</b>

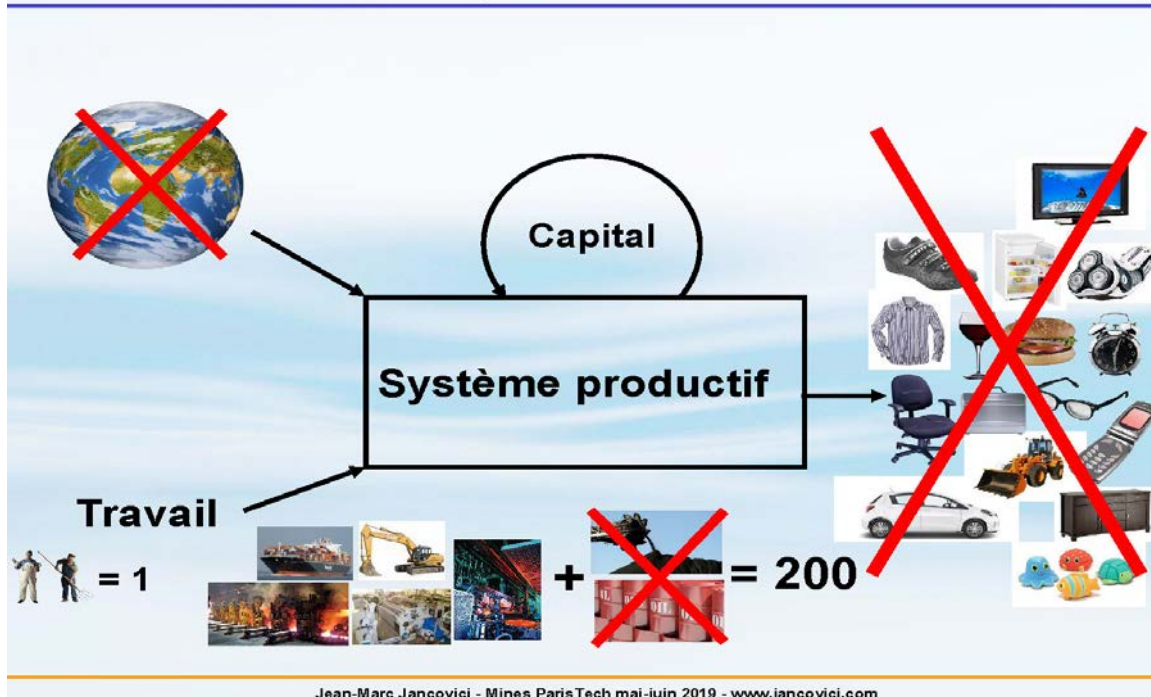
*Tableau général des forces industrielles et commerciales*

	France	Grande-Bretagne
Bretagne		
Forces vivantes	6 303 019	7 275 497
Forces inanimées	<b>5 233 333</b>	<b>19 840 000</b>
<b>FORCE TOTALE INDUSTRIELLE</b>	<b>11 536 352</b>	<b>27 115 497</b>

Jean-Marc Jancovici - Mines ParisTech mai-juin 2019 - www.jancovici.com

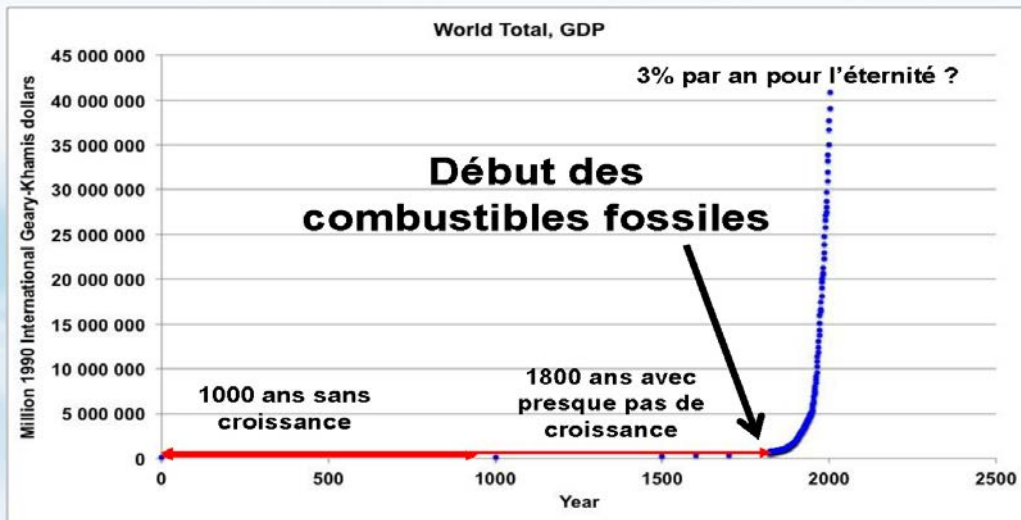
> une autre comptabilité, plus juste, aurait consisté à prendre en compte la valeur des ressources naturelles avec pour conséquence logique que l'extractivisme aurait cessé bien avant l'épuisement des stocks

## En fait, il vaut mieux avoir de la ressource !



Jean-Marc Jancovici - Mines ParisTech mai-juin 2019 - www.jancovici.com

## Les promesses électorales étaient plus faciles il y a 1000 ans



PIB mondial reconstitué de l'an 0 à 2003. Source : Angus Maddison

Jean-Marc Jancovici - Mines ParisTech mai-juin 2019 - [www.jancovici.com](http://www.jancovici.com)

> actuellement,

- le système économique ne fixe aucune limite au PIB (la valeur économique de la production), au travail de transformation des ressources naturelles par l'homme
- parce qu'il ne tient pas compte de l'épuisement des ressources naturelles / de la gestion du "stock"

> historiquement l'explication est à chercher chez les fondateurs de la théorie économique au début du XIXe

- l'économie est la gestion de la rareté,
- c'est à dire au XIX, le facteur humain : 1 milliard d'humains dans un monde qui reste en partie à explorer et où les ressources naturelles sont exploitées avec des convertisseurs ENR

> Citation JB Say (1767 - 1832) - Traité d'économie politique

Les ressources naturelles sont inépuisables, car sans cela, nous ne les obtiendrions pas gratuitement. Ne pouvant ni être multipliées ni épuisées, elles ne sont pas l'objet des sciences économiques.

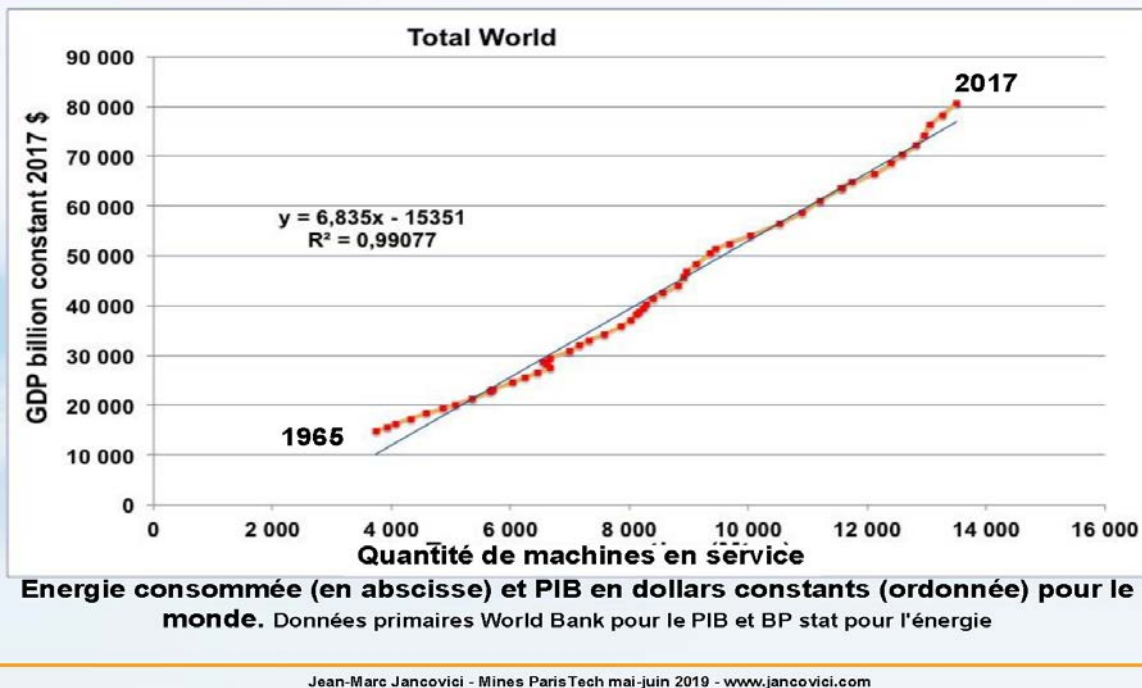
> facteurs limitants du système hier = les hommes mais aujourd'hui

- l'énergie qui alimente les convertisseurs (sans énergie, les travailleurs et le capital ne valent rien)
- et les ressources naturelles

Historiquement

- pas de croissance économique jusque l'an mil (convertisseur = force musculaire)
  - faible croissance jusque 1800
  - croissance exponentielle avec la mise au point des convertisseurs d'énergie à combustibles fossiles
- > le pétrole a permis aux Etats-Unis et à l'Europe d'écraser économiquement le reste du monde
- > parenthèse de 2 siècles qui se referme avec la Chine qui retrouve sa place de première puissance économique

## Le meilleur modèle macro-économique du monde : une droite



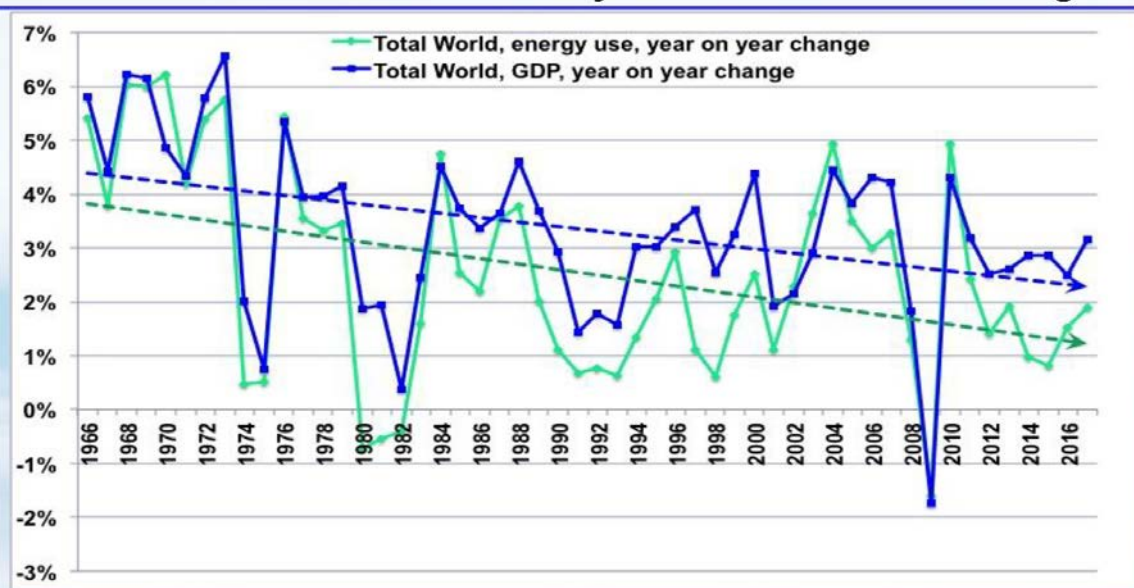
Equivalence parfaite entre la quantité de machines en service (= énergie consommée) et le PIB (= la valeur économique de la production)

Observable à l'année :

- nb de machines en service
- variation de la production économique

“Les euros ne font que mesurer monnairement un flux que les kw/h mesurent physiquement”  
> deux unités de compte qui mesurent la même chose, un flux de transformation

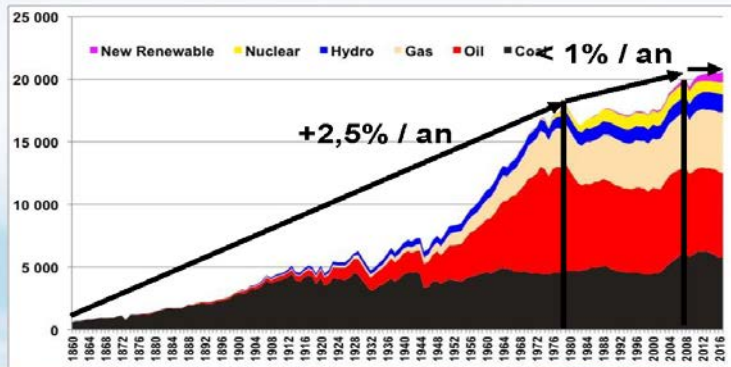
## Puis-je avoir du PIB sans énergie ?



Variation de la consommation d'énergie (en vert) et du PIB en dollars constants (en bleu), pour le monde. Données World Bank pour le PIB et BP stat pour l'énergie

# Chapitre 07 - Baisse de l'approvisionnement énergétique et conséquences

## C'est la valse à trois temps...



≈ 0

**Midas se fatigue, et appelle à sa rescousse la tertiarisation et la dette**

**Midas part en vacances, la dette explose, le taux d'emploi baisse, les inégalités s'accroissent...**

**<=> chaque année, le parc de machines par personne augmente d'au moins 2,5%**

**<=> chaque année, la transformation de ressources par personne augmente d'au moins 2,5%**

**<=> chaque année, la production économique par personne augmente d'au moins 2,5%**

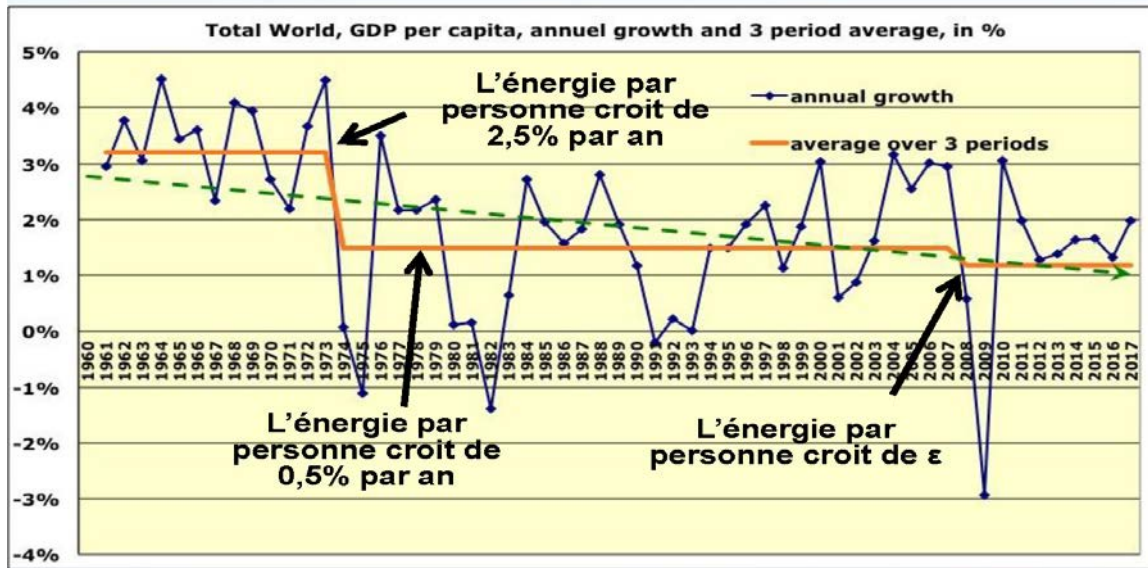
Jean-Marc Jancovici - Mines ParisTech mai-juin 2019 - www.jancovici.com

- jusqu'aux chocs pétroliers, l'approvisionnement énergétique augmente de 2,5% par an par personne
  - > cela signifie que le parc de machines par personne augmente de 2,5 % par an, au minimum (il faut tenir compte des gains d'efficacité énergétique)
  - > tant qu'il n'y a pas de facteur limitant sur les ressources à transformer (c'était le cas jusqu'aux chocs pétroliers), la production physique par personne augmente de 2,5% par an au moins
  - > la contrepartie monétaire de cette production augmente de 2,5% par an (un peu plus en fait)
- après les chocs pétroliers, l'approvisionnement énergétique freine brusquement pour les pays riches (OCDE),
  - > l'essor de la Chine et des pays émergents crée un rebond dans les années 90, du fait de l'augmentation de l'extraction de charbon (la moitié du charbon consommé dans le monde l'est par la Chine aujourd'hui)
  - > le frein de l'approvisionnement énergétique fait ralentir l'économie des pays riches :
    - la hausse de la production physique par personne continue à croître mais faiblement
    - trop faiblement pour soutenir le rythme de redistribution de la période précédente, où s'était perfectionné le Welfare State (hausse mécanique des salaires à l'ancienneté, des retraites, ...)
    - recours à la dette (inexistante ou presque avant les chocs pétroliers, la dette augmente dans tous les pays riches pour soutenir le rythme de redistribution des décennies précédentes) et à la tertiarisation, taux d'emploi baisse, inégalités augmentent ...
  - "le rythme d'augmentation de la production par personne devient insuffisant pour assurer le rythme de hausse de la redistribution par personne"
- à partir de 2005, l'approvisionnement énergétique par personne n'augmente plus dans le monde et décline dans la zone OCDE
  - conséquences du déraillement d'un système fondé sur l'abondance énergétique lorsque l'abondance fait défaut et que l'approvisionnement stagne
  - crise financière, la faillite de Lehman Brothers est une conséquence
  - explosion de l'endettement

--- taux d'intérêts négatifs

> stagnation puis baisse de l'approvisionnement énergétique ne fait que s'amorcer

## It's the kWh, stupid!



**Variation annuelle du PIB par personne en moyenne mondiale.** Jancovici, sur données World Bank.

Jean-Marc Jancovici - Mines ParisTech mai-juin 2019 - [www.jancovici.com](http://www.jancovici.com)

Variation annuelle du PIB par personne en moyenne mondiale

- on retrouve les 3 périodes ci-dessus
- l'endettement dans la dernière période permet "d'acheter" des % de PIB, ce qui masque en partie la réalité d'un PIB atone

-- période 01 : forte croissance de l'approvisionnement en énergie par personne et la production par personne croît encore plus fortement du fait du gain d'efficacité énergétique

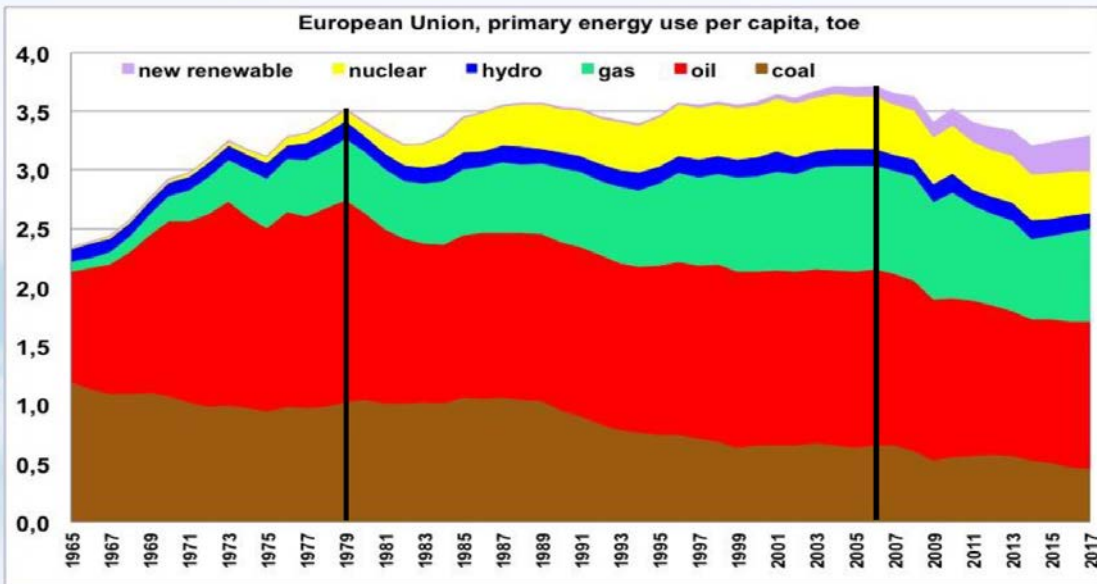
-- période 02 : ralentissement de l'approvisionnement / PIB croît moins vite

-- période 03 : deux cas de figure très différents dans le monde

---> OCDE

---> reste du monde

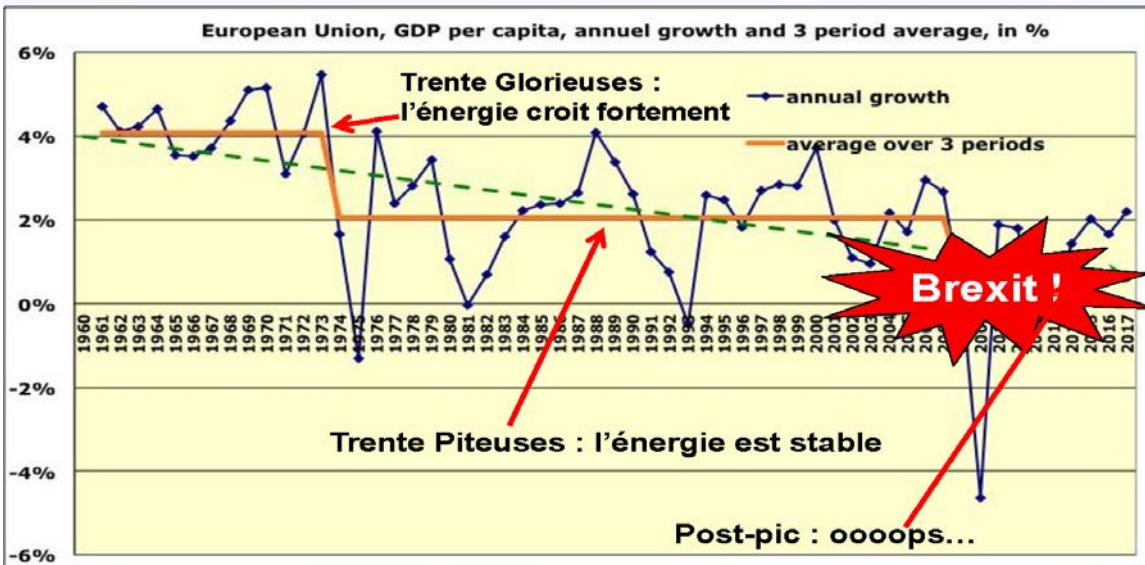
## Sécurité d'approvisionnement ? Quelle sécurité ?



Consommation d'énergie en Europe depuis 1965. Données BP Statistical Review, 2016

Jean-Marc Jancovici - Mines ParisTech mai-juin 2019 - www.jancovici.com

## C'est (à nouveau) la valse à trois temps



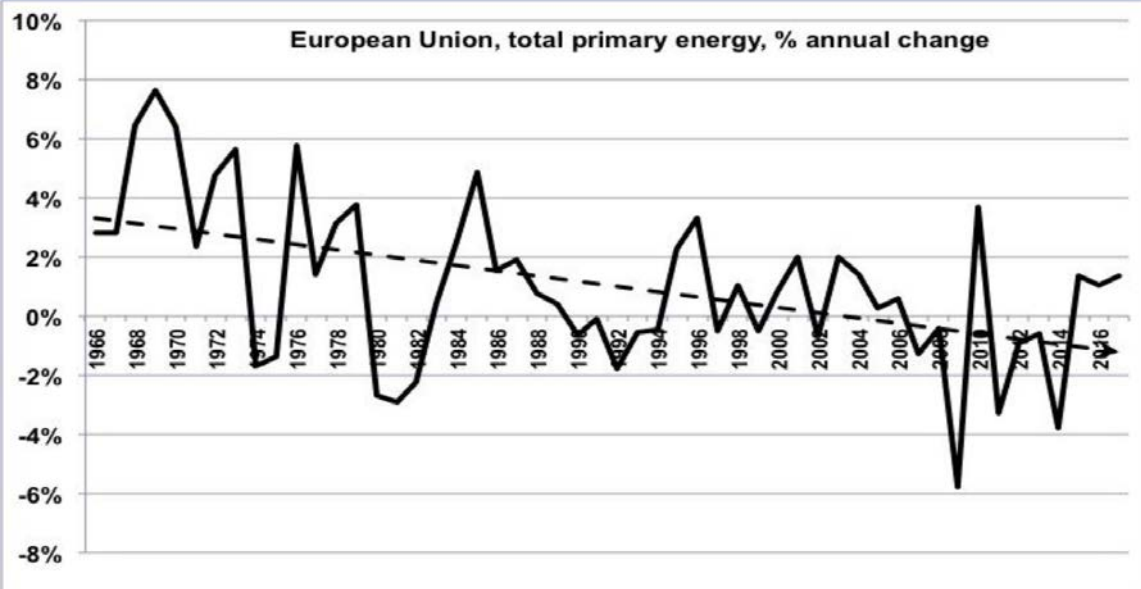
Variation annuelle du PIB par personne en Europe. Jancovici, sur données World Bank.

Jean-Marc Jancovici - Mines ParisTech mai-juin 2019 - www.jancovici.com

### Exemple UE

- période 01 : forte augmentation approvisionnement
- période 02 : faible augmentation approvisionnement (pic en 2006), généralisation de l'endettement pour compenser / maintenir la consommation et le niveau de vie
- période 03 : stagnation / début contraction de l'approvisionnement (malgré essor des énergies de roches mères aux Etats-Unis),
- > le PIB par personne stagne
- > les dettes ne peuvent pas être remboursées
- > la production industrielle aujourd'hui en Europe demeure inférieure à celle de 2007, s'observe sur les T.km camion, l'indice de la construction

## Une pédale de frein pour les kWh....

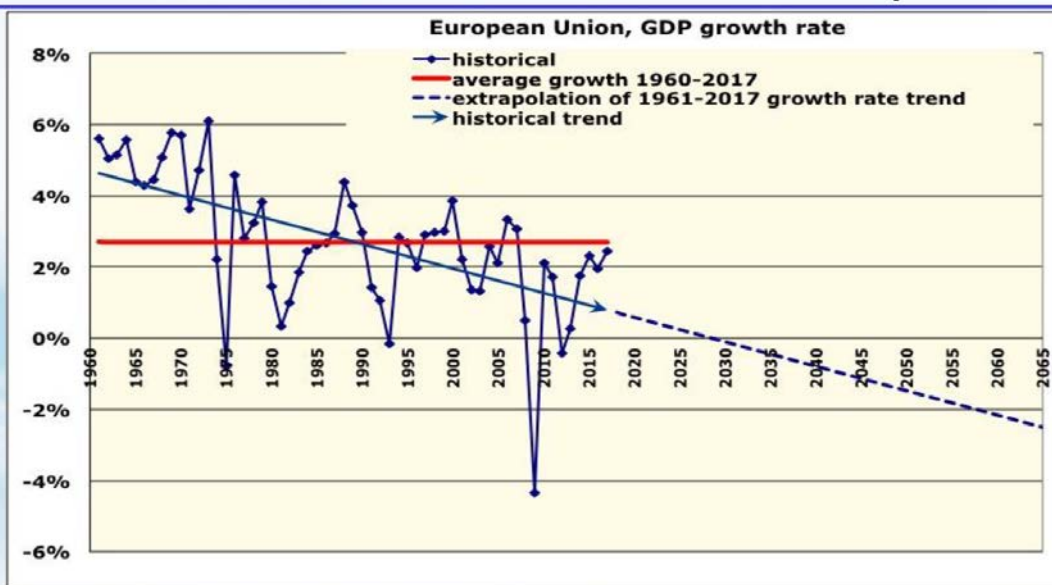


Variation de la consommation d'énergie en Europe depuis 1966. Données BP Statistical Review 2011, traitement par l'auteur.

Jean-Marc Jancovici - Mines ParisTech mai-juin 2019 - www.jancovici.com

“Ce n'est pas la crise financière qui a fait baisser la quantité d'énergie utilisée dans le monde, c'est la contraction de l'approvisionnement énergétique disponible qui a ralenti le PIB et qui a rendu incapables les emprunteurs de rembourser leurs dettes (contractées au moment du ralentissement de l'économie, période 02)

## ... et donc aussi pour le PIB



Taux de croissance du PIB européen sur la période 1960-2017 (bleu), de la moyenne sur la période (rouge), de la tendance passée (bleu plein), et de la prolongation de la tendance (pointillé). Données World Bank

Jean-Marc Jancovici - Mines ParisTech mai-juin 2019 - www.jancovici.com

Particularité de l'UE :

- mise en concurrence des salaires (variant de 1 à 5 dans la zone UE)
- dans un système économique en stagnation

---> conséquence :

----> l'entrée des pays de l'Est intervient en 2005, soit 2 ans avant le maximum énergétique européen (= date à laquelle le PIB de la zone n'augmente plus)

----> effet de vases communicants : les gains des pays de l'Est se font au détriment des pays de l'Ouest (délocalisation ou travailleur détaché, délocalisation à domicile)

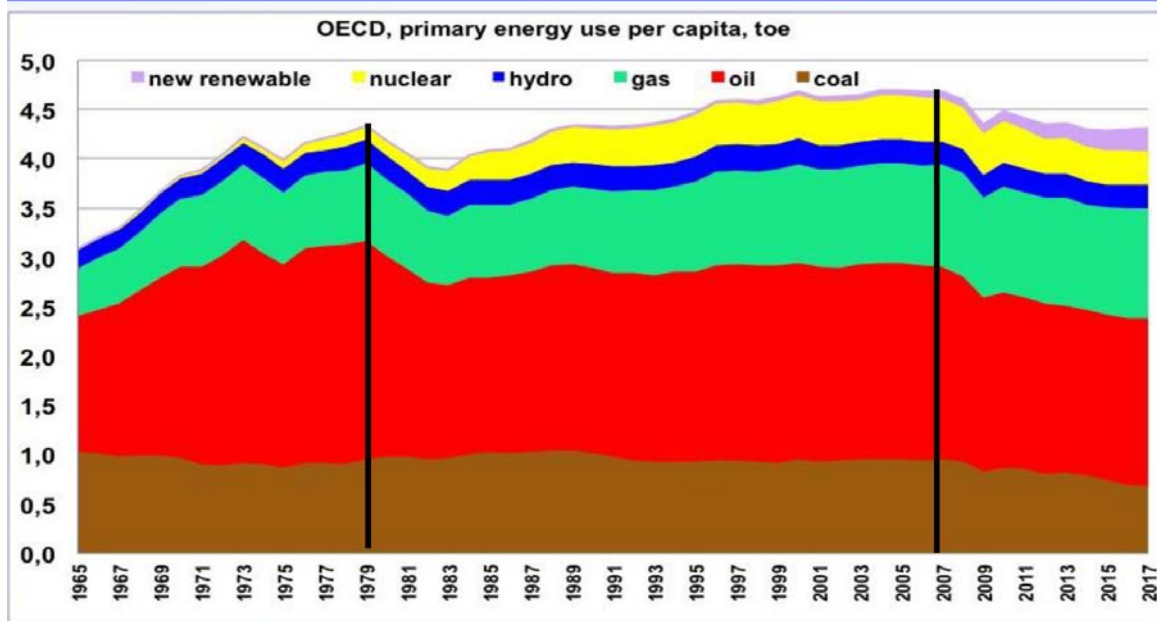


- > le maintien des salaires de l'Ouest de l'UE n'est pas possible
- > turbulences politiques prévisibles (Brexit ...)

Variation de la consommation d'énergie par personne (en Europe depuis 1966)

- > variation héritière d'une tendance très profonde et qui est présente depuis les chocs pétroliers
- > en décroissance sur 40 ans
- > se poursuivra dans les prochaines décennies, avec un PIB qui passera négatif
- > prochaines décennies = un monde de contraction et non plus d'expansion économique
- > enjeu : garder un système stable dans un contexte de contraction des ressources disponibles

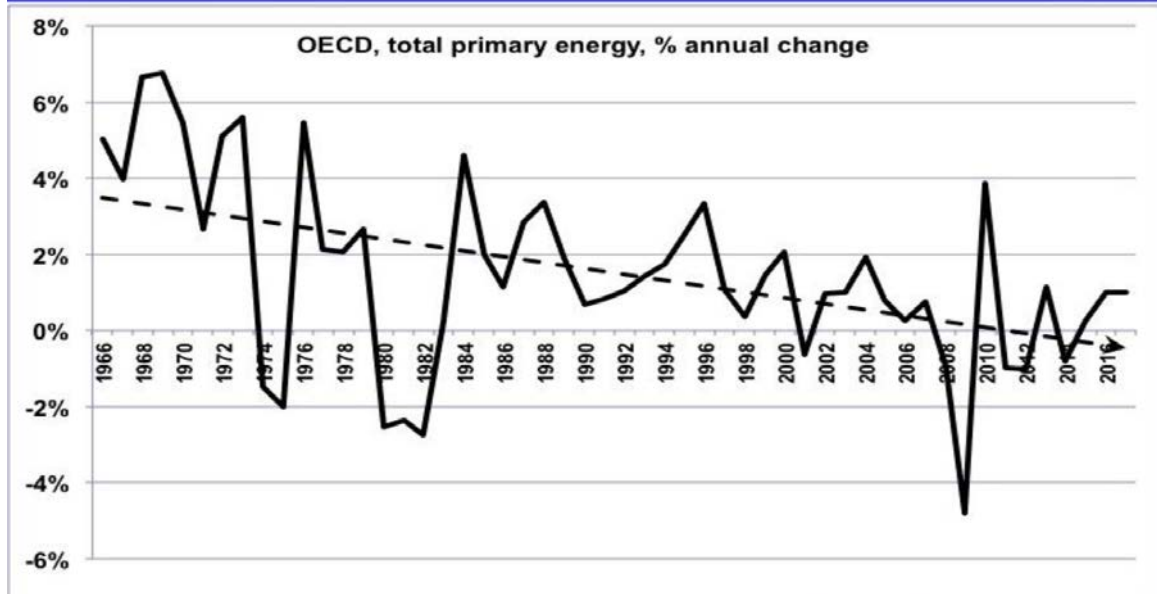
## Nous ne sommes pas seuls !



Consommation d'énergie de l'OCDE depuis 1965. Données BP Statistical Review, 2018

Jean-Marc Jancovici - Mines ParisTech mai-juin 2019 - www.jancovici.com

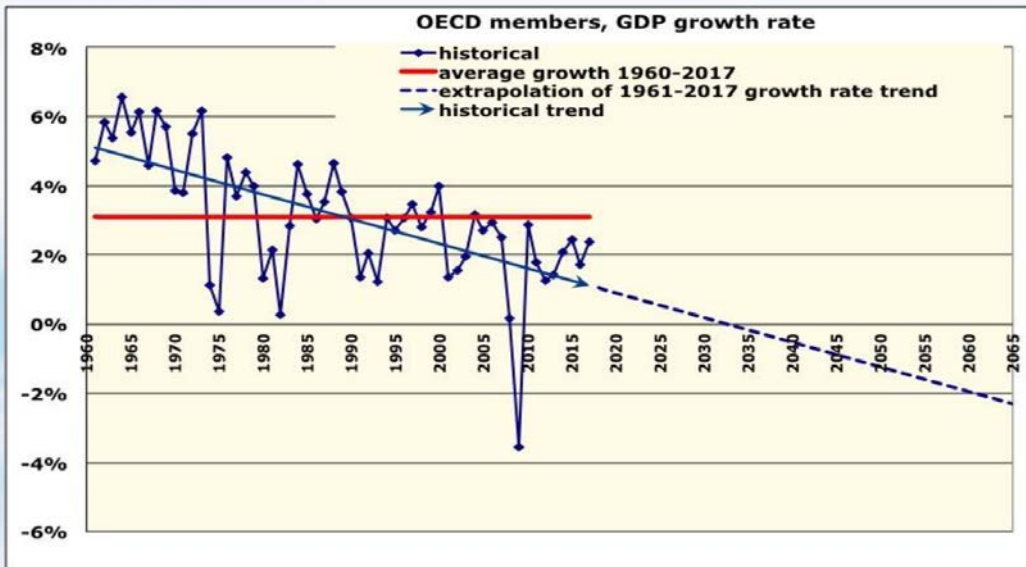
## Tous les pays « riches » ralentissent



Variation de la consommation d'énergie dans la zone OCDE depuis 1966. Données BP Statistical Review 2018, traitement par l'auteur.

Jean-Marc Jancovici - Mines ParisTech mai-juin 2019 - www.jancovici.com

**...et une partie de votre carrière se fera « dans l'autre sens »**



Taux de croissance du PIB de la zone OCDE sur la période 1960-2017 (bleu), de la moyenne sur la période (rouge), de la tendance passée (bleu plein), et de la prolongation de la tendance (pointillé). Données World Bank

Jean-Marc Jancovici - Mines ParisTech mai-juin 2019 - www.jancovici.com

**L'ère du feu, croissance à gogo et 2 questions...**

**Boum ?**

Minerais, sols, ressources vivantes... (gratuits aussi)

$O_2$

$C_nH_p$

**Gratuit !!**

$CO_2$

**= PIB**

Structure actuelle des métiers, loisirs et vacances, études longues, santé, retraites, mondialisation, concentration urbaine et banlieues étalées...

**Crac ?**

Jean-Marc Jancovici - Mines ParisTech mai-juin 2019 - www.jancovici.com

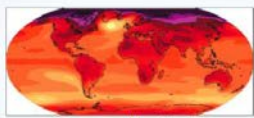
# LECON II - LES ÉNERGIES FOSSILES

## Chapitre 08 - Les énergies fossiles et leurs usages dans le monde et en France

L'ère du feu, croissance à gogo et 2 questions...

**Boum ?**

Minerais, sols,  
ressources  
vivantes...  
(gratuits aussi)



$\text{CO}_2$

$\text{O}_2$

$\text{C}_n\text{H}_p$

= PIB



Structure actuelle des métiers, loisirs et vacances, études longues, santé, retraites, mondialisation, concentration urbaine et banlieues étalées...

**Crac ?**

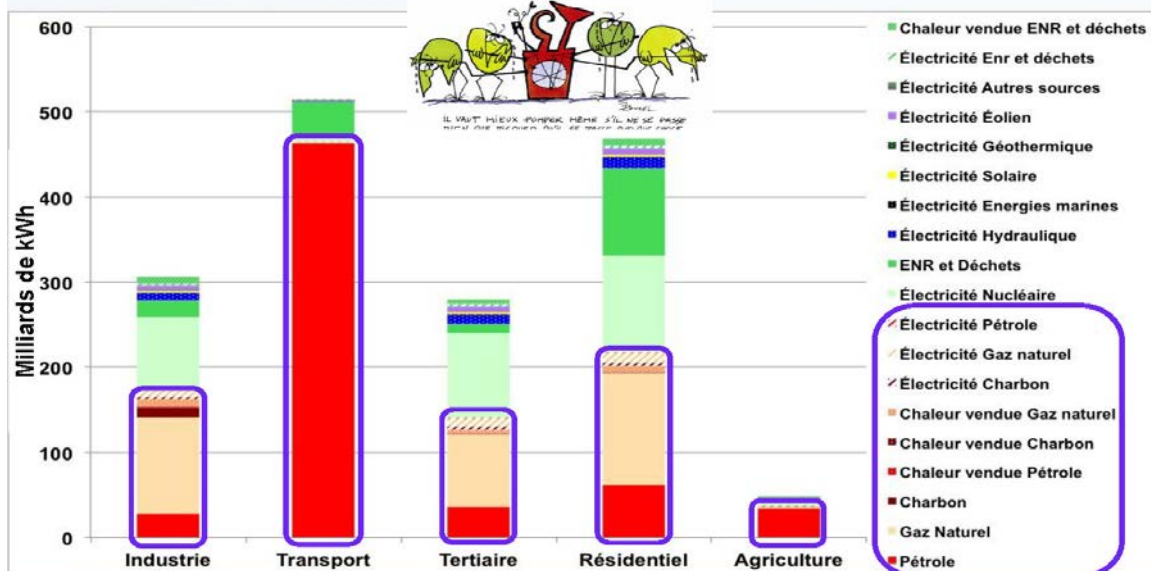


IL VAUT MIEUX ÉCHOUER NÈRE QU'ÊTRE PASSE

Jean-Marc Jancovici - Mines Paris Tech mai-juin 2019 - [www.jancovici.com](http://www.jancovici.com)

SPECIFITE FRANCE

## La France, pays « tout nucléaire » ?



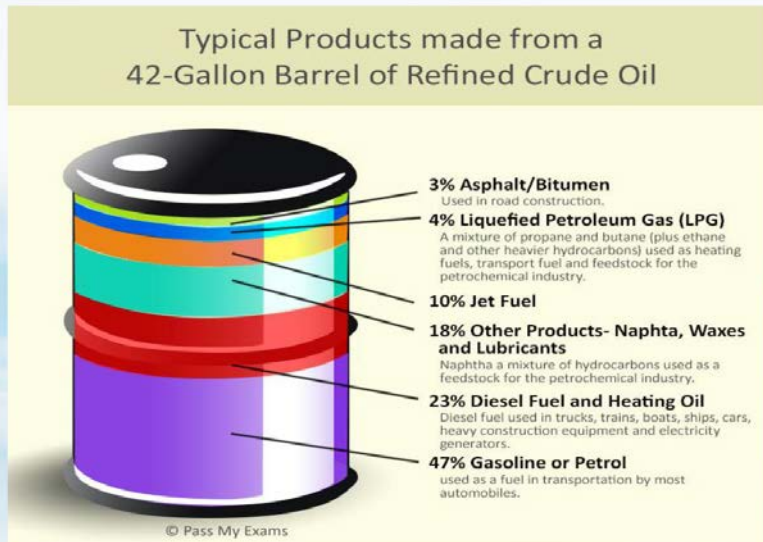
Répartition de la consommation d'énergie finale en France en 2018. Source Carbone 4, 2019.

Jean-Marc Jancovici - Mines Paris Tech mai-juin 2019 - www.jancovici.com

- Spécificité française dans l'approche de la question énergétique
  - > focalisation sur le nucléaire
  - > alors que l'essentiel de l'énergie finale (= qui passe un compteur / payante) qui alimente l'exosquelette de la société est comme ailleurs dans l'OCDE
    - provient des énergies fossiles
    - est constitué d'un vecteur (carburants liquides, électricité faite avec du gaz, gaz final pour le chauffage, très peu de charbon...)
- qui a été fabriqué à partir d'énergies fossiles
- Charbon = 10% des émissions de CO<sub>2</sub> de la France
- l'électricité qui provient du nucléaire
  - dans le résidentiel, approvisionnement énergétique en nucléaire et en bois sont du même ordre de grandeur
- Dans les énergies fossiles, ce qui domine est comme partout ailleurs dans l'OCDE, c'est le pétrole

LE PETROLE

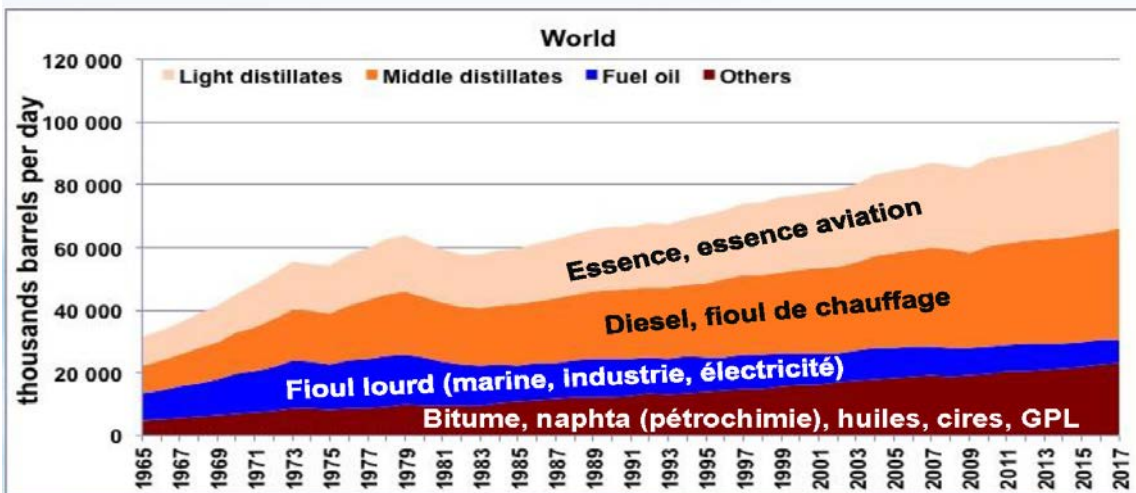
## Du pétrole, pourquoi faire ?



Type de produits obtenus à partir d'un baril de pétrole

Jean-Marc Jancovici - Mines Paris Tech mai-juin 2019 - [www.jancovici.com](http://www.jancovici.com)

## Du pétrole, pourquoi faire ?



Répartition de la consommation de produits distillés dans le monde depuis 1965. Données BP Statistical Review, 2018

Jean-Marc Jancovici - Mines Paris Tech mai-juin 2019 - [www.jancovici.com](http://www.jancovici.com)

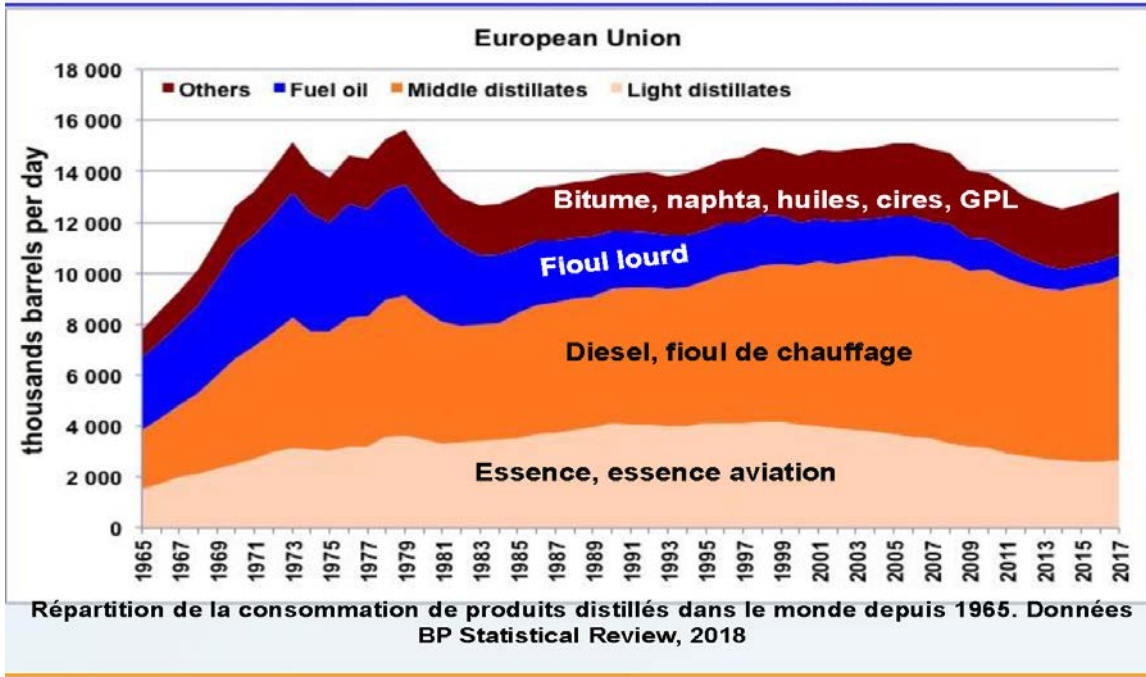
### • Différents usages du pétrole (raffiné) :

- naphta (base de la pétrochimie), cires & huiles 18%
- Gaz de pétrole liquéfié 4%
- essence 47%
- kérozène 10%
- diesel et fioul de chauffage 23%, essentiellement diesel
- bitumes (3%)
- coke de pétrole (résidut solide en fin de distillation et qui sert à alimenter en grande partie la colonne de distillation)

### La consommation

- dans le monde des produits du pétrole est en augmentation
- et stagne en Europe, sous stress d'approvisionnement depuis 2005

## Du pétrole, pourquoi faire ?



Jean-Marc Jancovici - Mines Paris Tech mai-juin 2019 - www.jancovici.com

L'essentiel de ce que consomme l'UE en matière de produits raffinés est pour une bonne part

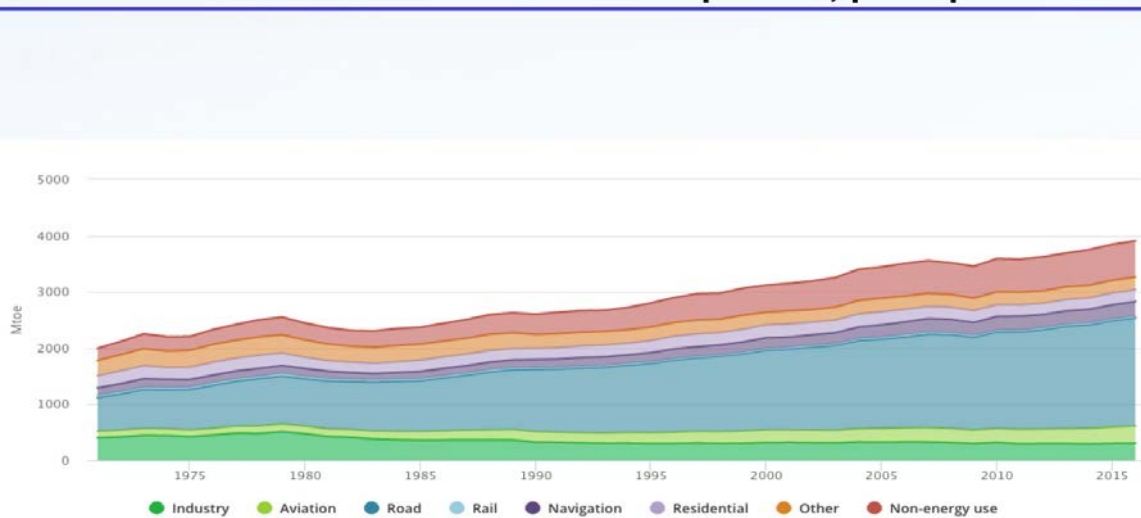
- de l'essence et du kérozène
- du diesel et du fioul

(baisse de la consommation de fioul lourd sensible depuis fin des années 70 : de moins en moins de fioul pour produire de l'électricité et le remplacement du fioul par du gaz dans l'industrie)

Cause du développement du diesel en France à la suite des chocs pétroliers

- baisse de la consommation du fioul résidentiel pour se chauffer
  - fioul sur-abondant en sortie de raffinerie + prix de l'essence en forte hausse
- => rééquilibrage : produire du diesel pour baisser la production de fuel et faire face à la "pénurie" d'essence
- => situation actuelle : si interdiction diesel, une partie de la production des raffineries restera inutilisée, d'autant plus que la distillation d'une raffinerie ne se change pas facilement

## Du pétrole, pourquoi faire ?

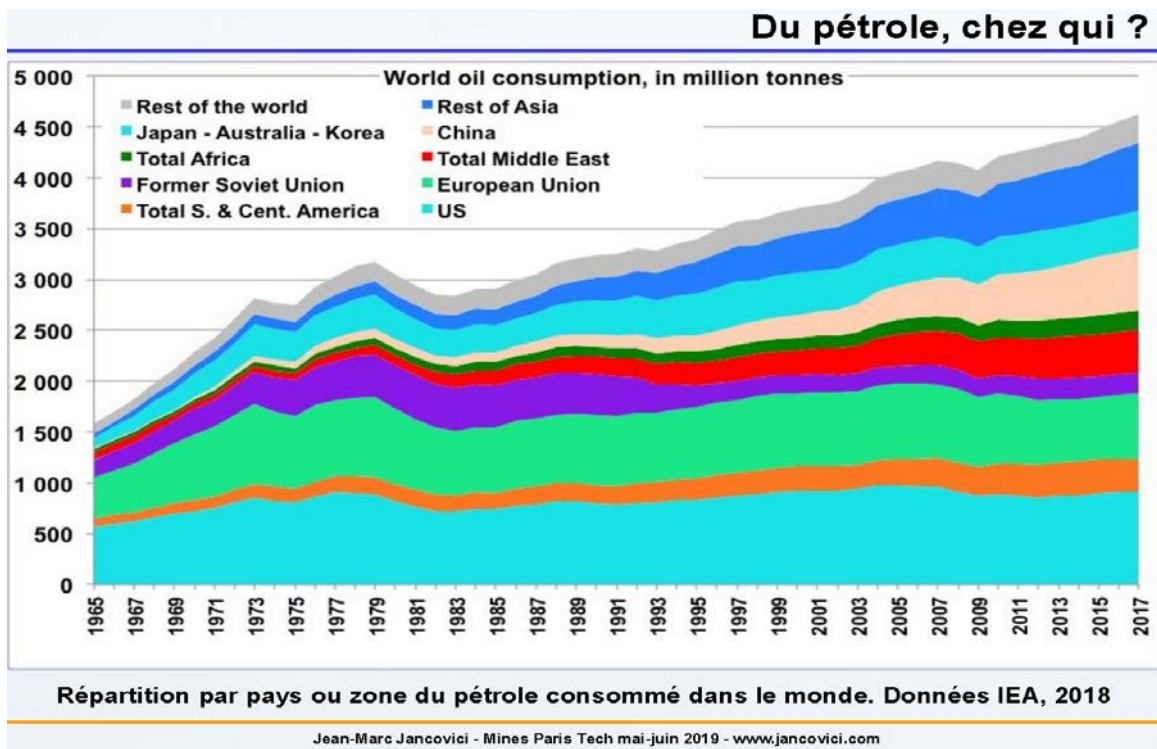


Jean-Marc Jancovici - Mines Paris Tech mai-juin 2019 - www.jancovici.com

Usages des produits raffinés dans le monde :

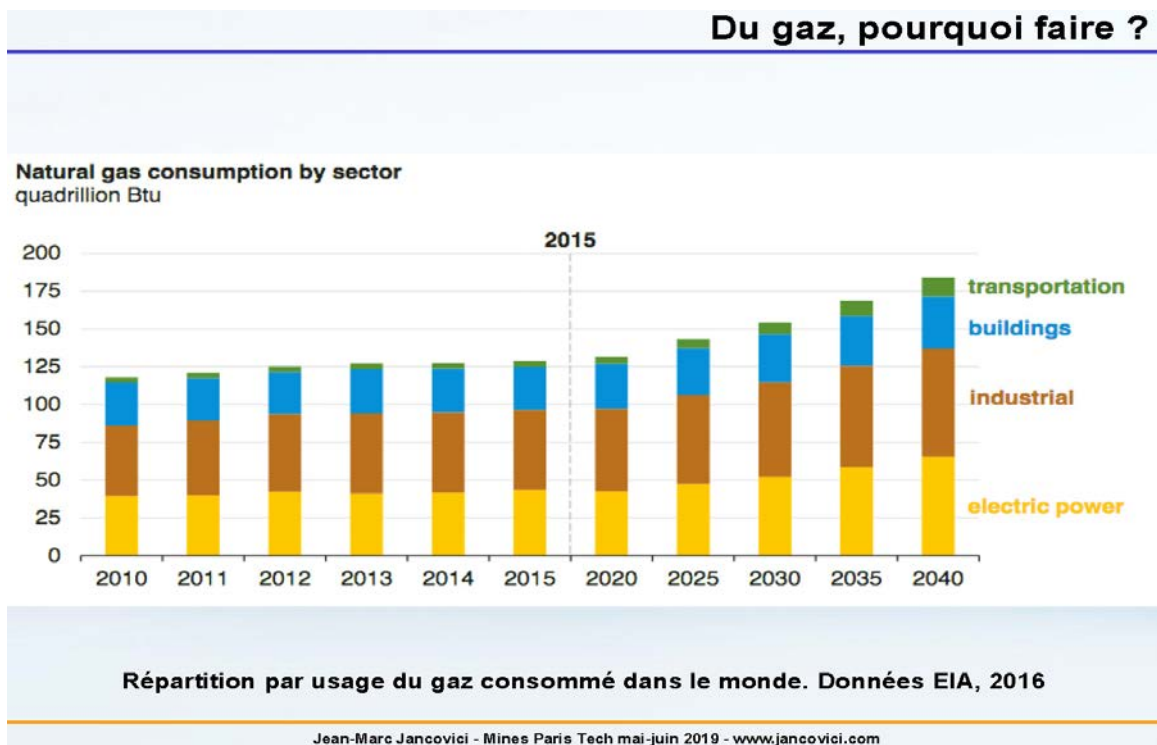
- les transports et en particuliers routiers = 1er poste et en plus forte augmentation
- 98% du déplacement planétaire est fait avec du pétrole
- ce pourquoi le pétrole est l'énergie de la mondialisation : pas de mondialisation sans pétrole

Répartition de la consommation de pétrole dans le monde



- Etats-Unis : consommation constante et le premier consommateur mondial (presque 20% du pétrole mondial consommé par 5% de la population mondiale)
- essor de la consommation chinoise depuis les années 90, en voie de dépasser l'UE

LE GAZ

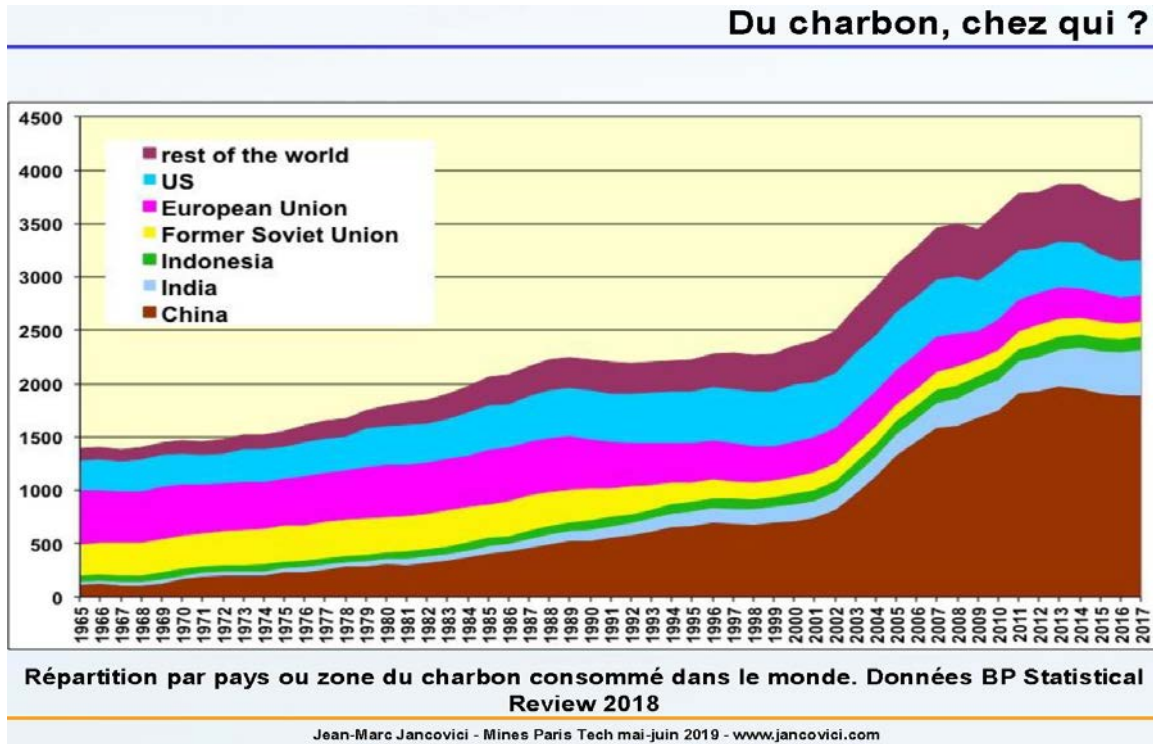


Usages :

- 01 • production d'électricité
- 02 • industrie
- 03 • bâtiment (= chauffage)
- 04 • transport

En France le 03 domine de très loin : 60% du gaz consommé pour le chauffage

## LE CHARBON

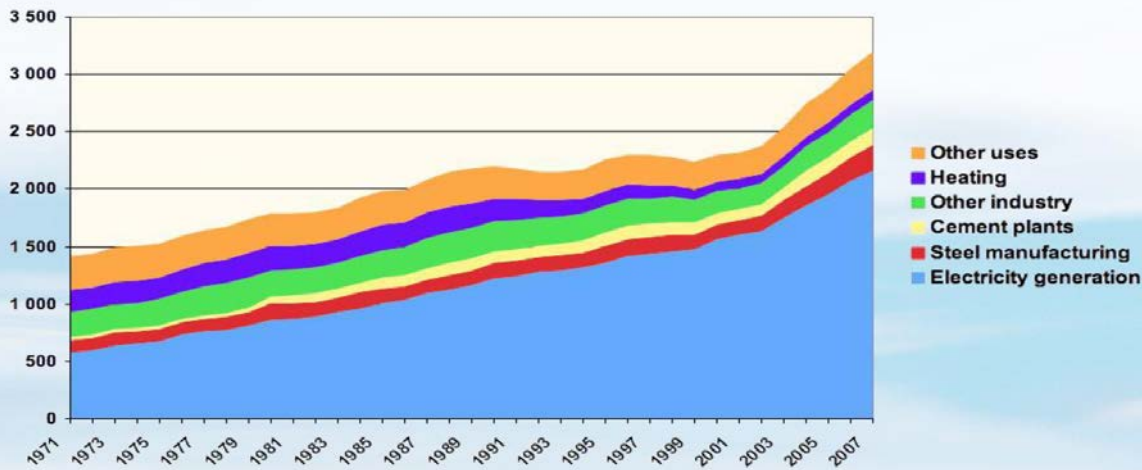


Répartition des consommateurs

- Chine 1er consommateur largement en tête devant l'Inde puis les Etats-Unis
- la Chine utilise la moitié du Charbon extrait
- en augmentation rapide depuis les années 70 avec accélération brusque au début des années 2000 (essor industriel de la chine)
- modèle Coréen identique : a multiplié ses émissions de CO2 par 27 entre 1965 et 2019



## Du charbon, pourquoi faire ?



Répartition par usage du charbon consommé dans le monde jusqu'à 2007. Données AIE, 2009

Jean-Marc Jancovici - Mines Paris Tech mai-juin 2019 - [www.jancovici.com](http://www.jancovici.com)

### Usages

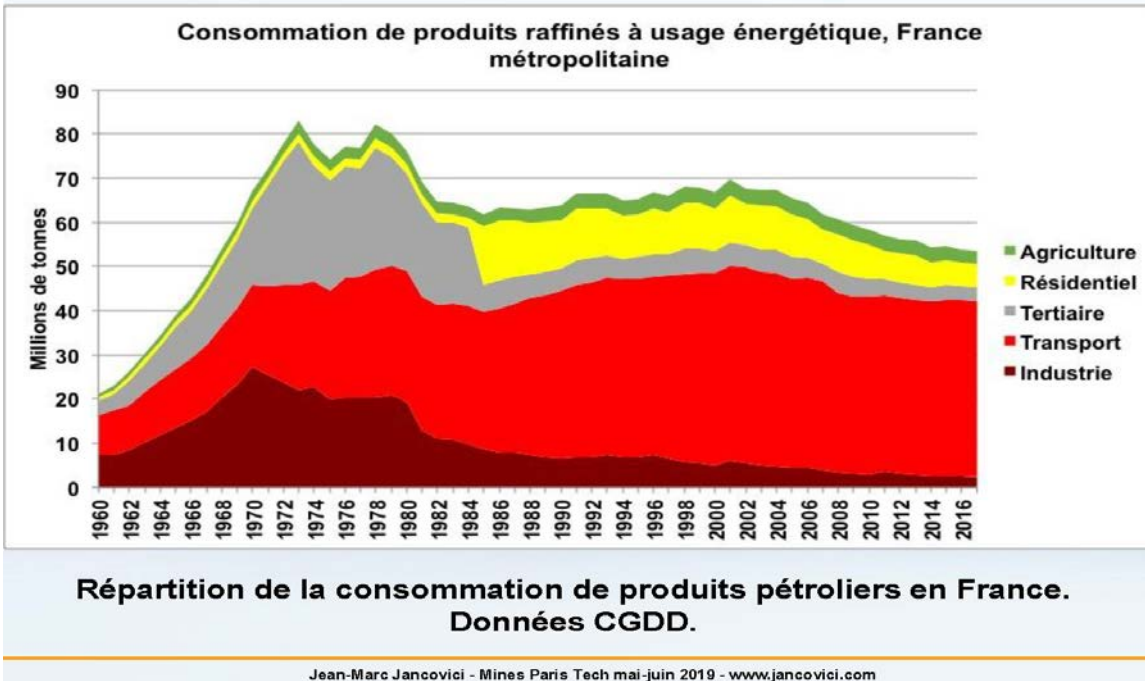
- production d'électricité (2/3)
- aciéries (15%)
- cimenteries
- industries diverses
- chauffage
- usages divers

### RAYONNEMENT GEOGRAPHIQUE DES ENERGIES FOSSILES INEGAL

- la seule énergie mondiale, pour des raisons de physique (la plus dense par unité de volume, 10 kw/h dans 1 litre et très facilement stockable), est le pétrole (plus des 2/3 de la production mondiale qui passe une frontière entre le pays de production et le pays de consommation)
- le gaz voyage peu : 30% passe une frontière,
  - dont 10% sur les 30 qui transitent sous forme de gaz liquéfié (via des méthaniers qui peuvent avoir des clients différents)
  - 20% du gaz a par conséquent un trajet fixe via des pipelines
  - 1 producteur / 1 consommateur : configuration qui explique que le prix du gaz a été calé sur le prix du pétrole, afin d'échapper aux aléas entre contractants
- le charbon (hors charbon métallurgique, à très haute teneur en carbone et qui sert à faire du coke puis de l'acier, qui coûte cher car provenant des quelques rares mines dans le monde)
  - 10 % seulement du charbon passe une frontière entre le pays de production et le pays de consommation
  - charbon = énergie domestique

### CONSOMMATION DES ENERGIES FOSSILES EN France

## Où va « notre » pétrole ?



### PETROLE

- 01 - Transport
- 02 - Résidentiel
- 03 - Agriculture
- 04 - Tertiaire
- 05 - Industrie

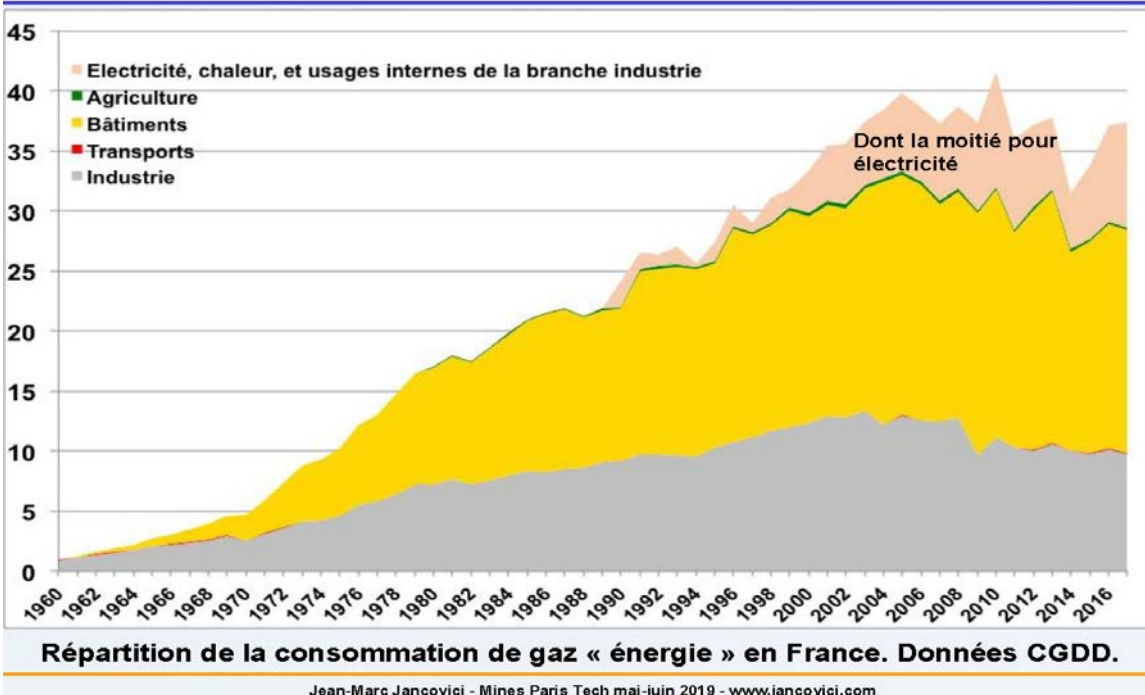
> très forte augmentation du pétrole jusqu'aux chocs pétroliers

> les chocs pétroliers redistribuent complètement les usages

- forte baisse industrie, chauffage résidentiel et tertiaire (remplacement par du gaz et de l'électricité nucléaire)

- aujourd'hui l'essentiel de la consommation de pétrole est pour les transports

## Où va « notre » gaz ?



### GAZ

- 01 • Chauffage / bâtiments

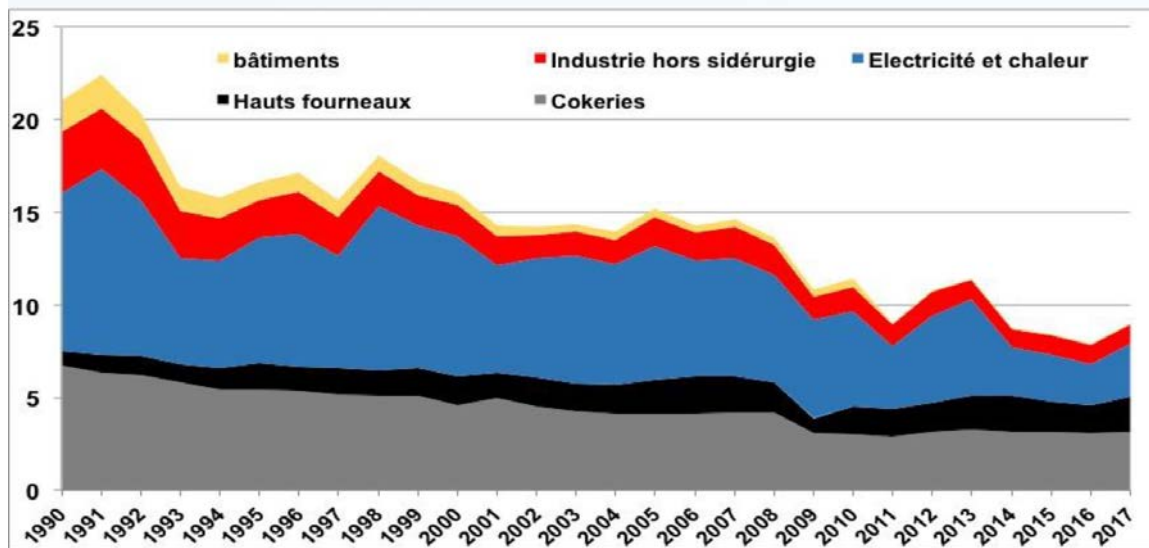
- 02 • Industrie
- 03 • Electricité

> depuis que la Mer du Nord a passé son pic de production (2005, 60% de l'approvisionnement européen), la consommation de gaz en France a arrêté de croître

> globalement en décroissance pour le chauffage et l'industrie

> aujourd'hui approvisionnement de la Mer du Nord 50% de l'Europe

### Où va « notre » charbon ?



Répartition de la consommation de charbon en France. Données CGDD.

Jean-Marc Jancovici - Mines Paris Tech mai-juin 2019 - www.jancovici.com

#### CHARBON

01 • Sidérurgie (hauts fourneaux et cokeries, fabrication de coke / carbone quasi pure à partir du charbon), plus de 50%

> diminution par 2 depuis 20 ans

> 240 PET consommation primaire de la France en énergie, le charbon = moins de 10

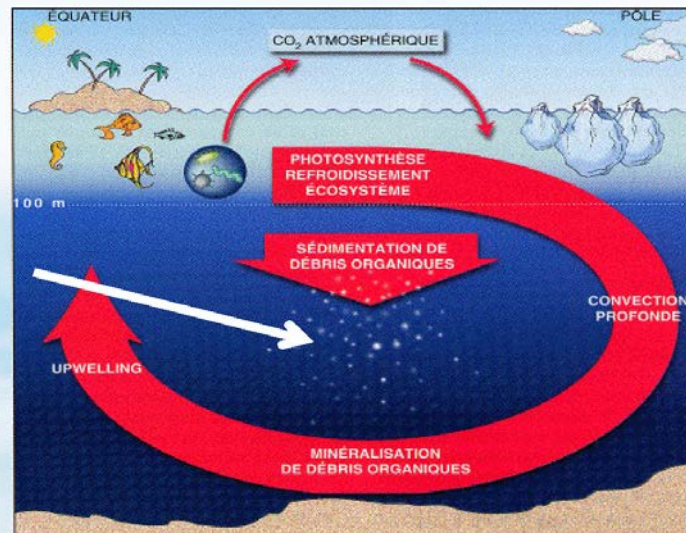
-----

## Chapitre 09 - Génèse des hydrocarbures

Formation des énergies fossiles

## L'aventure du pétrole commence à la plage ou presque

**Futur pétrole**  
Il faut juste attendre 10 millions à 1 milliard d'années !



**1% des débris sédimentent**

Jean-Marc Jancovici - Mines Paris Tech mai-juin 2019 - www.jancovici.com

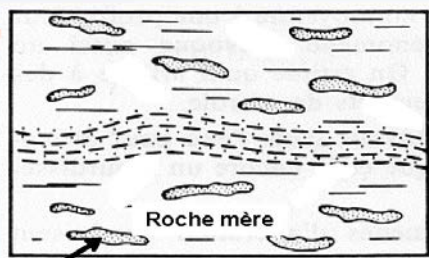
### PETROLE

- > de 10 millions à plusieurs centaines de millions d'années
- > processus gratuit

## Le pétrole aime la cuisson à petit feu

### Tectonique

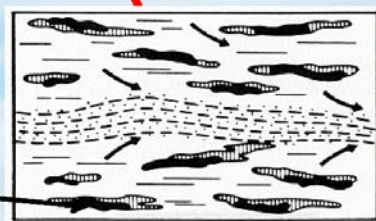
+ 0,5 à 20° C par million d'années



50 à 120 ° C :  
dégradation bactérienne (biochimique) avec expulsion d'eau et de CO<sub>2</sub> et formation de **kérogène**

Matière organique incluse dans le sédiment

Il reste du carbone sans hydrogène : du charbon



Un peu plus chaud :  
pyrolyse du kérogène, avec expulsion d'huile (pétrole) et de gaz (méthane) = migration primaire

Fougères à la place de plancton = charbon + gaz (grisou ou... coal bed methane)

Pyrolyse incomplète du kérogène planctonique = schistes bitumineux (oil shales)

Jean-Marc Jancovici - Mines Paris Tech mai-juin 2019 - www.jancovici.com

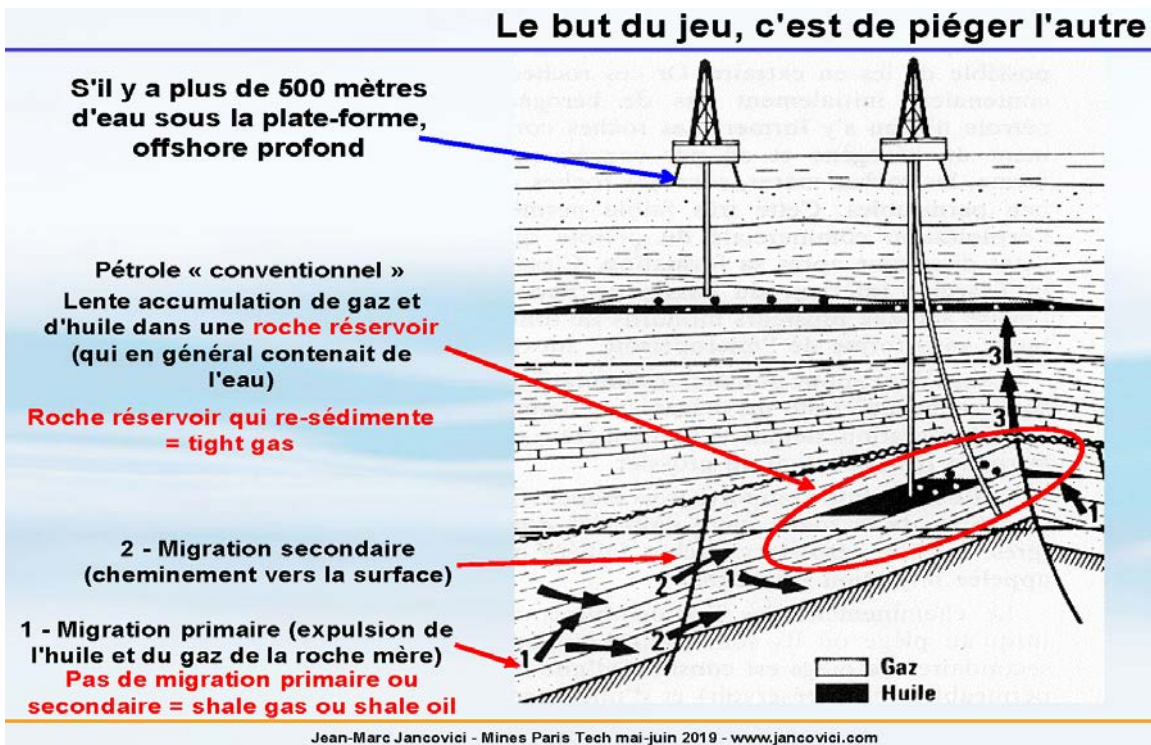
### Phase 01 : chute

- planctons et algues qui pour une petite partie (1%) finissent sur le plancher océanique (l'autre partie étant décomposée dans la colonne d'eau)
- à proximité des côtes, là où est la vie la plus indense et où le plancher océanique est le moins profonde

### Phase 02 : mélange

- sur le planche océanique mélange avec des sédiments minéraux (poussières amenées par le vent, alluvions amenés par les rivières, coquilles des planctons ...)

- compactage



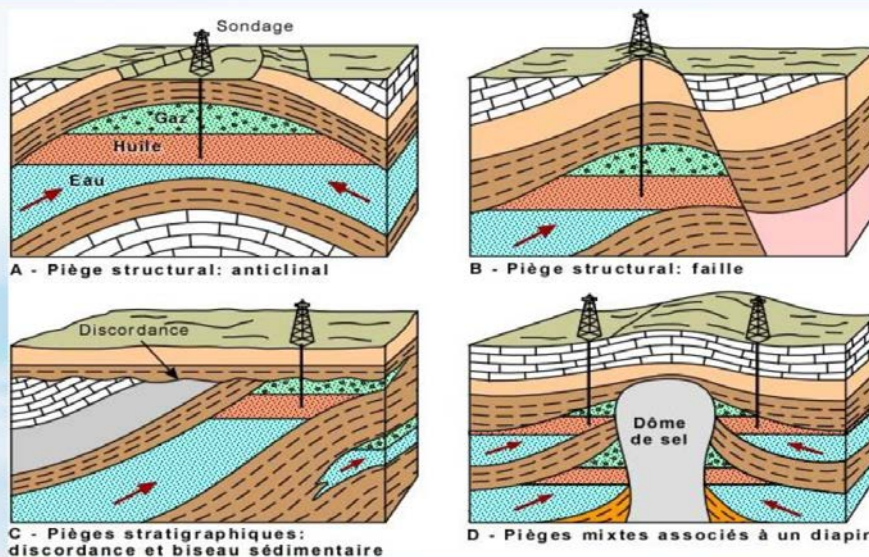
Phase 03 : tectonique des plaques (condition indispensable)

- enfouissement en profondeur
- réchauffement qui engendre une succession de dégradations des composants du sédiments
  - la partie minérale du sédiment se transforme en roche mère
  - la partie organique du sédiment va se transformer en plusieurs étapes
    - > dégradation bactérienne (expulsion d'eau et de CO<sub>2</sub>)
    - > dégradation thermique anaérobie (comme dans une raffinerie, fractionnement / pyrolyse de la matière organique qui aboutit à 3 types de chaînes organiques
    - > kérogène distillé par la géothermie : gaz + liquide (huile) + un résidu solide qui ressemble à du charbon et qui reste contenu dans la roche

Note :

- si la pyrolyse est incomplète / trop "jeune", alors on obtient une roche riche en matière organique appelée schistes bitumineux (ne pas confondre avec les sables bitumineux, oil shale à ne pas confondre avec shale oil)
- pour pouvoir être exploité le schiste bitumineux, il faut finir de le chauffer (très faible rendement énergétique, 1 seule installation dans le monde)
- in fine on récupère du pétrole avec ROI < 1

## On peut être piégé de plusieurs manières



### Divers types de pièges.

Source : [www.ggl.ulaval.ca/personnel/bourque/intro.pt/planete\\_terre.html](http://www.ggl.ulaval.ca/personnel/bourque/intro.pt/planete_terre.html) (n'existe hélas plus)

Jean-Marc Jancovici - Mines Paris Tech mai-juin 2019 - [www.jancovici.com](http://www.jancovici.com)

### Phase 04

- soit le kérogène reste à l'endroit où il s'est formé, le sédiment tout autour a formé une roche imperméable
- soit la roche est perméable, et alors le gaz et l'huile vont connaître une Migration primaire, c'est à dire se diffuser à l'intérieur de la roche

### Note :

- si on remplace le plancton par des fougères (ce qui s'est passé au carbonifère), alors se sont des veines de charbon qui sont formées
- la veine de charbon produit également du pétrole et du gaz, dans le même processus de décomposition et de pyrolyse créée par la chaleur de la terre
- > le pétrole s'échappe
- > tandis qu'une partie du méthane est absorbé dans la veine de charbon (coups de grizou)

### Phase 05 : migration secondaire

- mouvement du gaz et du pétrole vers la surface, la plupart du temps atteint la surface et se décompose
- à de rares exceptions, il reste coincé dans un piège (une roche perméable surmontée d'une roche imperméable)
- la roche réservoir remplie d'eau à 100% initialement
- in fine l'eau passe sous la partie imprégnée de pétrole
- si le piège est à moins de 500m sous terre = pétrole conventionnel
- si le piège est à plus de 500 mètres sous l'eau = off-shore profond

Note : un pétrole privé de sa migration secondaire ou de sa migration primaire, on a une roche mère contenant des hydrocarbures

> shale oil (ou pétrole de "schiste", pétrole de roche mère)

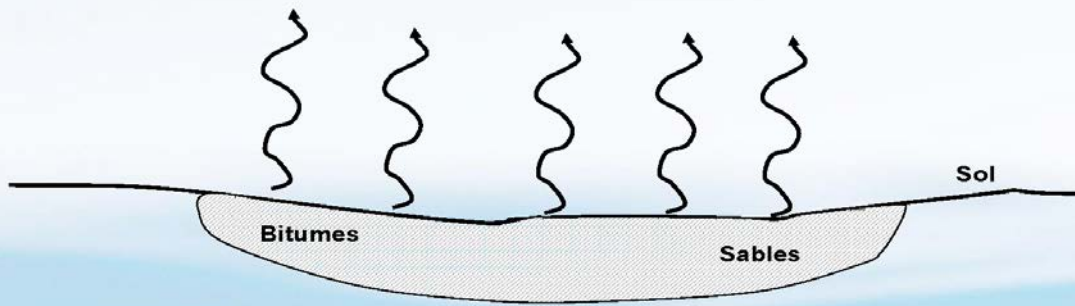
>> soit le pétrole est réellement dans la roche mère

>> soit une minimigration dans des porosités de la roche mère, dans ce cas, tight oil

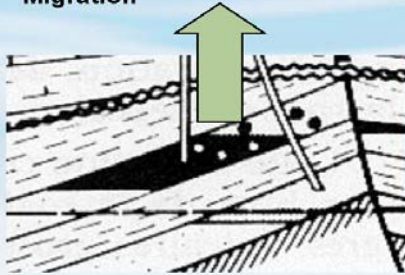
> le pétrole ne circule pas dans la roche, pour l'en faire sortir = fracturation, qui consiste à créer dans la roche mère un réseau de fissures

> fracturation énergivore, rendement énergétique de l'extraction du pétrole de roche mère réduit

## Le lendemain de cui...sson est parfois pâteux



Migration



Au Canada (sables bitumineux) nous avons du pétrole « plus vieux que du pétrole »

Jean-Marc Jancovici - Mines Paris Tech mai-juin 2019 - www.jancovici.com

Note 2 : si la fin de la migration secondaire aboutit en surface à du sable

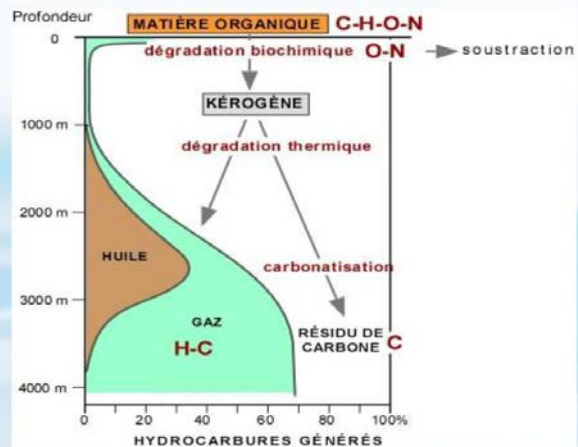
> le sable va emmagasiner le pétrole qui va se décharger de ses composants les plus volatiles

> sables bitumineux

> rendement énergetique mauvais (traitement supplémentaire + éléments volatiles disparus laissent un pétrole de moins bonne qualité)

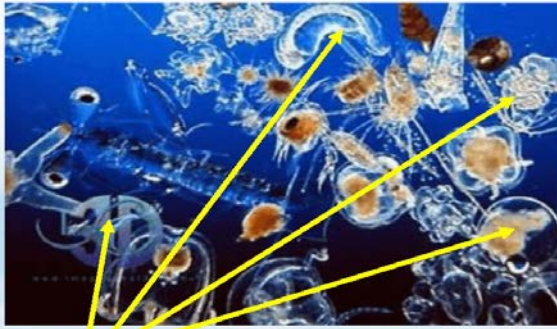
## L'aventure recommence

Tectonique



Jean-Marc Jancovici - Mines Paris Tech mai-juin 2019 - www.jancovici.com

## Merci, mère nature !



et miracle... (après 15 à 800 millions d'années et dans 0,000000001% des cas)



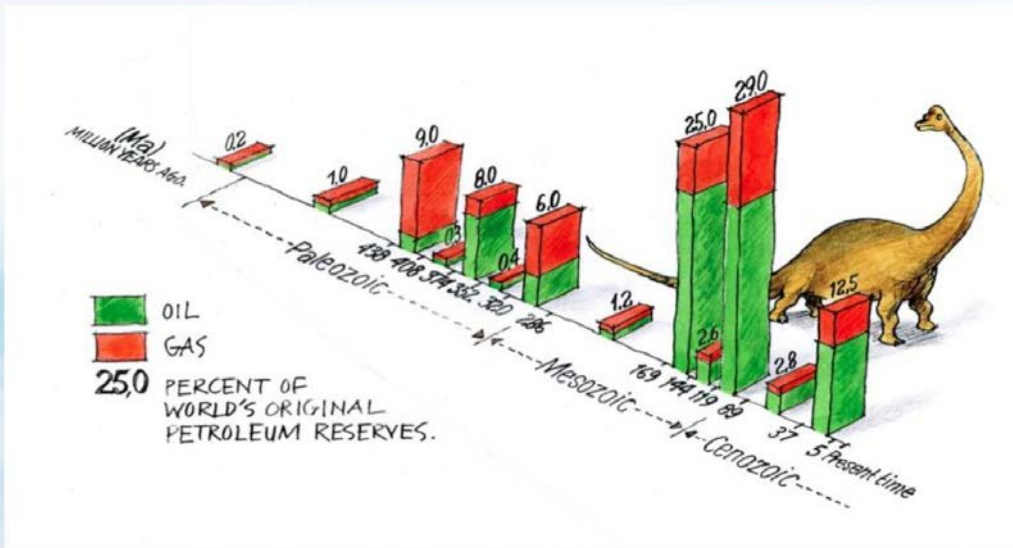
Carbone !

Je laisse tomber au fond de l'océan, fois mort,  
se mélanger avec le sédiment minéral,  
se faire enfouir par la tectonique des plaques,  
se faire cuire par la géothermie,

# GRATUIT !

Jean-Marc Jancovici - Mines Paris Tech mai-juin 2019 - www.jancovici.com

## Pétrole et gaz, des énergies de dinosaure !



Époques de formation du pétrole et du gaz, en pourcentage des réserves mondiales. Source Université d'Uppsala, Suède, 2011

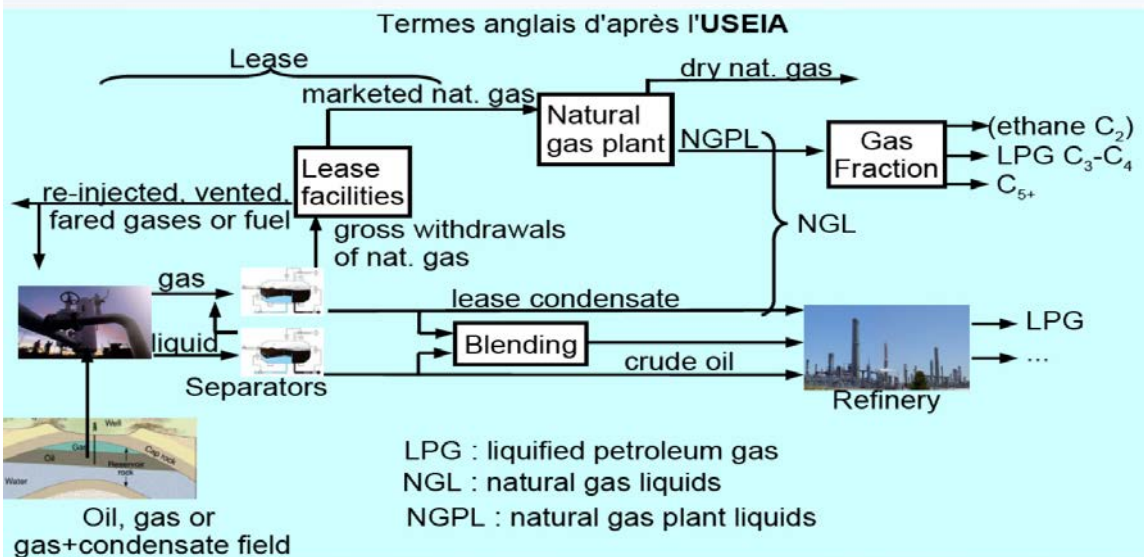
Jean-Marc Jancovici - Mines Paris Tech mai-juin 2019 - www.jancovici.com

## Chapitre 10 - Production et extraction des hydrocarbures

NOMENCLATURE



## Parlons un peu nomenclature

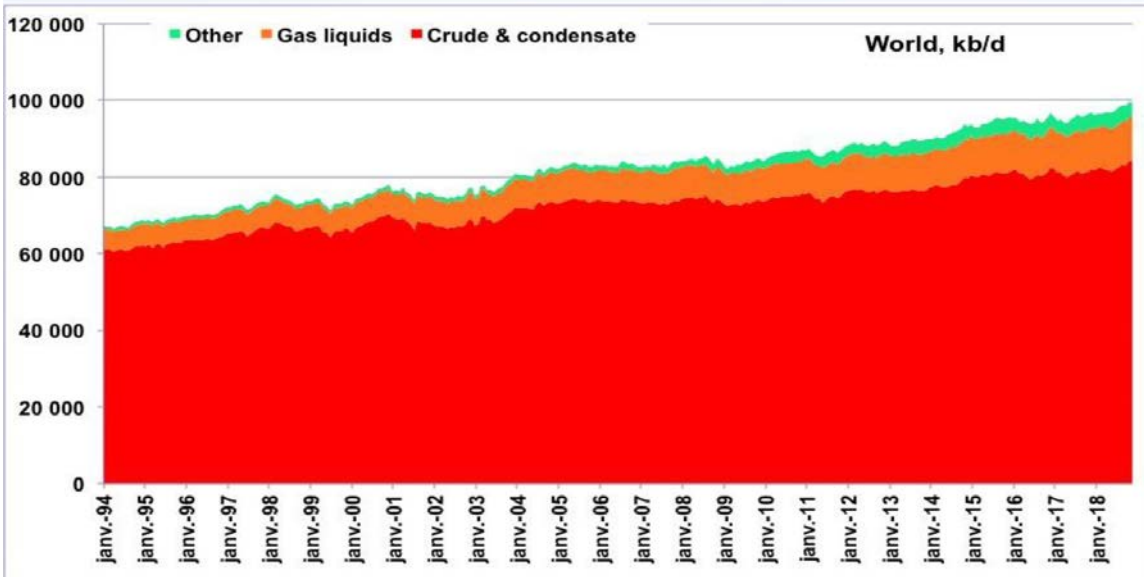


**Productions d'hydrocarbures par nature. Source Xavier Chavanne, IPG, 2015**

Jean-Marc Jancovici - Mines Paris Tech mai-juin 2019 - www.jancovici.com

Plusieurs réalités derrière le mot pétrole :

## Production de quoi exactement ?

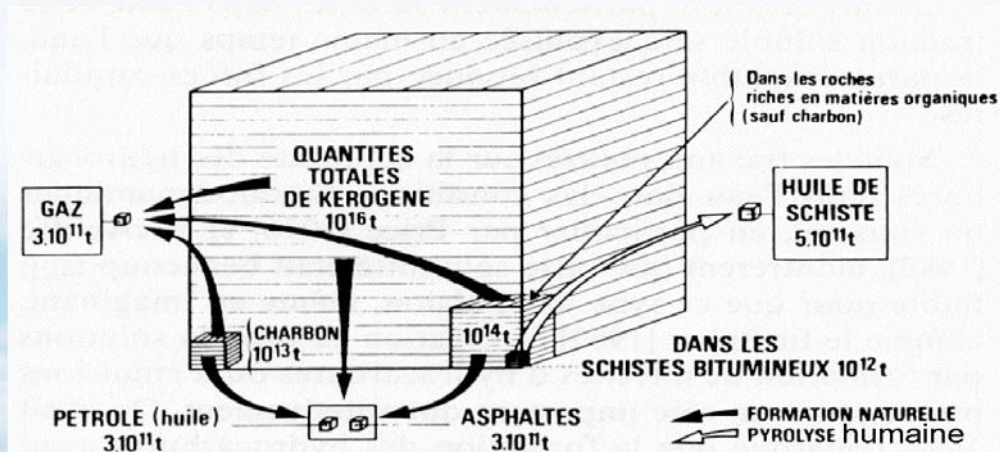


**Production mensuelle de « pétrole », en milliers de barils par jour. Données Energy Information Agency (US), 2019**

Jean-Marc Jancovici - Mines Paris Tech mai-juin 2019 - www.jancovici.com

- historiquement, pétrole désigne ce qui sort du puit de pétrole, sans traitement et mis directement dans les barils
- progressivement d'autres produits ont été extraits des forages de pétrole et sont parfois comptés avec le pétrole
  - gaz dissouts dans le pétrole (éthane pour la pétrochimie, propane pour la pétrochimie, butane = hydrocarbures saturés C2, C3, C4 = liquides de gaz / Natural Gas Liquid), parfois comptés dans le pétrole
  - liquides de gaz également présents en abondance dans les poches de gaz en compagnie du méthane (qui doit être "nettoyé" des gaz liquides pour pouvoir être utilisé)
  - présence de condensats extraits avec le gaz (chaînes carbonées de C5 à C8), comptabilisés dans le pétrole

## Du plancton à l'huile, une sélection plus sévère qu'à ENSMP



Etat des stocks de carbone d'origine organique dans la lithosphère. Le pétrole, c'est 0,00001% de la matière organique qui a vécu au moment de la sédimentation.

Source : les voies et les mécanismes des transformations des matières organiques sédimentaires au cours de l'enfouissement, Bernard Durand, Mem. Soc. Geol. France, N.S., 1987, pp 77-95

Jean-Marc Jancovici - Mines Paris Tech mai-juin 2019 - www.jancovici.com

En discriminant le pétrole brut + condensats avec les gaz liquides et les carburants biodiversité

- à partir de 2005, ptrole brut n'augmente quasiment plus
- augmentation des liquides de gaz dans la période récente peut masquer la faible prograssion de la production de pétrole

Pétrole et gaz se trouvent dans des réservoirs

- la plupart du temps des roches-réservoirs.
- parfois la roche-mère elle-même

La roche-réservoir est une roche sédimentaire poreuse :

- le pétrole imprègne les pores
- avec 3 étages maximum :
  - gaz (qui contient les condensats)
  - huile (qui nécessairement contient des gaz dissous). Propostion d'huile dans la roche varie de quelques % à quelques dizaines de % (10% typiquement)
  - eau

## Le pétrole sous terre : réserve or not réserve ?

Un « réservoir » de pétrole et/ou de gaz met  $\approx 50$  à 500 millions d'années à se former

Il s'agit d'une formation sédimentaire (calcaire, grès, sable...) plus ou moins poreuse, inégalement imprégnée par au plus 3 « étages » : gaz (qui contient des condensats), huile (qui contient du gaz dissous), eau.

La proportion d'huile dans la roche (en poids) est typiquement de quelques % à quelques dizaines de %

Le pétrole contenu dans la roche s'appelle du pétrole « en place ». Tout ne sortira pas.

En première approximation, plus le réservoir est situé profond sous terre et plus la fraction de gaz est élevée

Un pétrole « plus vieux que le pétrole », c'est du bitume

Les « schistes bitumineux » contiennent quelques % en volume de pétrole « plus jeune que le pétrole ». A ne pas confondre avec le « pétrole de schiste », qui désigne du pétrole mature disséminé dans une roche mère, ou logé dans des inclusions

Jean-Marc Jancovici - Mines Paris Tech mai-juin 2019 - [www.jancovici.com](http://www.jancovici.com)

Le pétrole dans la roche s'appelle "le pétrole en place", il est impossible d'extraire 100% de ce pétrole qui imprègne la roche-réservoir (idem pour l'huile présente dans la roche mère)

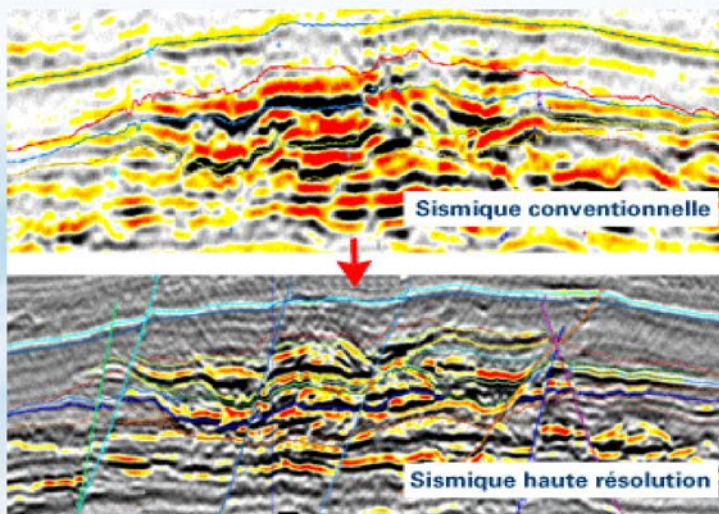
-- Taux de récupération variable

Variable profondeur :

- Plus l'enfouissement est profond plus la part du gaz est élevée
- Du pétrole qui se dégrade en surface est du pétrole vieux, appelé bitumes
- Du pétrole extrait avant maturation complète, schistes bitumineux (à ne pas confondre avec le pétrole de schiste qui est le pétrole mature de roche mère)

Prospection

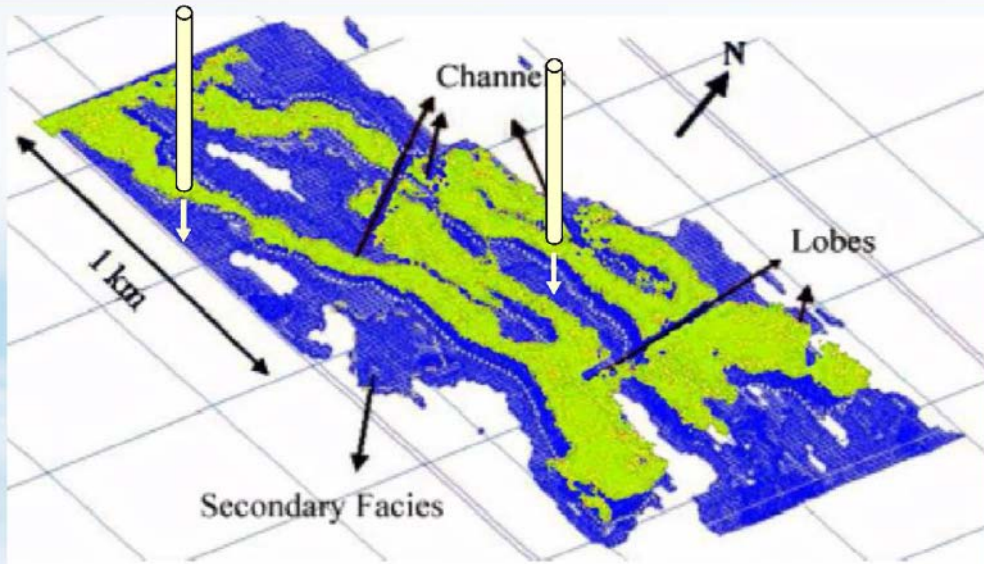
## Plus dur que le sexe d'un bébé : combien de pétrole ?



Exemple d'image obtenue avec de la sismique

Jean-Marc Jancovici - Mines Paris Tech mai-juin 2019 - [www.jancovici.com](http://www.jancovici.com)

## Un réservoir de géologue n'est pas celui d'une auto...



Un exemple de réservoir, reconstitué sur ordinateur à partir d'analyses sismiques

Jean-Marc Jancovici - Mines Paris Tech mai-juin 2019 - [www.jancovici.com](http://www.jancovici.com)

- analyse sismique
- creusement de forages d'exploration, remontée et analyse de la carotte

Quantité du stock connue uniquement par des calculs de modélisation donc avec marge d'incertitude  
Variables :

- le volume de la roche poreuse
- la porosité de la roche, variable selon les emplacements / la profondeur
- la concentration de l'huile dans la roche mère
- la viscosité de l'huile

## Les joies de la nomenclature...

**Le pétrole en place dans la roche réservoir ou la roche mère, qu'il soit extractible ou non, s'appelle une **ressource**. Cette quantité n'est jamais connue avec précision au moment de l'exploration (ni même après souvent), car elle va dépendre :**

Du volume de la roche poreuse (qui a rarement une forme simple)

De sa porosité (qui varie d'un point à l'autre du réservoir)

De la distribution de l'huile (qui peut très fortement varier au mètre près, et dépendre de la fraction expulsée pour les roches mères)

De la viscosité de l'huile (qui peut aussi varier)

**La **ressource** peut être déjà découverte ou non. Une découverte ne « crée » pas de pétrole, elle permet simplement de savoir où il se trouve !**

**Une fois découvert, le gisement peut être en cours d'exploitation, en développement (les investissements sont en cours), ou rien de tout cela.**

**Il n'est pas toujours simple de savoir si de multiples forages « positifs » dans une même zone appartiennent à un même réservoir qui communique de bout en bout, ou à plusieurs réservoirs, géologiquement séparés**

Jean-Marc Jancovici - Mines Paris Tech mai-juin 2019 - [www.jancovici.com](http://www.jancovici.com)

Une fois découvert plusieurs statuts possibles du puit

- exploitation (point de départ de la comptabilisation en tant que réserve)

- développement / installations en cours
- sans activité

## Les joies de la nomenclature (bis)

Pour un gisement - ou réservoir - donné, la **réserve prouvée** correspond à la quantité d'huile qui est **extractible avec certitude** ( $P > 90\%$ ), **aux conditions techniques et économiques du moment**.

Toutes choses égales par ailleurs :

Elle varie avec la réévaluation du réservoir

Elle augmente avec les progrès techniques

Elle varie avec le prix, mais peu sur un réservoir donné (limite énergétique)

Elle diminue avec le temps quand tous les autres paramètres sont stables

Les **réserves ultimes** correspondent à l'ensemble de ce qui peut sortir d'un gisement donné, du début à la fin de son exploitation (idem monde)

Par définition, les réserves ultimes correspondent donc à l'intégrale de la courbe de production entre  $-\infty$  et  $+\infty$ , et **ne varient pas au cours du temps**

Les réserves ultimes **restantes** constituent la totalité du pétrole extractible restant. Les réserves prouvées en sont un sous-ensemble.

Les réserves ultimes d'un réservoir ne sont connues avec certitude **qu'une fois l'exploitation terminée**. Si les réserves ultimes sont invariantes avec le temps, l'appréciation de ces réserves peut elle varier avec le temps.

Jean-Marc Jancovici - Mines Paris Tech mai-juin 2019 - www.jancovici.com

Notion de réserve prouvée (réserves 1P)

= l'hypothèse la plus basse sur les variables du gisement (taille, porosité, taux de récupération ...)

= assurance de pouvoir extraire à techniques constantes

Evolutions possibles de la réserve prouvée :

- réévaluations régulières à la hausse ou à la baisse
- augmente si les techniques de récupérations sont améliorées
- augmente faiblement avec le prix du pétrole (infrastructures initiales lourdes, inertie forte). Justifie l'exploration et la création de nouveaux forages mais pas rénovation d'existants.
- diminue avec le temps puisque le stocke s'épuise

Notion de réserves ultimes (= le plus probable) - Réserves 2P

= l'intégrale de la production entre le début et la fin, connue uniquement l'exploitation terminée

= ne varient pas avec le temps (sauf à les réévaluer)

= les réserves ultimes restantes > aux réserves prouvées

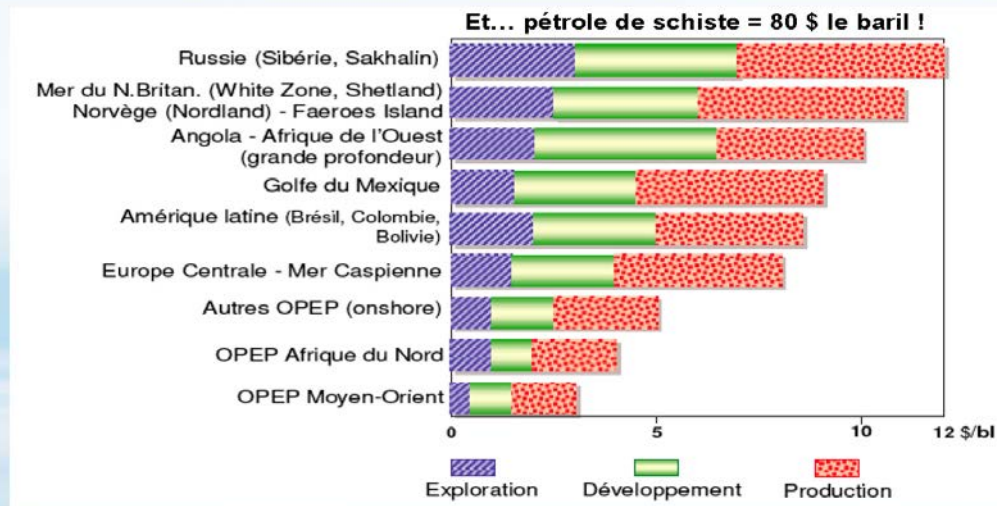
Notion de réserve 3P

= le plus optimiste, irréaliste

= réserves Prouvées + Réserves Probables + Réserves Possibles)

## Chapitre 11 - Les réserves

## Une réserve, c'est (un peu) pour un prix



Coût d'extraction d'un baril de pétrole conventionnel pour quelques grandes zones.  
10\$/baril  $\approx$  0,4 centime (d'euro) par kWh. Imbattable !

Source : ADL, Long term Outlook, 1999, In Bauquis & Babusiaux, Adadémie des Technologies, 2007

Jean-Marc Jancovici - Mines Paris Tech mai-juin 2019 - www.jancovici.com

### Réserves

= réserves en théorie ont un lien avec le prix

= mais pas en pratique car pour le pétrole conventionnel l'extraction est rentable quelque soit le prix du baril

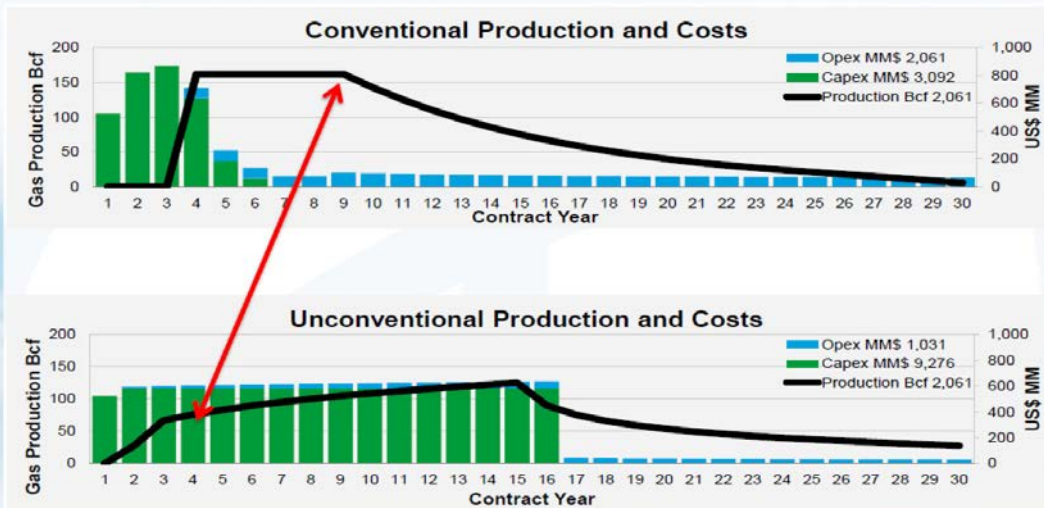
Coûts techniques d'extraction du pétrole dans le monde (exploration + développement + production)

- 5 à 10 \$ le baril, variable en fonction de la facilité d'accès, de l'ancienneté, etc.
- vendu 80 \$ pour les rentes : impôts, taxes (dont les plus importantes sont celles payées au pays producteur par les compagnies pétrolières en vertu de l'accord de partage avec le pays détenteur), marges d'intermédiaires

Différence fondamentale entre le pétrole "conventionnel" et le pétrole "de roche mère" au niveau de la structure des coûts

- gisement conventionnel :
  - roche poreuse qui contient du pétrole
  - l'essentiel des coûts est l'exploration puis l'installation du forage, avant que le 1er baril ne sorte de terre
  - coûts d'exploitation relativement modestes une fois les frais colossaux d'installation payés

## Hydrocarbures de schiste : back to the future

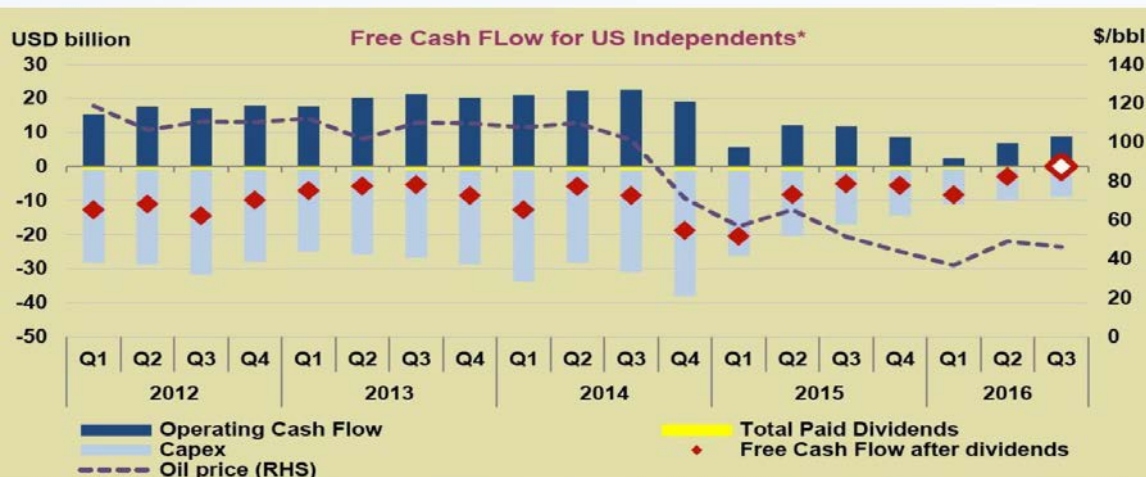


Source: Gaffney, Cline & Associates.

Jean-Marc Jancovici - Mines Paris Tech mai-juin 2019 - www.jancovici.com

- gisement de roche mère
- puit met 1 mois pour atteindre son pic, 1 an pour tomber entre 20 et 50% du niveau initial
- pour conserver un approvisionnement constant en provenance d'un champ, la solution est d'installer des puits en permanence (quelques millions de dollars)
- le puit n'est plus un élément de capital mais un élément de charge courante, un "consommable"
- > cette particularité dans la structure des coûts explique que depuis 2012 en moyenne, les exploitants de pétrole et de gaz de roche mère aux Etats-Unis perdent de l'argent
- > l'argent de la vente des ressources extraites suffit à payer le renouvellement des puits

## Plein de trous sans l'ombre d'un dollar de gain ?



≈ 250 milliards de dollars de pertes de trésorerie en cumulé !

Source: International Energy Agency, oil market report, 2016

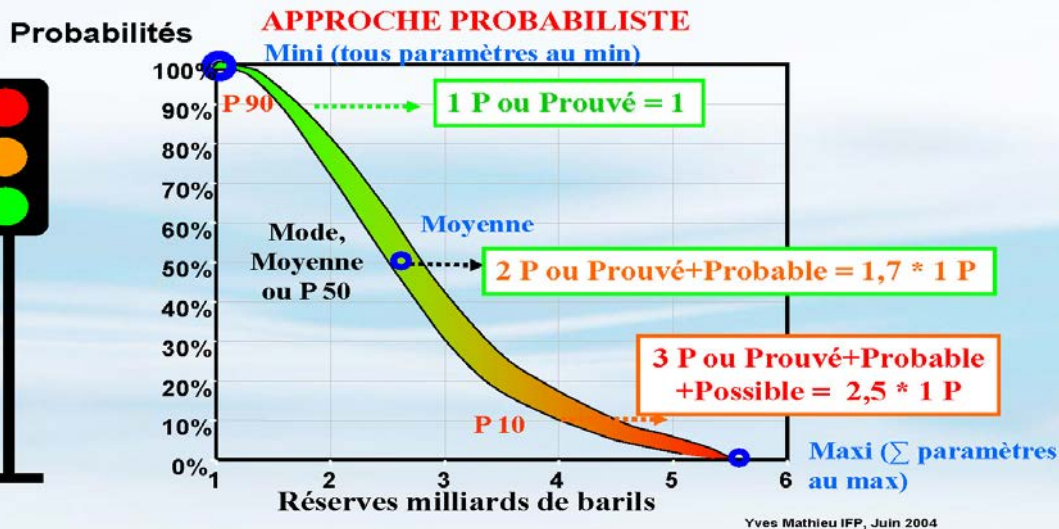
Jean-Marc Jancovici - Mines Paris Tech mai-juin 2019 - www.jancovici.com

- > mais se pose le problème de la dette croissante à rembourser avec un prix du baril bas
- > "étrangeté financière" / équilibre instable dans ce secteur qui pourrait conduire à un krach / à une chute brusque de la production.

Or il s'agit du seul endroit au monde avec l'Irak où la production de pétrole continue à croître. Conditionne l'évolution de l'économie mondiale.

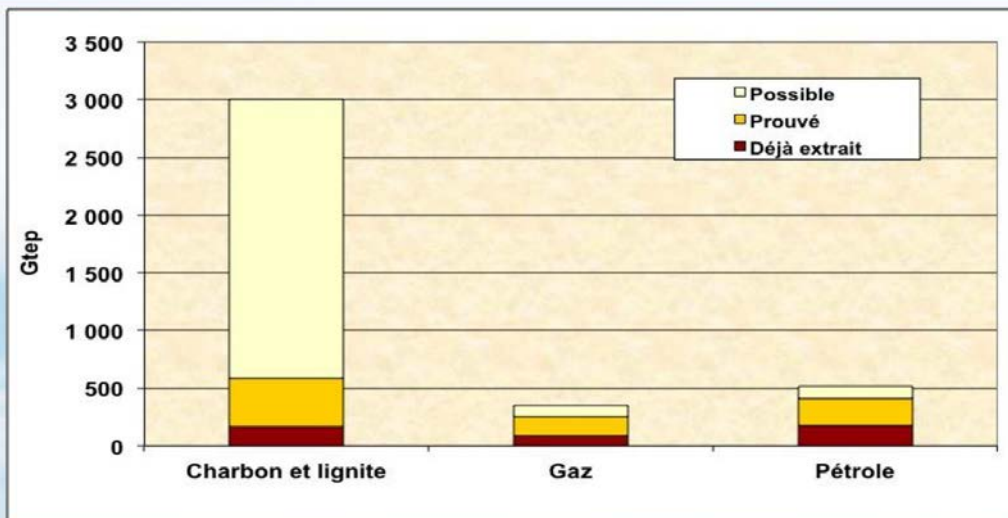
## Faire le tour du hangar et regarder par le trou de la serrure

Soit un réservoir, avec une incertitude sur son volume, sur sa porosité, sur sa pression, sur sa viscosité, etc



Jean-Marc Jancovici - Mines Paris Tech mai-juin 2019 - www.jancovici.com

## Parlons chiffres



Production cumulée (2012), réserves prouvées (2012) et haut de fourchette possible pour gaz, pétrole et charbon conventionnels.

Compilation de l'auteur sur sources diverses

Jean-Marc Jancovici - Mines Paris Tech mai-juin 2019 - www.jancovici.com

Bonne connaissance des réserves de pétrole et gaz conventionnel

-- le reste à découvrir est très faible

-- les réserves 2P bien évaluées

Pour le charbon, à l'inverse, état des réserves très incertain

Découvertes de pétrole et de gaz conventionnel (= dans des roches poreuses imprégnées, pas dans les



roches mères)

--> en baisse depuis les années 60,

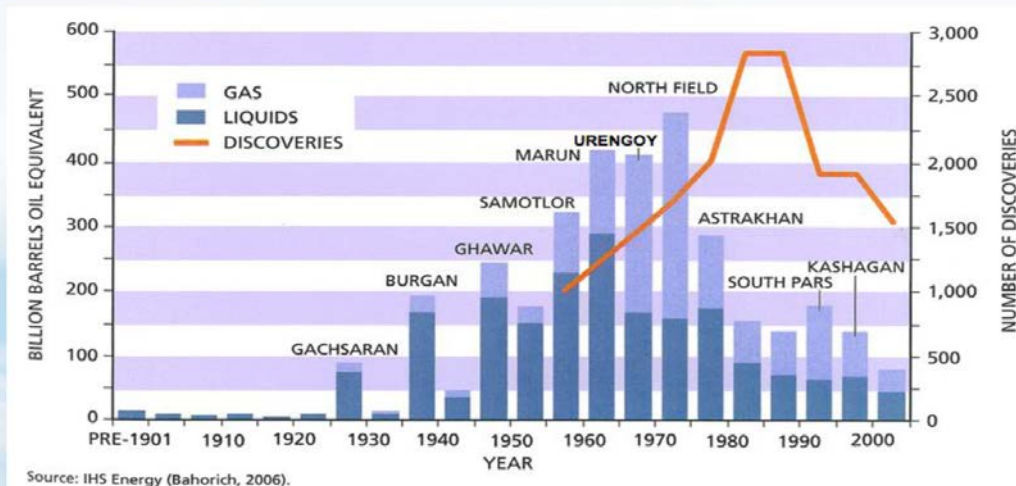
--> tendance lourde qui ne s'inversera pas car en parallèle les explorations ont tout cartographié

--> les découvertes de gisements ont augmenté jusqu'aux années 80 mais n'ont pas infléchi la baisse des quantités découvertes

--> depuis les années 80, les découvertes de gisement elles-mêmes déclinent fortement

--> la mise en exploitation des champs profonds et polaires n'inversera pas la tendance lourde

## Mieux vaut d'abord trouver le pétrole si on veut l'extraire



Découvertes mondiales de pétrole conventionnel et de gaz conventionnel récupérables depuis 1900 hors US et Canada, en milliards de barils équivalent pétrole par décennie (1 tonne = 7,3 barils). En orange : nombre de champs découverts.

Source : IHS, 2006

Jean-Marc Jancovici - Mines Paris Tech mai-juin 2019 - www.jancovici.com

## C'est la petite bête qui descend, qui descend...



Découvertes mondiales de pétrole conventionnel depuis 1947, en milliards de barils  
Source : Bloomberg

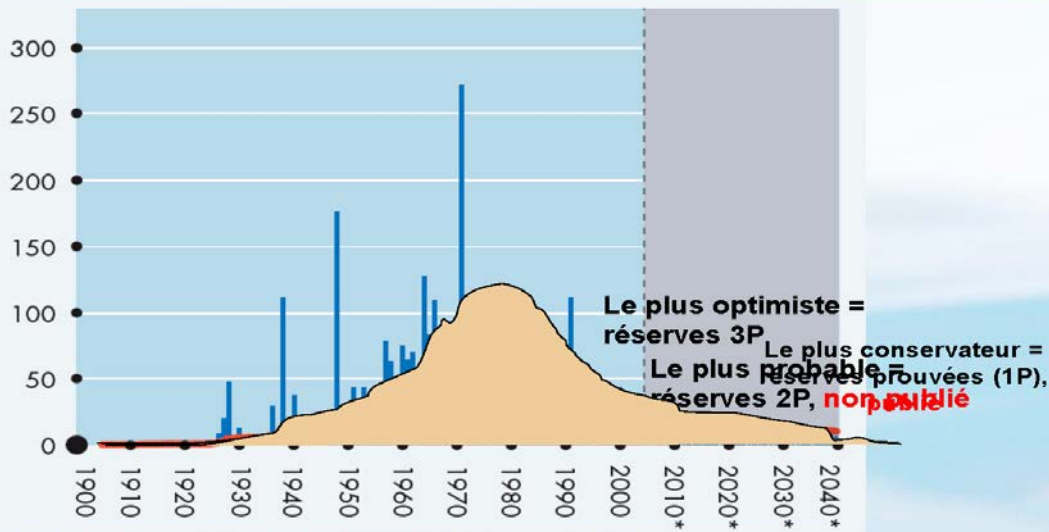
Jean-Marc Jancovici - Mines Paris Tech mai-juin 2019 - www.jancovici.com

La recherche de nouveaux gisements est très fortement corrélé au prix du pétrole

- plus le baril monte plus les recherches s'intensifient

- cela permet de faire des petites découvertes supplémentaires

## Et il en sortira quoi de tout ca ?

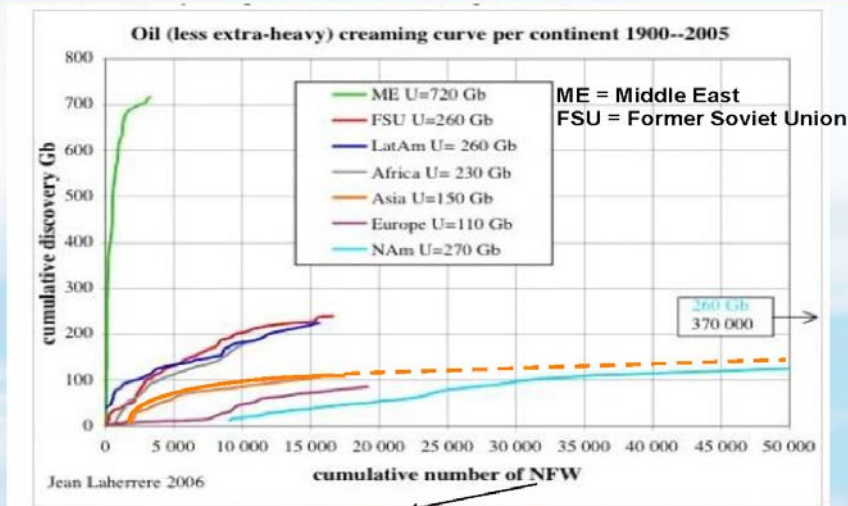


Découvertes mondiales de pétrole récupérable depuis 1900 (valeurs annuelles et moyenne mobile sur 20 ans), en milliards de barils, et **extrapolation pour le futur** (y compris offshore profond, polaire, etc).

Source : Shell/IHS Energy, 2005

Jean-Marc Jancovici - Mines Paris Tech mai-juin 2019 - www.jancovici.com

## Moins de découvertes parce nous cherchons moins ?



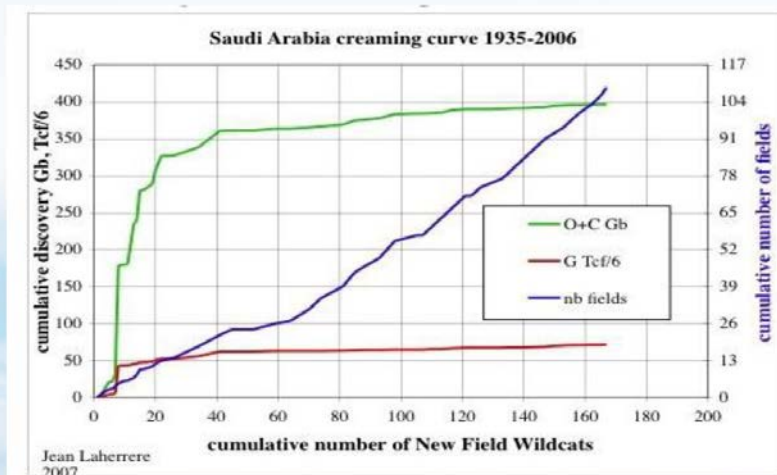
NFW = New Field Wildcats = puits d'exploration

Découvertes cumulées en fonction du nombre de puits forés pour le monde. Même remarque que précédemment.

Source Jean Laherrère, 2006

Jean-Marc Jancovici - Mines Paris Tech mai-juin 2019 - www.jancovici.com

## Moins de découvertes parce nous cherchons moins (bis) ?

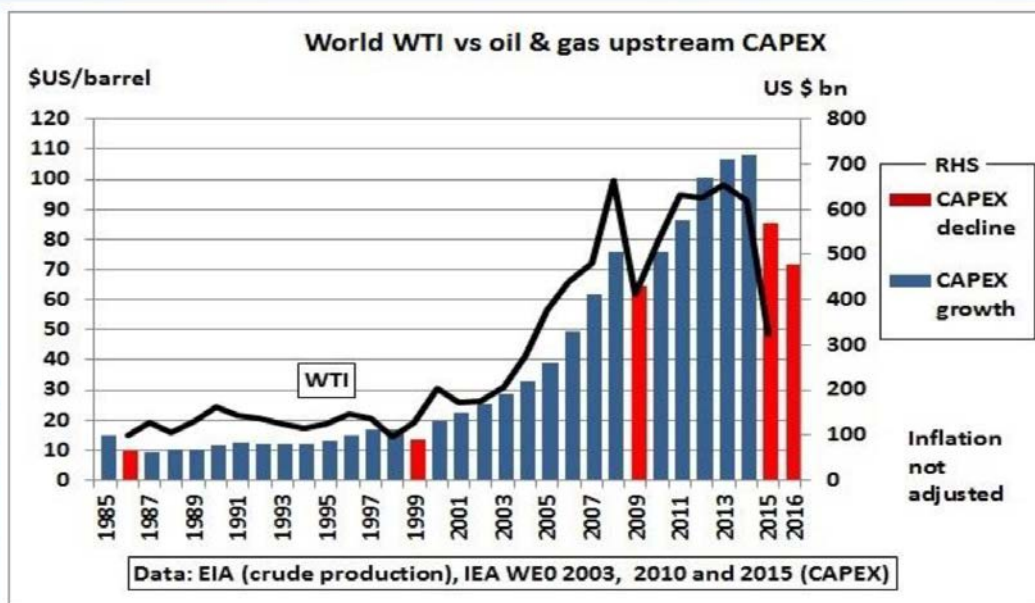


Découvertes cumulées en fonction du nombre de puits forés pour l'Arabie Saoudite. Il est facile de constater que plus le nombre de puits d'exploration forés est important, moins les derniers puits forés contribuent aux découvertes.

Source Jean Laherrère, 2007

Jean-Marc Jancovici - Mines Paris Tech mai-juin 2019 - www.jancovici.com

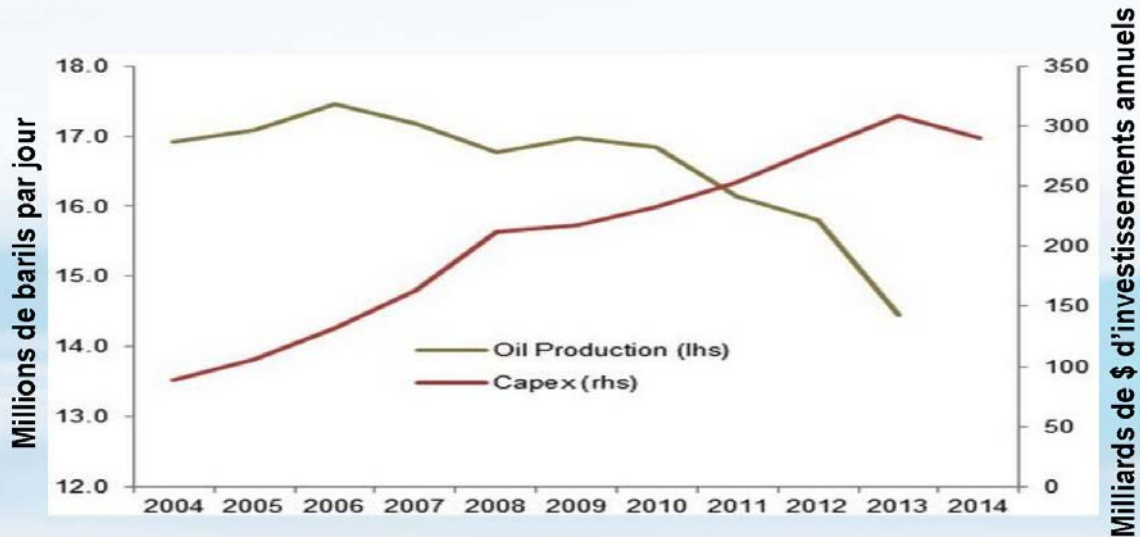
## Moins de découvertes parce que nous cherchons moins ?



Investissements en milliards de dollars de l'industrie pétrolière mondiale.

Jean-Marc Jancovici - Mines Paris Tech mai-juin 2019 - www.jancovici.com

## Mais ça ne suffit pas à produire plus...

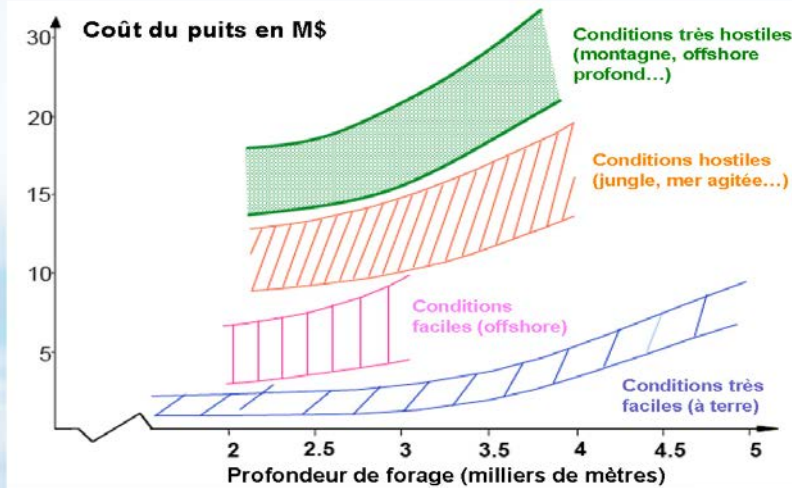


Production pétrolière des majors de 2004 à 2014, et budgets d'investissement des mêmes  
Source Bloomberg via Astenbeck Capital Management

Jean-Marc Jancovici - Mines Paris Tech mai-juin 2019 - www.jancovici.com

- Comparaison des dépenses d'exploration des majors (Capex) et la production de pétrole :
- les courbes se croisent en 2011
  - chute accélérée de la production à cette période malgré augmentation des investissements
  - l'investissement est surtout entrepris pour limiter le déclin de la production

## Chère, la technologie !



Prix d'un forage d'exploration dans le monde selon les conditions.

Source Pierre-René Bauquis, 2008

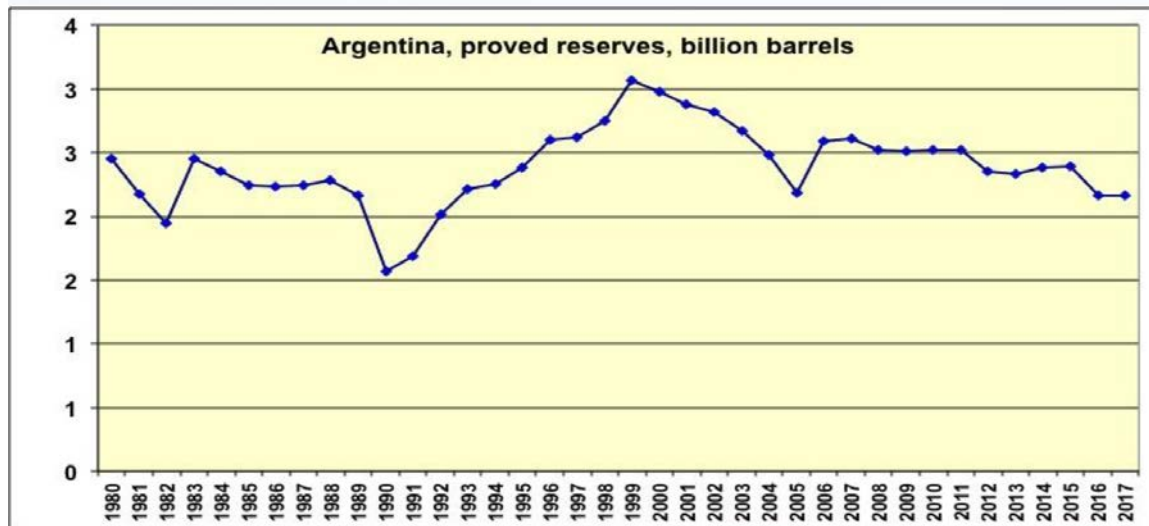
Jean-Marc Jancovici - Mines Paris Tech mai-juin 2019 - www.jancovici.com

- Explication de la fixation des prix du pétrole :
- indépendant du volume
  - prix oscillant par phases
  - > augmentation demande > montée du prix
  - > montée du prix > nouvelles prospections des majors
  - > montée des prix continue > reflux demande
  - > reflux demande > baisse du prix au moment où les nouveaux champs commencent à produire

--> prix bas > augmentation demande

- dans ce contexte d'oscillation le shale oil pourrait raccourcir la longueur d'onde de l'oscillation car la mise en place de nouveaux champs est très rapide

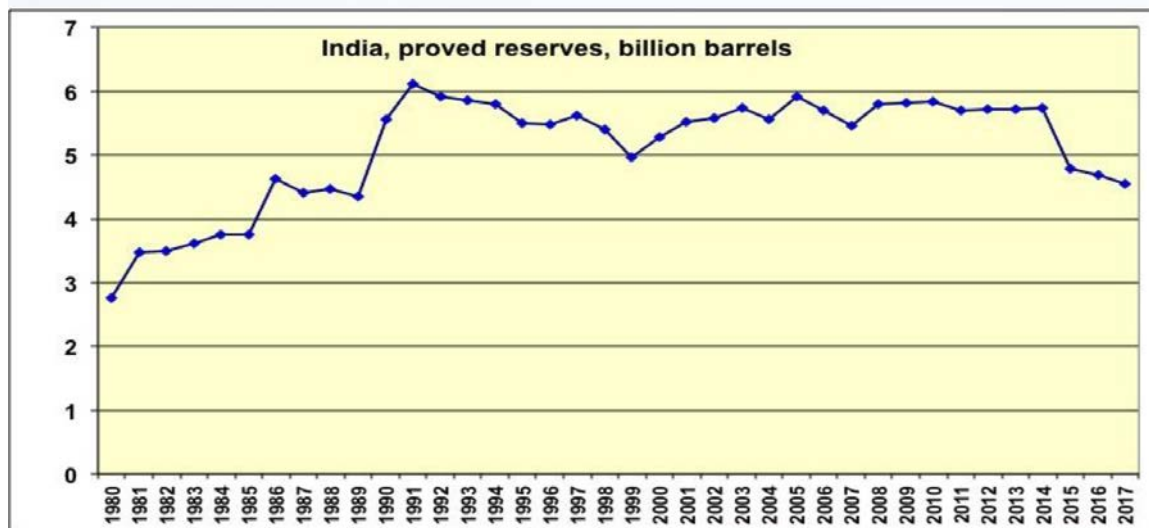
## Les réserves, normalement sensibles à l'activité des shadoks



Evolution des réserves prouvées en Argentine. Source BP Statistical Review, 2018

Jean-Marc Jancovici - Mines Paris Tech mai-juin 2019 - [www.jancovici.com](http://www.jancovici.com)

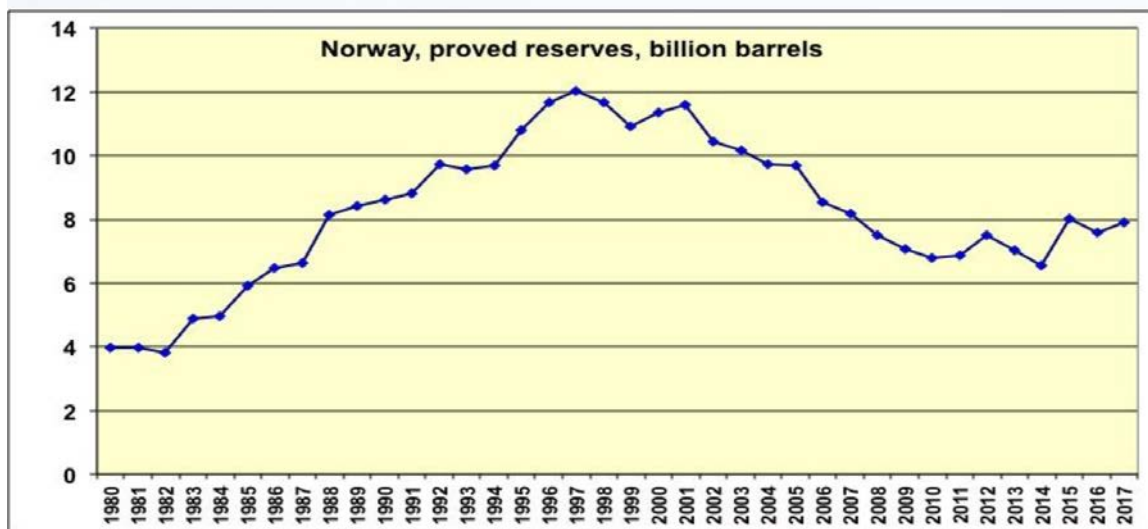
## Les réserves, normalement sensibles à l'activité des shadoks



Evolution des réserves prouvées en Inde. Source BP Statistical Review, 2018

Jean-Marc Jancovici - Mines Paris Tech mai-juin 2019 - [www.jancovici.com](http://www.jancovici.com)

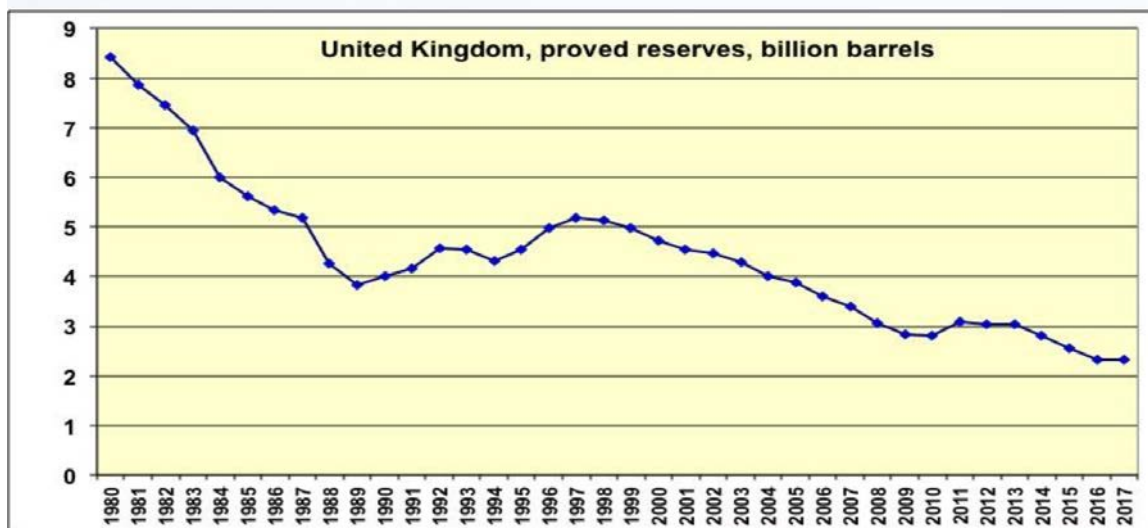
## Les réserves, normalement sensibles à l'activité des shadoks



Evolution des réserves prouvées en Norvège (1er producteur de brut en Europe). Source BP Statistical Review, 2018

Jean-Marc Jancovici - Mines Paris Tech mai-juin 2019 - [www.jancovici.com](http://www.jancovici.com)

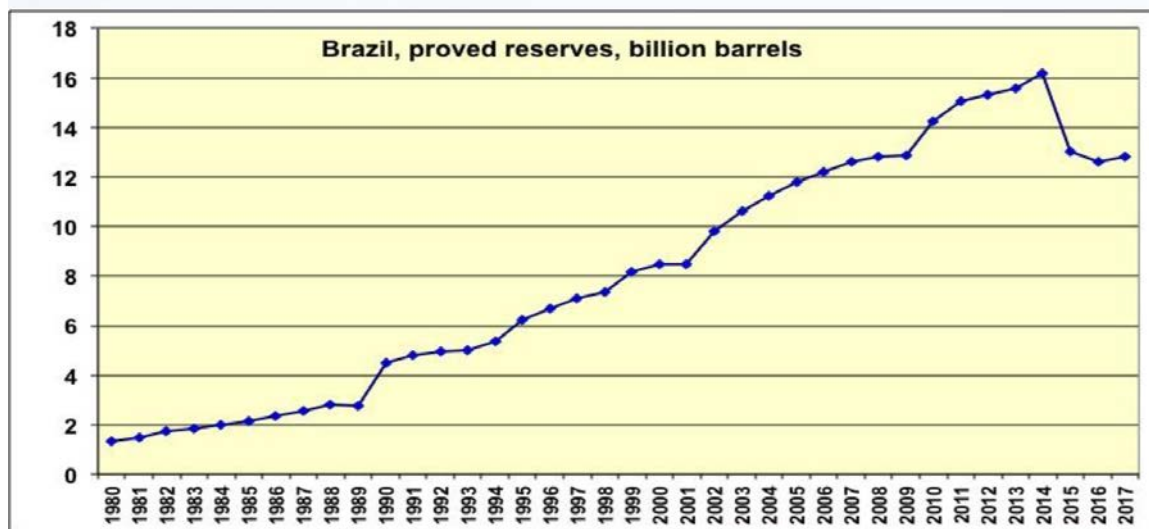
## Les réserves, normalement sensibles à l'activité des shadoks



Evolution des réserves prouvées en Grande Bretagne. Source BP Statistical Review, 2018

Jean-Marc Jancovici - Mines Paris Tech mai-juin 2019 - [www.jancovici.com](http://www.jancovici.com)

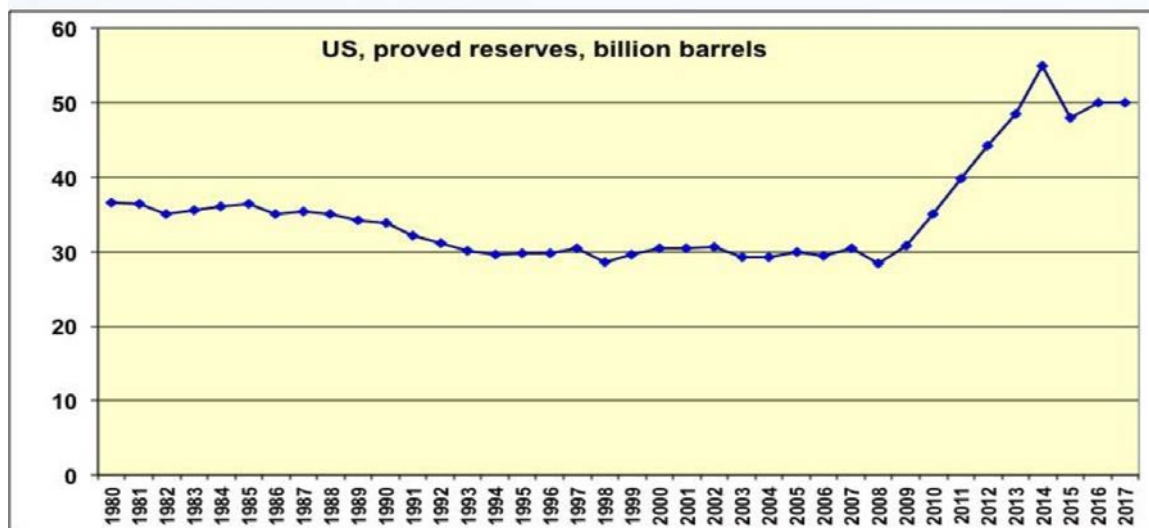
## Les réserves, normalement sensibles à l'activité des shadoks



Evolution des réserves prouvées au Brésil. Source BP Statistical Review, 2018

Jean-Marc Jancovici - Mines Paris Tech mai-juin 2019 - [www.jancovici.com](http://www.jancovici.com)

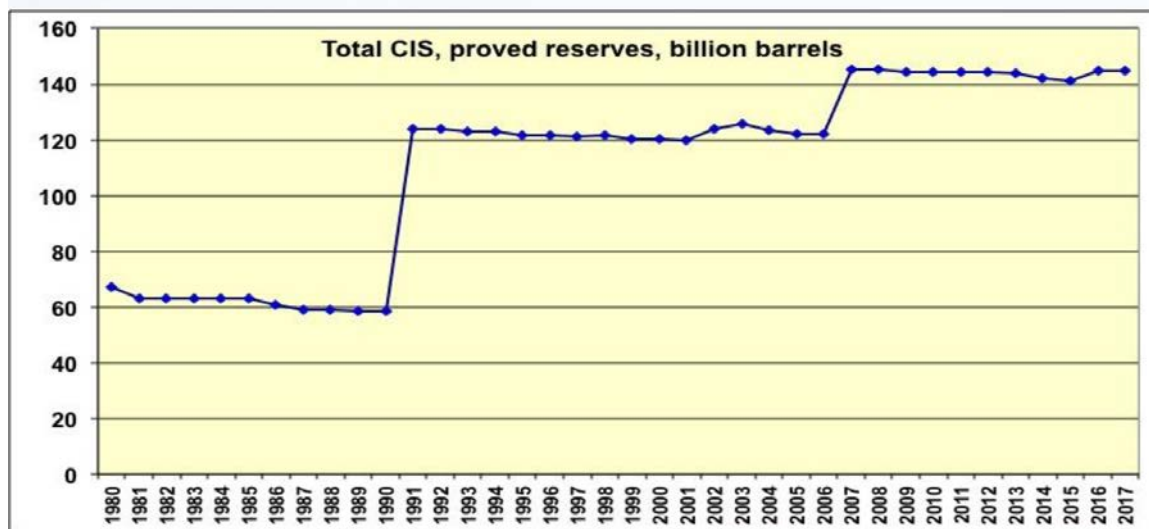
## Les réserves, normalement sensibles à l'activité des shadoks



Evolution des réserves prouvées aux USA. Source BP Statistical Review, 2018

Jean-Marc Jancovici - Mines Paris Tech mai-juin 2019 - [www.jancovici.com](http://www.jancovici.com)

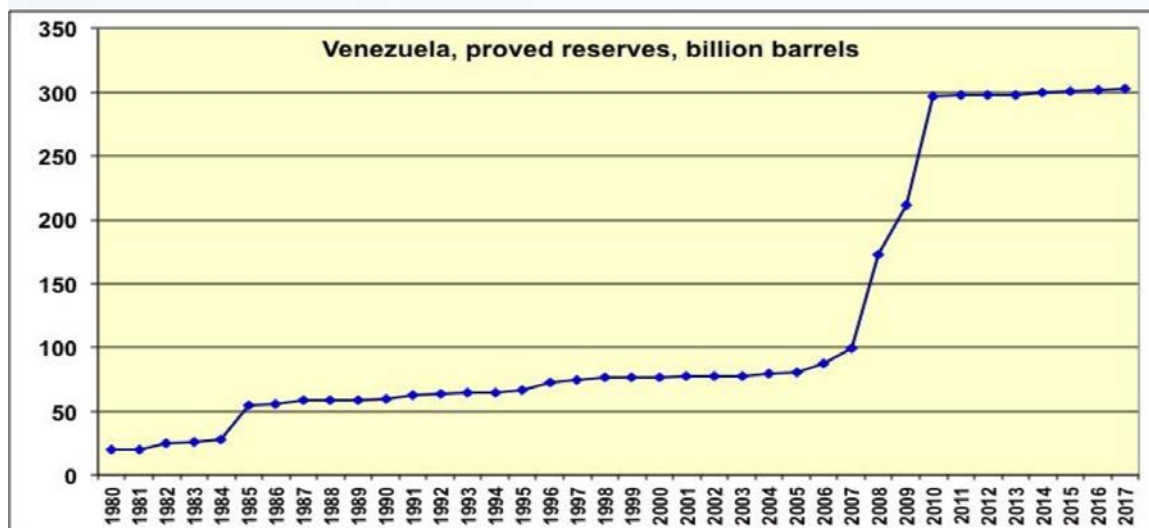
## Les réserves, normalement sensibles à l'activité des shadoks



Evolution des réserves prouvées dans l'ancienne URSS. Source BP Statistical Review, 2018

Jean-Marc Jancovici - Mines Paris Tech mai-juin 2019 - [www.jancovici.com](http://www.jancovici.com)

**Attention à ne pas confondre réservoir et robinet !**

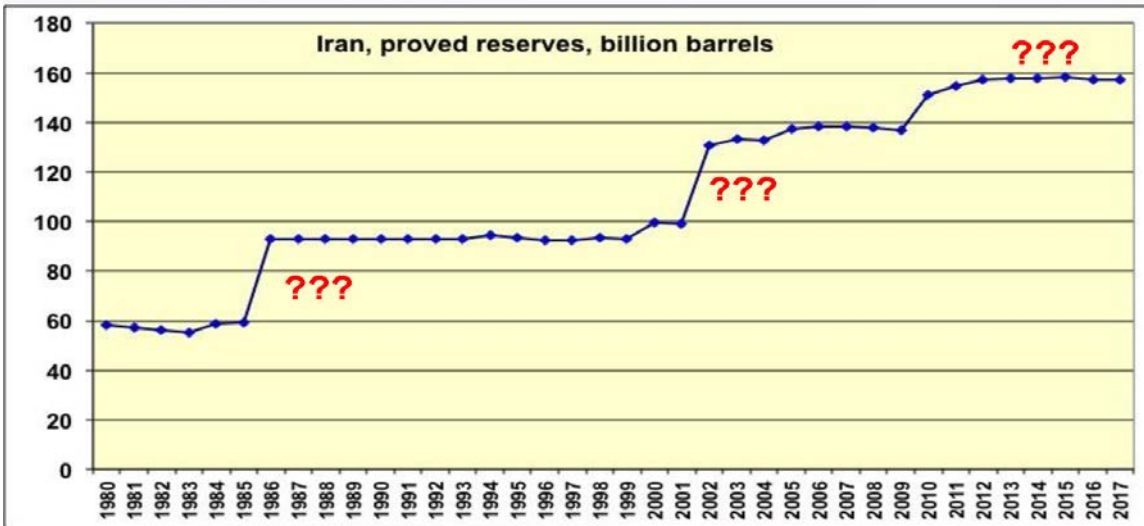


Evolution des réserves prouvées au Venezuela. Source BP Statistical Review, 2018

Jean-Marc Jancovici - Mines Paris Tech mai-juin 2019 - [www.jancovici.com](http://www.jancovici.com)



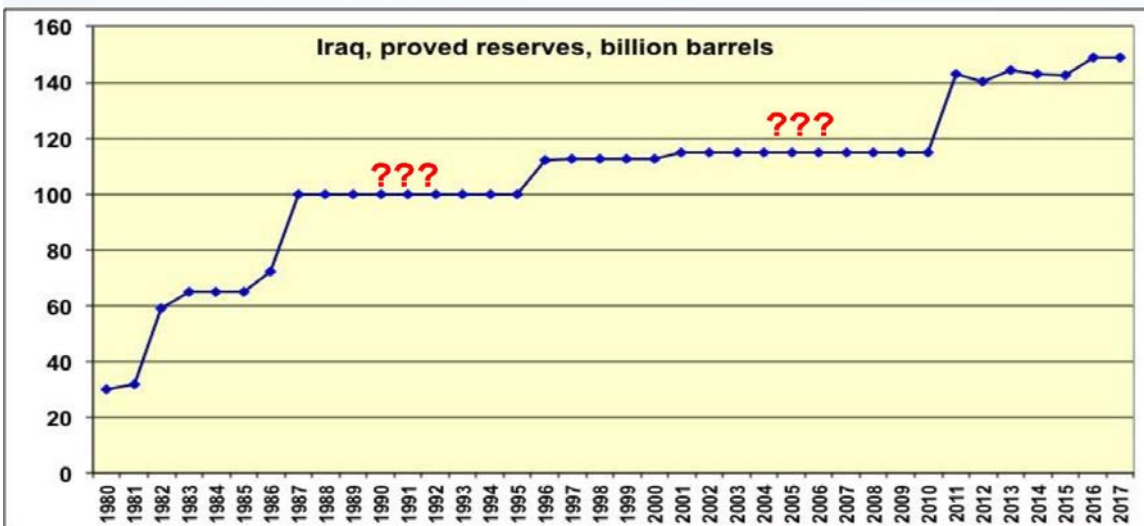
## Les réserves, insensibles à l'activité des shadoks ?



Evolution des réserves prouvées en Iran. Source BP Statistical Review, 2018

Jean-Marc Jancovici - Mines Paris Tech mai-juin 2019 - [www.jancovici.com](http://www.jancovici.com)

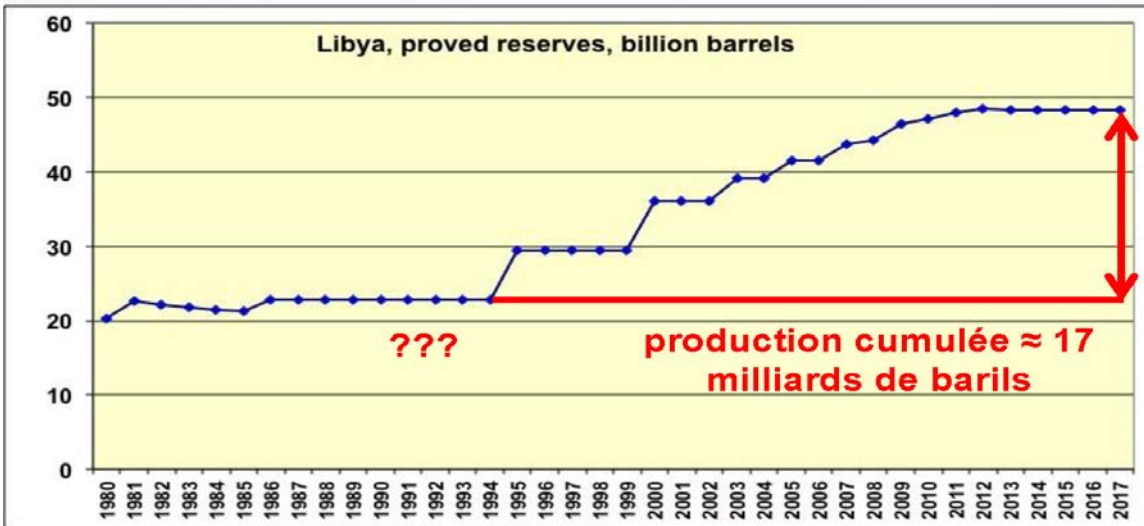
## Les réserves, insensibles à l'activité des shadoks ?



Evolution des réserves prouvées en Irak. Source BP Statistical Review, 2018

Jean-Marc Jancovici - Mines Paris Tech mai-juin 2019 - [www.jancovici.com](http://www.jancovici.com)

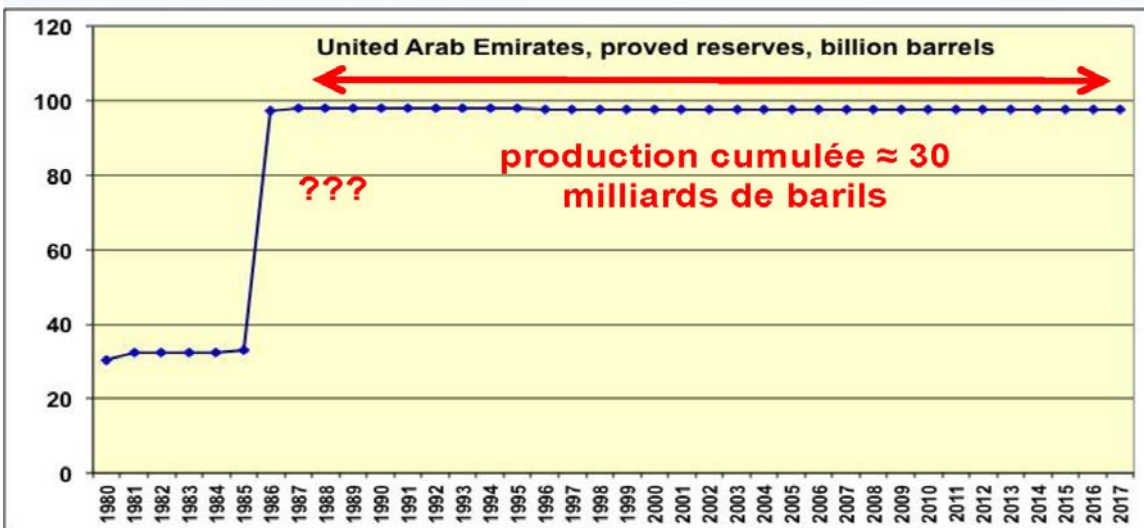
## Les réserves, insensibles à l'activité des shadoks ?



Evolution des réserves prouvées en Libye. Source BP Statistical Review, 2018

Jean-Marc Jancovici - Mines Paris Tech mai-juin 2019 - [www.jancovici.com](http://www.jancovici.com)

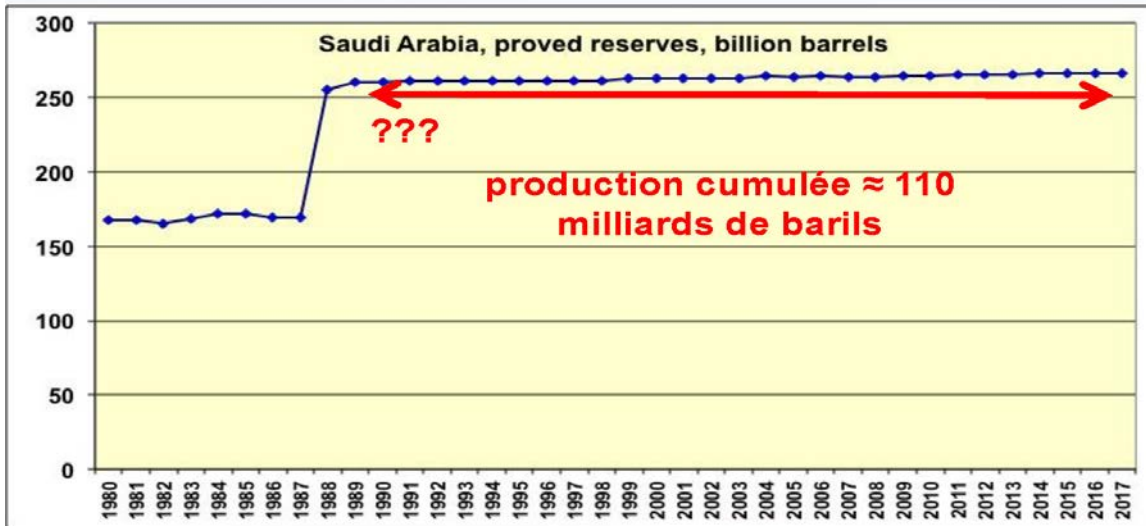
## Les réserves, insensibles à l'activité des shadoks ?



Evolution des réserves prouvées aux Emirats. Source BP Statistical Review, 2018

Jean-Marc Jancovici - Mines Paris Tech mai-juin 2019 - [www.jancovici.com](http://www.jancovici.com)

## Les réserves, insensibles à l'activité des shadoks ?



Evolution des réserves prouvées en Arabie Saoudite. Source BP Statistical Review, 2018

Jean-Marc Jancovici - Mines Paris Tech mai-juin 2019 - www.jancovici.com

Déclaration des réserves :

- par les majors : cotées en bourses, elles ont l'obligation de déclarer leurs réserves prouvées. Une toute petite partie (6%), l'immense majorité des déclarations de réserves prouvées relève de compagnies nationales (opacité des gouvernements)
- par les pays de l'Opep : obligation pour arbitrer les quotas de productions attribués aux membres de l'Opep

-- limites :

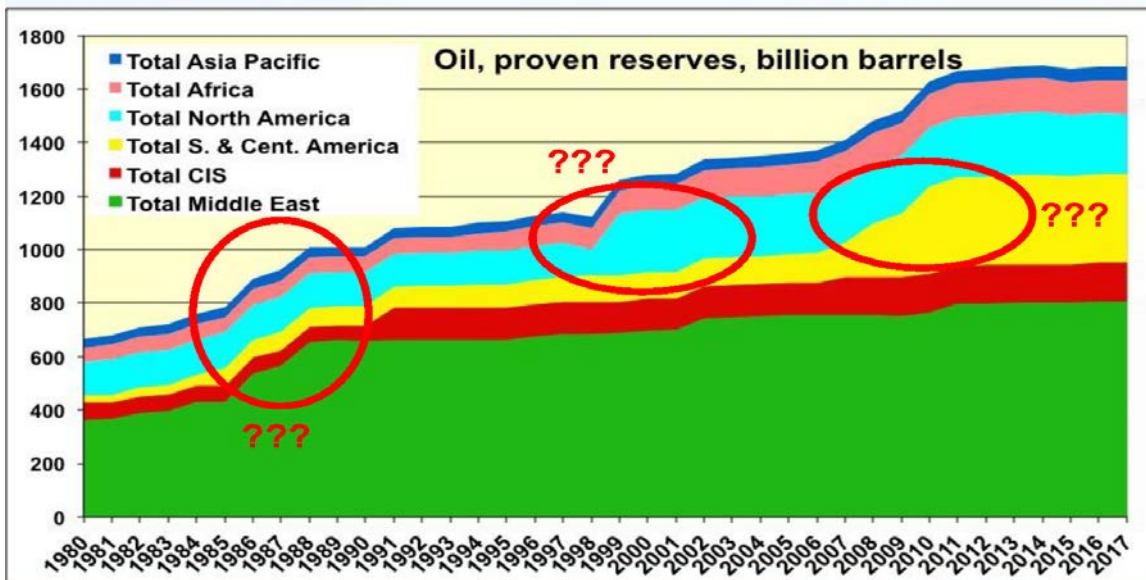
---> autodéclaration des pays, invérifiables : ex-URSS

---> définition de la ressource pétrole comptabilisé : Venezuela / Orénoque (pétrole liquide extra lourd)

---> graphiques en marches d'escalier avec croissance continue (jamais de baisse malgré la production) et sans découvertes majeures : mensonge d'Etat et rééquilibrages pour obtenir nouveaux quotas de production au sein de l'Opep (exemple Iran, Irak, Lybie)

----> grosse incertitude concernant les pays de l'Opep au Moyen Orient, informations non fiables (logique de quotas de l'Opep incite à la falsification)

## Et en plus les réserves prouvées sont un poker menteur...

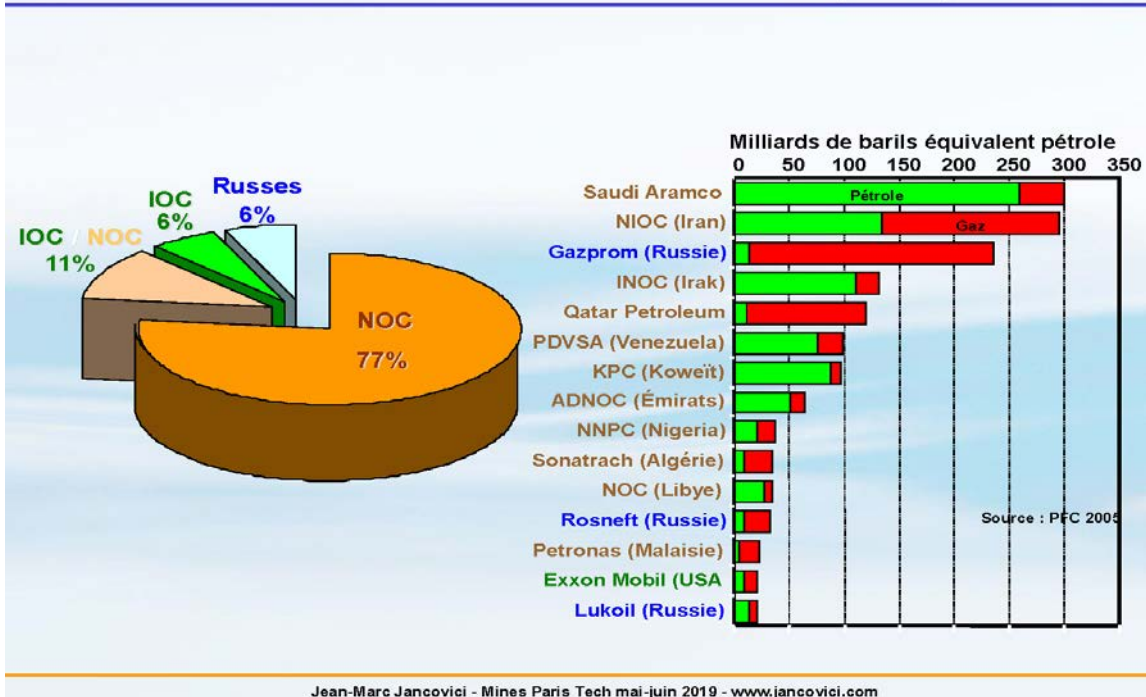


Evolution des réserves prouvées (déclarées) de pétrole, de 1980 à 2017.

Source BP Statistical Review 2017

Jean-Marc Jancovici - Mines Paris Tech mai-juin 2019 - www.jancovici.com

## Les réserves sont l'affaire du ministre plus que du PDG



Jean-Marc Jancovici - Mines Paris Tech mai-juin 2019 - www.jancovici.com

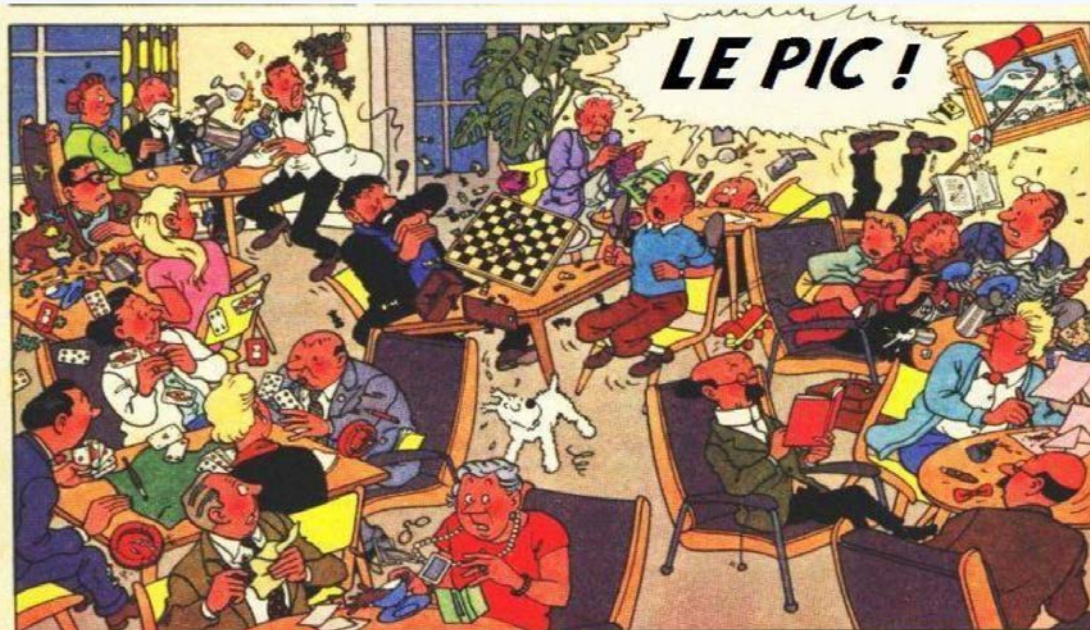
Historiquement plusieurs falsifications / limites

- mi-années 80 : contre-choc pétrolier, les pays de l'Opep réévaluent leurs réserves pour s'attribuer de nouveaux quotas
- début des années 2000 : mise en exploitation des sables bitumineux au Canada (nouveau type de "pétrole")
- 2010 : découverte des extra-lourds au Vénézuéla

> les réserves prouvées ne cessent d'augmenter malgré la production

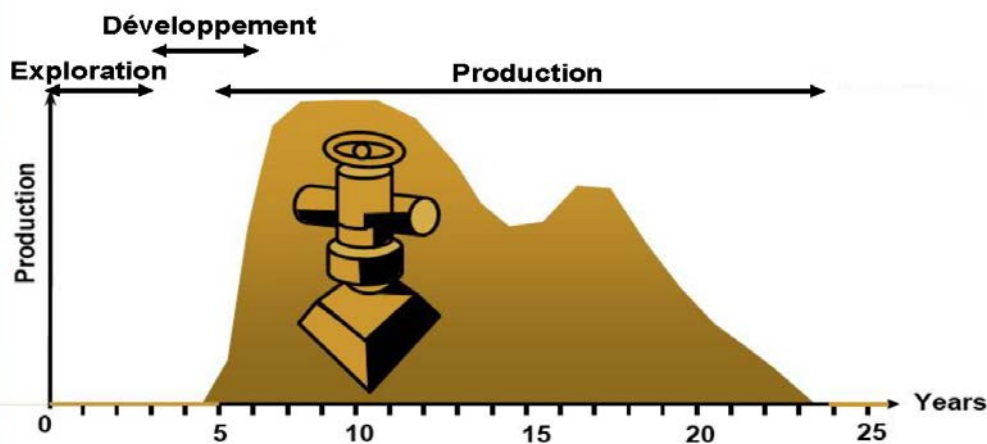
## Chapitre 12 - Pic pétrolier

### Les maths, c'est décidément détestable...



Jean-Marc Jancovici - Mines Paris Tech mai-juin 2019 - www.jancovici.com

### Pic systématique !



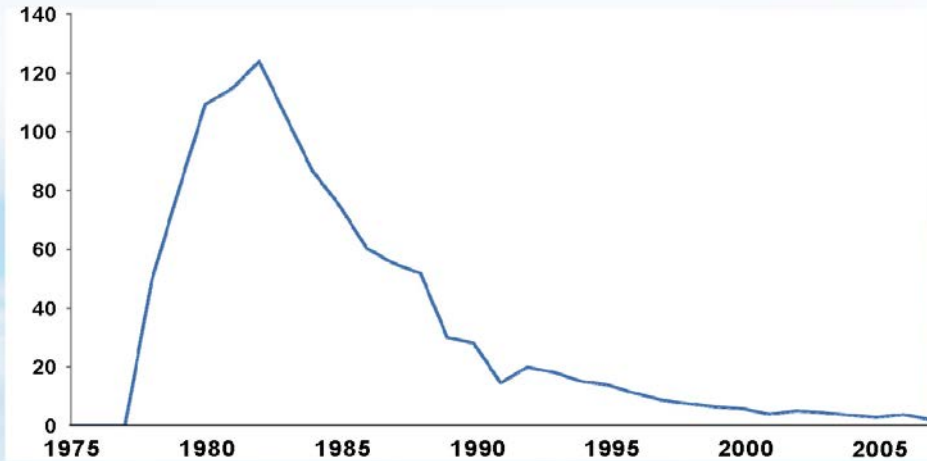
Aspect générique de la vie d'un champ de pétrole. La production a lieu quand il y a une aire marron. Source Pierre-René Bauquis, 2008.

Jean-Marc Jancovici - Mines Paris Tech mai-juin 2019 - www.jancovici.com

La réalité est donnée par de simples mathématiques :

- un stock de départ souterrain donné une fois pour toute pour les temps historiques (cela vaut pour le pétrole et pour tous les minerais)
- avec un inventaire fixé une fois pour toute, il est impossible d'avoir une extraction indéfiniment croissante ou même indéfiniment constante
- obligation du passage par un pic

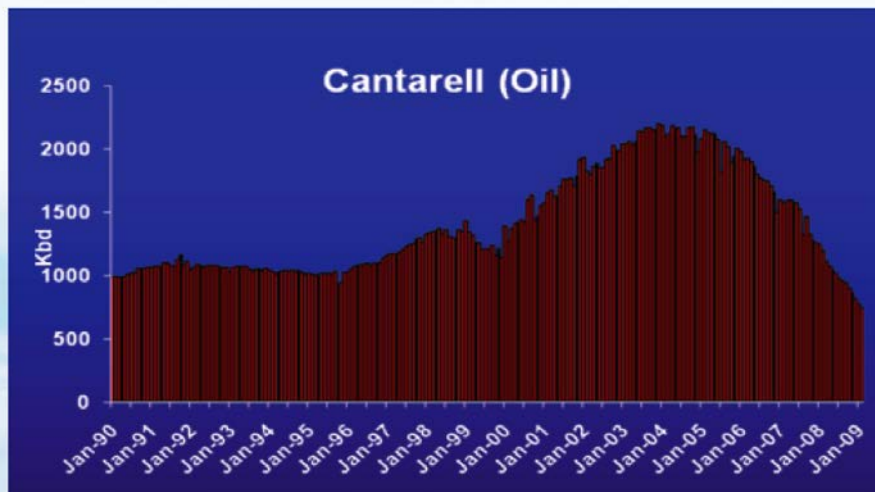
## Pic pour un champ



Production du champ de Thistle (Mer du Nord), en milliers de barils par jour.  
Source UK Energy Research Centre

Jean-Marc Jancovici - Mines Paris Tech mai-juin 2019 - [www.jancovici.com](http://www.jancovici.com)

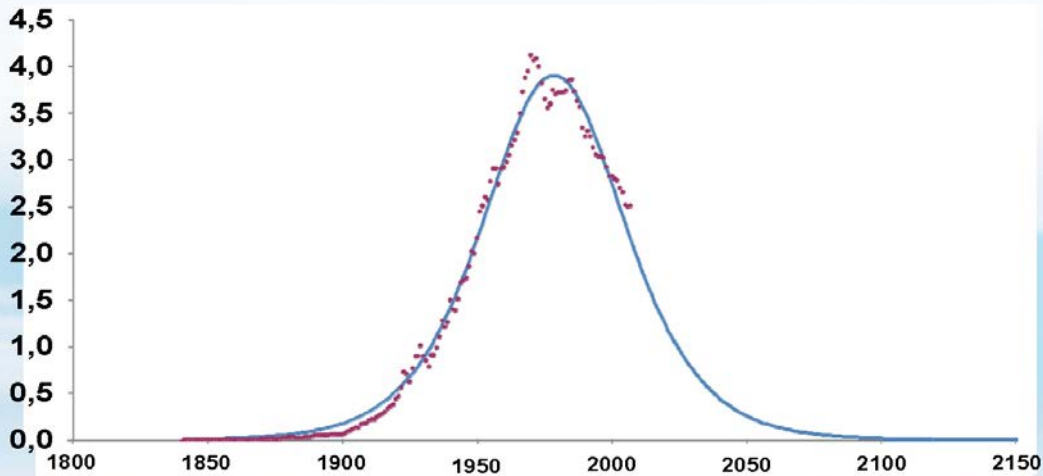
## Pic pour un gros champ



Production de pétrole du champ de Cantarell (Mexique). Source Matthews Simmons, Simmons & cy, 2009

Jean-Marc Jancovici - Mines Paris Tech mai-juin 2019 - [www.jancovici.com](http://www.jancovici.com)

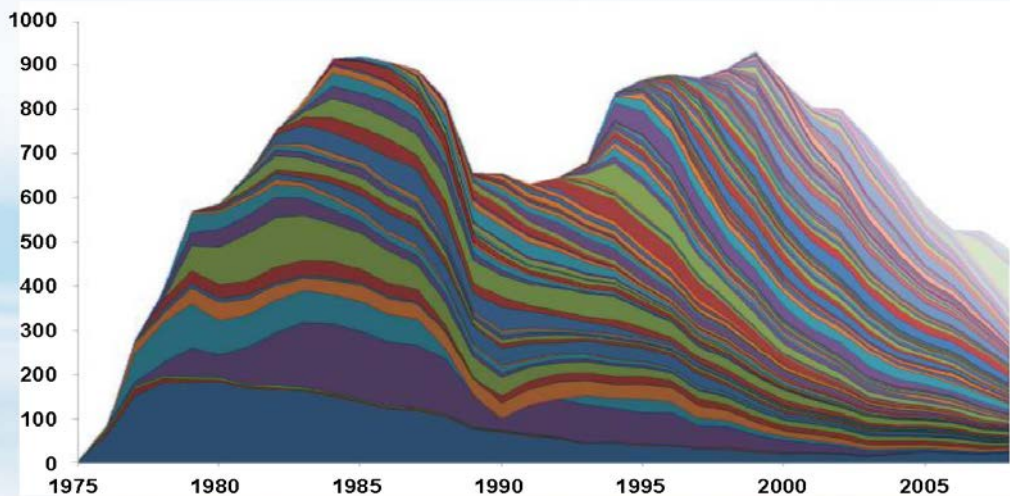
## Pic pour un gros pays



**Production des Etats Unis, en milliards de barils par an. Pic en 1970.  
Source UK Energy Research Centre, 2010**

Jean-Marc Jancovici - Mines Paris Tech mai-juin 2019 - [www.jancovici.com](http://www.jancovici.com)

## Un double pic est aussi possible



**Production pétrolière du Royaume Uni, en millions de barils par an, avec une décomposition par champ. Source UK Energy Research Centre, 2010**

Jean-Marc Jancovici - Mines Paris Tech mai-juin 2019 - [www.jancovici.com](http://www.jancovici.com)

La réalité se vérifie sur le terrain :

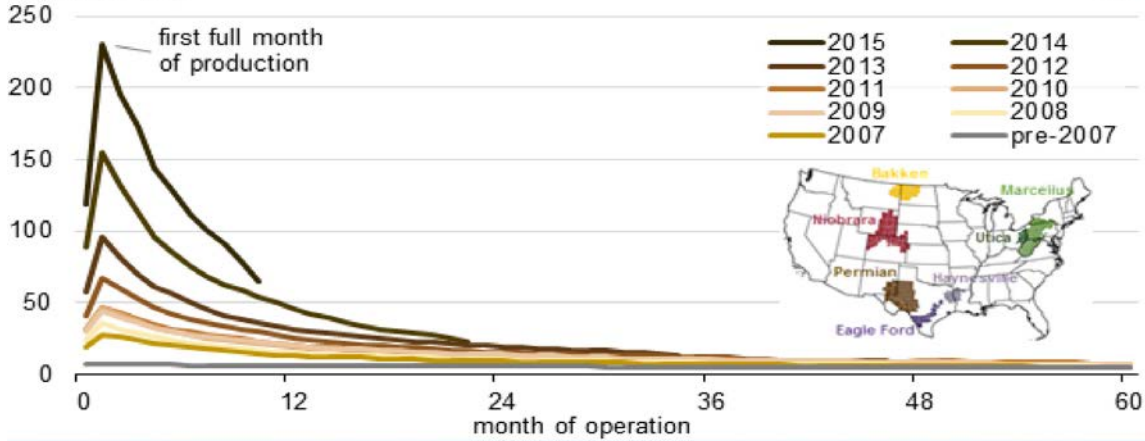
- chaque puit de pétrole mis en production passe par un pic
- cela se vérifie également au niveau du champ pétrolier (= un ensemble de puits)
- se constate pour l'exploitation du pétrole de roche mère (en moins d'1 an la production décline, très rapidement)

> pour maintenir un même niveau de production il faut ajouter des puits et faire de la prospection

## Le pic est très rapide pour un puits de shale oil

### Average oil production per well in the Permian region

barrels per day



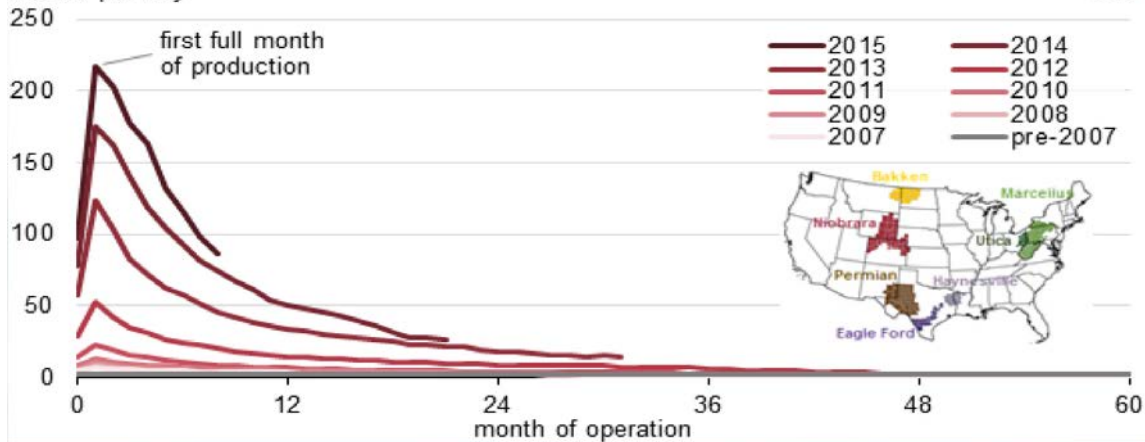
### Production par puits dans le Permien (premier champ de pétrole de roche mère aux USA). Energy Information Agency, 2019

Jean-Marc Jancovici - Mines Paris Tech mai-juin 2019 - [www.jancovici.com](http://www.jancovici.com)

## Le pic est très rapide pour un puits de shale oil (bis)

### Average oil production per well in the Niobrara region

barrels per day

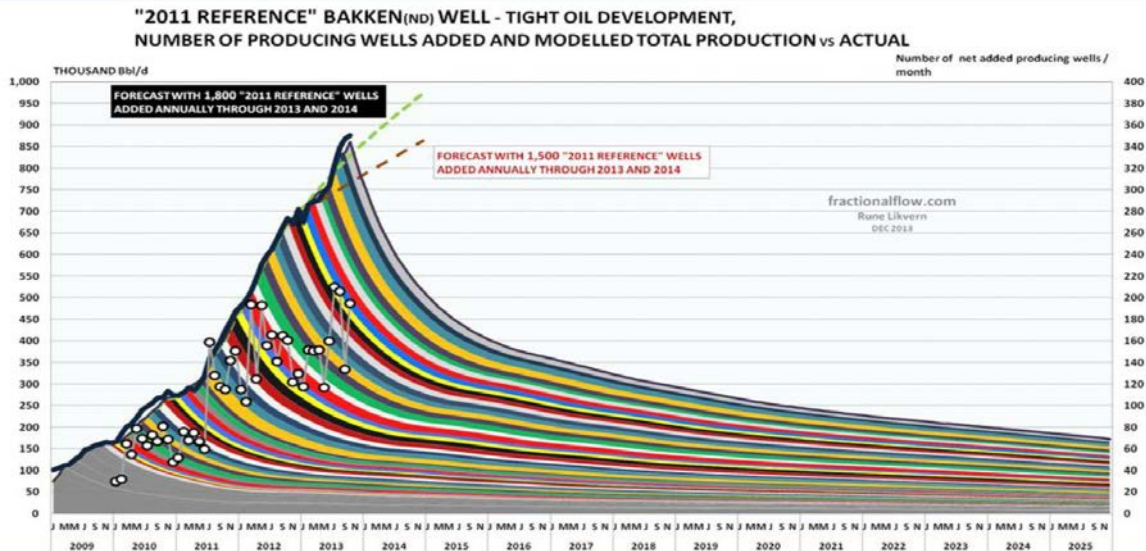


### Production par puits dans le Niobara (premier champ de pétrole de roche mère aux USA). Energy Information Agency, 2019

Jean-Marc Jancovici - Mines Paris Tech mai-juin 2019 - [www.jancovici.com](http://www.jancovici.com)



## Et donc il faut faire des trous en permanence !



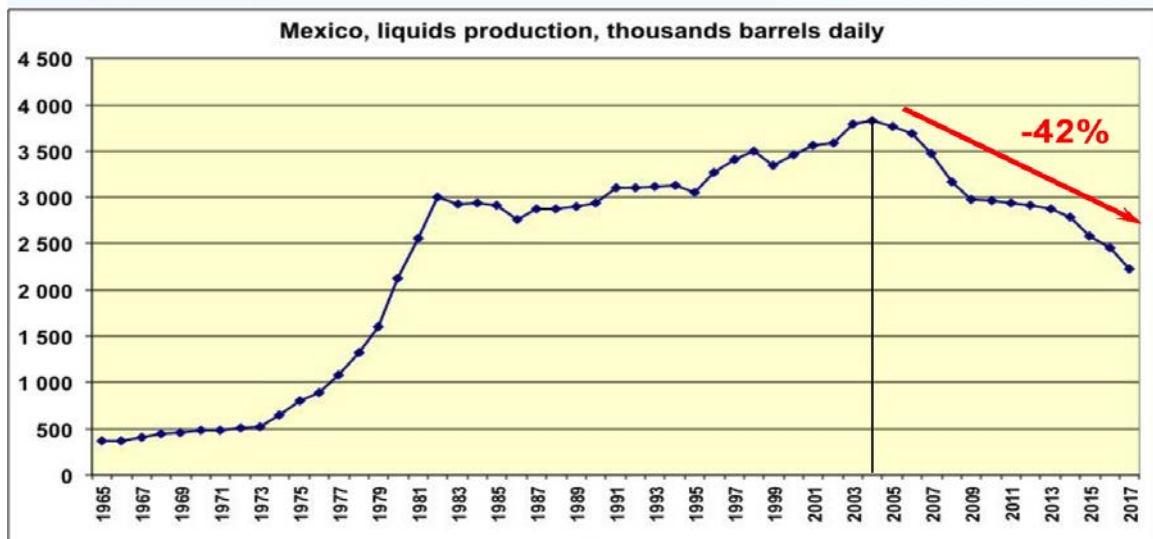
Exemple de profil de production si on cesse de forer dans le shale oil.

Jean-Marc Jancovici - Mines Paris Tech mai-juin 2019 - www.jancovici.com

Conséquences lorsqu'un pays atteint son pic de production :

- devient importateur au lieu d'exportateur. Exemples Argentine, Egypte, Indonésie (+30M PIB, aujourd'hui -5%) ...
- phénomène singulier : l'Egypte et l'Indonésie continuent à subventionner le pétrole à la pompe même en étant importateur, du coup subventionne les importations et contribue dans la fixation des prix à rendre inopérant l'équilibre classique offre / demande

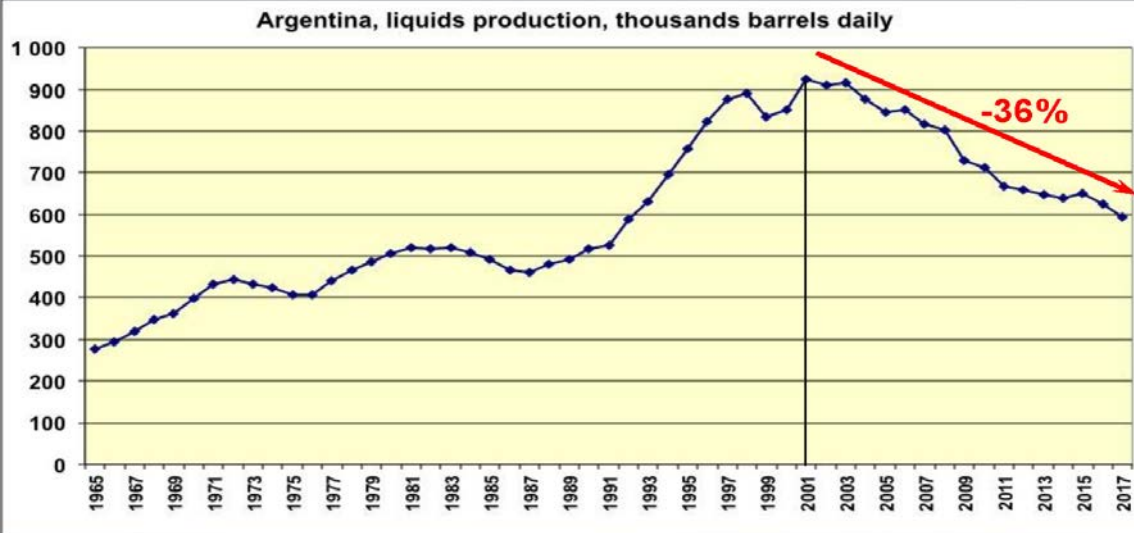
## Du champ au pays



Production de pétrole au Mexique ( $\approx 3\%$  de la production mondiale), en milliers de barils/jour. Source BP Statistical Review, 2018

Jean-Marc Jancovici - Mines Paris Tech mai-juin 2019 - www.jancovici.com

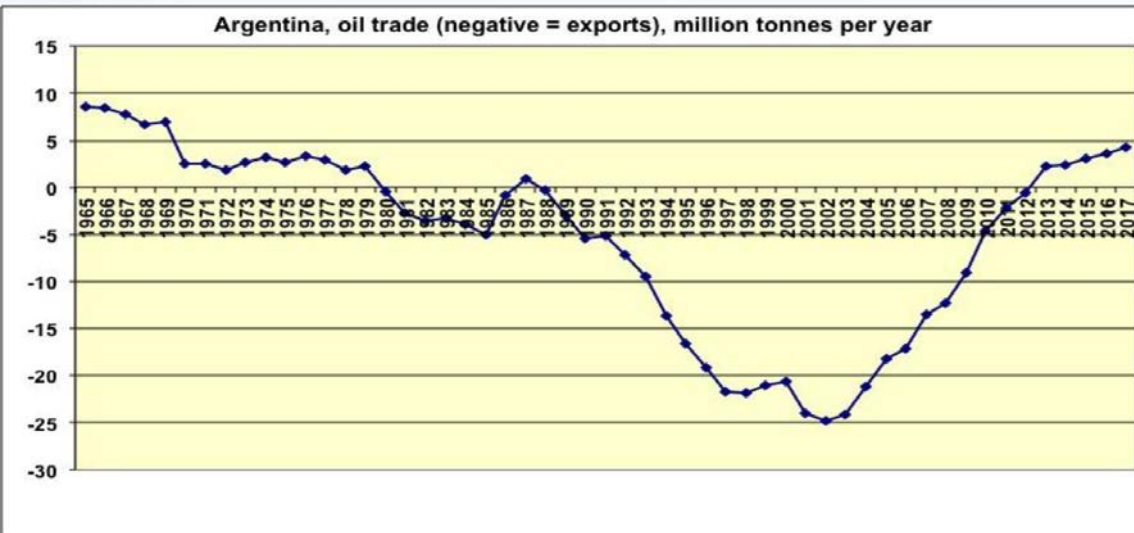
## Stock non renouvelable => pic et pic et...



Production de pétrole en Argentine (< 1% de la production mondiale), en milliers de barils/jour. Source BP Statistical Review, 2018

Jean-Marc Jancovici - Mines Paris Tech mai-juin 2019 - [www.jancovici.com](http://www.jancovici.com)

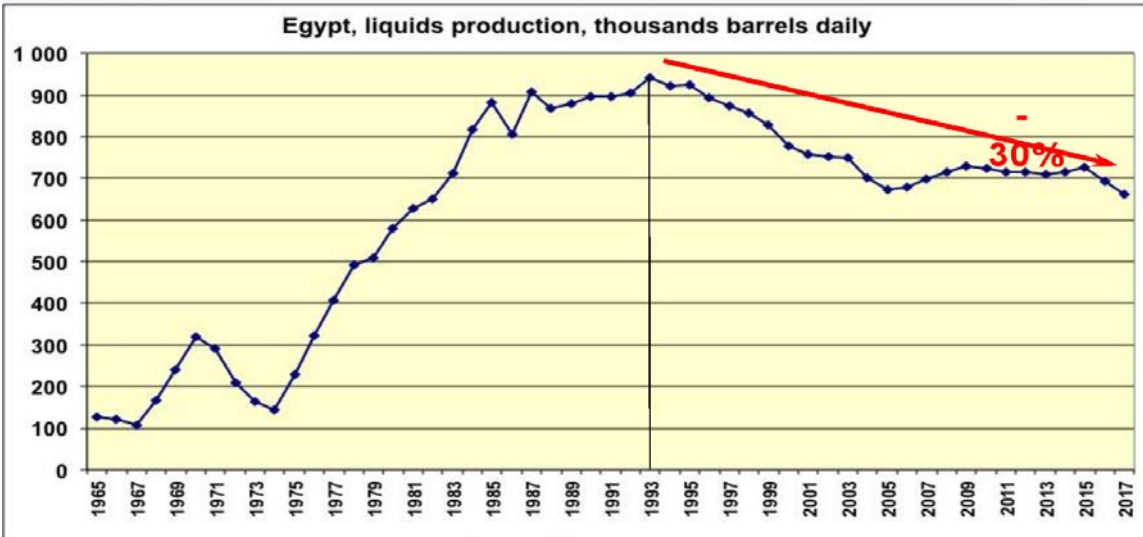
## Comment passer de grosses recettes à de menues dépenses



Solde importateur de pétrole de l'Argentine. Calculs Jancovici sur données BP Statistical Review, 2018

Jean-Marc Jancovici - Mines Paris Tech mai-juin 2019 - [www.jancovici.com](http://www.jancovici.com)

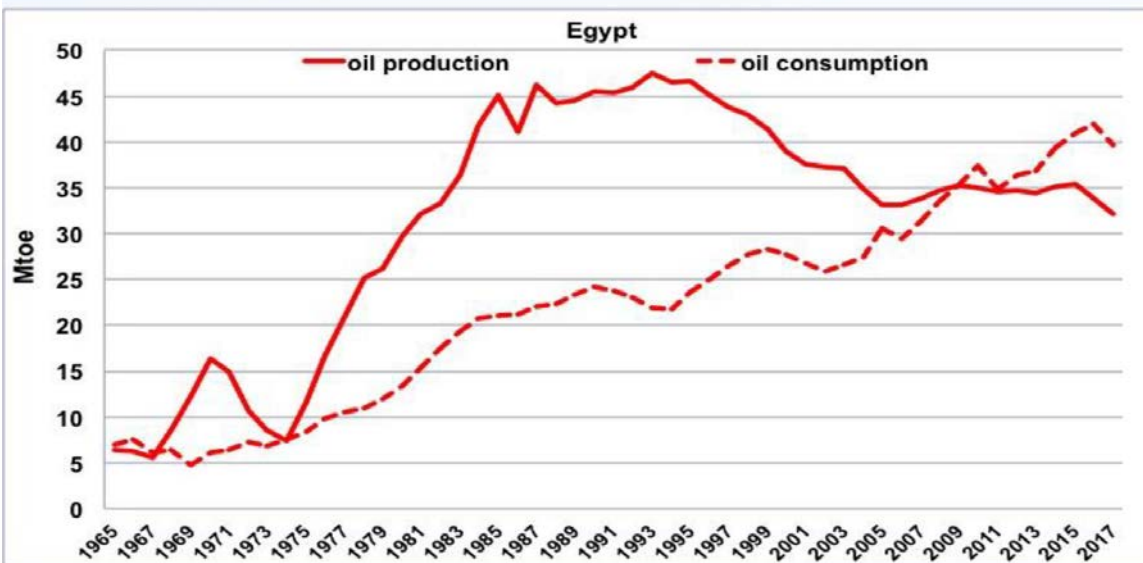
## Le pic, une réalité déjà fréquente



Production de pétrole en Egypte (< 1% de la production mondiale), en milliers de barils/jour. Source BP Statistical Review, 2018

Jean-Marc Jancovici - Mines Paris Tech mai-juin 2019 - www.jancovici.com

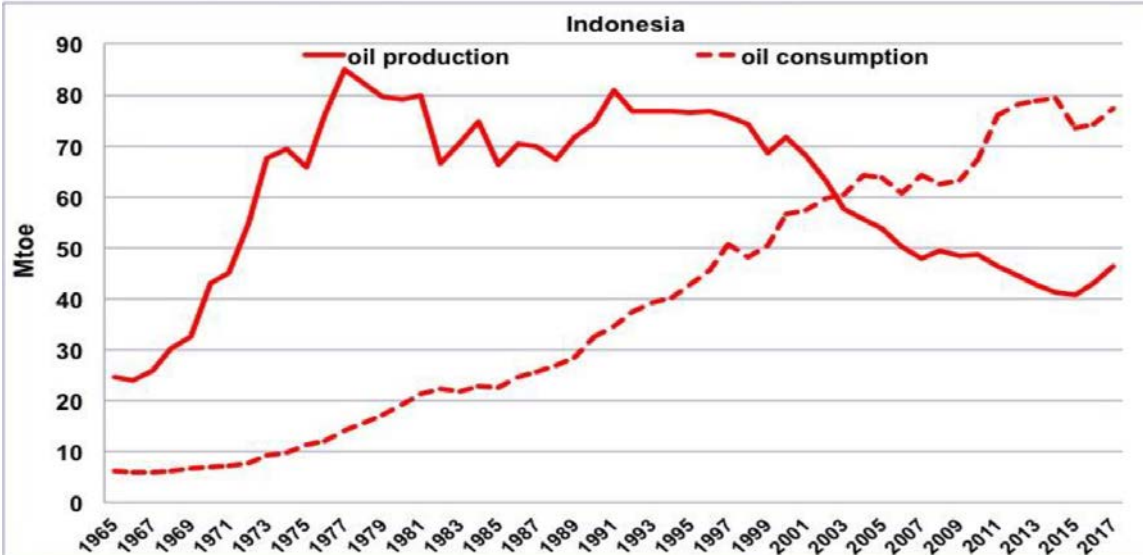
## Pic de la production... mais pas de la consommation !



Production et consommation intérieure en Egypte. D'après BP Statistical Review 2018

Jean-Marc Jancovici - Mines Paris Tech mai-juin 2019 - www.jancovici.com

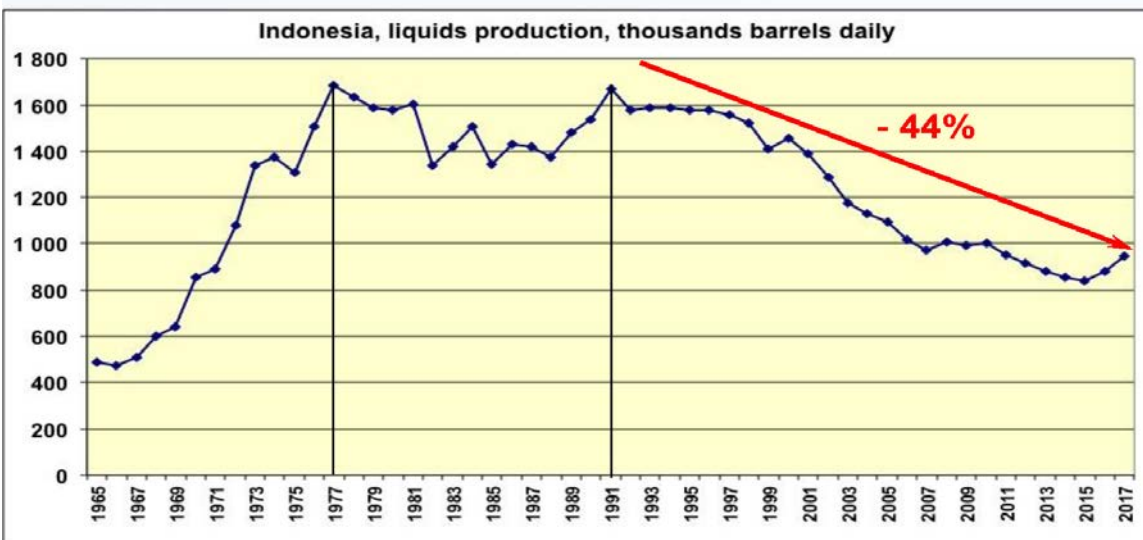
## Pic de la production... mais pas de la consommation !



Production et consommation intérieure en Indonésie. D'après BP Statistical Review 2018

Jean-Marc Jancovici - Mines Paris Tech mai-juin 2019 - www.jancovici.com

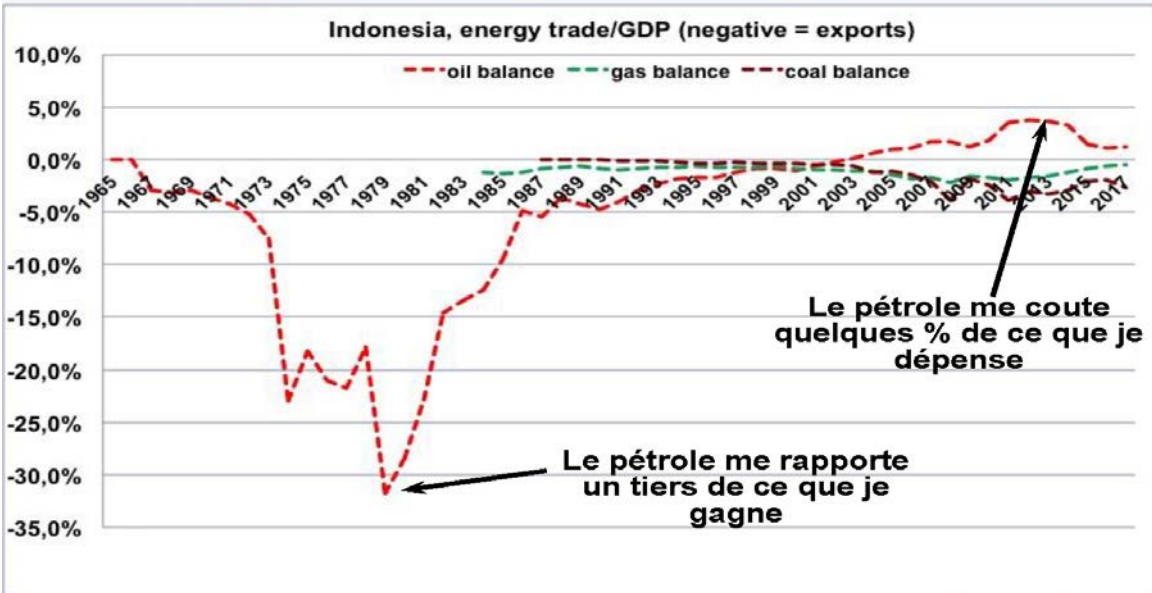
## Le pic, une réalité déjà fréquente - 2



Production de pétrole en Indonésie (1% de la production mondiale), en milliers de barils/jour. Source BP Statistical Review, 2018

Jean-Marc Jancovici - Mines Paris Tech mai-juin 2019 - www.jancovici.com

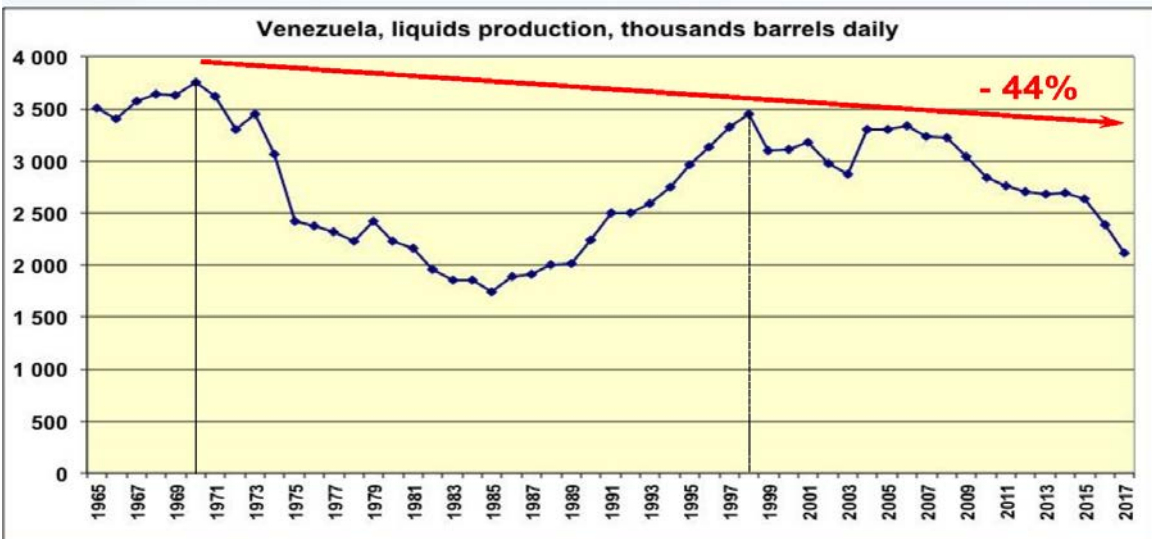
## Je gagnais quelques sous, mais c'est du passé !



Solde commercial de l'Indonésie par énergie rapporté au PIB. Calculs Jancovici sur données BP Statistical Review & World Bank, 2018

Jean-Marc Jancovici - Mines Paris Tech mai-juin 2019 - www.jancovici.com

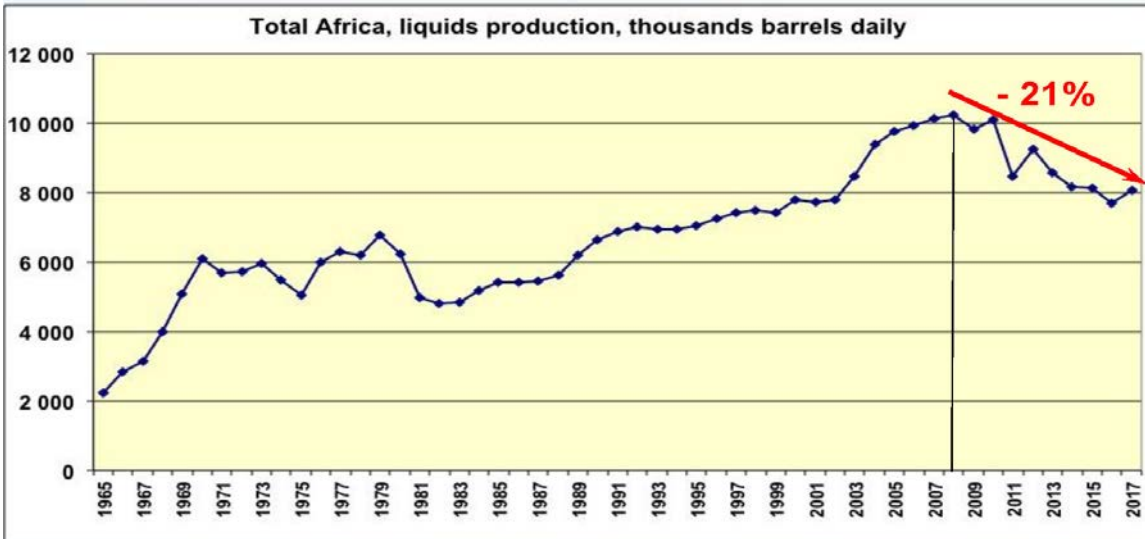
## Le pic, une réalité déjà fréquente - 3



Production de pétrole au Venezuela (≈ 3% de la production mondiale), en milliers de barils/jour. Source BP Statistical Review, 2018

Jean-Marc Jancovici - Mines Paris Tech mai-juin 2019 - www.jancovici.com

## Pic du sud



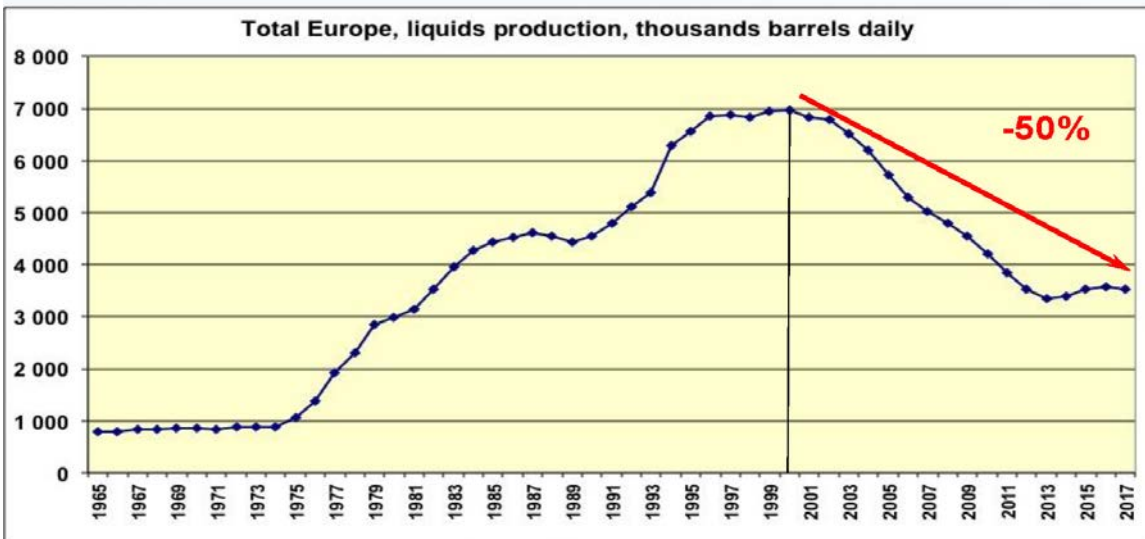
Production de pétrole en Afrique ( $\approx 9\%$  de la production mondiale), en milliers de barils/jour. Source BP Statistical Review, 2018

Jean-Marc Jancovici - Mines Paris Tech mai-juin 2019 - www.jancovici.com

Fournisseurs UE en chute :

- Afrique : pic franchi en 2009, 2009 / 2017 = -21% de sa production. Afrique (Algérie, Angola, Nigéria ...) des fournisseurs importants de l'UE
- Champs de la Mer du Nord a franchi le pic en 2000, depuis la production 2000 / 2017 = -50%
- Russie, proche du Pic (30% des importations européennes)

## Au grand jeu du pic, les Européens sont excellents



Production de pétrole en Europe ( $\approx 4\%$  de la production mondiale), en milliers de barils/jour. Source BP Statistical Review, 2018

Jean-Marc Jancovici - Mines Paris Tech mai-juin 2019 - www.jancovici.com

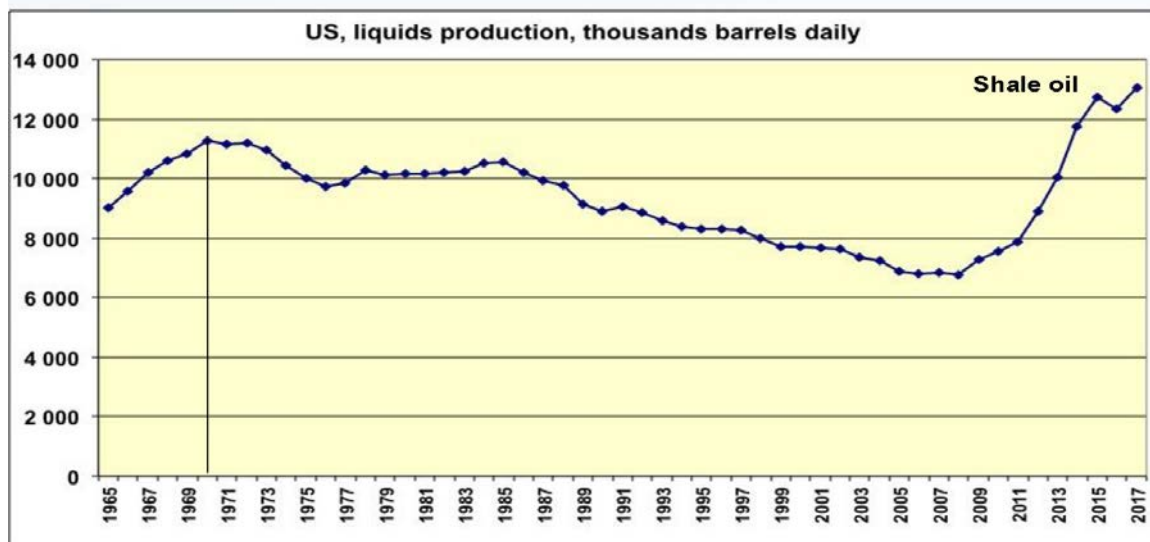
Trajectoires singulière des Etats-Unis :

- Pic pétrole conventionnel franchi au début des années 70
- effet Pétrole de roche mère / shale oil en 2010 explique le rebond (mais secteur fragile financièrement,

rentabilité, certains champs au bord du pic ...)

- reste largement importateur

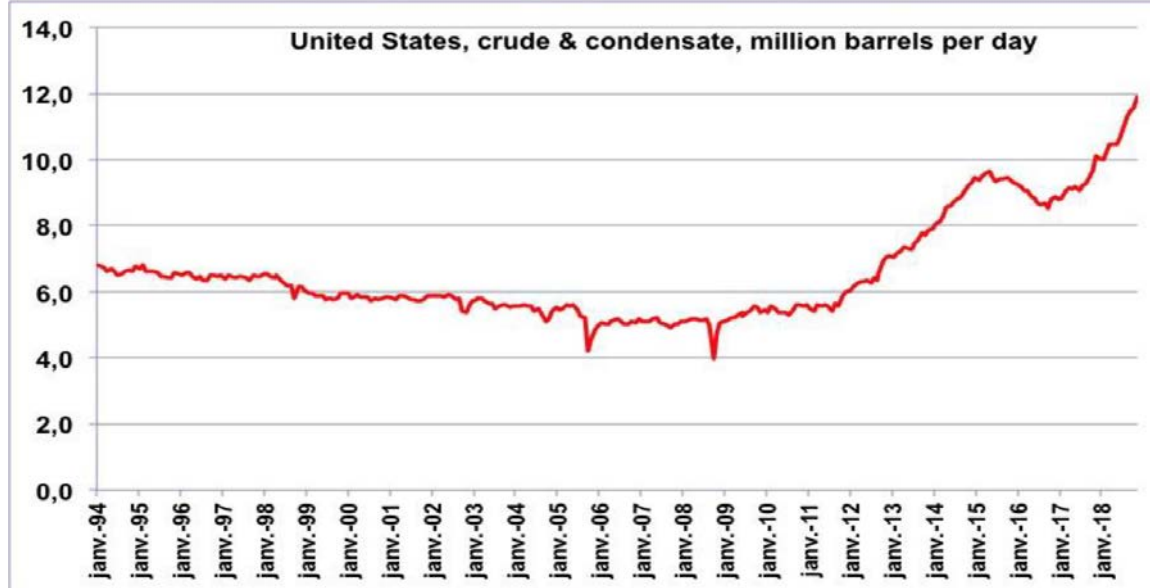
## Le pic, une réalité qui se combat ?



Production de pétrole aux USA (≈ 14% de la production mondiale), en milliers de barils/jour. Source BP Statistical Review, 2018

Jean-Marc Jancovici - Mines Paris Tech mai-juin 2019 - www.jancovici.com

## Un petit coup de microscope



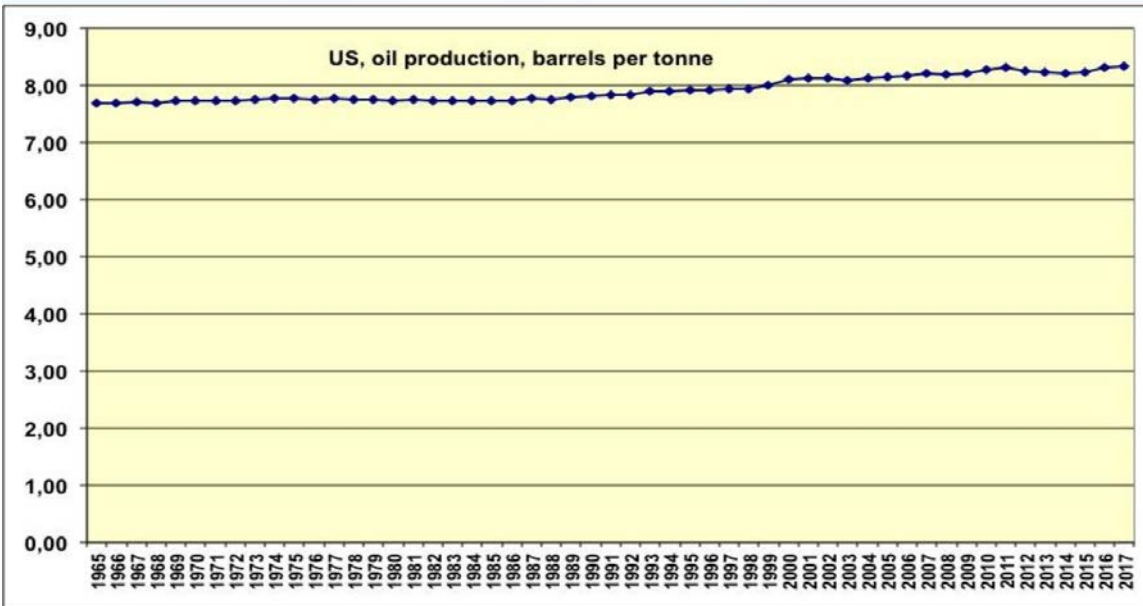
Production de pétrole + condensats aux USA, en millions de barils/jour. Source Energy Information Agency, 2019

Jean-Marc Jancovici - Mines Paris Tech mai-juin 2019 - www.jancovici.com

Facteur aggravant le pic :

- le contenu énergétique d'un baril diminue avec le temps
- pour être précis il faudrait ne plus compter le pétrole en barils, cela surévalue (et de plus en plus) l'énergie disponible

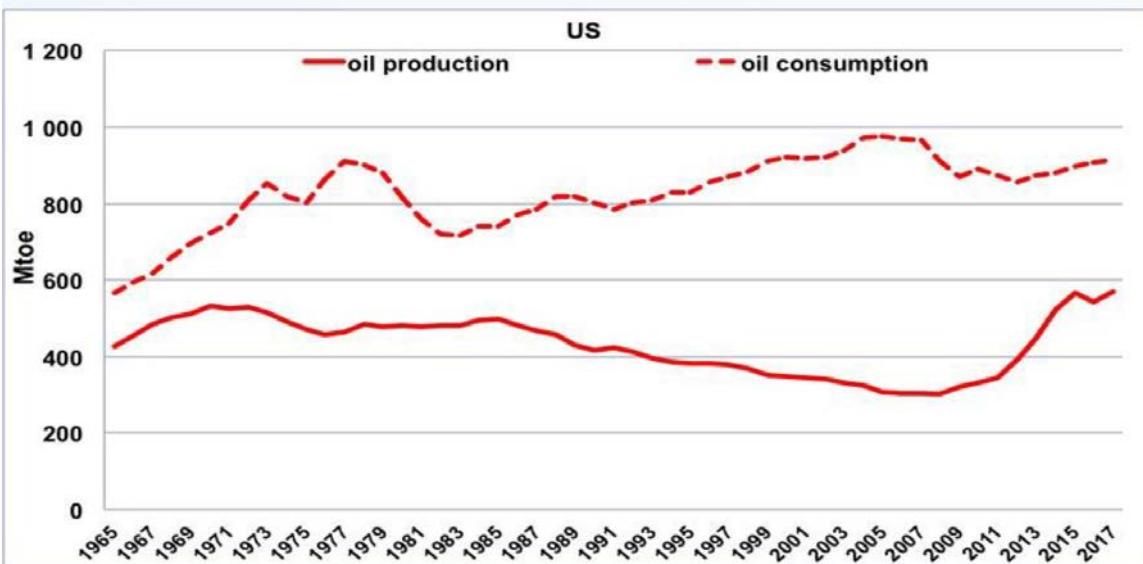
## Mais le baril, ça pèse toujours la même chose ?



Nombre de barils pour faire une tonne de pétrole aux USA. Calculs Jancovici sur données BP Statistical Review, 2018

Jean-Marc Jancovici - Mines Paris Tech mai-juin 2019 - [www.jancovici.com](http://www.jancovici.com)

## Et l'autosuffisance n'est pas vraiment pour tout de suite

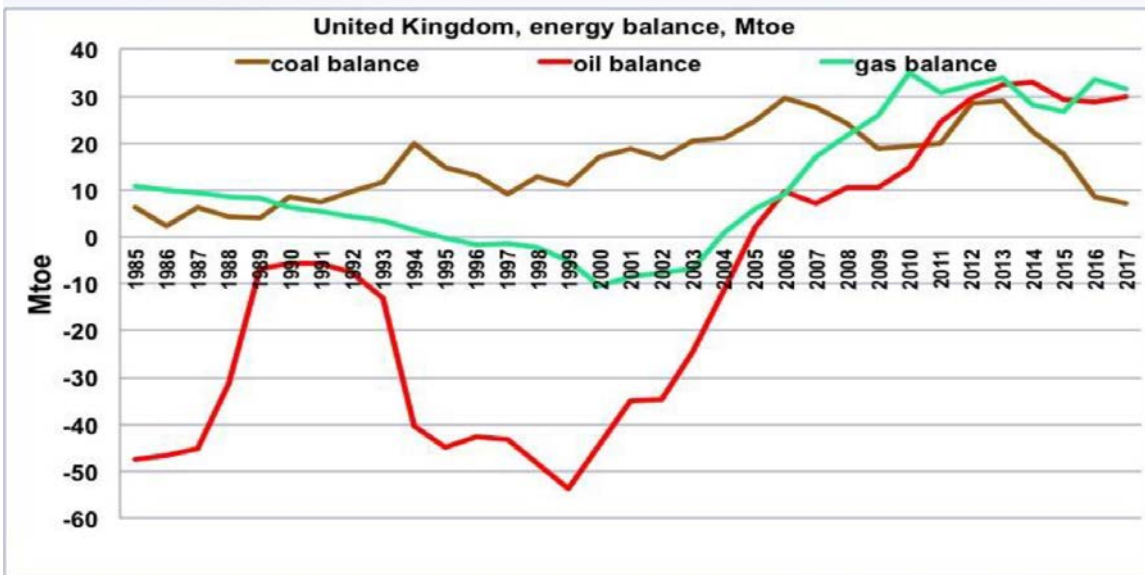


Consommation et production de liquides aux USA, en millions de tonnes par an. Données BP Statistical Review, 2018

Jean-Marc Jancovici - Mines Paris Tech mai-juin 2019 - [www.jancovici.com](http://www.jancovici.com)



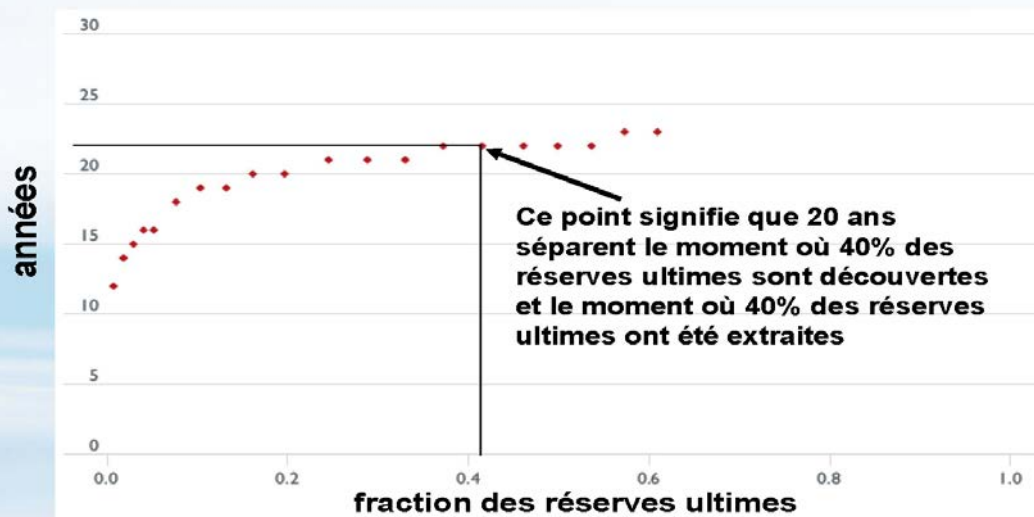
## On peut exporter puis importer ailleurs que dans le pétrole



Solde énergétique par énergie fossile en Grande Bretagne, en millions de tonnes équivalent pétrole par an. Données BP Statistical Review, 2018

Jean-Marc Jancovici - Mines Paris Tech mai-juin 2019 - www.jancovici.com

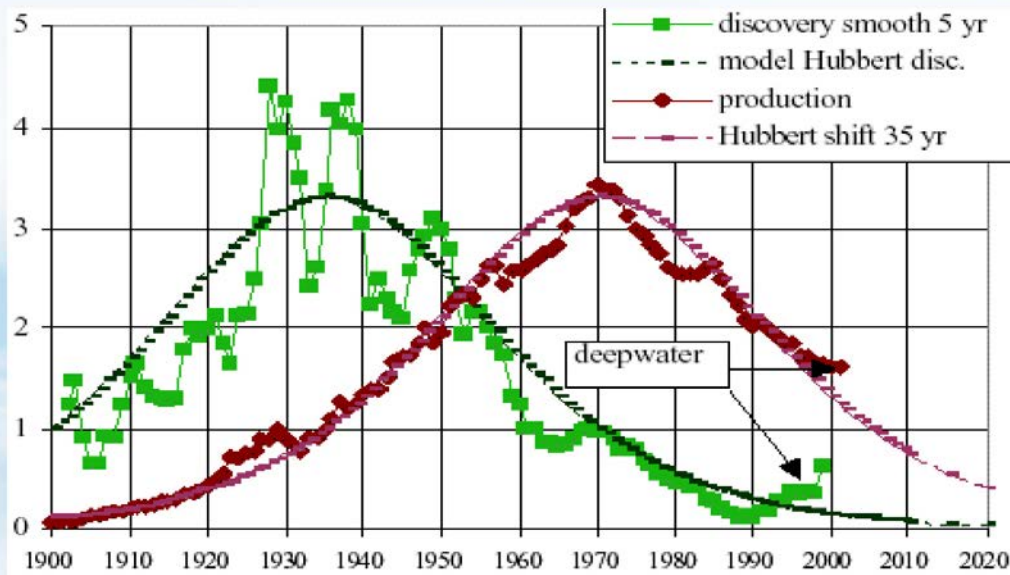
## Des découvertes à la production



Temps qui sépare la découverte de la production, pour une fraction donnée des réserves ultimes (cas de la Norvège). Source report 117, BITRE, Australian Government, 2009

Jean-Marc Jancovici - Mines Paris Tech mai-juin 2019 - www.jancovici.com

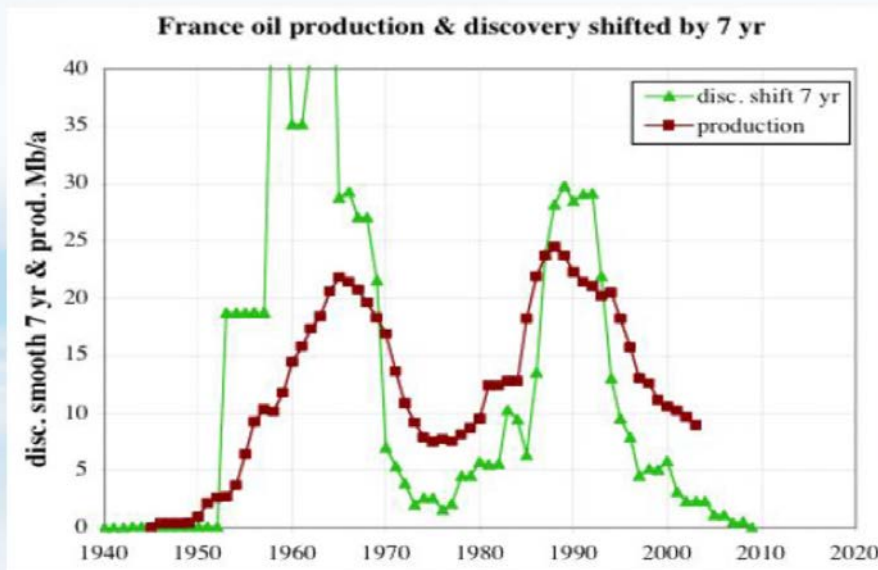
## Découvertes et production se ressemblent souvent



Découvertes et production aux USA : une « même tête », mais pas au même moment.  
Source Laherrère, 2004

Jean-Marc Jancovici - Mines Paris Tech mai-juin 2019 - www.jancovici.com

## En France, peu de pétrole, mais deux pics !

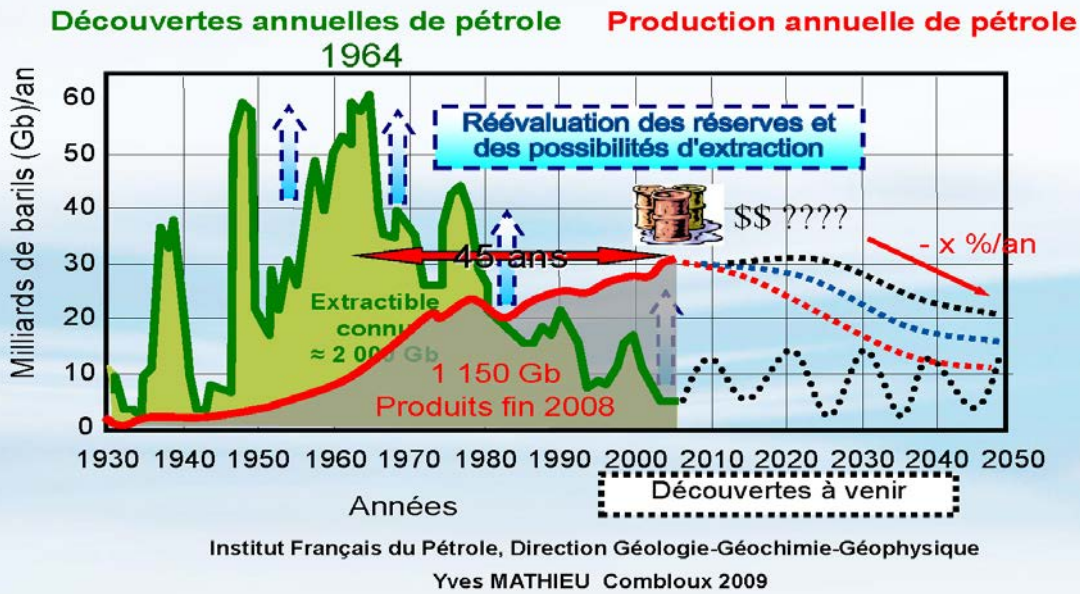


Découvertes décalées de 7 ans et production en France. Source Laherrère

Jean-Marc Jancovici - Mines Paris Tech mai-juin 2019 - www.jancovici.com

Pétrole conventionnel = +75% production

## Des idées et pas de pétrole, voilà le résultat



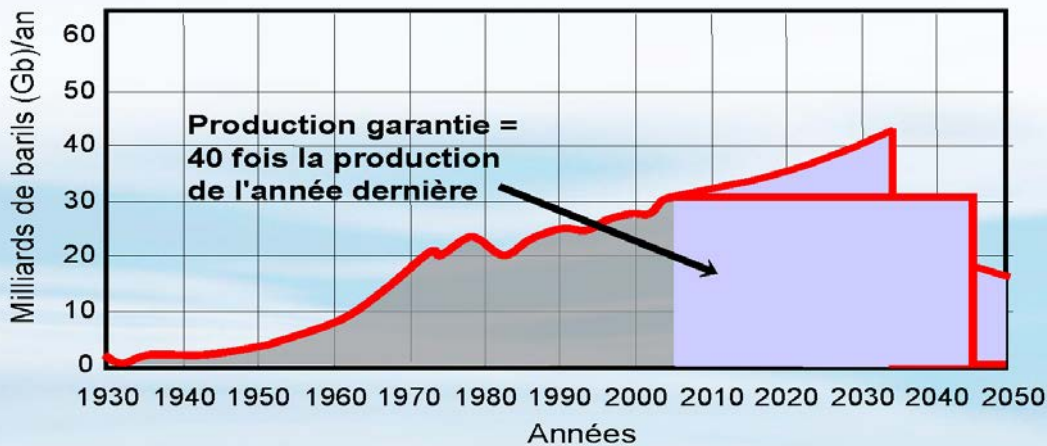
Jean-Marc Jancovici - Mines Paris Tech mai-juin 2019 - www.jancovici.com

Pic peut-être anticipé :

- maximum des découvertes de pétrole dans le monde 1964
- pic estimé à 5 décennies
- à partir de quoi s'ouvre une période de forte oscillation des prix
- puis déclin de la production (20 à 30 ans)

## 3 versions d'un R/P = 40

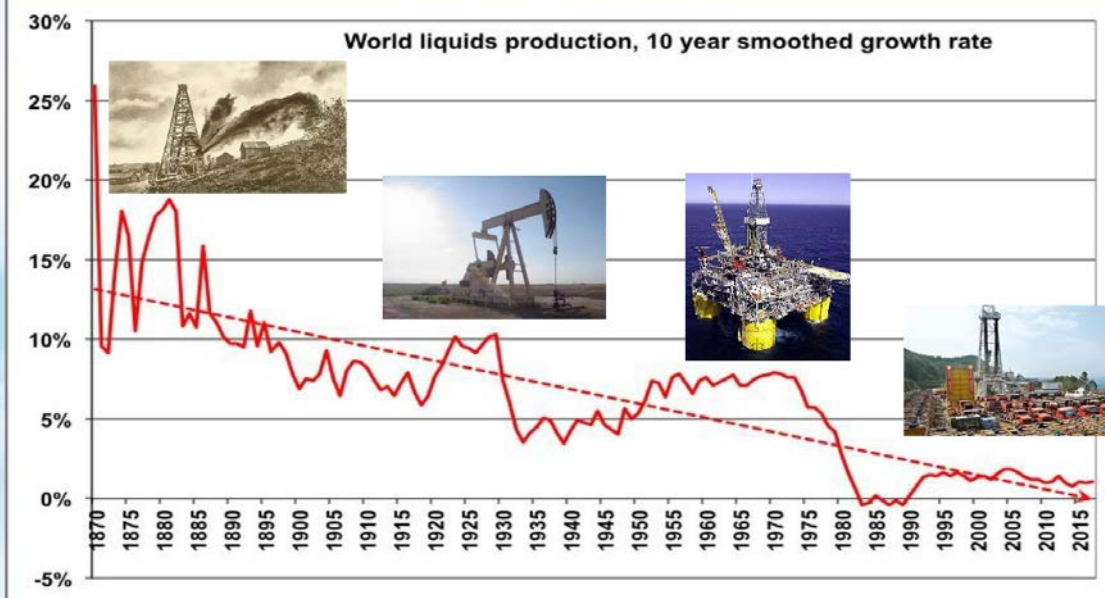
**Version très compliquée de la production future, qui ne tient pas la route !**



**3 manières de voir « 40 ans de pétrole » pour la production future.**

Jean-Marc Jancovici - Mines Paris Tech mai-juin 2019 - www.jancovici.com

## Je crois, mais un peu moins... en attendant de décroître ?



Variation annuelle (moyenne glissante sur 10 ans) de la production mondiale de liquides depuis 1860. Données : Shilling et. al de 1860 à 1965 ; BP Statistical Review 1966 - 2018

Jean-Marc Jancovici - Mines Paris Tech mai-juin 2019 - [www.jancovici.com](http://www.jancovici.com)

Déclin inéluctable mais pas assez rapide pour respecter les engagements sur le climat.  
Il faudrait provoquer un déclin plus rapide que celui imposé par la géologie (joue le rôle de "voiture balais")

Conséquence du déclin de l'approvisionnement :

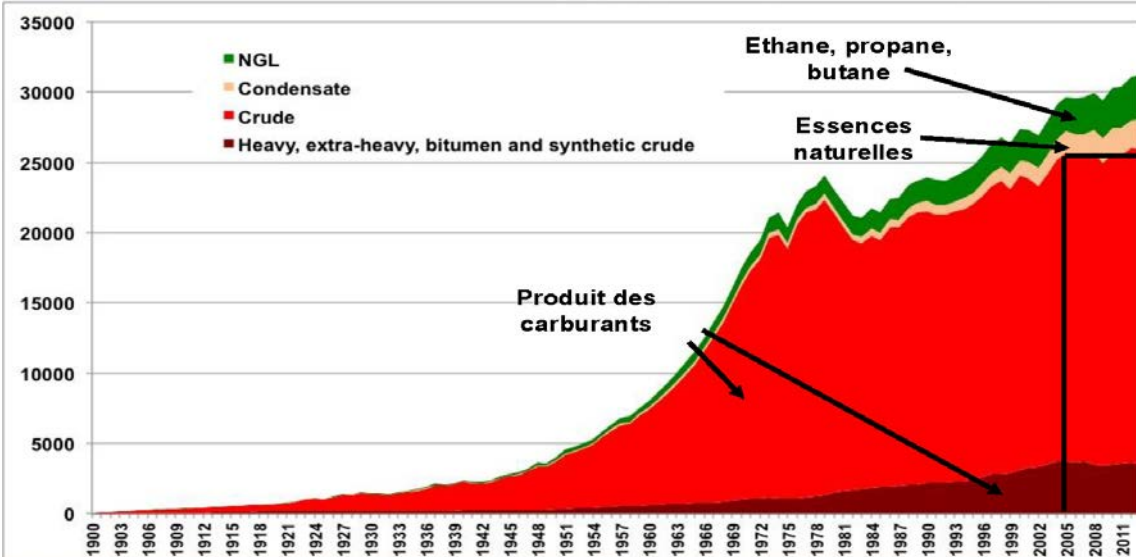
- réduction du débit futur
- réduction équivalent de la croissance économique

> la question du stock global encore disponible est par conséquent secondaire par rapport à l'accès à ce stock

## Chapitre 13 - Perspectives

Pic franchi ?

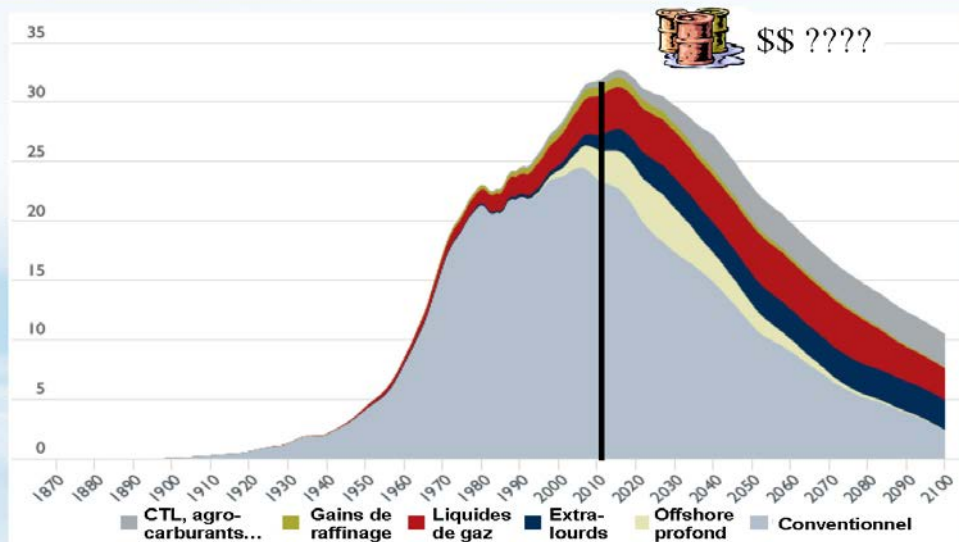
## Il y a toujours pétrole et pétrole...



Production mondiale de liquides décomposée par catégorie depuis 1900. Données non publiques.

Jean-Marc Jancovici - Mines Paris Tech mai-juin 2019 - www.jancovici.com

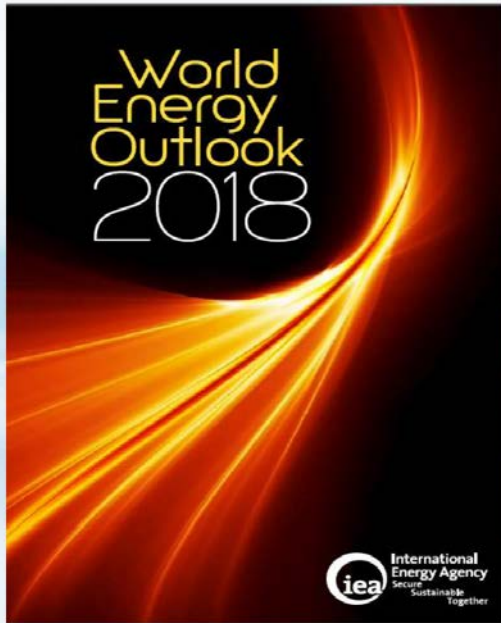
## Et le pic mondial, il est loin papa ?



Simulation de la production mondiale de « liquides », discriminée par type de production.

Source : « Transport energy futures: long-term oil supply trends and projections », Australian Government, Department of Infrastructure, Transport, Regional Development and Local Government, Bureau of Infrastructure, Transport and Regional Economics (BITRE), Canberra (Australie), 2009

Jean-Marc Jancovici - Mines Paris Tech mai-juin 2019 - www.jancovici.com



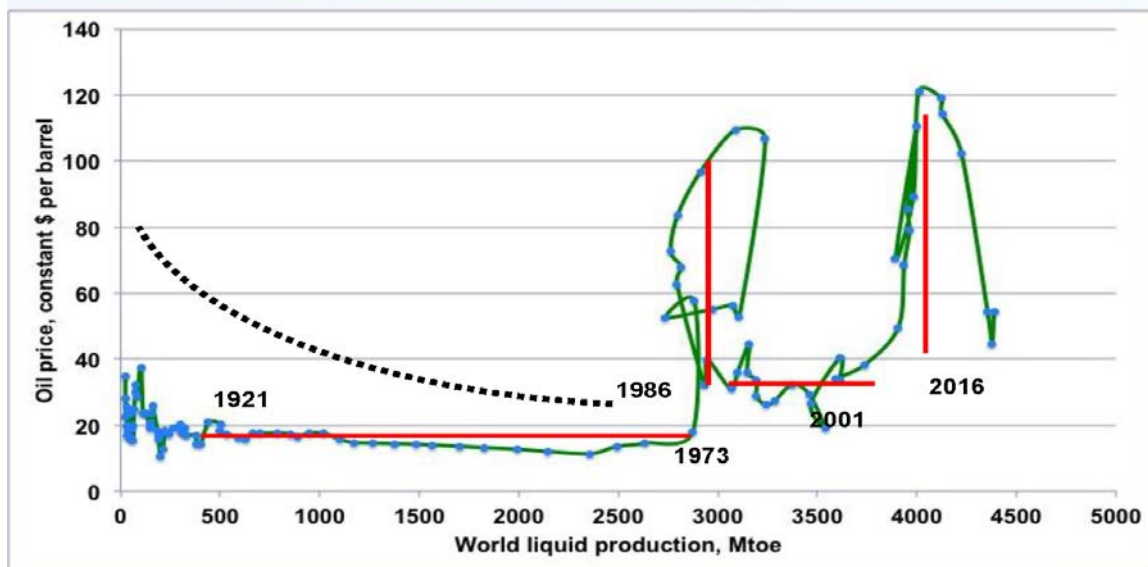
**« Global conventional crude oil production peaked in 2008 at 69.5 mb/d and has since fallen by around 2.5 mb/d »**

The risk of a supply crunch looms largest in oil. The average level of new conventional crude oil project approvals over the last three years is only half the amount necessary to balance the market out to 2025 (...). US tight oil is unlikely to pick up the slack on its own. (...) US tight oil (...) would need to more than triple in order to offset a continued absence of new conventional projects.

Jean-Marc Jancovici - Mines Paris Tech mai-juin 2019 - www.jancovici.com

- Plus ou moins 2020 pour tous les "liquides" confondus.
- L'agence internationale de l'énergie en décembre 2018 indique que le pic du pétrole conventionnel (c'est à dire pétrole - shale oil et sables bitumineux) a été franchi en 2008
- pour satisfaire la demande future de pétrole, il faudrait multiplier par 3 la production de shale oil aux Etats-Unis (les plus optimistes x2 et pour une durée inconnue)

### Le prix du pétrole est-il élastique ?



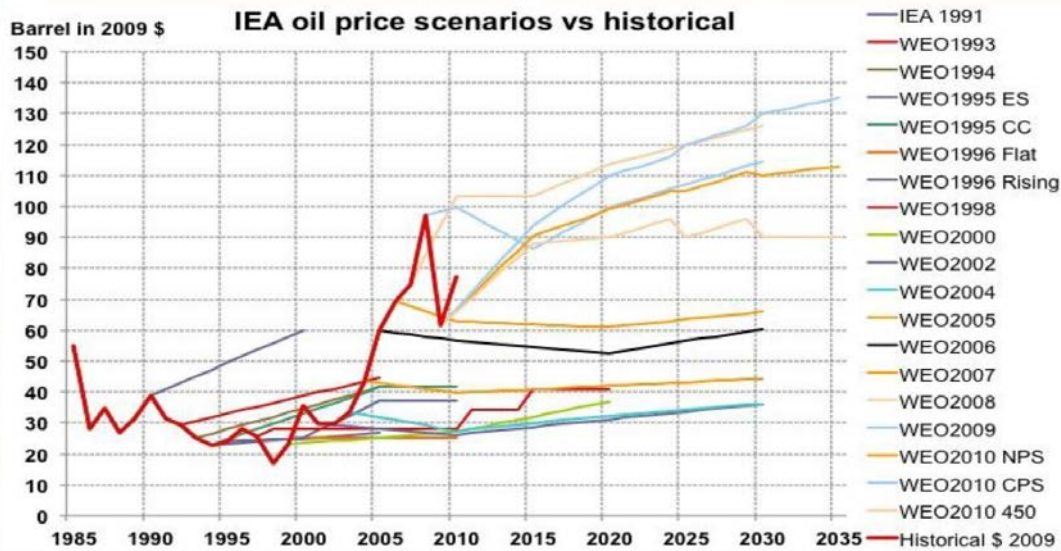
**Prix du baril (en abscisse) vs. PIB en dollars constants (ordonnée) de 1921 à 2017. Jancovici, 2018, sur données BP Statistical Review**

Jean-Marc Jancovici - Mines Paris Tech mai-juin 2019 - www.jancovici.com

Insuffisance de l'offre n'a pas pour corollaire un ajustement par le prix. L'envolée des prix ne sera pas le signal de la raréfaction :

- marqueur 1 : investissements croissants, hausse des investissements nécessaires pour mettre en place des puits. Indicateur : les Capex
- marqueur 2 : contraction de l'économie. Indicateur : PIB

## Il vaut mieux prévoir le prix passé que le prix futur

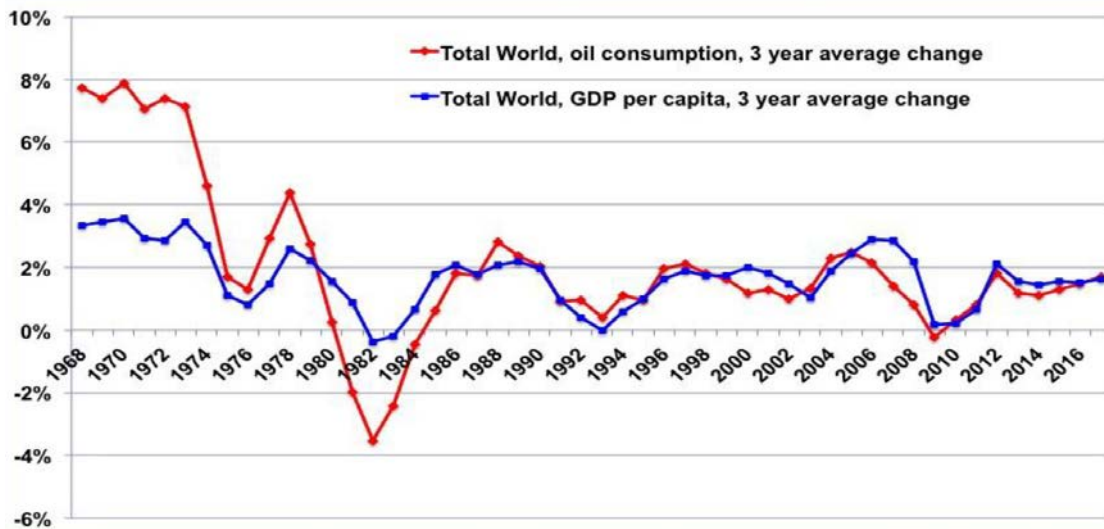


Prix réel du baril en \$ de 2009 et prévisions de prix de l'AIE effectuée pendant les années 1991 à 2010. Source Carbone 4

Jean-Marc Jancovici - Mines Paris Tech mai-juin 2019 - www.jancovici.com

Projection sur le prix du pétrole impossible à établir : l'Agence internationale de l'énergie se trompe systématiquement

## Puis-je avoir de l'économie sans pétrole ?



Variation de la production mondiale de pétrole (moyenne glissante sur 3 ans, source BP Statistical Review 2018) et du PIB par personne en dollars constants (moyenne glissante sur 3 ans, source World Bank 2018)

Jean-Marc Jancovici - Mines Paris Tech mai-juin 2019 - www.jancovici.com

Corrélation parfaite entre :

- la quantité de pétrole produite
- le PIB par personne

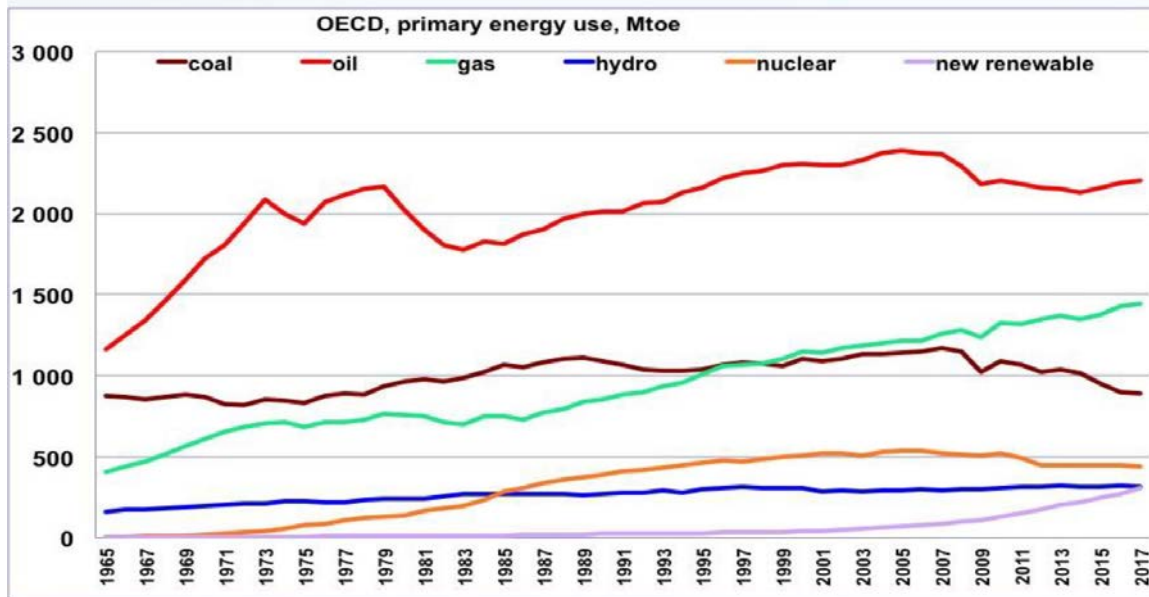
> l'économie est totalement dépendante du pétrole (le pétrole est ce qui relie les machines entre elles, leur production)

- depuis les chocs pétroliers cette dépendance s'est accrue
- gain d'efficacité des machines signifie également plus grande dépendance
- la mondialisation en allongeant les chaînes de flux logistiques a encore accru la dépendance

La variation de production de pétrole détermine la variation de PIB, non l'inverse

- évidemment ... la croissance ne vient pas de Mars
- c'est parce qu'il y a du pétrole pour animer les machines que la production / le PIB augmente

### Autant de pétrole qu'on veut, qu'il parait ?



Consommation d'énergie de l'OCDE depuis 1965. Données PB Statistical Review, 2018

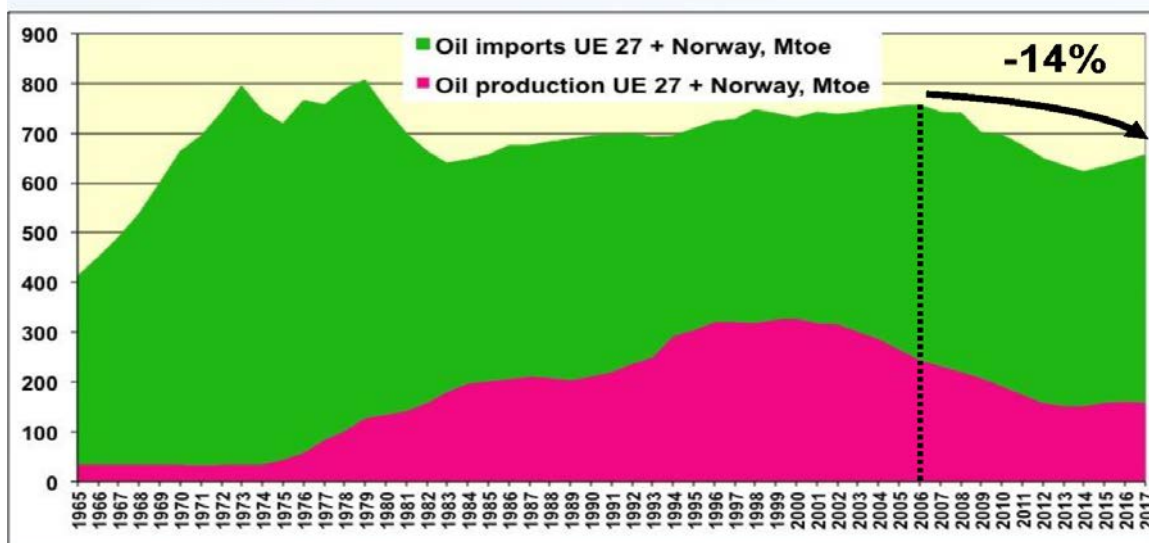
Jean-Marc Jancovici - Mines Paris Tech mai-juin 2019 - www.jancovici.com

Evolution prévisible : lorsque le shale oil atteindra son pic, la croissance va mécaniquement baisser et une récession inévitable

Confirmation si on observe la consommation d'énergie des pays de l'OCDE :

- 2006 : baisse de la consommation > ralentissement PIB
- 2008 : crise financière due à une montagne de dettes publiques (qui s'entassent depuis le premier choc pétrolier pour assurer la pérennité du système redistributif) et privées

### Camionneur en Europe, un métier d'avenir ?

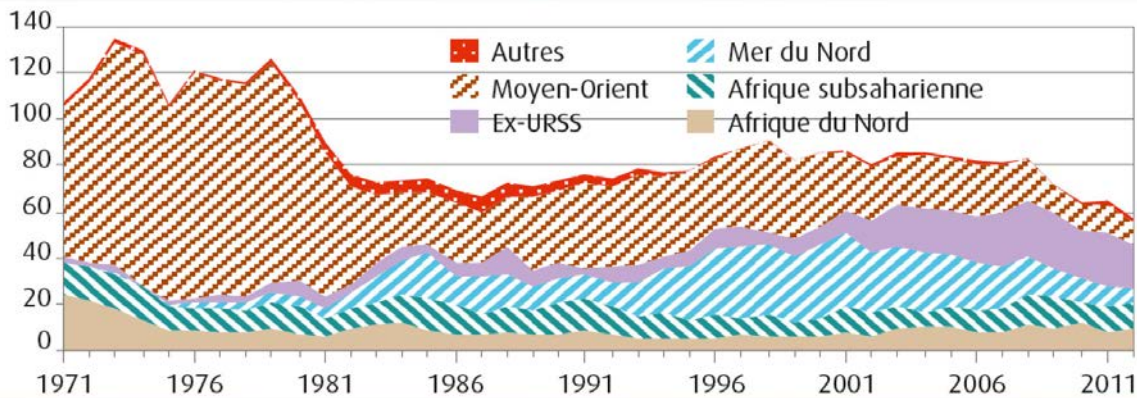


Approvisionnement pétrolier de l'Union+Norvège depuis 1965. Jancovici, sur données BP Statistical Review, 2018

Jean-Marc Jancovici - Mines Paris Tech mai-juin 2019 - www.jancovici.com



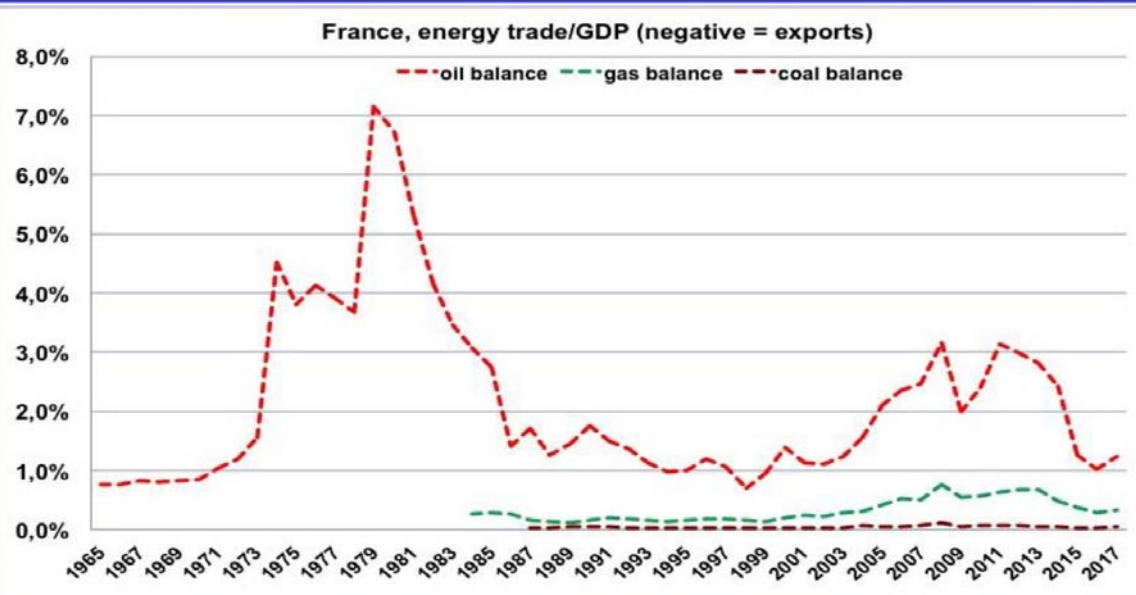
## Des idées hexagonales mais du pétrole qui ne l'est pas



Importations de pétrole en France par zone d'origine. Source SOES 2013

Jean-Marc Jancovici - Mines Paris Tech mai-juin 2019 - [www.jancovici.com](http://www.jancovici.com)

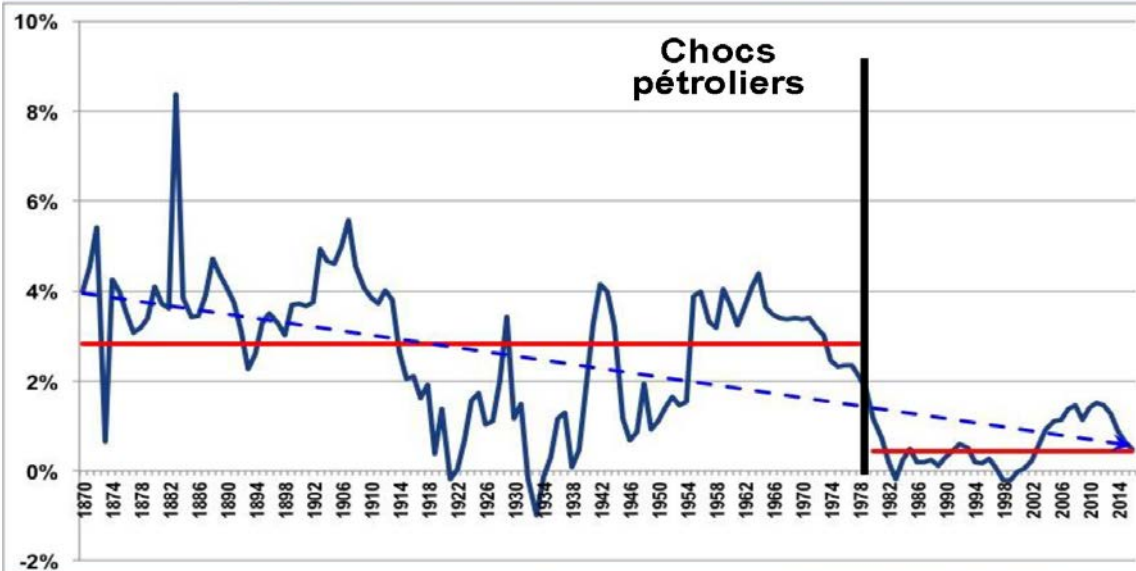
## Combien pour mes précieuses énergies fossiles ?



Evolution de la facture pétrolière de la France en % du PIB. Données primaires BP Statistical Review et World Bank, calcul de l'auteur

Jean-Marc Jancovici - Mines Paris Tech mai-juin 2019 - [www.jancovici.com](http://www.jancovici.com)

## Quel signal faut-il observer ?

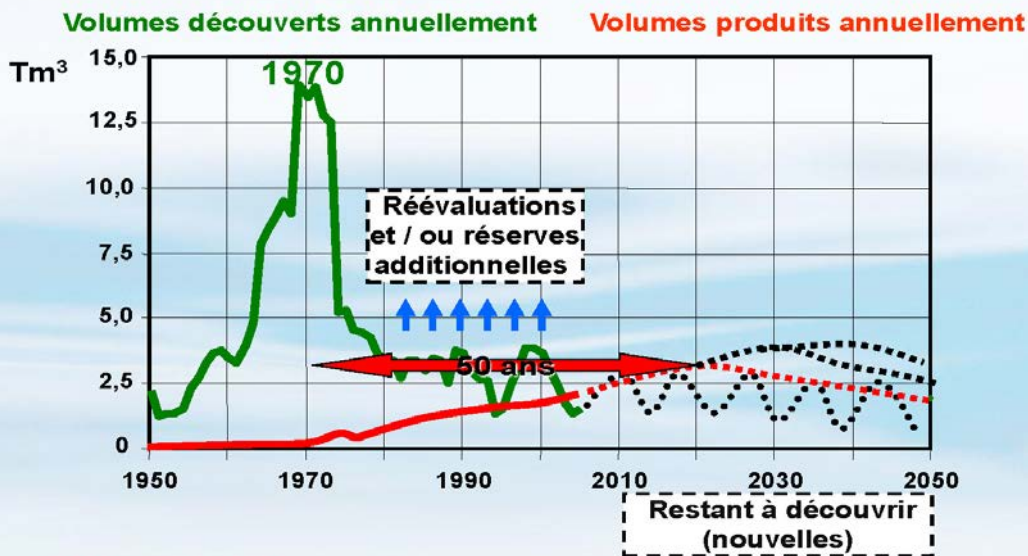


Variation annuelle de la consommation d'énergie par personne (monde), de 1860 à 2016.  
Source : Jancovici, 2017, sur données Schilling et al., 1977, BP Statistical Review, 2017, UN, 2017

Jean-Marc Jancovici - Mines Paris Tech mai-juin 2019 - www.jancovici.com

Gaz

## Plus de pétrole ? Mettons les gaz !



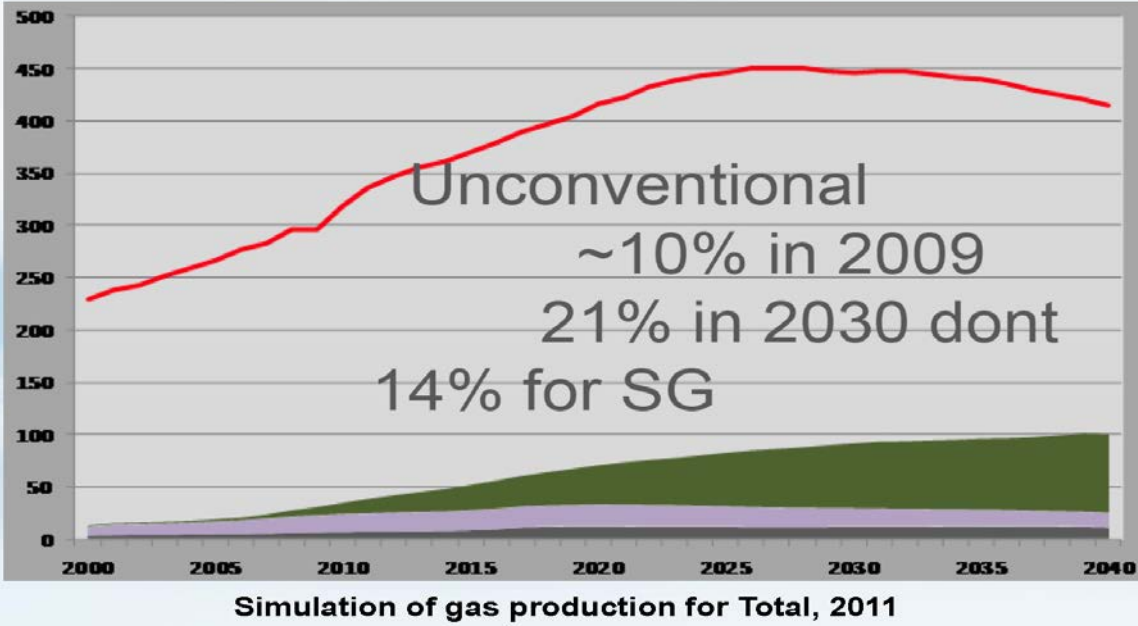
Direction Géologie-Géochimie-Géophysique

Yves MATHIEU Combloux 2009

Jean-Marc Jancovici - Mines Paris Tech mai-juin 2019 - www.jancovici.com

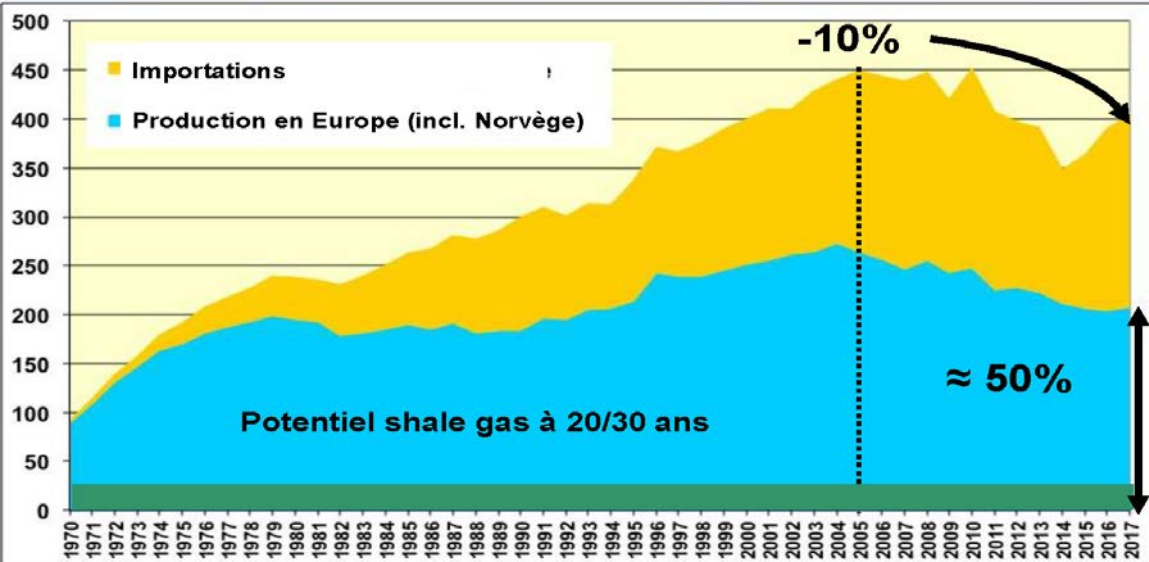
- pic prévu pour 2030 / 2040
- prochaines marches d'escalier pour l'Europe : pic du gaz norvégien vers 2020
- la solution du shale gaz en Europe pas possible :
  - > question de la législation (le sous-sol appartient à l'Etat contrairement aux Etats-Unis où c'est un bien privé, ce qui explique le 1,7 million de puits de pétrole et de gaz actuellement en activité et les 100 000 puits forés chaque année)
  - > densité de population en Europe ne permet pas l'exploitation du sous-sol (d'ailleurs moins intéressant du point de vue ressources) et la mise en place d'infrastructures dédiées (routes, ...)

## Plus de gaz normal ? Sus aux gaz de schiste !



Jean-Marc Jancovici - Mines Paris Tech mai-juin 2019 - www.jancovici.com

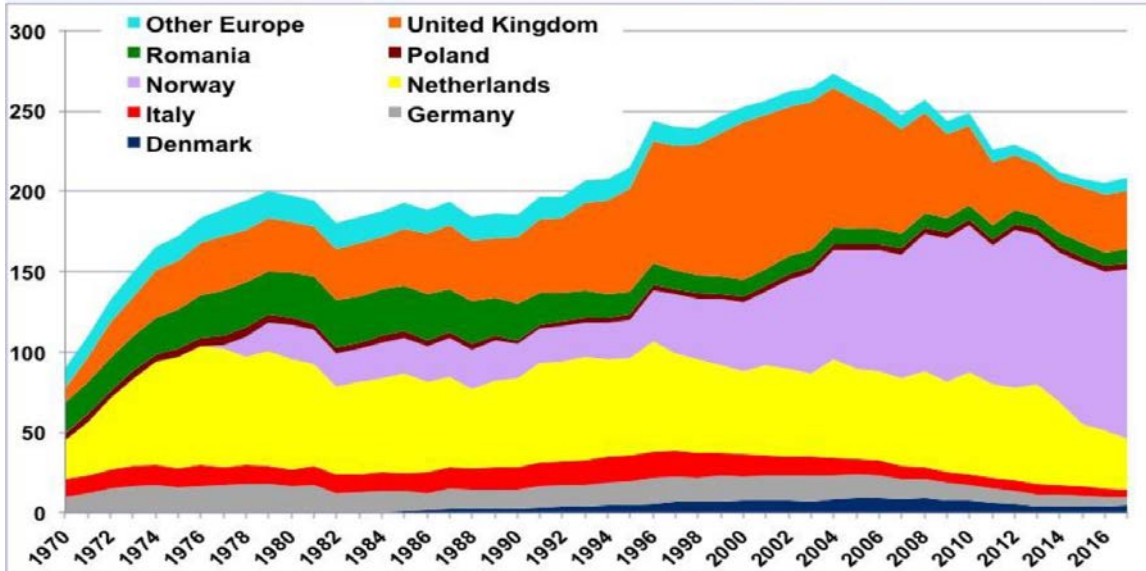
## Gaz à tous les étages ?



Evolution de l'approvisionnement en gaz UE+Norvège, en millions de tonnes équivalent pétrole par an, depuis 1965. Source Jancovici sur données BP Statistical Review, 2015

Jean-Marc Jancovici - Mines Paris Tech mai-juin 2019 - www.jancovici.com

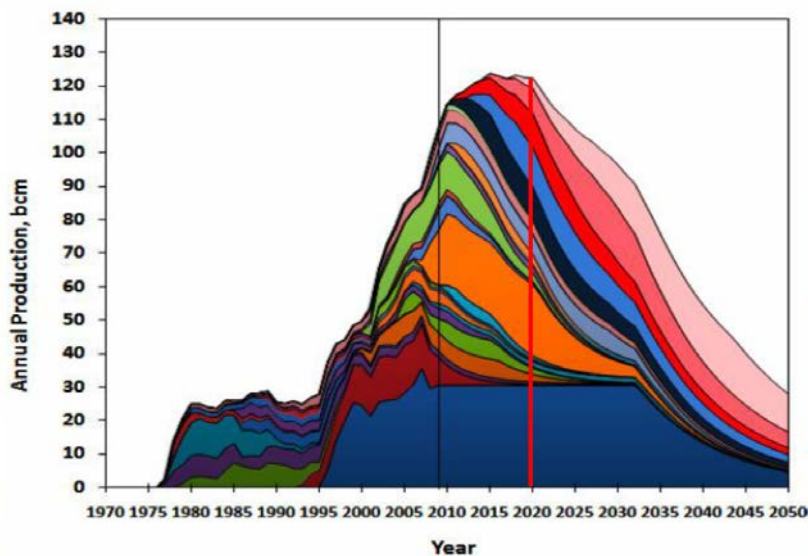
## Tout le monde ne pique pas en même temps



**Production de gaz en Europe, par pays, en millions de tonnes équivalent pétrole par an. Source BP Statistical Review, 2018**

Jean-Marc Jancovici - Mines Paris Tech mai-juin 2019 - [www.jancovici.com](http://www.jancovici.com)

## Vers le haut... puis vers le bas

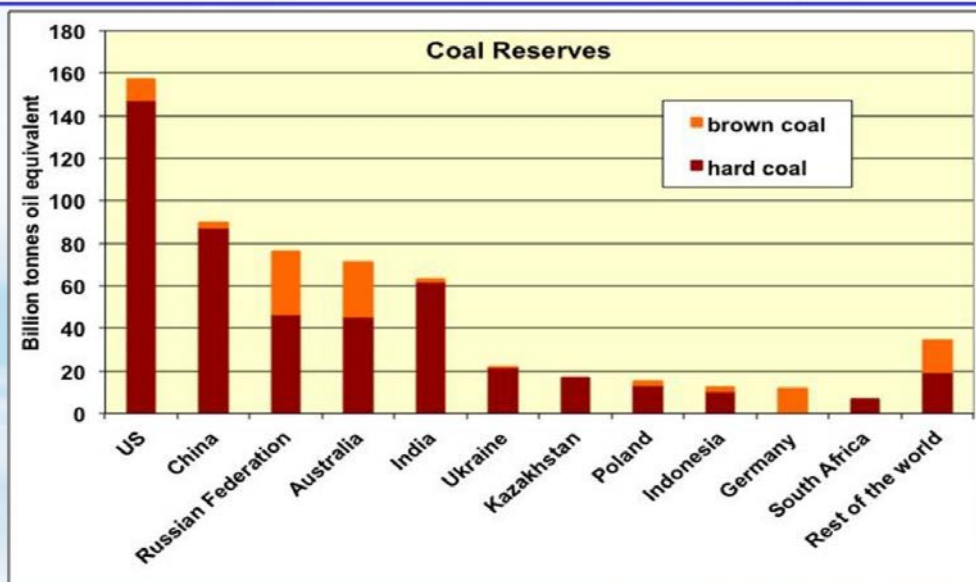


**Production de gaz en Norvège, incluant le reste à découvrir ou réévaluer. Source Söderbergh, B., et al., European energy security: The future of Norwegian natural gas. Energy Policy (2009)**

Jean-Marc Jancovici - Mines Paris Tech mai-juin 2019 - [www.jancovici.com](http://www.jancovici.com)

Charbons

## Le problème se complique encore !



Réserves de charbon par pays, en milliards de tonnes équivalent pétrole (BP Statistical Review, 2018). 10 pays possèdent plus de 90% du charbon mondial !

Jean-Marc Jancovici - Mines Paris Tech mai-juin 2019 - www.jancovici.com

> 2 types de charbon :

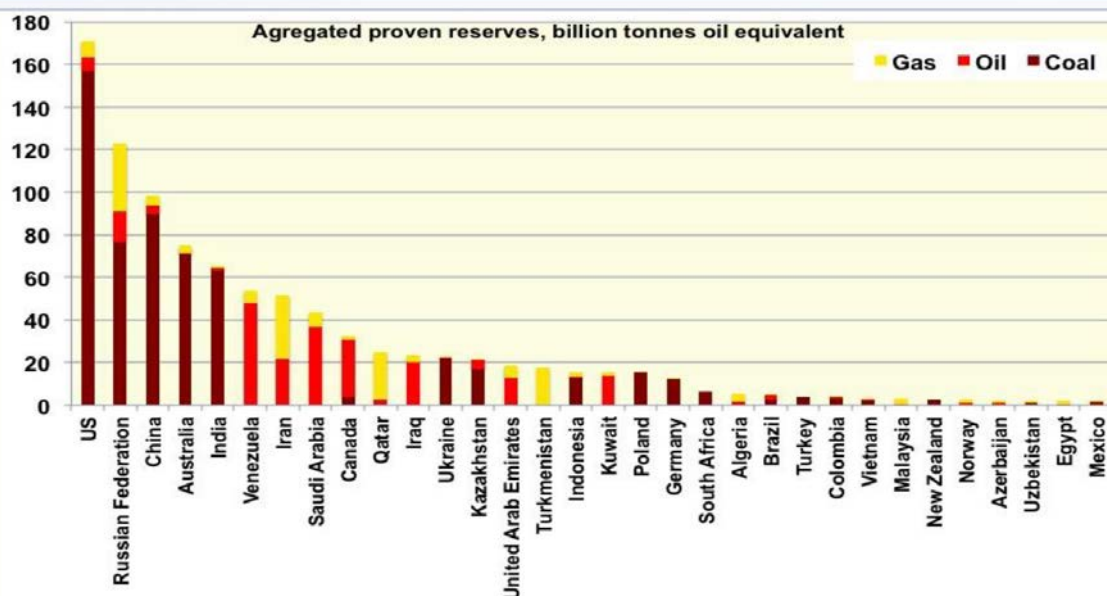
- “hard coil” = houille, anthracite, “charbon vapeur” = charbons anciens enfoui dans des galeries profondes et a haute teneur en carbone
- “brown coil” = lignite = charbon jeune qui n’est pas allé jusqu’au terme du processus de pyrolyse, riche en eau et en éléments incombustibles et près de la surface, qui s’exploite en mines à ciel ouvert (exemple: Mine de Hambach en Allemagne)

> énergie domestique, essentiellement dédié à la production d’électricité

> 10 pays possèdent plus de 90% des réserves

> énergie la plus émissive de CO2 par Kw/h et la plus disponible en quantité et immédiatement ... le sort climatique est dans les mains de quelques pays

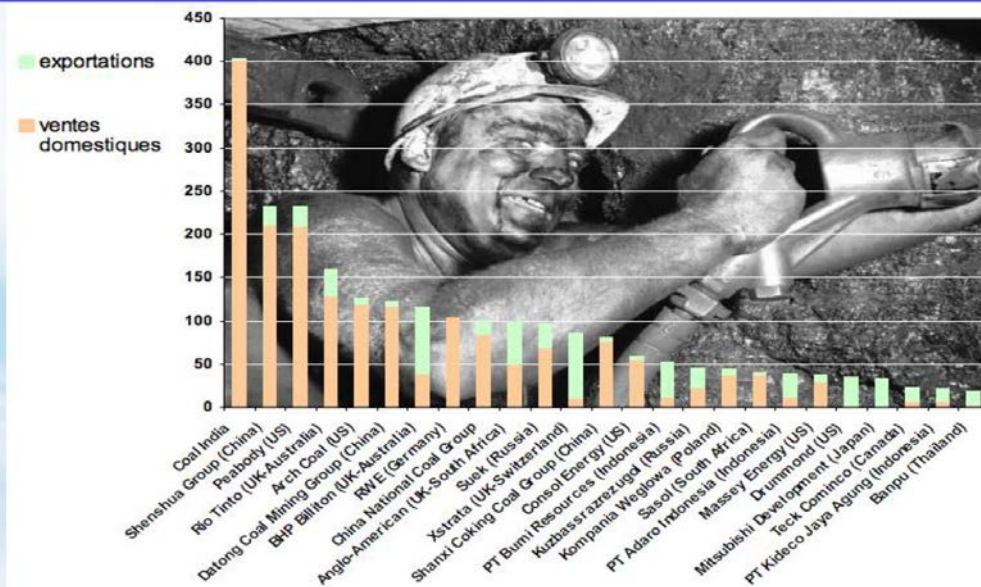
## Et qui arrive en tête des réserves de carbone?



Réserves prouvées gaz+pétrole+charbon. Données BP Statistical Review, 2018

Jean-Marc Jancovici - Mines Paris Tech mai-juin 2019 - www.jancovici.com

## Le charbon, une énergie surtout pour « chez soi »

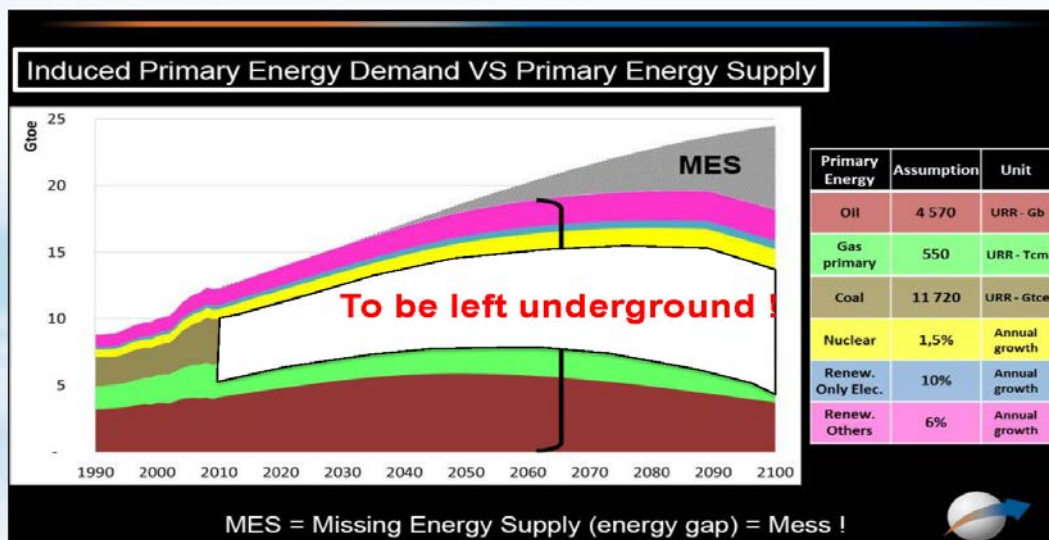


Production des 25 premières sociétés mondiales (total = 35% de la production mondiale).

Source AIE, World Energy Outlook, 2009

Jean-Marc Jancovici - Mines Paris Tech mai-juin 2019 - www.jancovici.com

## Let's pile everything up



Confrontation of wished demand vs. possible world supply. Source The Shift Project, 2012.

Jean-Marc Jancovici - Mines Paris Tech mai-juin 2019 - www.jancovici.com

Si on cumule les stocks :

- on observe que le charbon domine
- anomalie Etats-Unis : fermeture de centrales à charbon du fait de la chute des prix du shale gaz

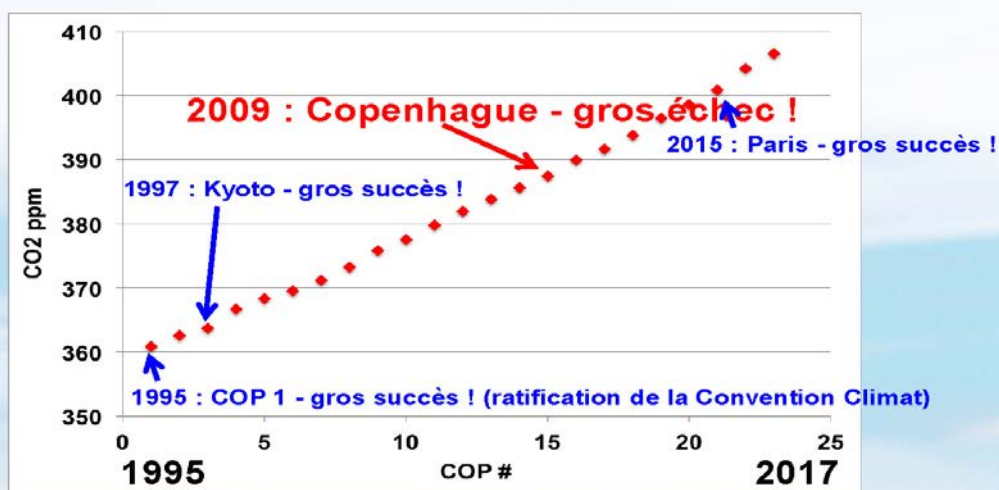
# LEÇON III - LE CHANGEMENT CLIMATIQUE 1/2

## Chapitre 14 - Changement climatique : qu'est-ce que l'effet de serre ?

**Nous avons un problème de climat ? Meuh non, c'est réglé !**



**Tu causes, tu causes...**



Concentration atmosphérique en CO<sub>2</sub> mesurée à chaque Conférence des Parties. Jancovici, d'après données NOAA ESRL.

Jean-Marc Jancovici - Mines Paris Tech mai-juin 2019 - [www.jancovici.com](http://www.jancovici.com)

Accords de Paris décembre 2015

- accords non contraignants des Etats pour limiter la hausse des températures au XXIe à moins de 2°
- 21e Convention Climat depuis 1995 : aucun infléchissement dans la concentration de CO<sub>2</sub> dans l'atmosphère constaté, la concentration augmente parallèlement au "bruit" médiatique sur la question

## Attention : le climat, ce n'est pas la météo !

Avec nos sens, nous ne percevons que **la météo**. La météo, c'est le temps qu'il fait « tout de suite et devant ma porte ». Elle concerne des valeurs **instantanées** et **locales** de la température, des précipitations, de la pression, de la nébulosité, etc.

Par contre, le climat désigne des conditions **moyennes** de température ou de précipitations, et leurs variations les plus régulières (saisons par ex.), sur une zone plus ou moins vaste.

La confusion est possible parce que le **climat** utilise les **mêmes grandeurs** que la météo : température, précipitations, vent, nébulosité, etc.

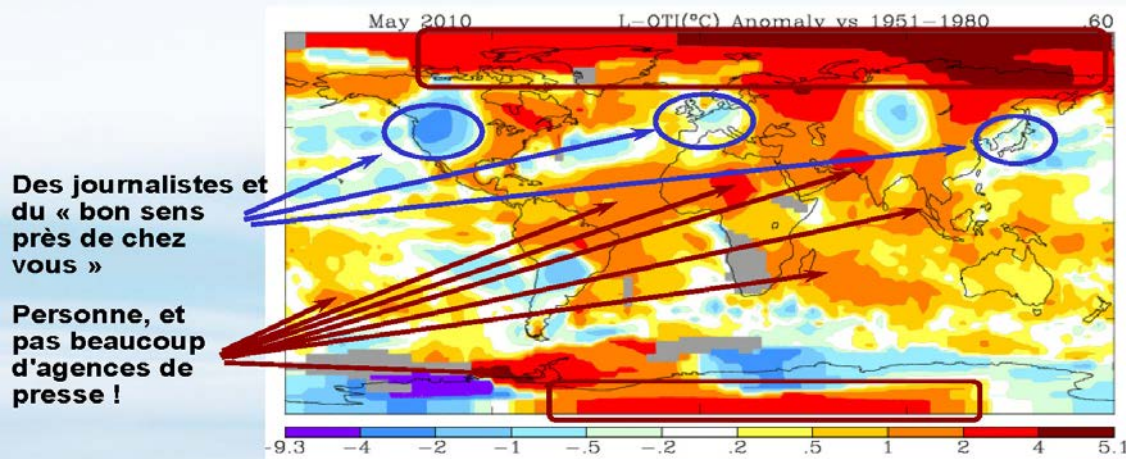
**Le climat change (et a toujours changé), mais pas aussi vite que la météo !**

Jean-Marc Jancovici - Mines Paris Tech mai-juin 2019 - www.jancovici.com

Confusion commune

- météo, immédiatement perceptible immédiatement par les sens (construit avec des valeurs instantanées)
- climat, non perceptible directement, construit / décrit avec des moyennes spatiales et / ou temporelles

## Agla... et le climat se réchauffe ?



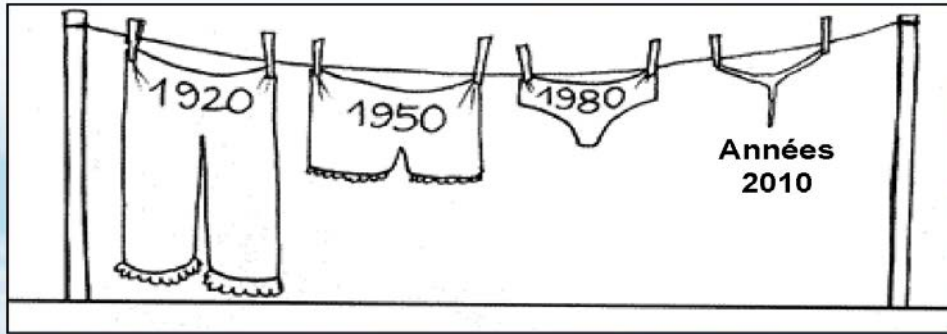
Températures de Mai 2010 comparées à la moyenne du mois de mai sur la période 1951-1980. Source GISS/NASA

Jean-Marc Jancovici - Mines Paris Tech mai-juin 2019 - www.jancovici.com



## Une série exacte peut être mal interprétée...

Il est évident qu'Allègre néglige des données d'observation irréfutables



Effet du relèvement des températures l'habillement depuis 1920  
Source : Petit Bateau ; Playtex ; Aubade ; Princesse Tam Tam  
Vivement 2020 ?

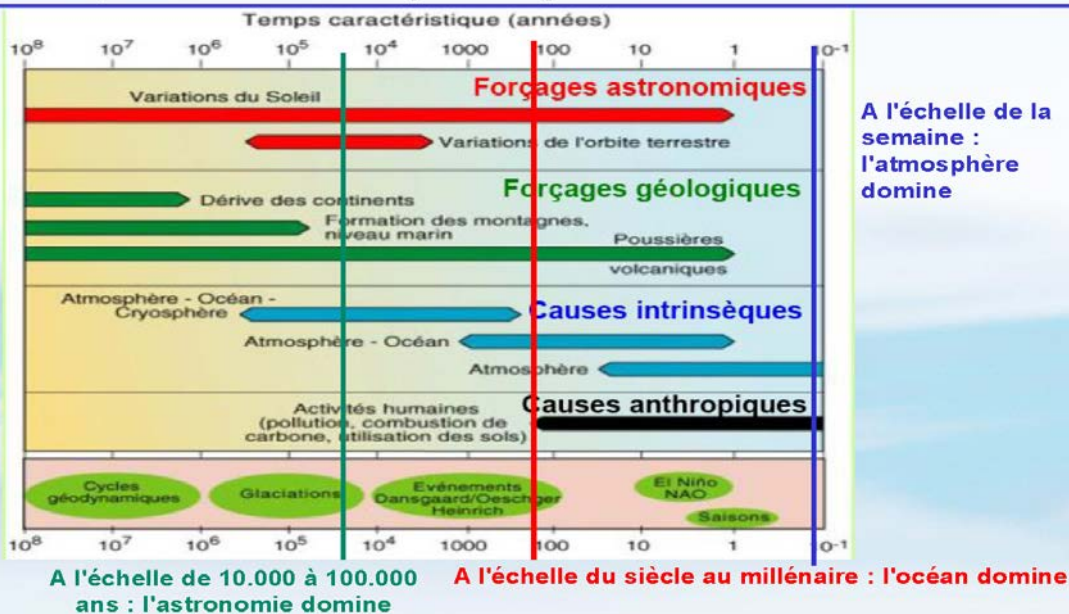
-> Attention aux vues partielles et aux corrélations transformées en lien de cause à effet !

Jean-Marc Jancovici - Mines Paris Tech mai-juin 2019 - www.jancovici.com

Défauts de raisonnement :

- raisonnements qui transforment une corrélation en un lien de cause à effets
- vue partielle d'une série exacte peut déboucher sur une mauvaise interprétation

## Que des hommes pour tripoter le climat ? Allons donc...



Causes diverses d'influence sur le climat et échelles de temps caractéristiques. Edouard Bard, exposé au Collège de France.

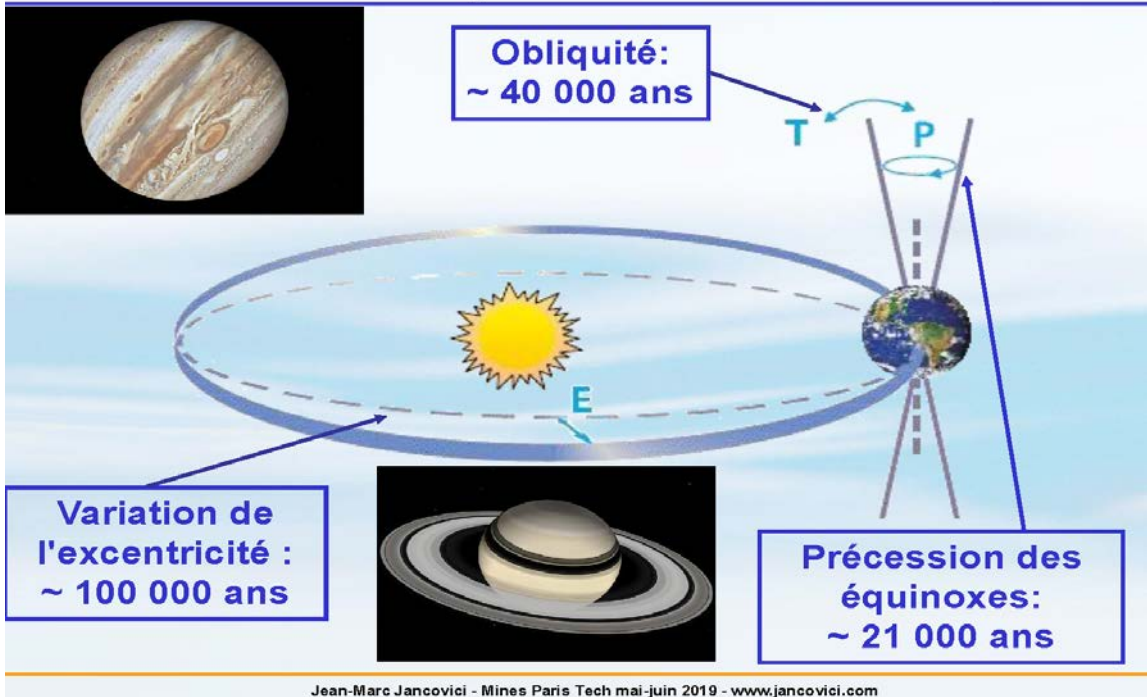
Jean-Marc Jancovici - Mines Paris Tech mai-juin 2019 - www.jancovici.com

Ne pas oublier la donnée temporelle / la variable échelle de temps

- le climat n'a jamais été stable à l'échelle des temps géologiques
- au sein d'une même ère géologique, les derniers millions d'années de l'ère quaternaire par exemple, on constate de grandes oscillations climatiques (succession de phases de glaciations & de réchauffements)

Les causes d'influence sur le climat sont diverses et agissent à des échelles de temps différentes (source : Edouard Bard, Collège de France, <https://www.college-de-france.fr/site/edouard-bard/symposium-2009-05-15-09h45.htm>) :

## Être perturbé concerne aussi les planètes



### • échelle 10 000 / 100 000 ans :

--- forçages astronomiques : le système solaire fait varier le climat de la terre

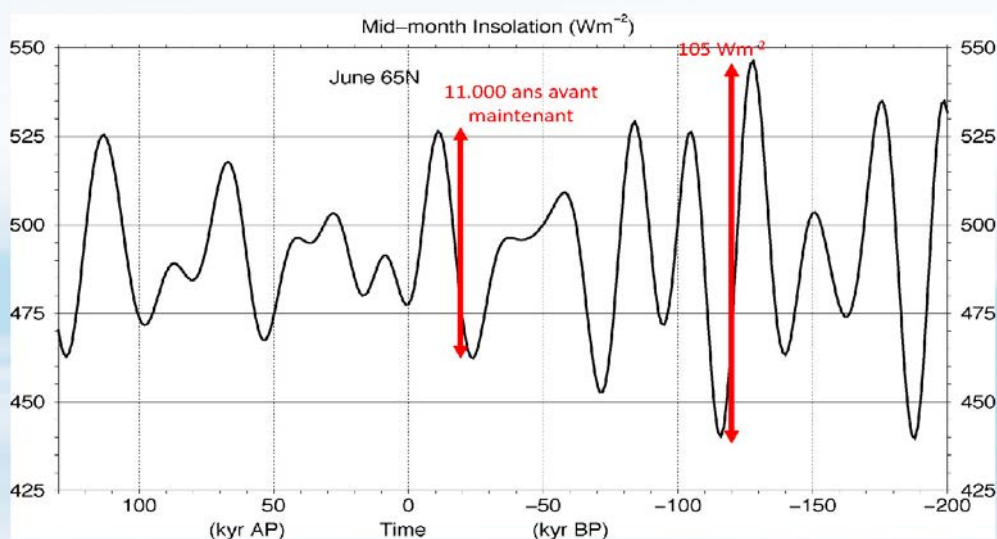
----> l'attraction des divers astres modifie l'excentricité de l'ellipse terrestre autour du soleil (100 000 ans)

----> l'obliquité de la terre se modifie (orientation qui détermine la présence des saisons et leur intensité ... plus l'axe est incliné plus les saisons sont prononcées / plus l'axe est redressé plus l'été est froid et moins la glace des pôles fond, entrée progressive en glaciation) 40 000 ans

----> l'axe de la rotation de la terre varie chauffant alternativement (21000 ans) une hémisphère plutôt qu'une autre

--- + forçages géologiques (dérive des continents, formation des reliefs et niveaux marins). Exemple : installation de la calote antarctique sur la pôle sud il y a 20 millions d'années a créé une surface réfléchissante et provoqué la chute des températures de plusieurs degrés

## Je gèle et je déglace



Variation de l'insolation en juin à 65° N. Source André Berger, exposé au Collège de France, 2004

Jean-Marc Jancovici - Mines Paris Tech mai-juin 2019 - www.jancovici.com

• échelle du siècle ou millénaire : océans, circulation des fluides peuvent changer le climat sur une période de temps d'1 siècle à 1 millénaire. C'est le compartiment qui pilote le changement climatique à l'échelle du

siècle.

- échelle de la semaine (météo) : l'atmosphère

Cause anthropique s'est ajoutée : la civilisation humaine est devenue un agent climatique



Effet de serre :

- matières réfléchissantes sur terre : glace + déserts : évacue 1/3 de l'énergie solaire qui touche la planète
- 2/3 non réfléchis, donc absorbés par le sol (dont 2/3 d'eau), qui cherche à se mettre à l'équilibre énergétique, via 3 processus :
  - > par contact avec l'air, restitution d'une part de l'énergie qui chauffe l'air en contact direct avec le sol
  - > par évaporation, restitution de la chaleur dans l'atmosphère
  - > par rayonnement de l'infrarouge ("infrarouge lointain", longueurs d'onde spécifique) qui "rebondit" sur la couche atmosphérique

L'atmosphère laisse presque tout passer sauf

- à aller les ultra-violet du soleil (bloqués par l'ozone situé dans la stratosphère)
- au retour, les infrarouges lointains ré-émis par le sol qui butent sur l'atmosphère,
  - > l'atmosphère absorbe alors l'énergie de ces infrarouges
  - > pour se mettre à l'équilibre, l'atmosphère rayonne à nouveau l'infrarouge dont 1 partie en direction du sol
  - > 2nd chauffage du sol après celui reçu directement du rayonnement solaire

L'effet de serre est un processus naturel qui permet de gagner 30°C. Sans effet de serre pas de vie sur terre.

La civilisation humaine vient perturber ce cycle naturel

- en émettant des gaz à effets de serre supplémentaires
- qui s'accumulent sans se dissiper
  - > augmentation de la concentration de gaz à effet de serre dans l'atmosphère
  - > augmentation de l'opacité de l'atmosphère au rayonnement des infrarouges lointains émis par la planète
  - > réchauffement de la basse atmosphère (troposphère, les 10 premiers kilomètres) et du sol (qui augmente la restitution de la chaleur par ses 3 processus habituels)

Impacte les phénomènes météorologiques intenses (ouragans, orages, tornades encouragés) :

- température de la stratosphère diminue
- température de la troposphère augmente (et avec la puissance convective)

## **Climatologue, cela n'existe (presque) pas !**

**Pour cerner le comportement du climat, il faut une multitude de disciplines scientifiques, dont aucune ne s'appelle « climatologie » :**

**Astrophysiciens -> énergie solaire reçue par la Terre**

**Dynamiciens de l'atmosphère -> échanges surface-espace**

**Chimistes de l'atmosphère (aérologues) -> composition de l'air**

**Océanographes -> océan,**

**Glaciologues -> calottes polaires, paléoclimats,**

**Vulcanologues -> volcans,**

**Géophysiciens -> dérive des continents,**

**Biogéochimistes -> cycle des éléments (N, C, P, O...), paléoclimats**

**Biologistes -> végétation,**

**Sans parler de toutes les sciences humaines, puisque l'homme est devenu un agent climatique....**

Jean-Marc Jancovici - Mines Paris Tech mai-juin 2019 - www.jancovici.com

Le terme de "climatologue" souvent employé dans la presse recouvre en réalité de multiples disciplines

- toutes utiles pour comprendre le dérèglement climatique et sa part anthropique
- et mises en commun sous l'égide des Nations Unies, le GIEC Groupe Intergouvernemental sur l'évolution du climat (IPCC, International Panel on Climate Change en anglais)
- cela signifie qu'aucun scientifique n'est expert du climat en général, il peut l'être dans un domaine particulier

## **L'effet de serre est de l'histoire (scientifique) très ancienne**

**1824 : Joseph Fourier, physicien français, publie "Remarques générales sur les températures du globe terrestre et des espaces planétaires", où il expose que la température du sol est augmentée par le rôle de l'atmosphère**

**1838 : Claude Pouillet, physicien français, puis Joseph Tyndall, un irlandais, attribuent l'effet de serre naturel à la vapeur d'eau et au gaz carbonique. Pouillet affirme que toute variation de la quantité de vapeur d'eau, comme de CO<sub>2</sub>, doit se traduire par un changement climatique**

**1896 : Svante Arrhenius, chimiste Suédois (Prix Nobel 1903) prédit que l'utilisation intensive des combustibles fossiles engendrera un réchauffement climatique. Il donne un ordre de grandeur : 4° C en plus pour un doublement du CO<sub>2</sub> dans l'air.**

**1922 : Lewis Fry Richardson, un physicien anglais, tente une première expérience de modélisation du climat à partir des seules équations de la physique (sans ordinateur !).**

**1950 : Le premier ordinateur (l'ENIAC) est utilisé pour expérimenter le premier modèle numérique de prédiction météorologique**

Jean-Marc Jancovici - Mines Paris Tech mai-juin 2019 - www.jancovici.com

Découverte de l'effet de serre :

- 1824 : Joseph Fourier démontre que la température de la planète est augmentée par le rôle de l'atmos-

phère

- 1838 : la vapeur d'eau et le CO<sub>2</sub> identifiés comme gaz à effet de serre
- 1896 : calculs sur les conséquences d'un effet de serre plus puissant par le suédois Arrhénius  
--> doublement du CO<sub>2</sub> dans l'atmosphère = entraîne un réchauffement global de 4° (c'est exact)  
--> structure spatiale de cette élévation de température décrite avec justesse : augmentation d'autant plus marquée que la température de départ est basse (l'effet d'un supplément d'interception d'infrarouges terrestres impacte davantage les zones froides de la planète, c'est-à-dire les pôles plus que les tropiques, la nuit plus que le jour, plus vite l'hiver que l'été)
- 1950 : premier ordinateur utilisé (ENIAC) dès 1950 pour réaliser le premier modèle de simulation de l'atmosphère / de prédiction météorologique
- années 70 : découverte des spectromètres de masse qui permettent de réaliser des analyses isotopiques (indispensables pour reconstituer les températures du passé, via des échantillons prélevés sur la croûte terrestre, dont les carottes polaires)

## Vous avez dit gaz à effet de serre ?

**Un gaz est dit « à effet de serre » si il est capable d'absorber du rayonnement infrarouge émis par la Terre**

**Cela concerne essentiellement :**

**La vapeur d'eau H<sub>2</sub>O**

**Le dioxyde de carbone ou « gaz carbonique » ; CO<sub>2</sub>**

**Le méthane, ou gaz naturel ; CH<sub>4</sub>**

**Le protoxyde d'azote, ou gaz hilarant ; N<sub>2</sub>O**

**Des molécules plus complexes telles les halocarbures ; C<sub>x</sub>H<sub>y</sub>F<sub>z</sub>Cl<sub>t</sub>**

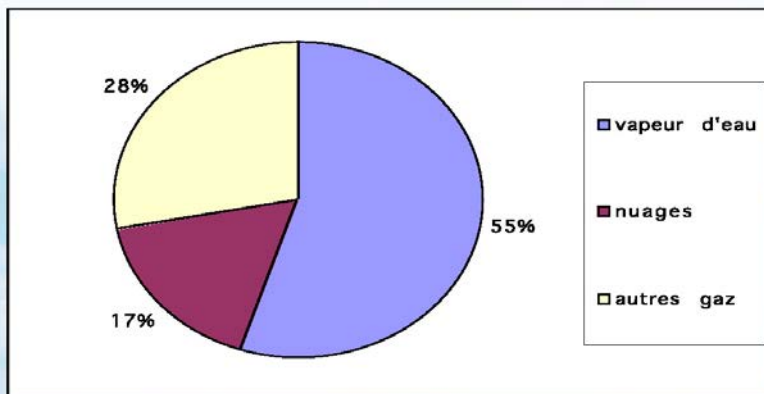
**Un gaz sans émissions directes : l'ozone**

Jean-Marc Jancovici - Mines Paris Tech mai-juin 2019 - [www.jancovici.com](http://www.jancovici.com)

Gaz à effets de serre (capable d'absorber des rayonnement infrarouge émis par la terre),

- tous des gaz tri-atomique ou plus (par exemple l'oxygène et l'azote sont transparents à l'infrarouge terrestre)

## Origine de l'effet de serre « naturel » : que d'eau !

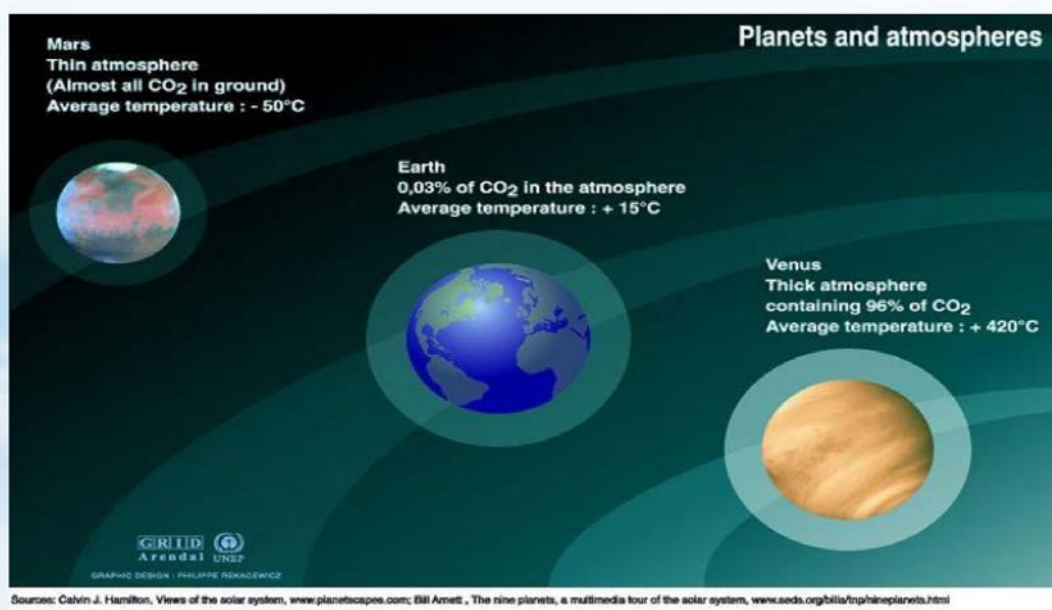


Jean-Marc Jancovici - Mines Paris Tech mai-juin 2019 - [www.jancovici.com](http://www.jancovici.com)

essentiellement :

- vapeur d'eau (H<sub>2</sub>O) / présent naturellement dans l'atmosphère depuis 4,5 milliards d'années
- dioxyde de carbone (CO<sub>2</sub>) / présent naturellement dans l'atmosphère depuis 4,5 milliards d'années
- méthane (CH<sub>4</sub>) / présent naturellement dans l'atmosphère (apparu avec la vie sur terre et ses microorganismes unicellulaires primitifs les archées, <https://fr.wikipedia.org/wiki/Archaea>)
- protoxyde d'azote (N<sub>2</sub>O)
- molécules complexes mises au point par les hommes, par exemple Halocarbures qui constituent des GES extrêmement puissants (hydrocarbures où l'on a substitué tout ou partie de l'hydrogène par une molécule d'allogène, par exemple chlore ...)
- ozone qui ne se contente pas d'absorber les ultraviolets du soleil, il sait également absorber les infrarouges terrestres

## La Terre n'a pas le monopole de l'effet de serre

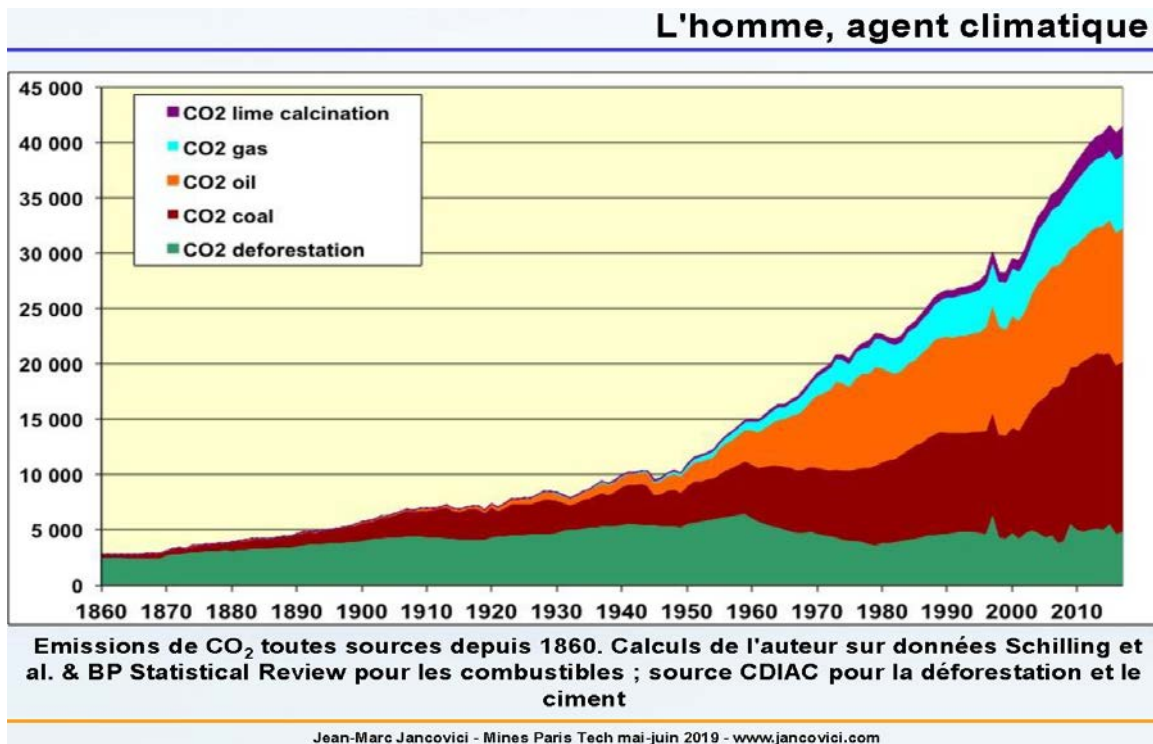


Jean-Marc Jancovici - Mines Paris Tech mai-juin 2019 - [www.jancovici.com](http://www.jancovici.com)

Gaz à effets de serre présents sur d'autres planètes : Exemple Vénus,

- 96% de CO<sub>2</sub> dans l'atmosphère. Surchauffe de 420°C (la proximité avec le soleil ne joue que pour quelques dizaines de degrés)
- différence avec la terre : Vénus n'a pas porté la vie (archées ou plus tard plantes capables de faire de la photosynthèse)

## Chapitre 15 - Les émissions humaines de Gaz à Effet de Serre



### 5 causes humaines d'émission de CO<sub>2</sub>

- gaz
- pétrole
- charbon
- déforestation

--> pour l'essentiel du défrichage pour de nouvelles surfaces agricoles

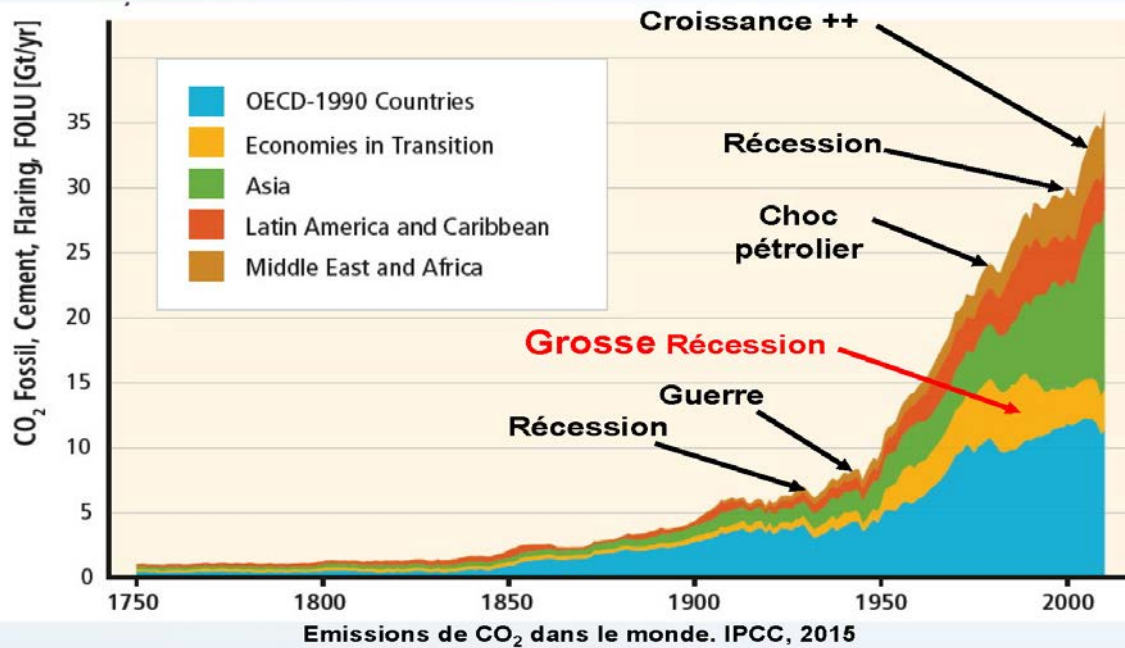
--> pic de déforestation dans les années 60, continue aujourd'hui. Précision des mesures discutable, la détection se faisant par détection satellitaire.

--> 1er mécanisme de libération de CO<sub>2</sub> : lorsque les arbres sont exploités par la filière bois, une grande partie ne dure dans le temps - papiers, emballages, meubles bons marchés... - et par conséquent libère le CO<sub>2</sub> (déchets incinérés). En France 7% du bois coupé est du bois d'oeuvre à longue durée de vie)

--> 2e mécanisme : le sol agricole est labouré et libère du CO<sub>2</sub> contenu dans le sol (exposition de l'humus à l'oxygène de l'air, destockage du carbone par oxydation accélérée)

- calcination du calcaire (carbonate de calcium, CaCO<sub>3</sub>) pour faire du ciment (chaux vive CAO + additifs), c'est à dire couper en 2 CaCO<sub>3</sub> (CAO + CO<sub>2</sub>) via un four à ciment dans lequel le calcaire est porté à plus de 1000°C. CO<sub>2</sub> rejeté dans l'atmosphère

## Plus ça va (le PIB) et moins ça va (le CO<sub>2</sub>)...



Jean-Marc Jancovici - Mines Paris Tech mai-juin 2019 - www.jancovici.com

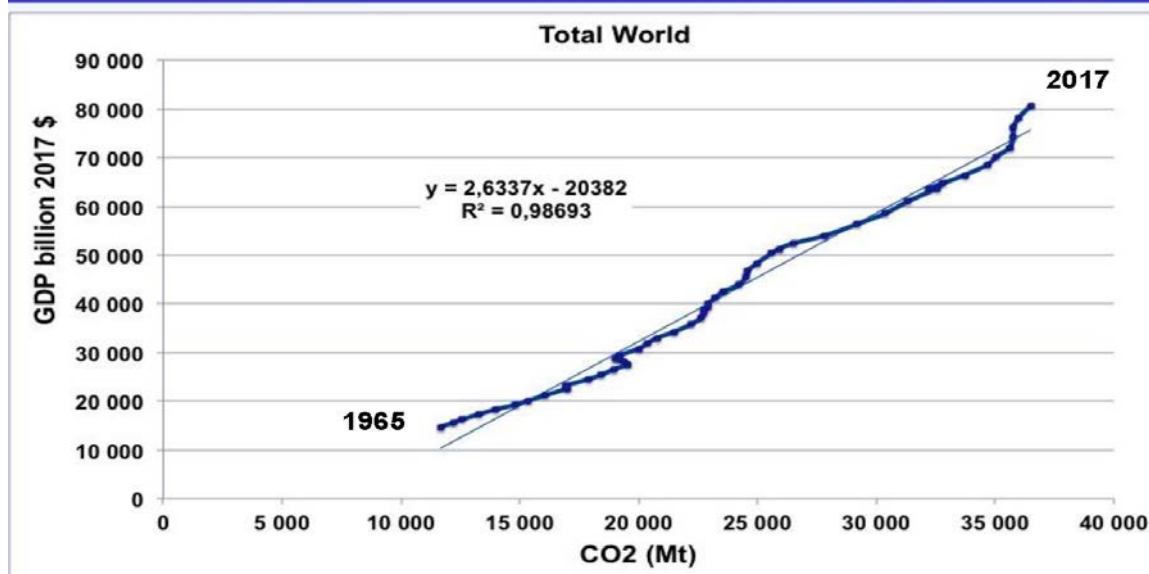
Zones d'émissions du CO<sub>2</sub>

- zone OCDE stagne
- Asie passé devant

Les deux seules années au cours du XXe siècle où les émissions de CO<sub>2</sub> ont baissé de 4% ou plus (cap fixé par les Accords de Paris) :

- 1932 : au plus fort de la crise de 1929
- 1945 : éradication industrielle de l'Allemagne et du Japon

## Plus de PIB avec moins de CO<sub>2</sub> ?



Emissions de CO<sub>2</sub> (en abscisse) et PIB en dollars constants (ordonnée) pour le monde. Données primaires World Bank pour le PIB et BP stat pour l'énergie

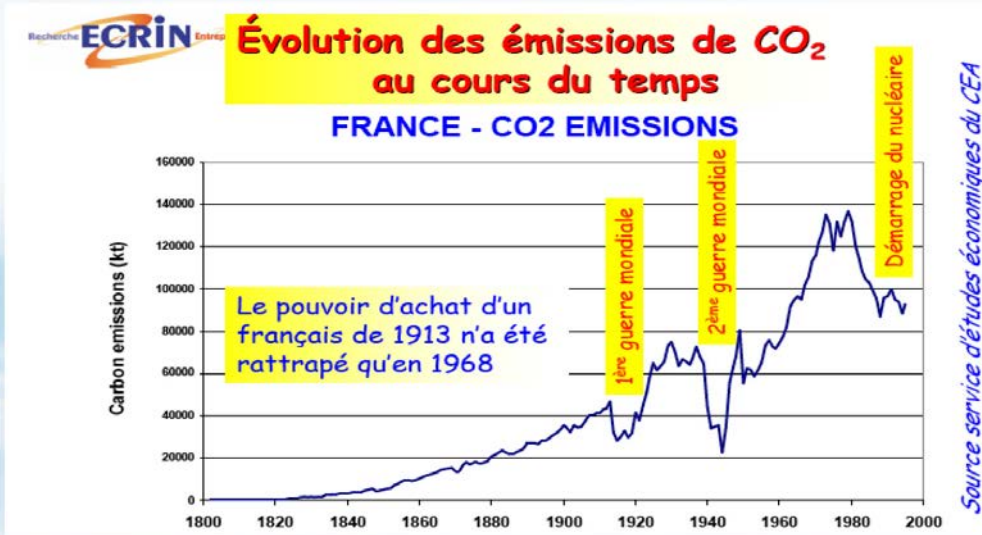
Jean-Marc Jancovici - Mines Paris Tech mai-juin 2019 - www.jancovici.com

Moins de CO<sub>2</sub> avec plus de PIB : totalement impossible, on ne sait pas faire plus de PIB sans utiliser plus de machines

- plus de PIB = plus de flux productif
- le flux productif par définition mesuré par l'énergie = plus de PIB = plus d'énergie
- étant donné que l'énergie est essentiellement fossile = plus d'énergie = plus d'émission de CO<sub>2</sub>



## En France aussi, plus ça va et moins ça va



Emissions de CO<sub>2</sub> provenant de combustibles fossiles en France depuis 200 ans

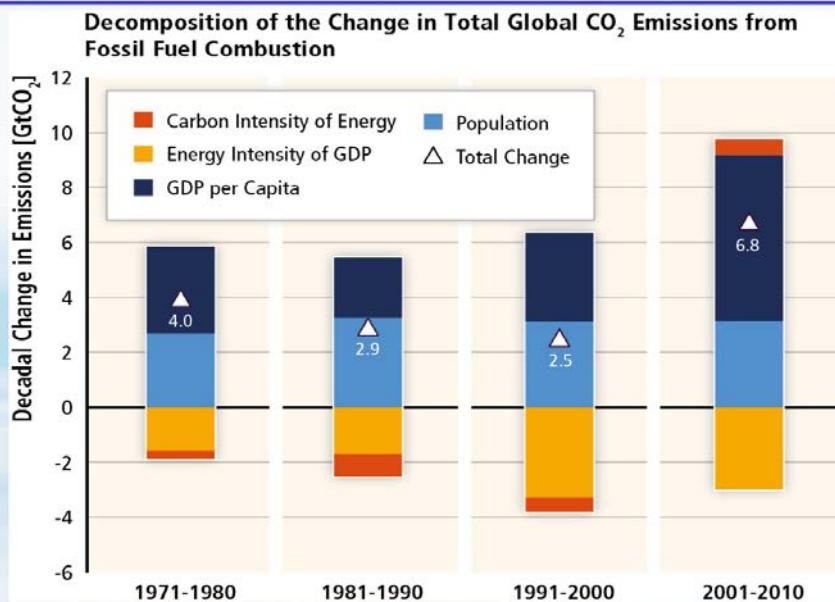
Source CEA.

Jean-Marc Jancovici - Mines Paris Tech mai-juin 2019 - www.jancovici.com

Sur le long terme, l'évolution des émissions de CO<sub>2</sub> en France obéit au modèle commun hausse PIB = hausse des émissions.

Une originalité survient dans les années 70 / 80 avec le démarrage du programme nucléaire français qui fait chuter sensiblement (mais temporairement) les émissions.

## Vivent le charbon, le PIB et les enfants !



Contribution de divers facteurs à la variation des émissions de CO<sub>2</sub> fossile par période

Source IPCC, AR5, 2014.

Jean-Marc Jancovici - Mines Paris Tech mai-juin 2019 - www.jancovici.com

Equation de Kaya décompose les émissions de CO<sub>2</sub> en 4 termes

- population
- PIB par personnes
- intensité énergétique du PIB (quantité de kw/h qu'il faut pour créer de la valeur ajoutée)
- l'efficacité CO<sub>2</sub> de l'énergie (quantité de CO<sub>2</sub> émis lorsqu'on utilise 1 Kw/h)

Selon le GIEC, l'émission de CO<sub>2</sub> toujours croissante sur les 4 dernières décennies

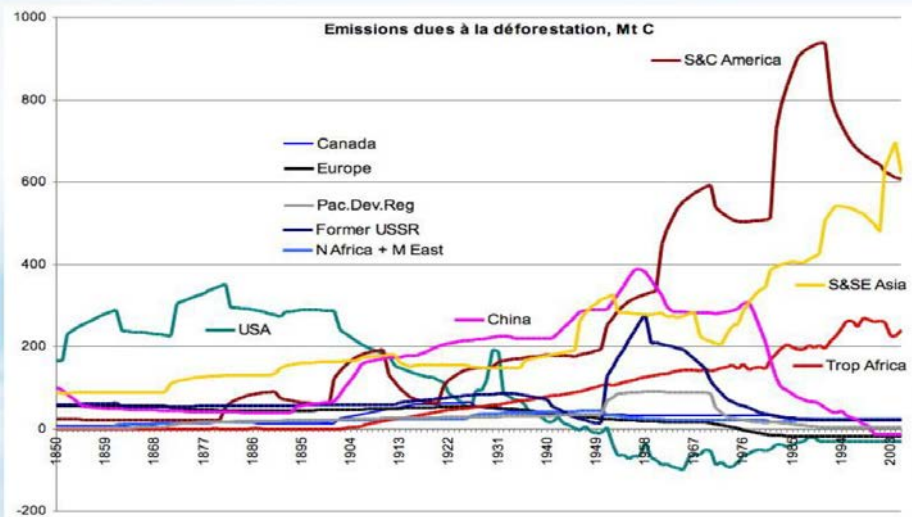
- 1970's : +4

- 1980's : +2,9
- 1990's : +2,5
- 2000's : +6,8

Mais décomposition révèle : l'augmentation démographique + l'augmentation de la transformation de l'environnement (PIB par personne) sont plus rapides que les gains / améliorations obtenus

- par l'amélioration de l'efficacité CO2 de l'énergie sauf sur la dernière décennie (dégradation du fait de l'essor industriel de la Chine et l'explosion de l'exploitation du charbon)
- et par l'amélioration de l'intensité énergétique du PIB

## La déforestation, historiquement la première source



**Emissions dues à la déforestation, par grande zone, de 1850 à 2005.**

**Source : Houghton, The Woods Hole Research Center sur <http://cdiac.ornl.gov/trends>**

Jean-Marc Jancovici - Mines Paris Tech mai-juin 2019 - [www.jancovici.com](http://www.jancovici.com)

Les premières émissions de CO2 provoquées par l'activité humaine sont dues à la déforestation.

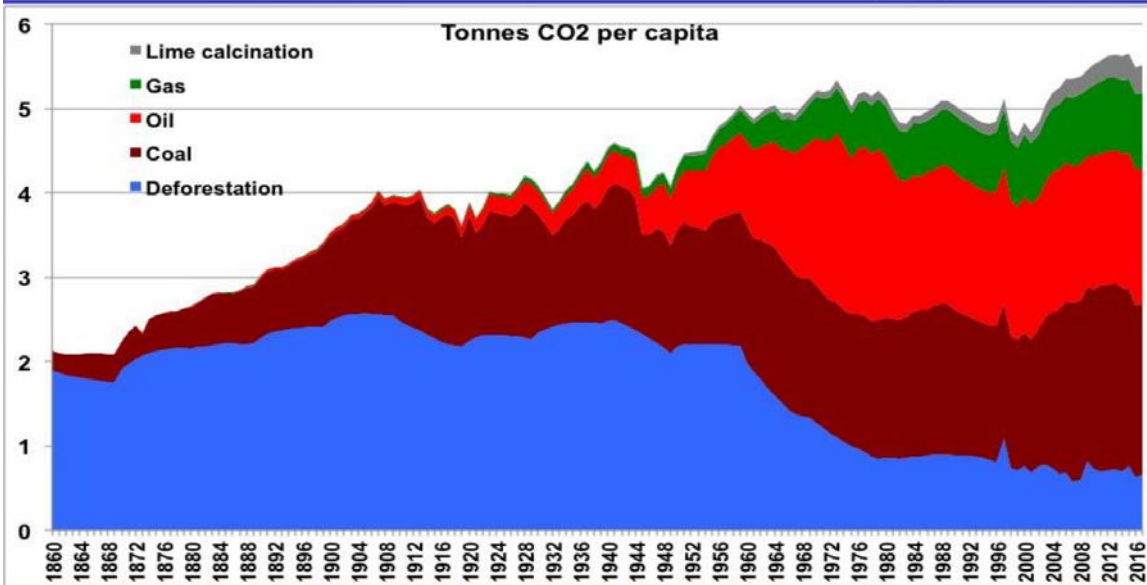
Mécanisme :

- on déforeste pour faire face à l'augmentation de la taille de la population = augmentation des surfaces cultivables
- on déforeste pour satisfaire un régime alimentaire carné = augmentation des surfaces agricoles par personne

Augmentation de la population et augmentation de la part carnée dans l'alimentation sont les deux moteurs de la déforestation.

Le retour à une agriculture extensive pour se passer / réduire les intrants chimiques sans changer de régime alimentaire se ferait au détriment de la forêt.

## Et par personne ?



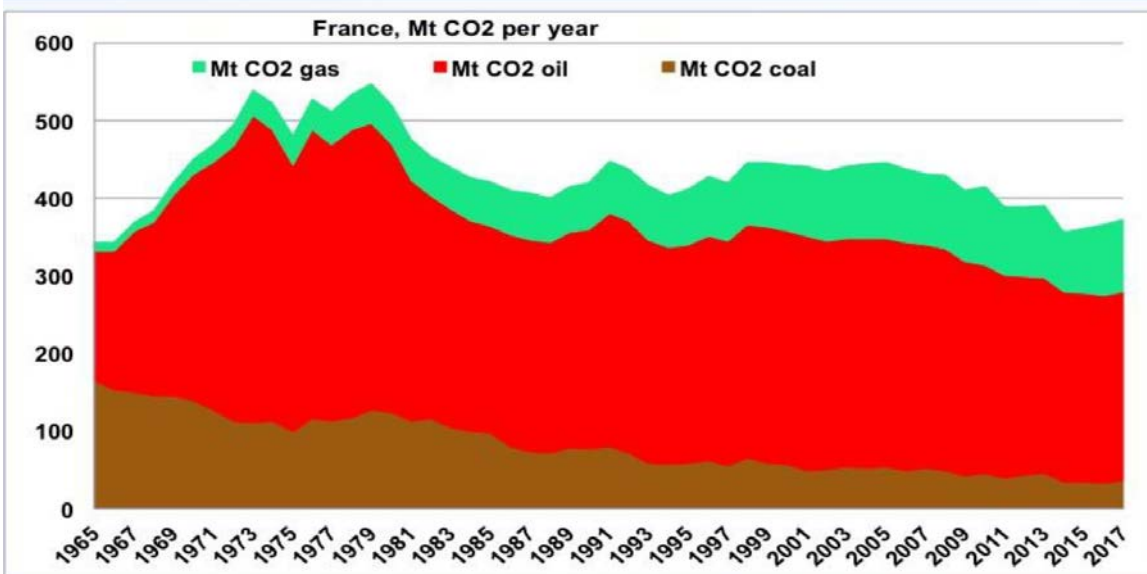
Emissions de CO<sub>2</sub> par personne depuis 1880. Calculs de l'auteur sur données Schilling et al. & BP Statistical Review pour les combustibles ; données The Carbon Budget pour la déforestation et le ciment ; UN pour la population.

Jean-Marc Jancovici - Mines Paris Tech mai-juin 2019 - www.jancovici.com

Les émissions de GES par personne ont été multipliées par 2,5 depuis le milieu du XIXe :

- fort recul du facteur déforestation (déclin dans les années 1960)
- explosion des énergies fossiles

## Et en France ?



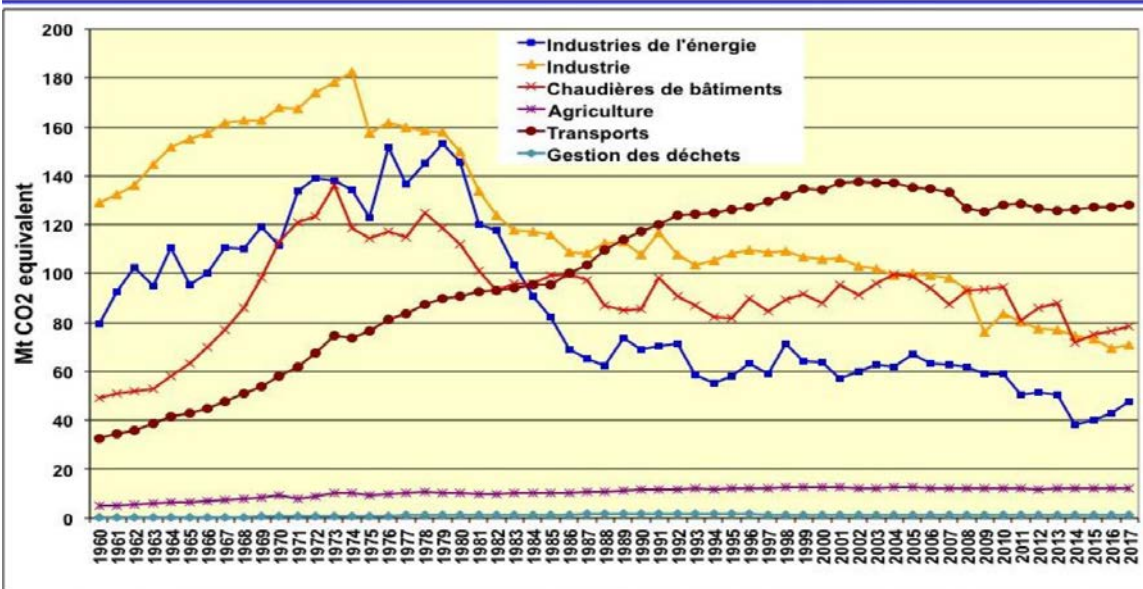
Emissions de CO<sub>2</sub> en France depuis 1965, en millions de tonnes. Calculs de l'auteur sur données BP Statistical Review 2018

Jean-Marc Jancovici - Mines Paris Tech mai-juin 2019 - www.jancovici.com

Les émissions de CO<sub>2</sub> brutes en France ont tendance à baisser depuis le premier choc pétrolier (pic aux alentours de 550 Mt CO<sub>2</sub>) :

- moins de charbon : moins utilisé car d'une part moins de sidérurgie et d'industrie en général et d'autre part plus d'électricité nucléaire
- moins de pétrole : chassé des usages industriels et d'une partie du chauffage par le gaz et l'électricité nucléaire
- gaz n'augmente plus ses émissions depuis le milieu des années 2000

## Et en France ?



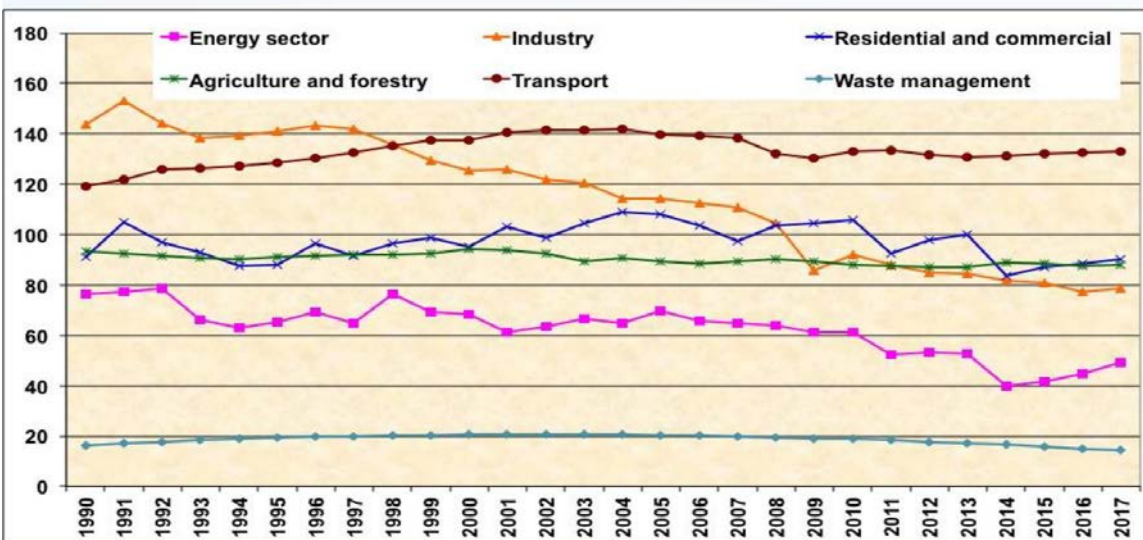
**Emissions de CO<sub>2</sub> en France depuis 1960, en millions de tonnes. Source CITEPA 2018**

Jean-Marc Jancovici - Mines Paris Tech mai-juin 2019 - [www.jancovici.com](http://www.jancovici.com)

Les émissions de CO<sub>2</sub> en France par secteurs d'activité :

- émissions de CO<sub>2</sub> de l'industrie ont très fortement baissé depuis les chocs pétroliers (ce qui signifie que l'industrie est le secteur dans lequel les émissions sont les plus sensibles au prix)
- chute dans les émissions des centrales électriques (surtout) et les raffineries (= Industries de l'énergie), les centrales électriques fonctionnant aux énergies fossiles Gaz / Pétrole / Charbon de plus en plus rares et remplacées par le nucléaire
- baisse des émissions de CO<sub>2</sub> dans le secteur du bâtiment (= chaudières de bâtiment)
- seul secteur en hausse : les transports, jusqu'au milieu des années 2000 où on observe une stagnation voire une baisse (constatée dans tous les autres pays européens), causée par le stress d'approvisionnement en hydrocarbure liquide

## Et en France ?



**Emissions de gaz à effet de serre en France depuis 1990, en millions de tonnes équivalent CO<sub>2</sub>. Source CITEPA 2018**

Jean-Marc Jancovici - Mines Paris Tech mai-juin 2019 - [www.jancovici.com](http://www.jancovici.com)

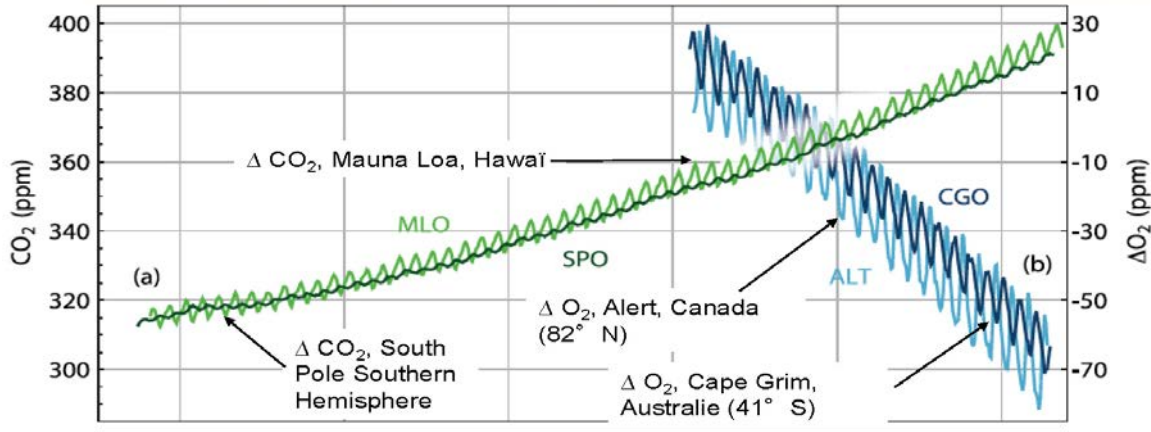
Tous GES confondus en France :

- transports en tête des émissions (130 Mt équivalent CO<sub>2</sub>)
- le secteur agricole fait un bond dans le classement par rapport si on considère l'ensemble des GES car

émet d'autres gaz.

## Chapitre 16 - Mesurer l'émission de GES

### Une partie de ce CO<sub>2</sub> se trouve très bien dans l'air



Source : IPPP, 5<sup>e</sup> rapport d'évaluation, 2014

Jean-Marc Jancovici - Mines Paris Tech mai-juin 2019 - [www.jancovici.com](http://www.jancovici.com)

Augmentation du CO<sub>2</sub> dans l'atmosphère est de manière certaine liée à l'oxydation des ressources fossiles.

L'analyse de la teneur isotopique de l'atmosphère le prouve.

- comparaison des évolutions de teneur en CO<sub>2</sub> de l'atmosphère et d'oxygène, le premier monte tandis que le second descend

(cela ne peut pas être imputé à l'activité volcanique qui ne fait pas varier le taux d'oxygène)

- autre preuve : le carbone 14

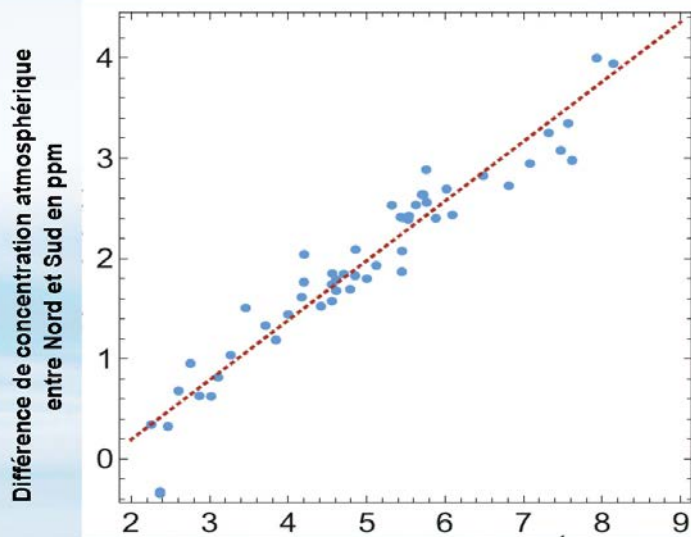
- l'azote de la haute atmosphère, sous l'effet du rayonnement cosmique, se transforme en Carbone 14

- le carbone 14 entre dans le cycle du carbone et est ingéré par les êtres vivants

- lors de la combustion des ressources fossiles (qui ont perdu leur carbone 14 depuis des millions d'années), on doit assister à un changement de la teneur isotopique de l'atmosphère : appauvrissement de l'atmosphère en carbone 14 et augmentation de la teneur en CO<sub>2</sub>

- c'est ce qui est constaté actuellement

## Même là, il y a des inégalités Nord-Sud !



Différence Nord-Sud pour les émissions annuelles de CO<sub>2</sub>, en milliards de tonnes de carbone

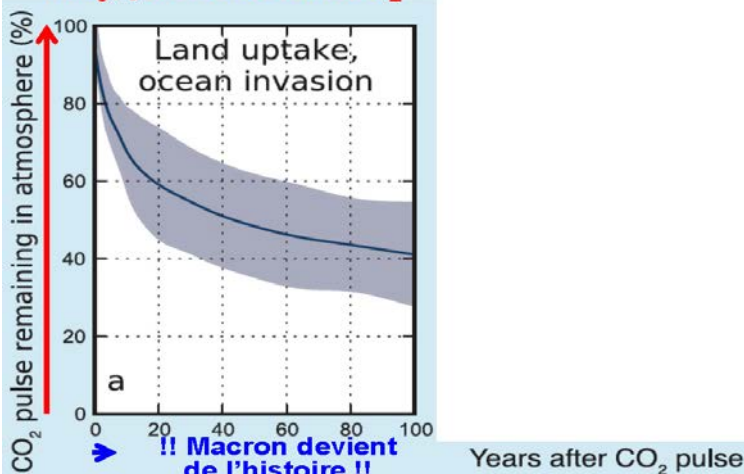
Source IPCC, 5<sup>e</sup> rapport d'évaluation, 2014

Jean-Marc Jancovici - Mines Paris Tech mai-juin 2019 - www.jancovici.com

- actuellement 400ppm de CO<sub>2</sub> dans l'atmosphère
- 10% de CO<sub>2</sub> dans l'atmosphère = toxicité aigüe = mort assurée
- CO<sub>2</sub> = un oxyde = c'est-à-dire une molécule extrêmement stable chimiquement.

## Les gaz à effet de serre aiment s'envoyer en l'air... et y rester

A  $t_0$ , j'é mets du CO<sub>2</sub>



!! Macron devient de l'histoire !!

Je suis mort

Vous êtes morts

Vos enfants sont morts

Fraction d'un « pulse » de CO<sub>2</sub> émis à l'instant 0 qui reste dans l'atmosphère au cours du temps, et processus dominant d'épuration selon la période concernée.

Source IPCC, 5<sup>e</sup> rapport d'évaluation, 2014

Jean-Marc Jancovici - Mines Paris Tech mai-juin 2019 - www.jancovici.com

Autre exemple : l'oxyde de fer présent depuis l'oxydation du fer lors de la formation des continents, soit plusieurs milliards d'année

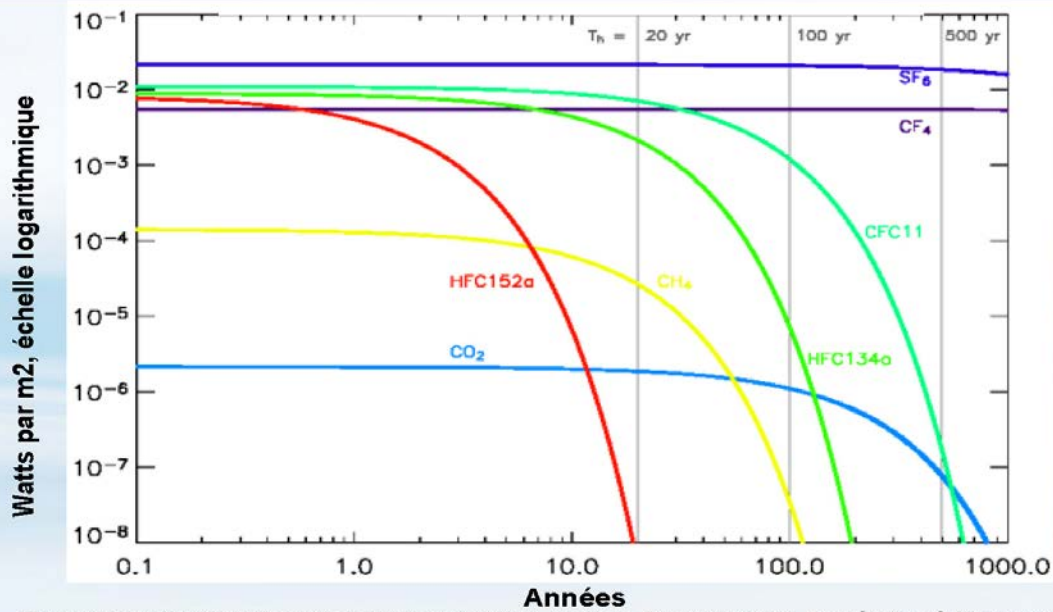
- pas de processus d'épuration chimique du CO<sub>2</sub> envoyé dans l'atmosphère (= ne se mélange pas à d'autres gaz),

les deux seuls processus d'épuration étant :

- processus physique 1 : dissolution du CO<sub>2</sub> dans l'eau océanique (= processus d'équilibrage de pression partielle entre l'atmosphère et l'océan)

- processus physique 2 : photosynthétisation du CO<sub>2</sub> (métabolisation du CO<sub>2</sub> par les plantes, réaction endothermique par l'entremise des photons)

## Le gaz à effet de serre aime s'envoyer en l'air... et y rester



Jean-Marc Jancovici - Mines Paris Tech mai-juin 2019 - www.jancovici.com

- conséquence de l'extrême stabilité du CO<sub>2</sub> : le temps qu'il faut pour évacuer le surplus de CO<sub>2</sub> envoyé dans l'atmosphère est très très long
  - 1 siècle après : 40% du surplus toujours présent dans l'atmosphère
  - 1 millénaire après : 20% du surplus toujours présent dans l'atmosphère
  - 10 000 ans après : 10% du surplus toujours présent dans l'atmosphère

- > le processus du changement climatique n'a aucune réversibilité, impossible de revenir en arrière
- > autre certitude : en raison de l'inertie du CO<sub>2</sub> dans l'atmosphère, la dégradation de la situation par rapport au présent est inéluctable
- > échelles de temps : inadaptation des organisations sociales (Etats, démocraties, entreprises, ...) et de nos perceptions mentales

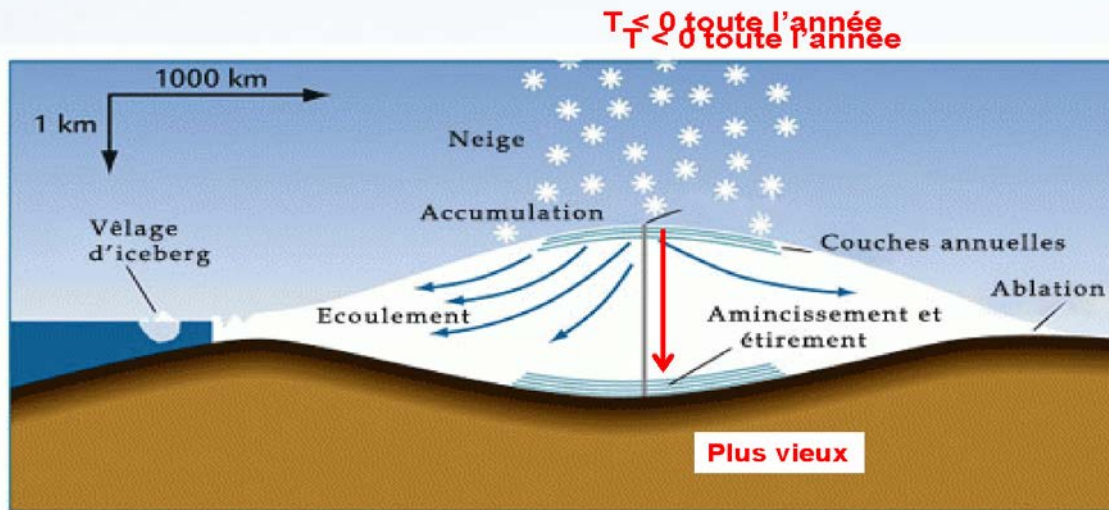
Autres émissions de gaz à effet de serre dont le Méthane,

- avec effet radiatif plus important que le CO<sub>2</sub>
- mais reste moins longtemps dans l'atmosphère grâce à l'existence d'un processus d'épuration chimique de l'atmosphère (le seul gaz dans ce cas)

On sait mesurer l'augmentation du taux de CO<sub>2</sub> dans l'atmosphère

- de manière instrumentale depuis 1958
- par carottage des calottes glaciaires aux pôles pour comparer la situation présente avec les périodes plus anciennes
  - formation des calottes =>
    01. La neige accumulée qui ne fond jamais et qui en se tassant au fil des siècles devient de la glace (effet de pression).
    02. L'air qui circule entre les flocons est emprisonné sous forme de petites bulles d'air, qui permettent de retrouver en l'état l'atmosphère de l'époque de la formation de la glace
    03. La glace ne reste pas immobile, tend sous son propre poids à fluer vers l'océan.

## Pour savoir ce qui s'est passé, il faut fouiller les archives



Jean-Marc Jancovici - Mines Paris Tech mai-juin 2019 - [www.jancovici.com](http://www.jancovici.com)

L'opération de carottage consiste à creuser un amas de glace qui flue verticalement / s'enfonce et non la part qui se déplace vers les océans  
- carotte glaciaire permet de récupérer une atmosphère fossile de plus en plus ancienne au fur et à mesure que la carotte est profonde

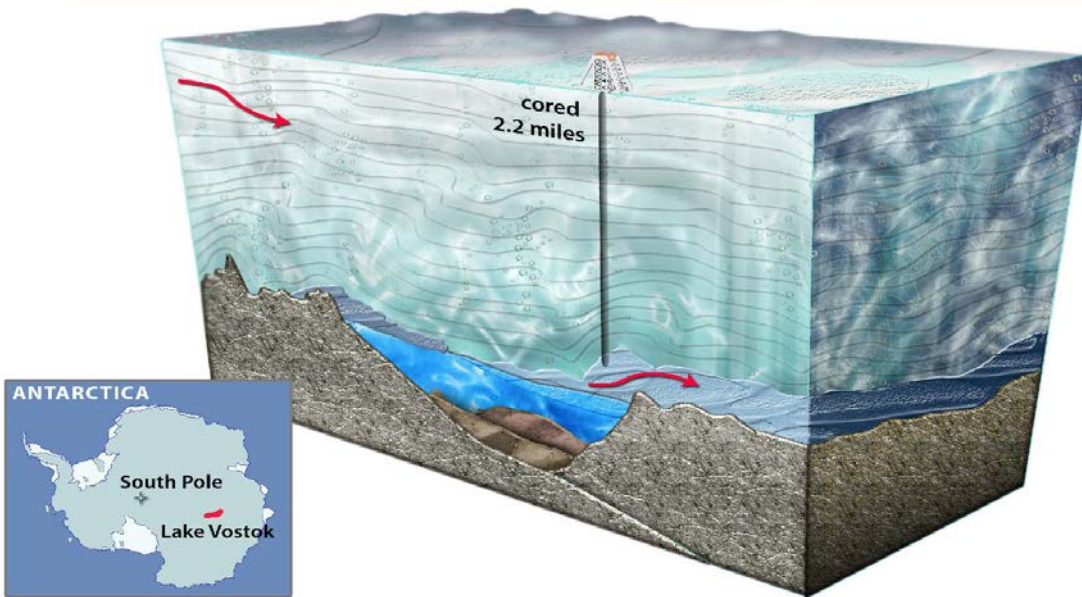
## Allons à la neige (ou plutôt à la glace)



Jean-Marc Jancovici - Mines Paris Tech mai-juin 2019 - [www.jancovici.com](http://www.jancovici.com)



## J'fais des trous, des p'tits trous...



Jean-Marc Jancovici - Mines Paris Tech mai-juin 2019 - [www.jancovici.com](http://www.jancovici.com)

## Le glaçon peut couter fort cher... mais rapporter gros



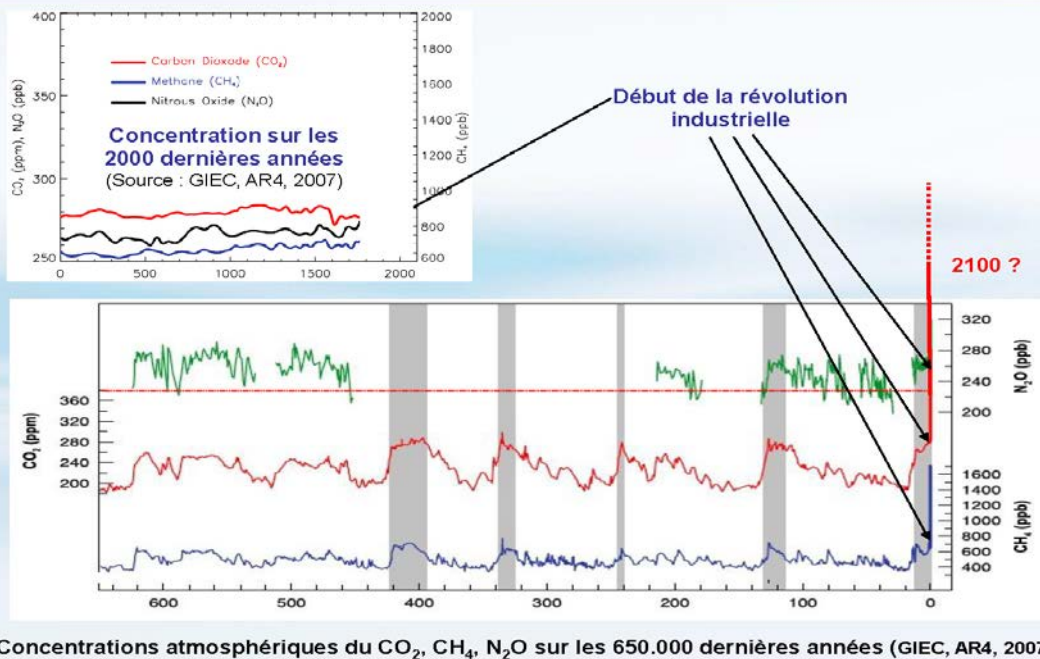
Jean-Marc Jancovici - Mines Paris Tech mai-juin 2019 - [www.jancovici.com](http://www.jancovici.com)

- On retrouve dans les carottes toutes les espèces chimiques contenues dans cette atmosphère (CO<sub>2</sub>, méthane,...), on analyse en particulier :

- la composition isotopique de l'eau / de la glace permet de fournir la température planétaire de l'époque (à partir de la fraction d'oxygène<sup>18</sup> et la fraction de deutérium dans l'hydrogène de l'eau : plus la chaleur est élevée, plus l'évaporation de l'eau est forte, moins l'oxygène<sup>18</sup> et le deutérium sont présents)
- l'air fossilisé dans les petites bulles fournit le taux de CO<sub>2</sub>, méthane, protoxyde d'azote, ... de l'atmosphère

Note : le carottage au Groenland n'est plus possible pour les période récente car désormais la neige en surface de la calotte fond, il n'y a plus d'accumulation de glace / de piégeage de l'air dans la glace. Pour les période récentes, le carottage est seulement possible en Antarctique

## Emettons, émettons, il en restera toujours quelque chose

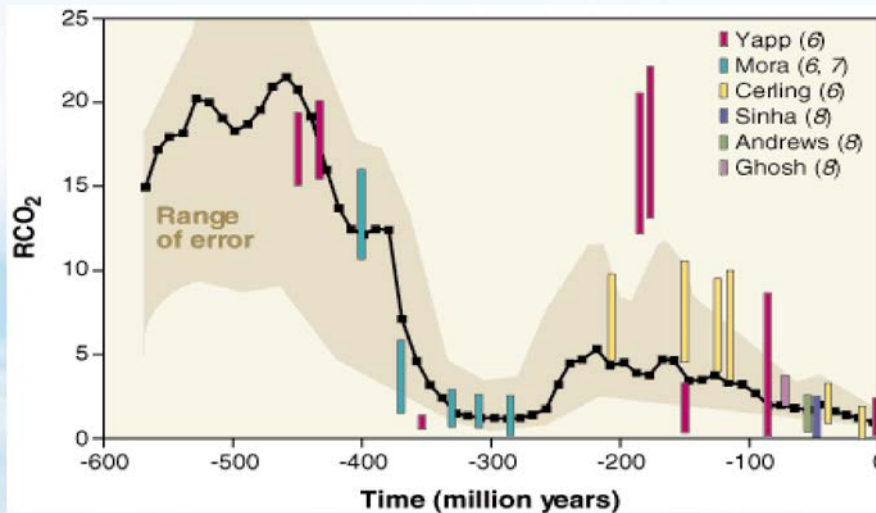


Jean-Marc Jancovici - Mines Paris Tech mai-juin 2019 - [www.jancovici.com](http://www.jancovici.com)

Résultat des carottages :

- jusqu'à 800 000 ans (carotte Antarctique)
- augmentation exponentielle des concentrations de GES depuis la révolution industrielle
- dans les périodes précédentes on constate de fortes variations de la teneur en CO<sub>2</sub> et en méthane de l'atmosphère
- cette variabilité s'explique par les forçages astronomiques qui changent la température sur terre qui en retour change la concentration des GES dans l'atmosphère
- conjonction depuis 10 000 ans puisque nous entrons alors dans une phase interglaciaire, phase classique de déstockage du CO<sub>2</sub>
- > l'eau chaude dissout moins le CO<sub>2</sub> que l'eau froide, en période interglaciaire les océans dégazent du CO<sub>2</sub>
- > les zones humides plus nombreuses expliquent le surcroît d'émission de méthane pendant les périodes interglaciaires
- depuis la Révolution industrielle, le surplus de GES envoyé dans l'atmosphère
- est bien supérieur à toutes les variations naturelles / d'origines astronomiques connues
- provoque une discontinuité brutale, dont on ne connaît pas les conséquences sur des milliers d'années (et même en baissant drastiquement les émissions, du fait de la persistance des GES dans l'atmosphère)

## Plus ou moins de CO<sub>2</sub>, c'est naturel aussi...



Variation de la concentration atmosphérique en CO<sub>2</sub>, au cours des 600 millions d'années qui nous ont précédé. Source : Berner, Science, 1997

Jean-Marc Jancovici - Mines Paris Tech mai-juin 2019 - www.jancovici.com

La concentration de CO<sub>2</sub> dans l'atmosphère a déjà été bien plus élevée :

- 20 à 30 supérieur à la concentration actuelle, il y a 500 millions d'années.

- Epoque où la puissance solaire était moins forte et où il y avait très peu de vie sur les terres émergées

## Comparer les gaz, comment on fait ?

$$PRG = \frac{\int_0^N F_{gaz}(t) dt}{\int_0^N F_{CO_2}(t) dt}$$

**Le Pouvoir de Réchauffement Global, ou PRG (en anglais Global Warming Potential, ou GWP) : une équation compliquée pour une notion simple : combien de fois le CO<sub>2</sub> ?**

Jean-Marc Jancovici - Mines Paris Tech mai-juin 2019 - www.jancovici.com

Mesure des différents GES :

- le PRG (Pouvoir de Réchauffement Global / GWP : Global Warming Potential)
- le forçage radiatif cumulé qu'apporte 1 unité de GES dans l'atmosphère
- plus exactement, il s'agit d'une unité relative : c'est le rapport entre le forçage radiatif cumulé d'1 unité de GES sur une durée donnée / sur le forçage radiatif pour la même durée du même poids de CO<sub>2</sub>
- par convention le PRG du CO<sub>2</sub> vaut 1 quelque soit l'horizon de temps concerné

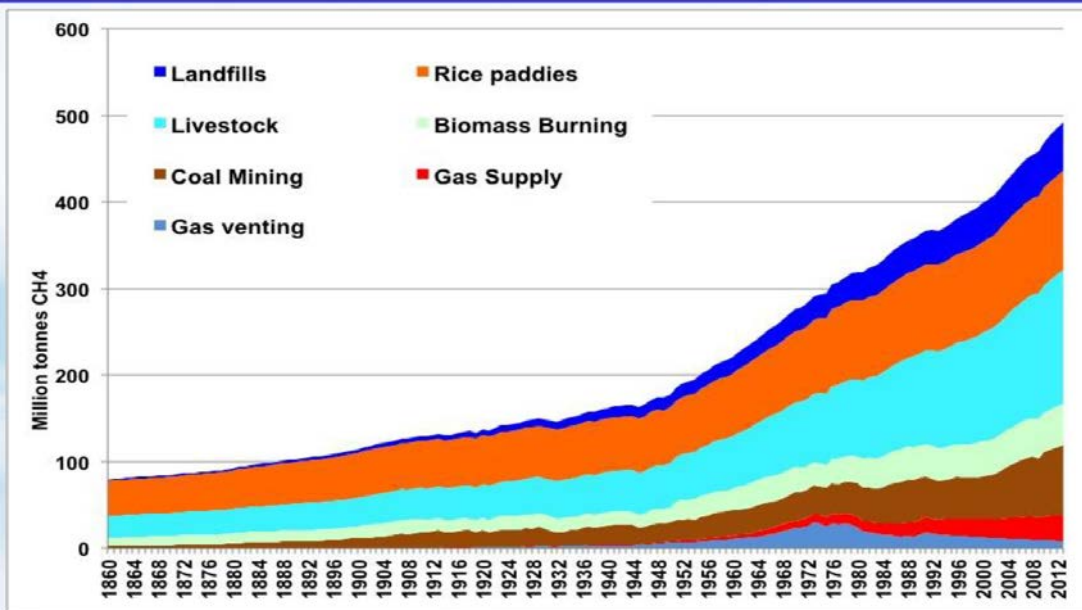
Quelle est la bonne échelle de temps du PRG ?

- à 1 siècle, le méthane est 25 fois plus nocif que le CO<sub>2</sub>
- à 20 ans, il est 80 fois plus nocif que le CO<sub>2</sub>

> débat de l'échelle de temps pertinente entre les pays émetteurs de méthane (rizières Asie, élevages Nvlle Zélande, ...) et les pays plus émetteurs de CO2

> question du temps pilote la charge de l'effort en fonction des sources d'émission

## Vaches qui rotent et pètent émettent tripette



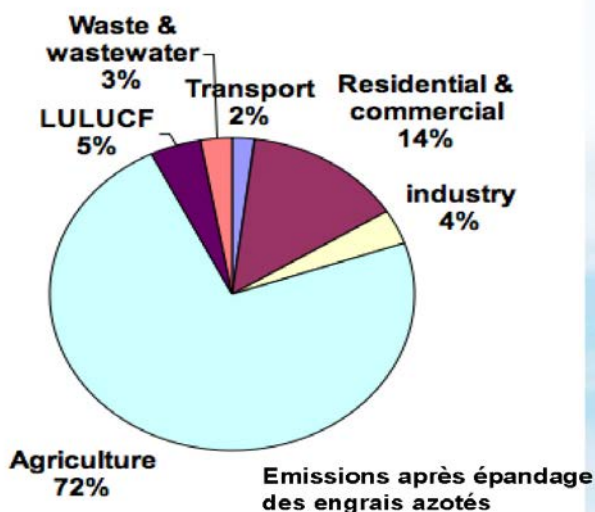
Emissions de méthane dans le monde par secteur (source The Carbon Budget)

Jean-Marc Jancovici - Mines Paris Tech mai-juin 2019 - www.jancovici.com

Détail des émissions de méthane

- fuite dans les réseaux de gaz
- extraction (mines de charbon)
- combustion de la biomasse
- cheptel des ruminants (essentiellement des vaches, 1,5 à 2 milliards de vaches sur terre = 1ère biomasse des mammifères, rotent du méthane du fait de la fermentation anaérobie dans leurs 4 estomacs)
- rizières (décomposition végétale à l'abri de l'air)
- décharges (empilement des déchets organiques, qui en fermentant émettent du méthane ... dont la captation est possible / accessible aux pays riches)

## Un gaz hilarant qui ne l'est plus tellement



Répartition des émissions de N<sub>2</sub>O dans le monde par secteur, 2004 (source IPCC)

Jean-Marc Jancovici - Mines Paris Tech mai-juin 2019 - www.jancovici.com

Autre GES, le protoxyde d'azote. Provenances dans le monde :

- combustion, transport, industrie, chaudières de bâtiment

> processus de combustion : emploi de l'oxygène de l'air, non pur / embarque de l'azote de l'air : le processus de combustion réarrange l'oxygène sous forme d'oxyde d'azote. Le protoxyde d'azote est une petite partie de cet oxyde d'azote)

- cause essentielle d'émission du protoxyde d'azote : l'agriculture (72%)

> utilisation d'engrais azotés (que ce soit pour les engrais de synthèses mais également pour les engrais "naturels" comme le lisier, le purin, ...)

> phénomène lors de l'épandage sur le sol l'action microbienne du sol forme une petite partie de protoxyde d'azote

## Chaîne du froid et mauvaises odeurs sous les bras...

### Les halocarbures

La première famille - désormais interdite de production - est mondialement connue : les CFC. Leur premier usage a été le remplacement de l'ammoniac dans les circuits réfrigérants, puis ils ont servi comme gaz propulseurs, solvants, expulseurs de mousses plastiques...

Désormais interdits de production, les CFC ont été remplacés par des substituts aux doux noms de HFC, HCFC, PFC...

Ces gaz servent - toujours - dans les circuits de fluide réfrigérants, mais aussi comme gaz propulseurs, de gaz expulseurs (industries des mousses plastiques), de solvants (semi-conducteurs), et viennent parfois de manière « indésirables » de certains procédés industriels (par exemple électrolyse de l'alumine

Jean-Marc Jancovici - Mines Paris Tech mai-juin 2019 - [www.jancovici.com](http://www.jancovici.com)

Autre GES, les molécules dites d'halocarbures.

- gaz que l'on obtient en remplaçant dans les hydrocarbures de l'hydrogène par des hallogènes
- pour quoi faire ? Car la liaison Carbone-Hallogène est extrêmement stable et donc en réalisant ce genre de composé on peut obtenir des molécules quasi-indestructibles. C'est-à-dire non toxiques.

> exemple : dans les chaînes du froid, les halocarbures ont remplacé le CO<sub>2</sub> (moins efficace sur le plan thermodynamique) et surtout l'ammoniac dans les circuits frigorifiques (les molécules de gaz halogénées sont totalement inertes, sont respirables)

> exemple : gaz propulseur des bombes aérosols (gaz halogénés à la place des gaz hydrocarbures inflammables utilisés avant)

> exemple : gaz expulseur de mousse, solvants dans l'industrie ...

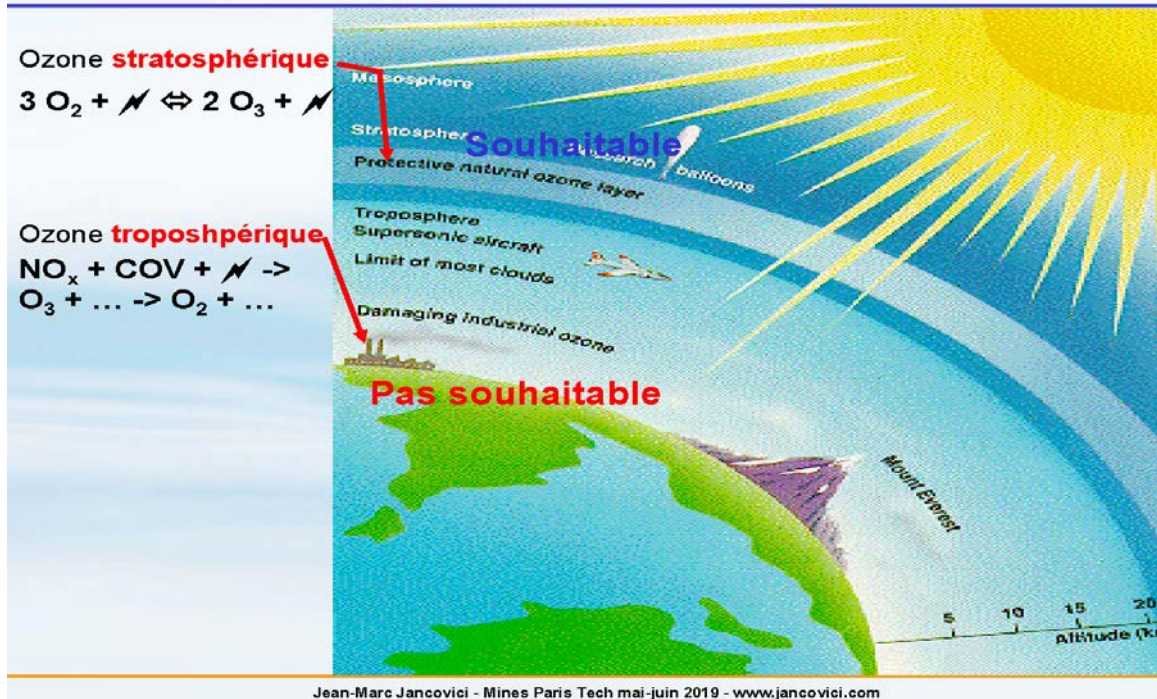
- les halocarbures plus ou moins nocifs :

> le + dangereux : le CFC (chloro-fluo-carbure) qui a été supprimé. Stabilité telle que ce gaz atteignait la haute atmosphère sans être altéré, et en contact avec les UV libère son chlore et agresse l'ozone atmosphérique

> la production de CFC a été supprimé mais pas les émissions totalement (par exemple le CFC utilisé dans les expulseurs de mousse, toujours stocké par exemple dans les vieux modèles de frigo)

> remplacé par d'autres gaz qui n'agressent pas la couche d'ozone mais qui en revanche sont des GES extrêmement puissants

## Ozone des villes et ozone d'en haut



Autre GES, sans émission directe, l'ozone.

• l'ozone se retrouve à 2 endroits :

> ozone stratosphérique, dans la haute atmosphère.

fonctions capitales x2 :

- Intercepte les UV durs du soleil

- et en absorbant de l'énergie, il réchauffe la haute atmosphère (ce qui crée une inversion de température, préserve la condensation et empêche le contact H<sub>2</sub>O et UV qui aboutirait à une fuite de l'hydrogène dans l'espace, in fine à la disparition de l'eau sur terre)

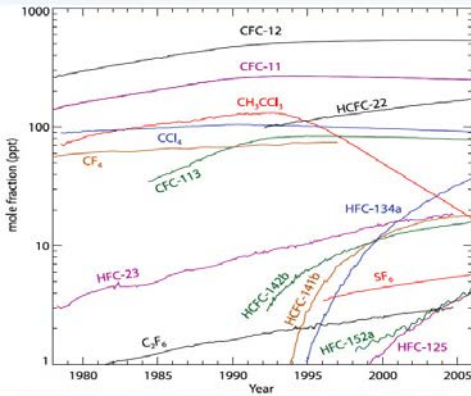
> ozone troposphérique, près du sol.

- apparaît du fait de l'activité humaine qui envoie dans l'atmosphère des oxydes d'Azote et des composés organiques volatiles

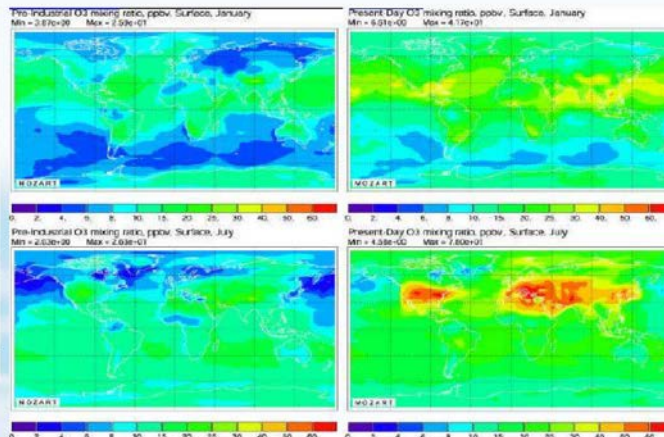
- le rayonnement solaire agit sur ces pollutions et forme de l'ozone

- cet ozone est une pollution dangereuse pour la santé, participe à l'effet de serre et a un effet inhibiteur sur la croissance des plantes

## Et tout cela s'accumule aussi dans l'atmosphère



Concentration atmosphérique de divers gaz halogénés (attention ! Échelle logarithmique : une droite ici = une exponentielle « en vérité »). GIEC, 4<sup>e</sup> rapport d'évaluation, 2007



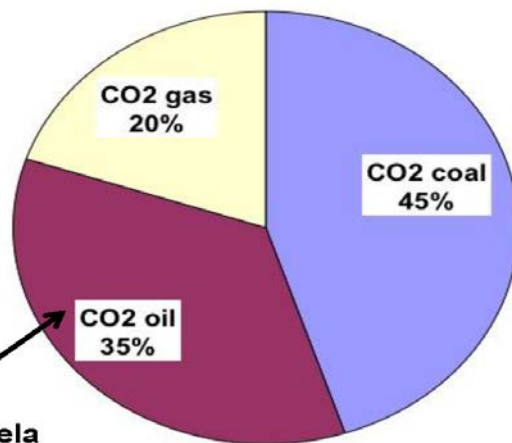
Concentration moyenne d'ozone près du sol à l'époque préindustrielle (à gauche) et actuellement (à droite), en janvier (en haut) et en juillet (en bas).

Source : Didier Hauglustaine, conférence AFITE/LSCE d'octobre 2003 au Laboratoire des Sciences du Climat et de l'Environnement

Jean-Marc Jancovici - Mines Paris Tech mai-juin 2019 - [www.jancovici.com](http://www.jancovici.com)

## CO<sub>2</sub> = pétrole = voitures ? Pas si simple...

Fossil CO<sub>2</sub> emissions by fuel, 2017

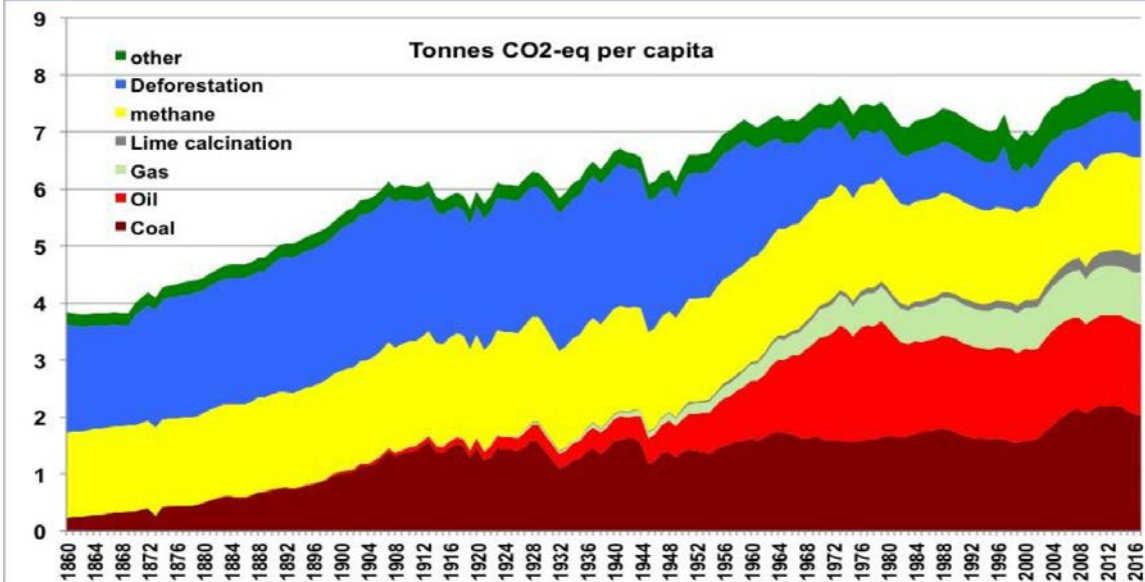


Voitures = 30% de cela

Emissions de CO<sub>2</sub> par combustible, 2017  
Jancovici, 2018, d'après BP statistical Review, 2018

Jean-Marc Jancovici - Mines Paris Tech mai-juin 2019 - [www.jancovici.com](http://www.jancovici.com)

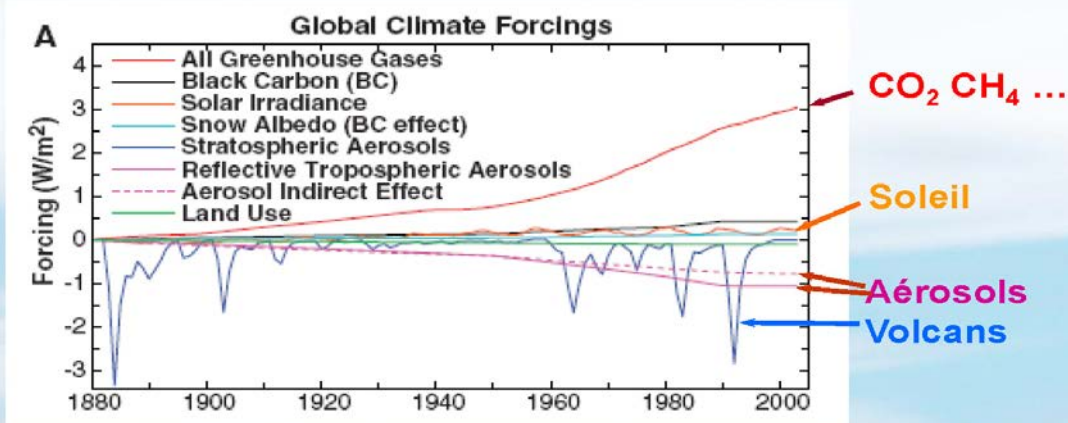
## Devenir neutres en 50 ans ?



Emissions de gaz à effet de serre par personne toutes sources depuis 1860. Calculs de l'auteur sur données Schilling et al. & BP Statistical Review (combustibles) ; the global carbon budget (autres émissions)

Jean-Marc Jancovici - Mines Paris Tech mai-juin 2019 - www.jancovici.com

## On sort la calculette : qui influe le plus ?

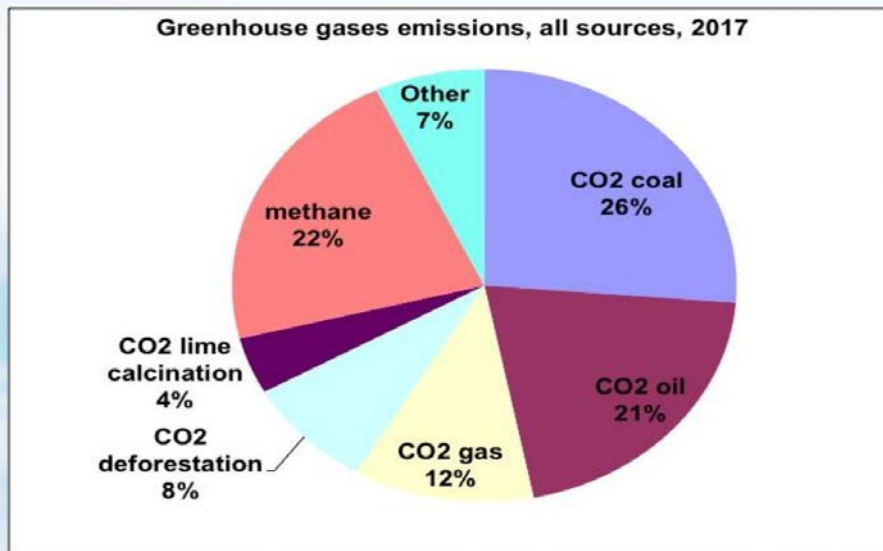


Comparaison des diverses influences (naturelles et humaines) sur un climat stable à l'échelle du siècle. Source Hansen et al., Science, 2005

Jean-Marc Jancovici - Mines Paris Tech mai-juin 2019 - www.jancovici.com



## Contribution de chaque gaz aux émissions



Part de chaque gaz dans les émissions de 2017, hors ozone. Pour le ciment il s'agit uniquement des conséquences de  $\text{CaCO}_3 \rightarrow \text{CaO} + \text{CO}_2$

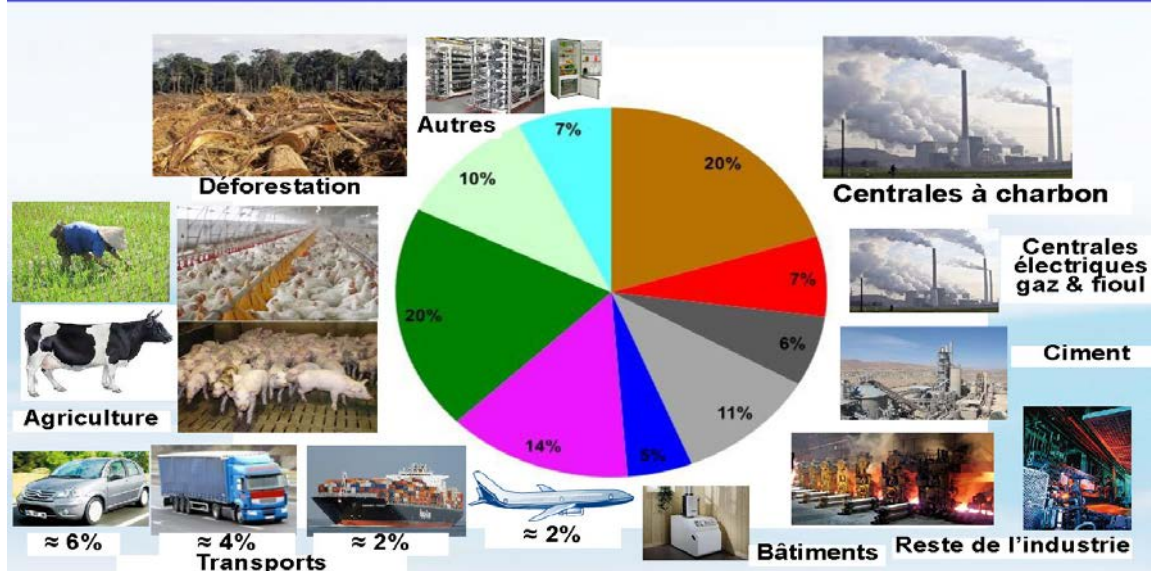
Sources diverses, compilation de l'auteur

Jean-Marc Jancovici - Mines Paris Tech mai-juin 2019 - www.jancovici.com

## Chapitre 17 - Poids respectif des différents GES

Représentations des GES

### Bref, l'ensemble donne quoi ?



Décomposition des émissions mondiales en 2017. Jancovici, données diverses.

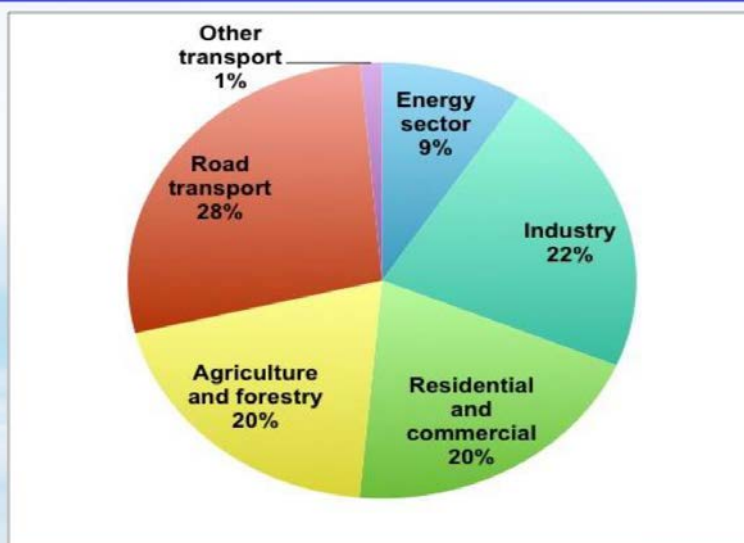
Jean-Marc Jancovici - Mines Paris Tech mai-juin 2019 - www.jancovici.com

1) GES en fonction des émissions directs par les différents secteurs d'activité

- 20% des émissions planétaires = centrales à charbon
- 7% = centrales à gaz et un peu fioul
- 6% = cimenteries
- 12% = le reste de l'industrie dont 4% pour les aciéries
- > émissions directes, consommation électrique non comptabilisée ici, double probablement si incluse)
- > construire les ponts et des bâtiments (acier + cimenteries) équivant à presque 10% des émissions

- 6% = chauffage des bâtiments dans le monde (chiffre apparemment faible mais parce que dans le monde une bonne partie des bâtiments n'a pas besoin d'être chauffée)
- 16% = transports
  - > voitures 6%
  - > camions 4%
  - > bateaux 2%
  - > avions 2%
- 20% = agriculture
  - > essentiellement des gaz hors CO2
  - méthane des vaches, puis autre cheptel de ruminants, les rizières,
  - le protoxyde d'azote des champs
- 10% = déforestation
  - > lié à l'activité agricole, c'est un processus amont, et donc l'activité "nutrition" proche des 30%
- 7% = divers
  - > gestion des déchets, fuites des chaînes du froid, ...

## Et quid de la Gaule ?



Répartition des émissions **brutes** françaises 2015 (tous gaz à effet de serre pris en compte) par secteur (source CITEPA)

(\*) hors transports maritimes et aériens internationaux

Jean-Marc Jancovici - Mines Paris Tech mai-juin 2019 - [www.jancovici.com](http://www.jancovici.com)

### Zoom par secteurs d'activité en France

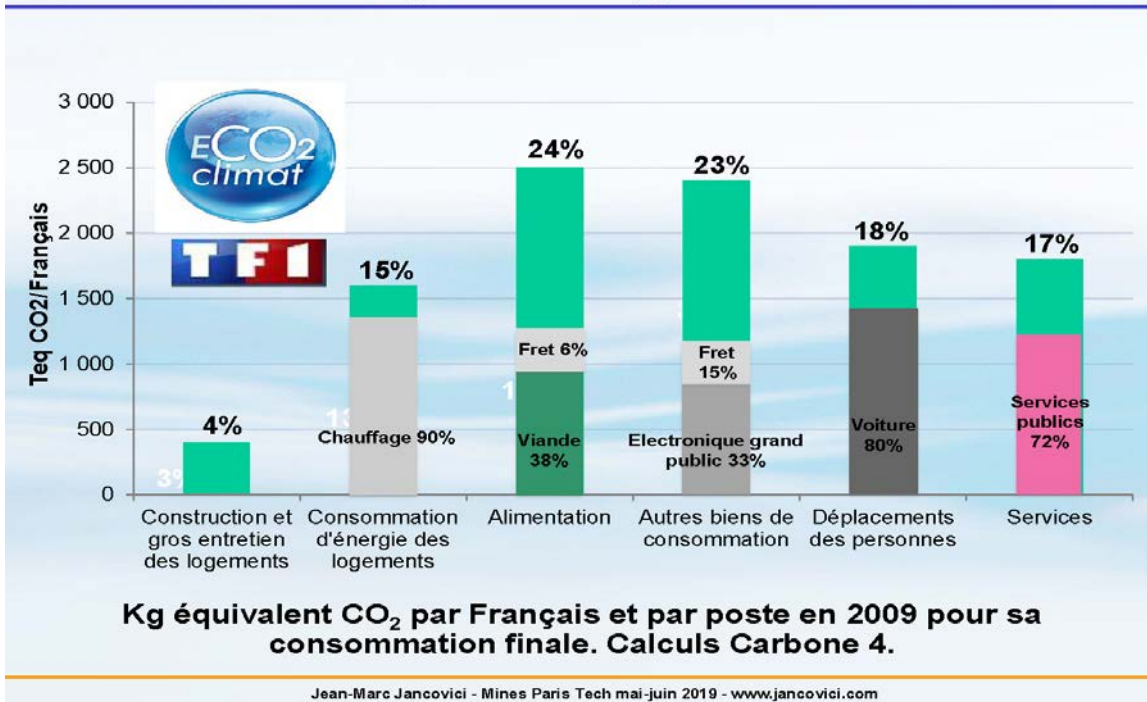
- 28% = transport en tête
- 22% = industrie
- 20% = bâtiments pro etr individuels
- 20% = agriculture
- 9% = secteur énergétique (très petit car très de production électrique au charbon)

### 2) Autre manière de présenter les GES : les émissions issues de notre empreinte carbone

- Définition : par opposition aux émissions dites territoriales (les émissions émises en France), l'empreinte Carbone est un point de vue "consommation", elle mesure les émissions de ce que l'on consomme
  - > Emissions domestiques (= françaises) de GES par Français et par an = environ 6 tonnes CO2 + 2 tonnes autres GES
  - > Empreinte Carbone = 11 tonnes
  - > 3 tonnes d'émissions qui ont été générées à l'étranger, pour produire les biens de consommation importés
  - > soit presque 1/4 des émissions de CO2 des Français

- A quels actes de la vie courante sont associées les émissions des Français ?

## Dis moi ce que tu émetts, je te dirai si tu consommes



(dit autrement quels leviers le consommateur peut activer pour faire baisser ses émissions)

- 4% = entre 200 et 400 kg de CO<sub>2</sub> par an = construction de plusieurs centaines de milliers de logements chaque année (il s'agit d'une moyenne, 1 maison de 100m<sup>2</sup> = au moins 20 à 40 tonnes de CO<sub>2</sub> émis entre acier des fers à béton, ciment, plastique, tuiles, ... )
- 15% = confort thermique et énergétique du logement
  - > dont 90% pour le chauffage domestique, qui consomme 4 fois plus d'énergies fossiles (gaz et fioul) que d'énergie nucléaire
  - > particularité de la France, électricité nucléaire fournit un confort électrique très peu carboné.
  - > à l'opposé de la France, les pays à l'énergie fossile aux hivers rigoureux et aux étés chauds (climat continental), le confort thermique et énergétique occupent une part très importante des émissions
- 24% achat alimentation
  - > dont Viande 38% + produits lactés (dérivé essentiellement du cheptel bovin) = entre 50 et 66% de l'empreinte carbone de l'alimentation d'un Français
  - > Précision sur le mode de calcul : cycle de vie complet, tout ce qui a été nécessaire pour produire la viande : des émissions servant à faire pousser la nourriture des animaux, en passant par le diesel des machines agricoles, la fabrication des engrais azotés N<sub>2</sub>O, émissions de protoxydes d'azote en provenance des champs, émissions du métabolisme des ruminants / Méthane, ...
  - > 1 vache dans sa vie produit 30 tonnes de lait / 10 tonnes de lait par an
  - > 10 litres de lait nécessaires pour 1 kg de fromage type Conté : contenu carbone du Conté 10 fois supérieur au contenu Carbone du lait
- 23% achats / biens de consommation
  - > depuis 1990 croissance due aux émissions liées à l'électronique grand public (33%), les autres postes sont stables
  - > les émissions du système numérique mondial (= la production annuelle des ordinateurs, serveurs, pc, smartphones + éléments de réseau pour les faire communiquer + électricité) = 4% des émissions planétaires et en augmentation de 10% par an
  - > dématérialisation = pollution = non durable
  - >> alimentation + achats : la moitié de l'empreinte carbone d'un Français se trouve dans l'alimentation et les achats
- 18% déplacements individuels (dont 80% voiture et presque 20% pour l'avion, qui était quasiment à 0 en 1990 : rapporté à l'heure de travail, facteur prix divisé par 10)
  - > ne prend pas en compte les déplacements professionnels
- 17% services (dont 72% Services publics)

- > exemple Education nationale, 1 million d'employés à déplacer, chauffer, ...
- > exemple Secteur de la Santé, environ 5% de l'empreinte carbone de la France (fabrication matériel et médicaments, bâtiments, ...)
- > exemple Armée. Consommation de pétrole de l'armée US : entre le 1/3 et la moitié de la consommation de pétrole de la France.

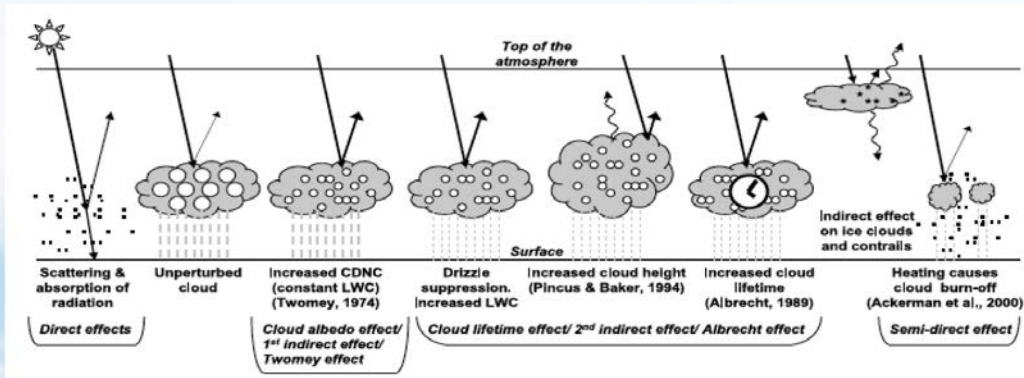
# LEÇON IV - LE CHANGEMENT CLIMATIQUE 2/2

Objet de la leçon : Les conséquences du changement climatique.

---

## Chapitre 18 - L'action des aérosols et précurseurs d'aérosols

### Chaud seulement, ou froid aussi ?



**Effet d'autres émissions humaines : les aérosols ou précurseurs d'aérosols.**

**Source : GIEC, 4<sup>e</sup> rapport d'évaluation, 2007**

Jean-Marc Jancovici - Mines Paris Tech mai-juin 2019 - www.jancovici.com

Pour finir le tour d'horizon des émissions humaines responsables du dérèglement climatique.

Les aérosols et les précurseurs d'aérosols sont à l'instar des gaz à effet de serre :

- des substances mises dans l'atmosphère du fait de l'activité humaine
- qui contribuent au réchauffement climatique

Un aérosol est une suspension dans l'air de particules solides ou liquides. L'activité humaine :

- soit émet directement des particules dans l'atmosphère (par exemple la suie, suspension dans l'air de particule de carbone)
- soit en émettant des substances / des gaz qui une fois dans l'air vont émettre des particules solides ou liquides (exemple très important, le dioxyde de soufre SO<sub>2</sub>)

Exemple de l'aérosol dioxyde soufre

Une fois dans l'atmosphère, le SO<sub>2</sub> va créer des particules de sulfates, c'est-à-dire des particules brillantes et donc particulièrement réfléchissantes pour la lumière solaire. Le carburant particulièrement soufré utilisé dans la marine marchande :

- ont à court terme un effet "bénéfique" refroidissant plus important que l'effet réchauffant
- mais à long terme les particules reviennent dans les précipitations sous forme de pluies acides (le sulfate se dissout dans l'eau qui au sol devient de l'acide sulfurique)

Les aérosols agissent sur la formation des nuages :

- ils servent de noyau de nucléation
- et favorisant la condensation de la vapeur d'eau

Le constat a été fait qu'au-dessus des zones très industrialisées, les nuages sont formés :

- de particules un peu plus fines
- et qui précipitent un peu moins facilement

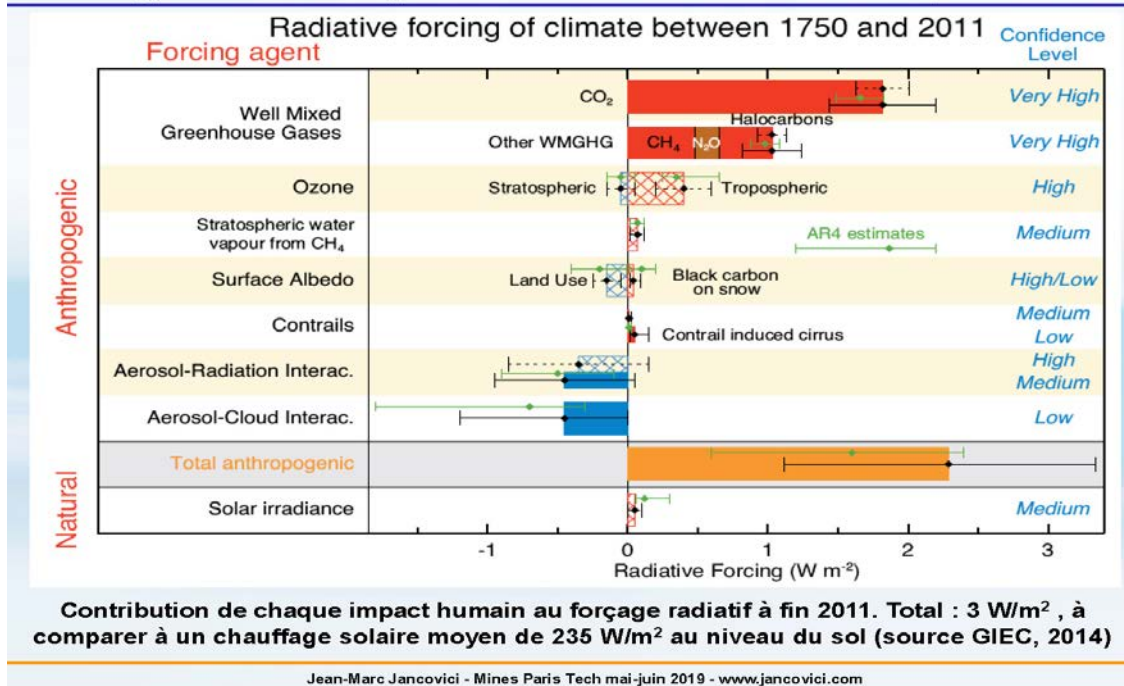
Les émissions humaines d'aérosols peuvent ainsi modifier la nature des nuages :

- lorsque les particules sont sombres (exemple la suie), cela intensifie le réchauffement car cela augmente la quantité de rayonnement solaire absorbé
- lorsque les particules sont brillantes (exemple SO<sub>2</sub>), cela augmente l'albedo, et donc diminuer la quantité de rayonnement absorbé

Caractéristiques des aérosols :

- En fonction de la nature de l'aérosol envoyé dans l'atmosphère : effet réchauffant ou effet refroidissant (le plus souvent)
- Durée de vie courte

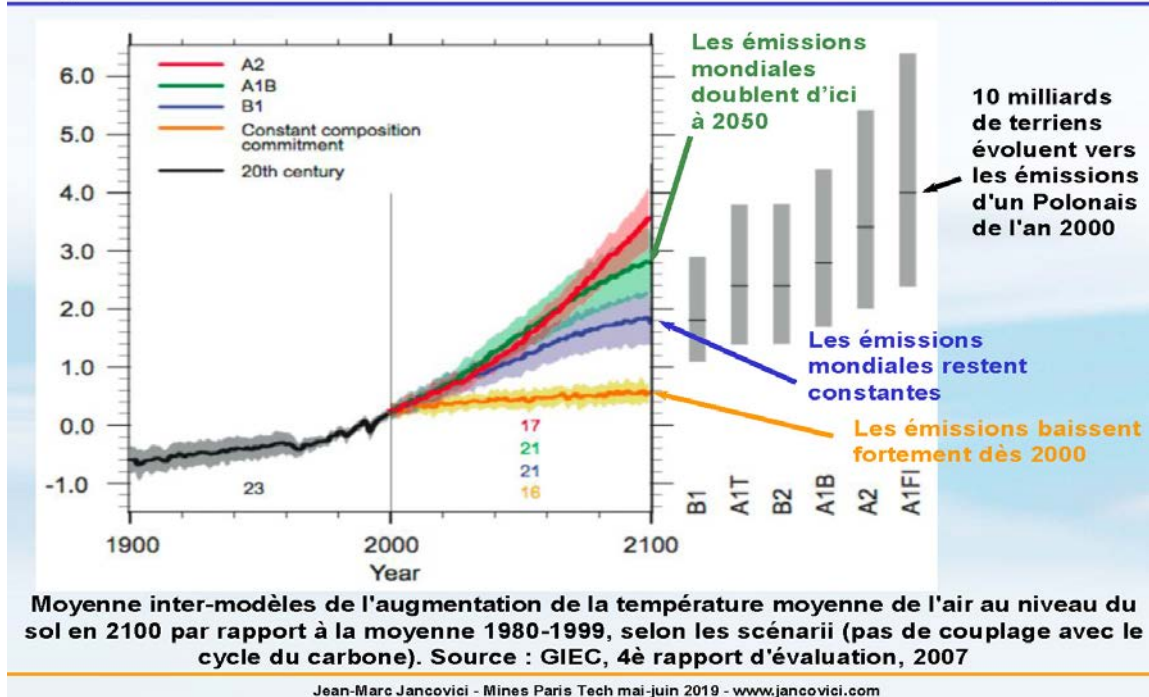
## Les gaz chauffent ; les aérosols refroidissent... quel bilan ?



Bilan des effets refroidissants et réchauffants de toutes les substances émises par l'activité humaine :

- il y a bien un effet de forçage radiatif du fait de l'activité humaine
- les aérosols - dont le poids relatif reste difficile à évaluer pour certains - ne compensent jamais le forçage

## J'y mets mes scénarios d'émission dans les modèles : quid ?



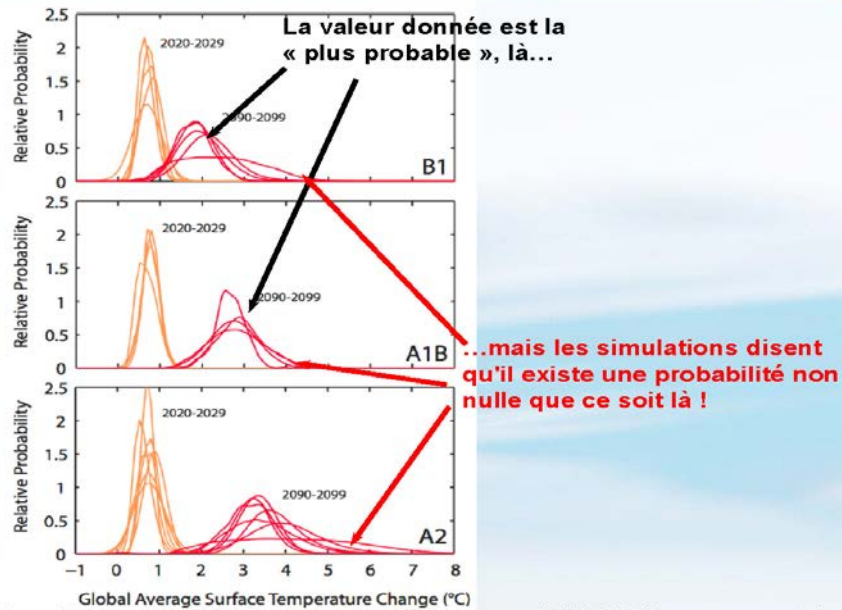
Evolution moyenne de la température en fonction du scénario d'émission de GES :

- scénario 01 : baisse sensible et immédiate des émissions et zéro émission atteint avant la fin du XXI<sup>e</sup> siècle. Dans ces conditions, l'objectif d'une augmentation de 1,5° (par rapport à l'ère pré-industrielle, 1850) peut être atteint.
- scénario 02 : les émissions mondiales demeurent constantes et dans ce cas l'augmentation d'ici la fin du XXI<sup>e</sup> siècle sera d'environ 2° (soit 3° par rapport à l'ère pré-industrielle). Forte variabilité des modèles : entre +1° et +3° selon les paramètres considérés (2° changent tout au niveau des conséquences)
- scénario 03 : scénario intermédiaire / scénario "charbon haut" dans lequel les émissions doublent d'ici 2050 et où la température augmente de 3° à la fin du siècle (+1,5° pour les modèles les plus optimistes, +4° pour les pessimistes)
- scénario 04 : scénario "polonais" (10 milliards de Terriens polluent comme des Polonais d'aujourd'hui) conduit à une augmentation de 5°

Notes :

- > ère pré-industrielle = 1850, date depuis laquelle la température a déjà augmenté de 1°
- > grande incertitude sur le degré de réchauffement signifie qu'il y a un grand risque car incapacité à fixer une borne supérieure

## Existe-t-il réellement un haut de fourchette ?



**Signification des « fourchettes » d'élévation de température en 2090-2099 par rapport à 1980-1999 GIEC, 4<sup>e</sup> rapport d'évaluation, 2007**

Jean-Marc Jancovici - Mines Paris Tech mai-juin 2019 - [www.jancovici.com](http://www.jancovici.com)

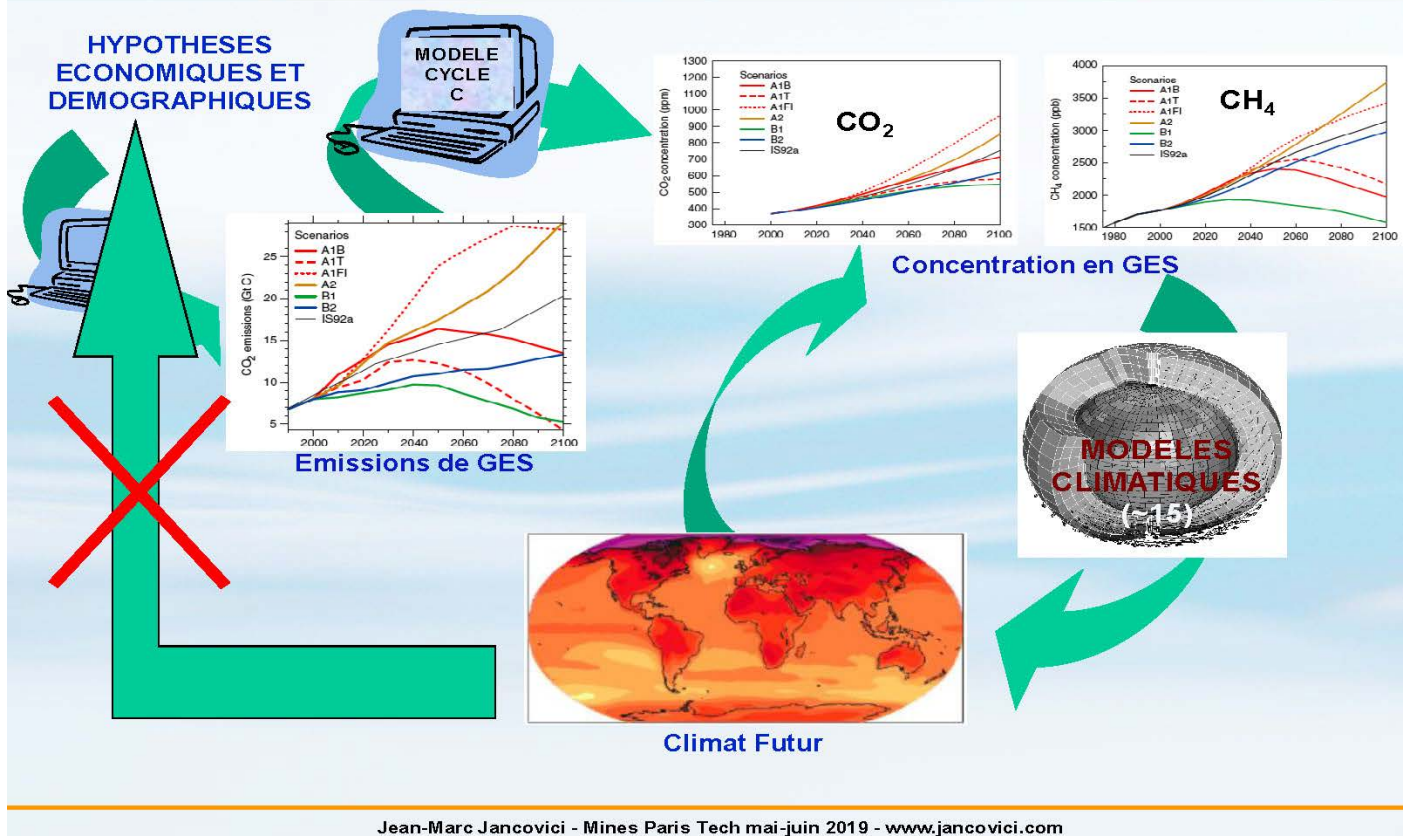
Une grande dispersion des valeurs / des estimations de hausse de température en fonction des modèles utilisés est constatée pour tous les scénari. Explication : pour 1 même modèle il est possible de faire plusieurs simulations en modifiant légèrement certains paramètres.

- la distribution des résultats est donc élargie
- et la valeur officielle publiée est celle qui est considérée comme la plus probable dans cette distribution (sans garantie que la valeur ne peut pas être plus importante)

## Chapitre 19 - La logique d'une simulation climatique du GIEC



# Simuler le climat, pas plus fiable qu'un pronostic boursier ?



Jean-Marc Jancovici - Mines Paris Tech mai-juin 2019 - [www.jancovici.com](http://www.jancovici.com)

En entrée de la simulation :

- la représentation du système physique, c'est-à-dire un Modèle de climat
- l'hypothèse avec laquelle le chercheur va venir perturber ce système physique, en l'occurrence les émissions de GES

Les premières présentations des rapports du GIEC consistaient à :

## 1. Elaborer des hypothèses sur les émissions futures de GES

Ces hypothèses des émissions des GES sont élaborées en fonction d'hypothèses secondaires liées à l'activité économique, à la croissance de la population, etc.

> dans cette approche, les émissions de GES résultent de l'économie, consommatrice d'énergie

> c'est si on y réfléchit, une inversion de causalité puisque c'est la disponibilité d'énergie qui commande à l'activité économique. Cette approche inverse le facteur limitant.

## 2. Modéliser l'évolution de la concentration future de GES

Une fois les différentes hypothèses d'émissions futures de GES élaborées, elles sont intégrées dans une modélisation consistant à déterminer le niveau de concentration de GES dans l'atmosphère (unité de mesure, le RCP : Representative Concentration Pathway)

## 3. Modélisation du climat résultant de la concentration future de de GES

Le modèle du climat ainsi obtenu va décrire les effets selon les hypothèses concentration de GES.

Désormais dans les Rapports du GIEC, il y a une prise en compte de la rétroaction :

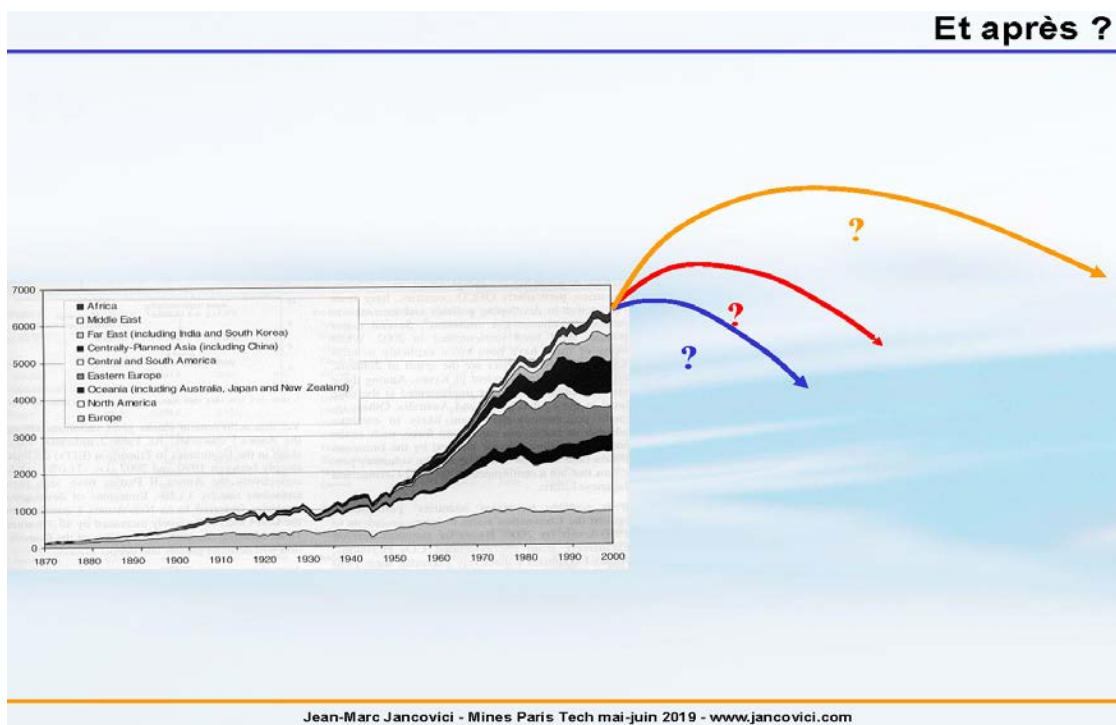
- entre la concentration de GES
- et le modèle de climat

Exemple : si le réchauffement est trop brutal, les écosystèmes se détériorent et une partie des puits de CO<sub>2</sub> ne sont plus efficaces (moins de photosynthèse, CO<sub>2</sub> moins recyclé par le vivant et par conséquent, à émission identique la concentration de CO<sub>2</sub> augmente plus vite)

Cependant la rétroaction avec les hypothèses initiales ne sont toujours pas prise en compte, dit autrement une décroissance subie du fait de la brutalité / rapidité du changement climatique n'est pas anticipée.

On a finalement un paradoxe dans les scénarios du GIEC :

- une causalité valide : les scénarios les plus sombres sont ceux où la concentration de GES est la plus importante
- mais une déduction finale fragile : plus le scénario est catastrophique, mieux l'économie se porte. Par construction, dans les scénarios du GIEC, jamais le climat ne peut porter atteinte au système économique.

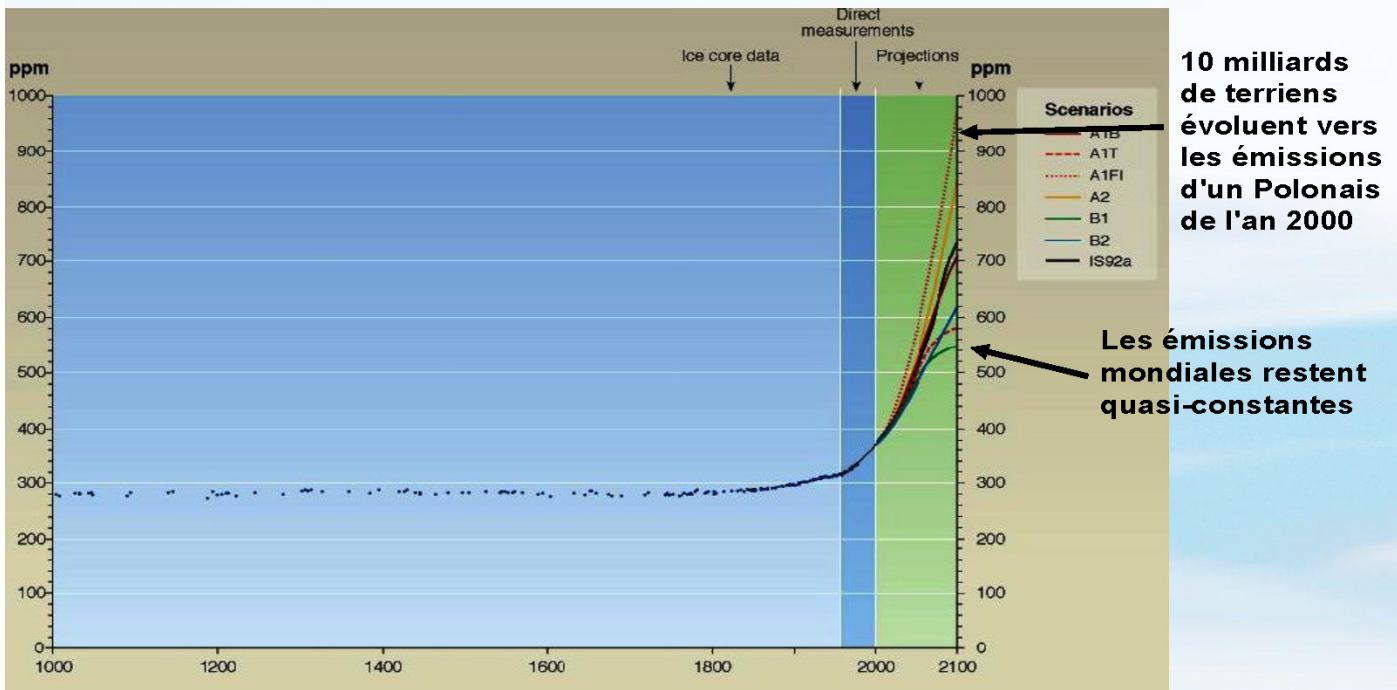


Impossible de prédire ce que seront les émissions futures de GES :

- combien d'êtres humains peupleront la terre dans 40 ans ?
- combien de pétrole, de gaz et de charbon par personne dans le futur ?
- combien de kilo de viande consommés par personne ?
- etc.

Les prédictions étant impossibles, les chercheurs élaborent des scénarios, proposent plusieurs possibilités.

## J'émets, l'atmosphère concentre

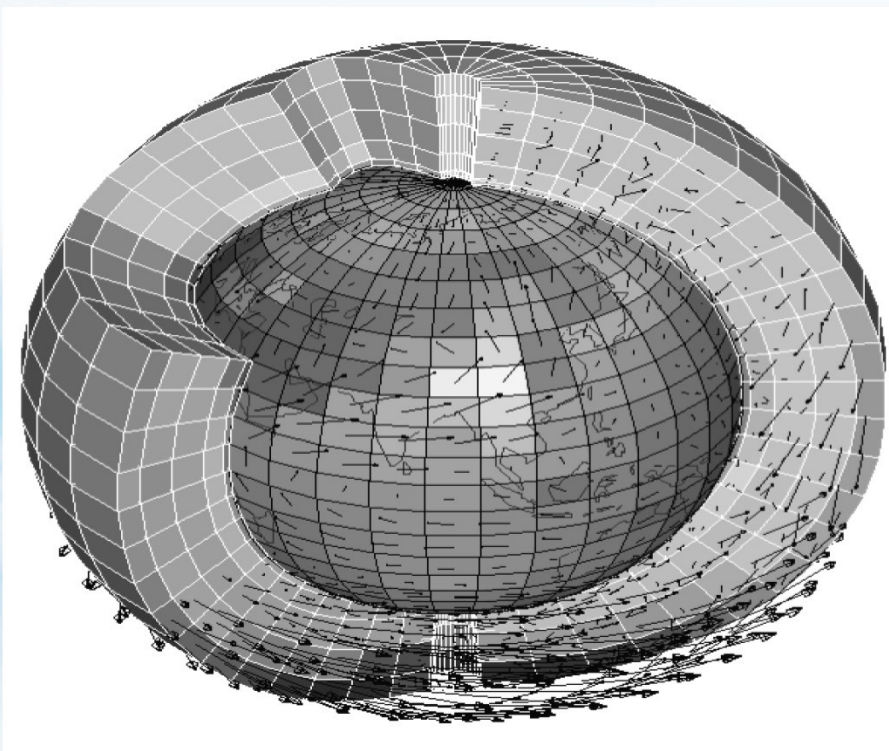


Source : Climate Change 2001, the scientific Basis, GIEC, 2001

Jean-Marc Jancovici - Mines Paris Tech mai-juin 2019 - [www.jancovici.com](http://www.jancovici.com)

Première étape de la modélisation : passer des émissions à la concentration de GES (ci-dessus CO<sub>2</sub>)

## Qu'est-ce qu'un modèle climatique ?



Source : L. Fairhead, LMD/IPSL

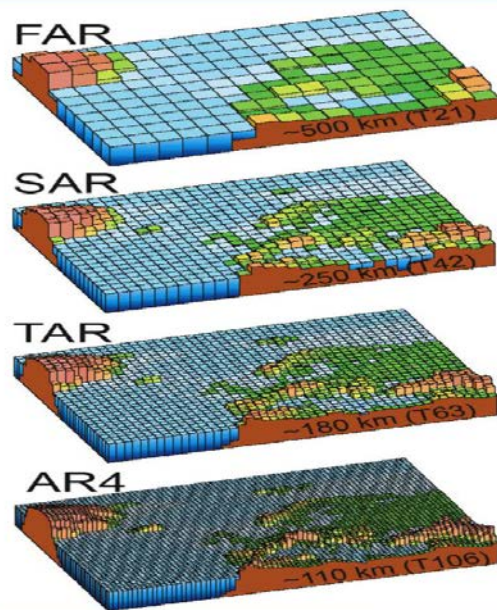
Jean-Marc Jancovici - Mines Paris Tech mai-juin 2019 - [www.jancovici.com](http://www.jancovici.com)

Deuxième étape : une fois les scénarios des concentration mis au point, les chercheurs les intègrent dans un modèle de climat.

Un modèle de climat est une représentation numérique / virtuelle de la planète conçu :

- en maillant tous les compartiments fluides des océans et de l'atmosphère
- ainsi que les continents
- en distinguant les propriétés de l'eau et de la terre

## Amélioration en complexité, mais aussi en résolution



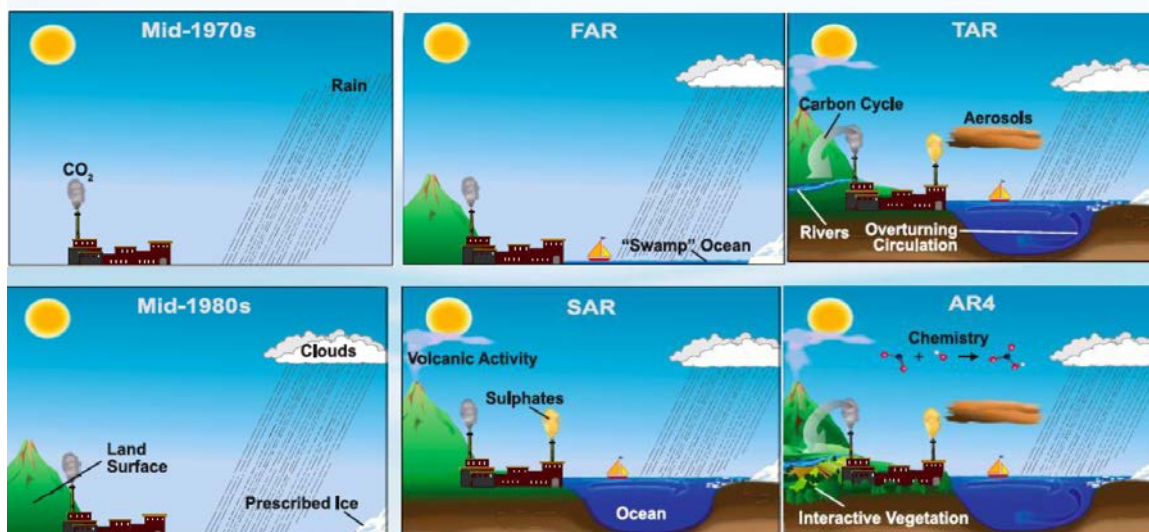
Source : GIEC, 4<sup>e</sup> rapport d'évaluation, 2007

Jean-Marc Jancovici - Mines Paris Tech mai-juin 2019 - www.jancovici.com

Les modèles s'améliorent avec les capacités des calculs informatiques accrues

- les mailles ont pu être reserrées
- le relief a été pris en compte (permettant de savoir si la place occupée par l'atmosphère)
- en plus de l'albedo de la surface terrestre a pu être pris en compte le cycle du carbone

## Les modèles font aussi l'objet d'améliorations continues !



Evolution de la complexité des modèles. Source : GIEC, 2007

Jean-Marc Jancovici - Mines Paris Tech mai-juin 2019 - www.jancovici.com

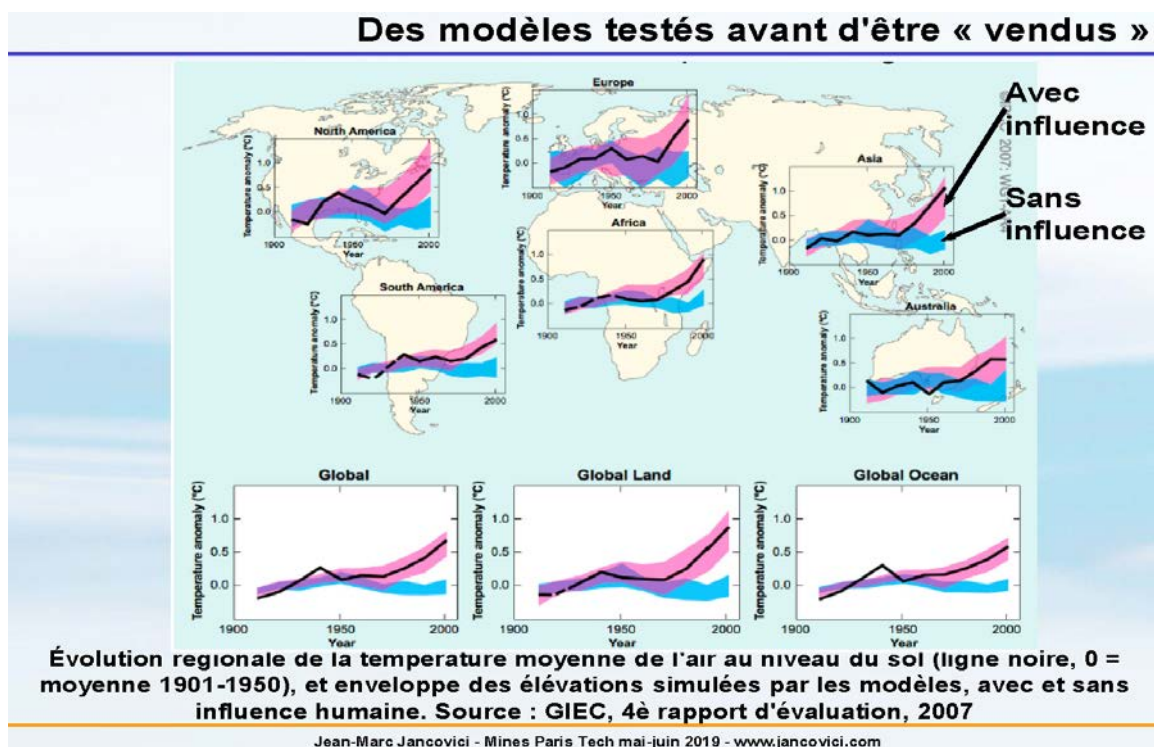
Autre champ d'amélioration du modèle : la complexité des processus impliquant l'atmosphère (océans,

végétations, aérosols, couverture nuageuse, chimie atmosphérique, cycle du carbone...)

A noter : l'amélioration des modèles n'a jamais changé fondamentalement les ordres de grandeur sur l'élévation de température qui résulte d'une augmentation donnée de la concentration en CO<sub>2</sub> de l'atmosphère car cette élévation de température résulte en premier ordre de la quantité d'énergie supplémentaire qui est envoyé vers le sol par un supplément d'effet de serre. Dit autrement

- cela relève d'un processus physique assez bien compris d'absorption / réémission par un gaz
- une fois que vous avez l'énergie totale qui retourne au sol et que vous savez faire la différence entre ce qui est absorbé par l'océan et ce qui est absorbé par le sol, il est assez aisé d'obtenir approximativement l'élévation de température du sol

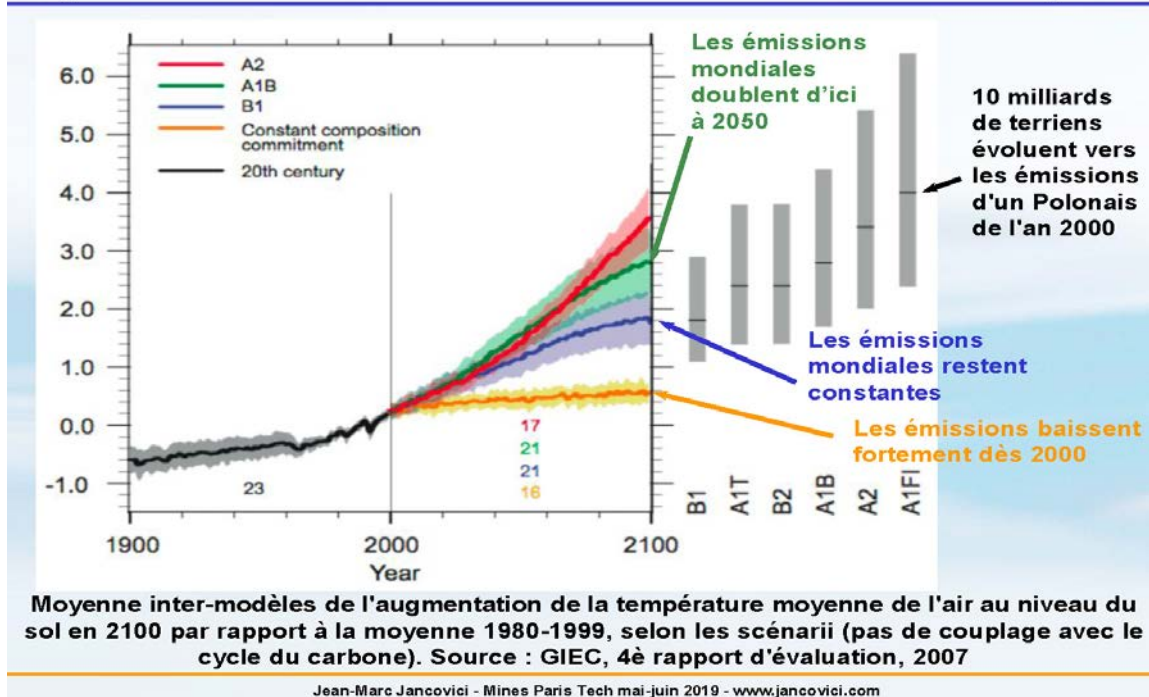
La sophistication des modèles permet notamment d'améliorer la résolution spatiale, de mieux approcher un certain nombre de phénomènes locaux mais ne change pas fondamentalement les prévisions sur l'élévation de température moyenne. Car l'élévation de la température moyenne représente l'élévation de la quantité d'énergie contenue dans le système.



Les modèles sont systématiquement testés / calibrés sur le passé (ci-dessus l'élévation des températures).

## Chapitre 20 - Les scénarii du GIEC

## J'y mets mes scénarios d'émission dans les modèles : quid ?



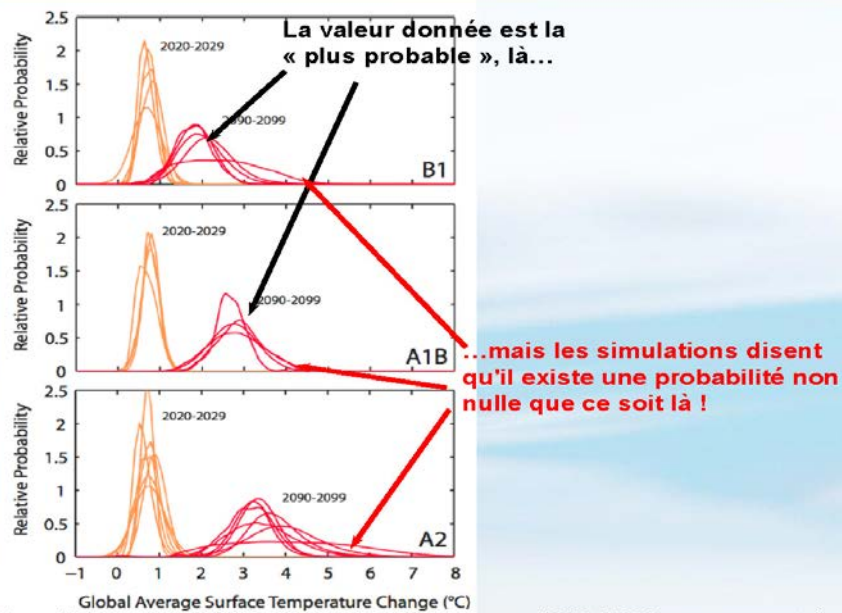
Evolution moyenne de la température en fonction du scénario d'émission de GES :

- scénario 01 : baisse sensible et immédiate des émissions et zéro émission atteint avant la fin du XXI<sup>e</sup> siècle. Dans ces conditions, l'objectif d'une augmentation de 1,5° (par rapport à l'ère pré-industrielle, 1850) peut être atteint.
- scénario 02 : les émissions mondiales demeurent constantes et dans ce cas l'augmentation d'ici la fin du XXI<sup>e</sup> siècle sera d'environ 2° (soit 3° par rapport à l'ère pré-industrielle). Forte variabilité des modèles : entre +1° et +3° selon les paramètres considérés (2° changent tout au niveau des conséquences)
- scénario 03 : scénario intermédiaire / scénario "charbon haut" dans lequel les émissions doublent d'ici 2050 et où la température augmente de 3° à la fin du siècle (+1,5° pour les modèles les plus optimistes, +4° pour les pessimistes)
- scénario 04 : scénario "polonais" (10 milliards de Terriens polluent comme des Polonais d'aujourd'hui) conduit à une augmentation de 5°

Notes :

- > ère pré-industrielle = 1850, date depuis laquelle la température a déjà augmenté de 1°
- > grande incertitude sur le degré de réchauffement signifie qu'il y a un grand risque car incapacité à fixer une borne supérieure

## Existe-t-il réellement un haut de fourchette ?



Signification des « fourchettes » d'élévation de température en 2090-2099 par rapport à 1980-1999 GIEC, 4<sup>e</sup> rapport d'évaluation, 2007

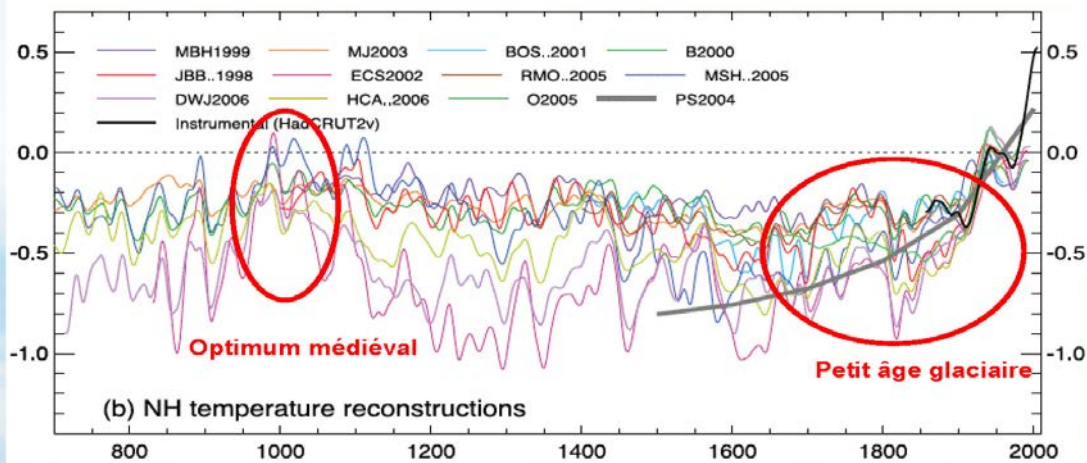
Jean-Marc Jancovici - Mines Paris Tech mai-juin 2019 - [www.jancovici.com](http://www.jancovici.com)

Une grande dispersion des valeurs / des estimations de hausse de température en fonction des modèles utilisés est constatée pour tous les scénari. Explication : pour 1 même modèle il est possible de faire plusieurs simulations en modifiant légèrement certains paramètres.

- la distribution des résultats est donc élargie
- et la valeur officielle publiée est celle qui est considérée comme la plus probable dans cette distribution (sans garantie que la valeur ne peut pas être plus importante)

## Chapitre 21 - Comparaisons avec les changements de températures passés

## Quelques degrés en un siècle, pas une affaire courante...



Évolution de la température moyenne de l'air au niveau du sol pour l'hémisphère nord de l'an 700 à l'an 2000. Source IPCC, 2007

Jean-Marc Jancovici - Mines Paris Tech mai-juin 2019 - [www.jancovici.com](http://www.jancovici.com)

Confrontation de l'élévation de température prévue à l'expérience passée : la variabilité des températures constatée depuis 2000 ans (par la paléoclimatologie) se situe entre -1 et 0

La paléoclimatologie = la science des trous :

- dendrochronologie : faire un trou dans un arbre pour mesure sa croissance annuelle (mesure de l'épaisseur et de la dureté des cernes). Archive climatique limitée car très localisée, terrestre et donne uniquement les températures et précipitations de la saison de pousse de l'arbre (printemps + été).

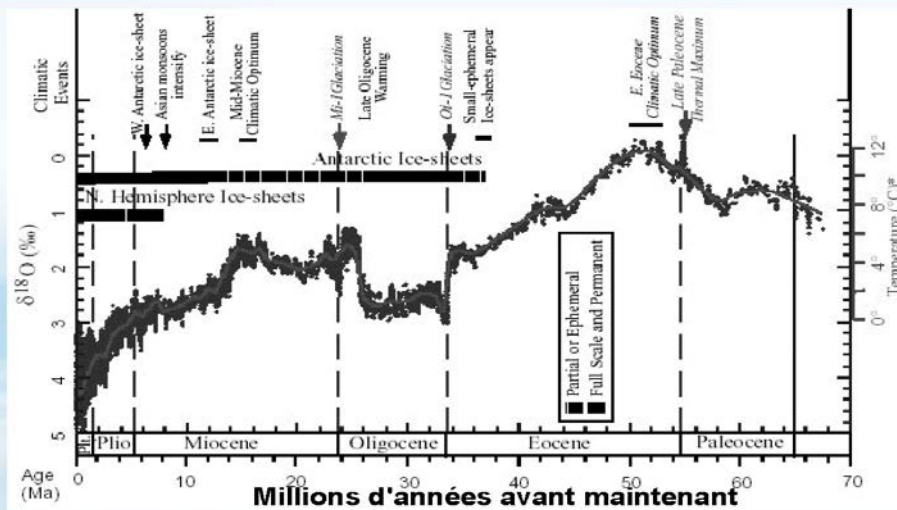
Constats :

- optimum médiéval après l'An mil : +0.5°
- petit âge glaciaire XVIIIe : -0.5°
- à partir de l'époque industrielle (1850) : +1°

> nous sommes déjà aujourd'hui dans un déplacement de température qui n'a jamais été observé dans le passé (hausse + rapidité)



## Quelques degrés en un million d'années, déjà plus



Estimation de la température moyenne de la planète, par rapport à la moyenne du dernier millénaire (zéro des ordonnées). Cette courbe a été obtenue par l'analyse de sédiments océaniques prélevés dans 40 lieux différents.  
Source : Zachos et al., Science, 2001

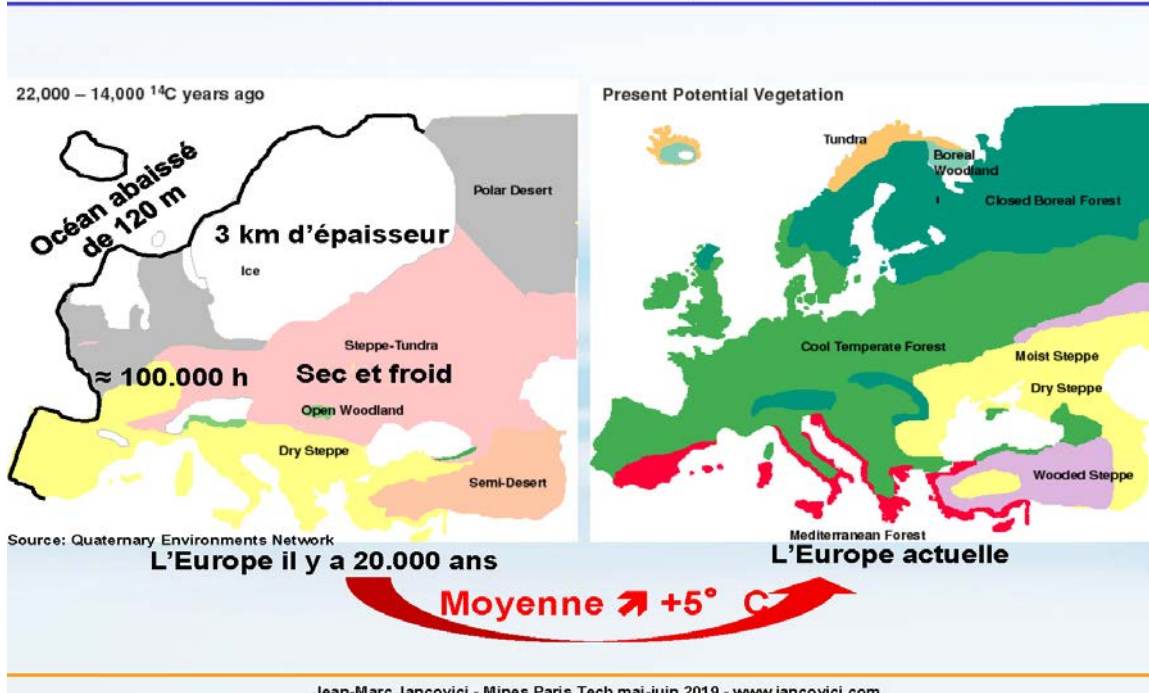
Jean-Marc Jancovici - Mines Paris Tech mai-juin 2019 - www.jancovici.com

Avec l'analyse des sédiments océaniques il est possible de remonter plus loin dans le temps. Jusqu'à 60 millions d'années.

Constats :

- lent refroidissement du système climatique
- avec une lente diminution de la quantité de CO<sub>2</sub> dans l'atmosphère
- +12° il y a 50 millions d'années, une atmosphère plus chaude pas une nouveauté : la nouveauté réside dans la présence des hommes
- les variations de température ont toujours existé et ont produit des effets sur l'humanité : la nouveauté réside dans l'ampleur et l'accélération de la hausse des températures, les effets produits pourraient avoir des effets majeurs sur l'humanité (combien de survivants ? dans quelles conditions ? ...)

## 5 ° C de plus en un siècle, juste un pull en moins ?



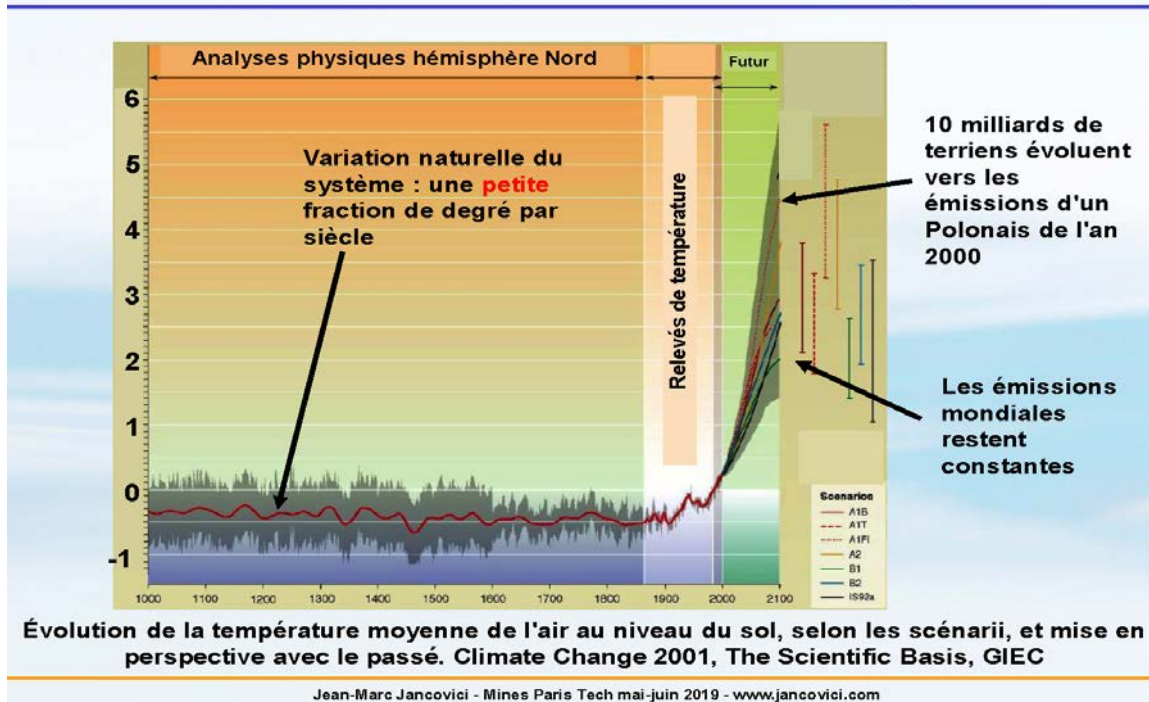
Jean-Marc Jancovici - Mines Paris Tech mai-juin 2019 - www.jancovici.com

Il y a 20 000 ans, au coeur de la dernière ère glaciaire, il faisait 5° de moins :

- océan abaissé de 120 mètres (eau transformée en glace sur le Nord de l'Europe, de l'Amérique, de l'Asie)
- le Nord de l'Europe recouvert par une calotte glaciaire de 3km d'épaisseur
- climat plus froid = beaucoup moins d'évaporation = climat plus sec = végétation du nord de la Sibérie
- capacité de l'écosystème = 100 000 humains

En 5 à 10 000 ans, la température moyenne a gagné 5° : la variabilité du système n'est pas du tout à l'échelle de ce que la civilisation industrielle déclenche aujourd'hui. Quelques millénaires contre quelques siècles, voire décennies.

## Le problème est devant, pas derrière !



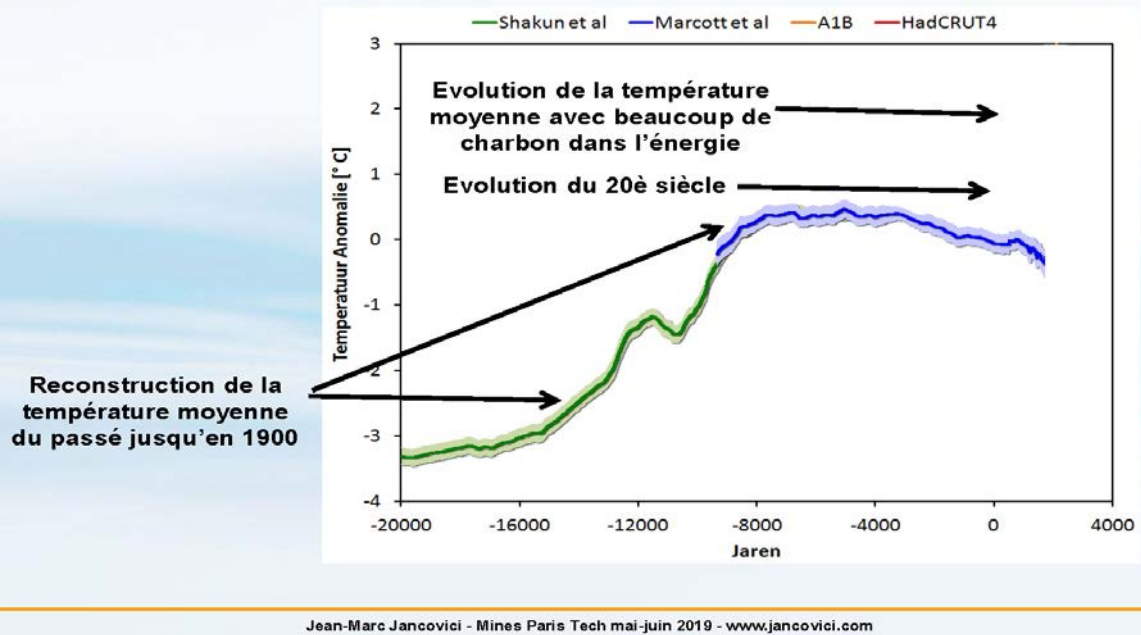
La variation naturelle du système est bien attestée par l'analyse des arbres (dendrochronologie) au cours du dernier millénaire, il s'agit d'une petite fraction de degré à la hausse ou à la baisse.

A partir de 1860 on peut mesurer directement / de manière instrumentale la température moyenne de la planète

- les instruments de mesure directs, en l'occurrence les thermomètres inventé en 1492 (dans les villes et ceux embarqués sur les navires marchands qui sillonnent les océans)
- sont suffisamment généralisés partout sur la planète à partir de la moitié du XIXe pour pouvoir remplacer la dendrochronologie

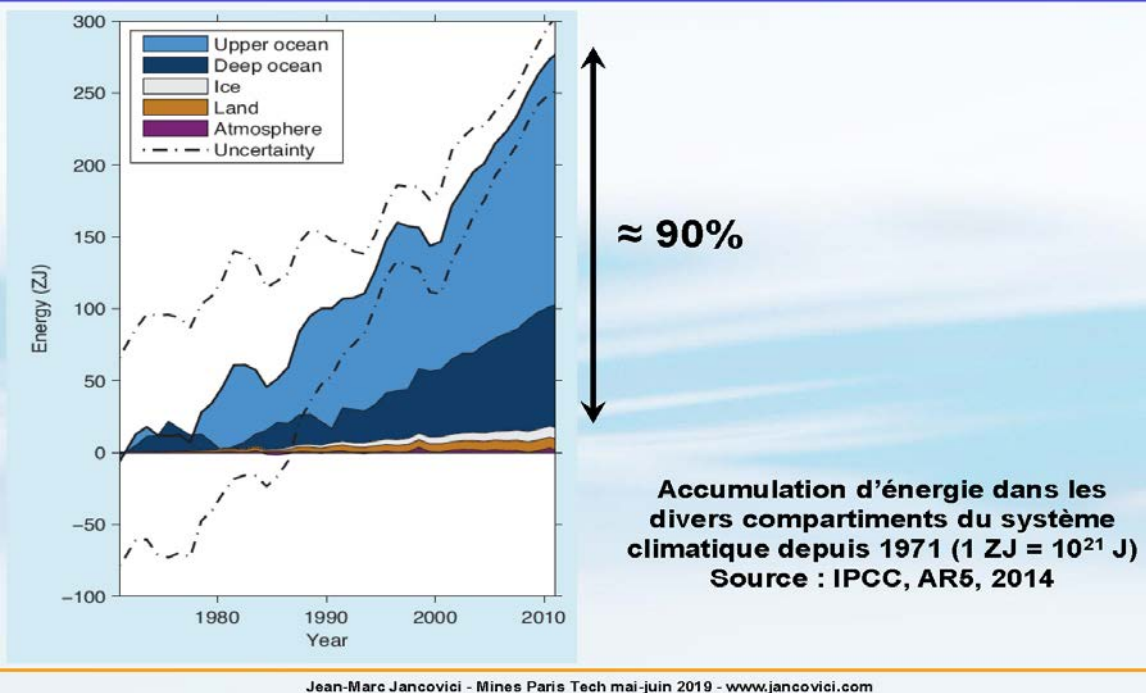
L'évolution future des températures est modélisée et montre - quelque soit le scénario retenu - que le changement à venir est sans commune mesure avec les évolutions passées / la variabilité naturelle du système. Même à 2° d'augmentation, il y aura une quantité de dysfonctionnements considérables.

## Et pour quelques degrés de plus...



Le carottage (analyse des isotopes de l'eau et de l'oxygène des calottes glacières) permet de suivre l'évolution des températures bien plus loin que la dendrochronologie. A l'échelle de temps de 20000 ans, l'évolution de la courbe de température fait un angle à 90° au XXIe siècle.

## Il paraît que le réchauffement s'est arrêté ?



L'élévation de température déjà en cours et qui va s'accélérer au XXIe siècle et

- ne concerne pas seulement l'élévation de la température de l'atmosphère (= la partie émergée de l'iceberg)
- le supplément d'énergie provoqué par le supplément d'effet de serre se loge à 90% dans l'océan / réchauffe l'océan

Il suffit donc que l'enfouissement de l'énergie soit - du fait des courants - moindre une année pour que l'on constate un réchauffement supérieur de l'atmosphère (et vice-versa). La variabilité annuelle de la tempéra-

ture atmosphérique dépend du comportement de la circulation des océans, du processus d'enfouissement de la chaleur dans l'océan.

Globalement le système emmagasine toujours plus d'énergie mais ponctuellement, la traduction de ce phénomène est plus ou moins visible dans l'atmosphère selon la circulation océanique.

## Chapitre 22 - Les impacts du changement climatique

### A / L'augmentation de la température de l'atmosphère et de l'océan

#### Quels seront les impacts du changement climatique ?

**Avec une amplitude qui dépendra de nos émissions :**

**Impacts sur les écosystèmes (affaiblissements, disparitions, déplacements)**

**Augmentation du niveau des océans**

**Impacts sur les courants marins et donc sur les climats régionaux**

**Modification des phénomènes extrêmes (dont pics de chaleur, précipitations intenses, sécheresses, etc)**

**Augmentation du « trou d'ozone »**

**Impacts directs sur la santé humaine (déplacement des zones endémiques pour les maladies, conséquences des phénomènes brusques, etc).**

**Et encore acidification de l'océan, risques géopolitiques, etc...**

**Et nous ne ferons jamais le tour de toutes les mauvaises surprises possibles à l'avance, puisque la situation est inédite**

Jean-Marc Jancovici - Mines Paris Tech mai-juin 2019 - [www.jancovici.com](http://www.jancovici.com)

#### Les impacts

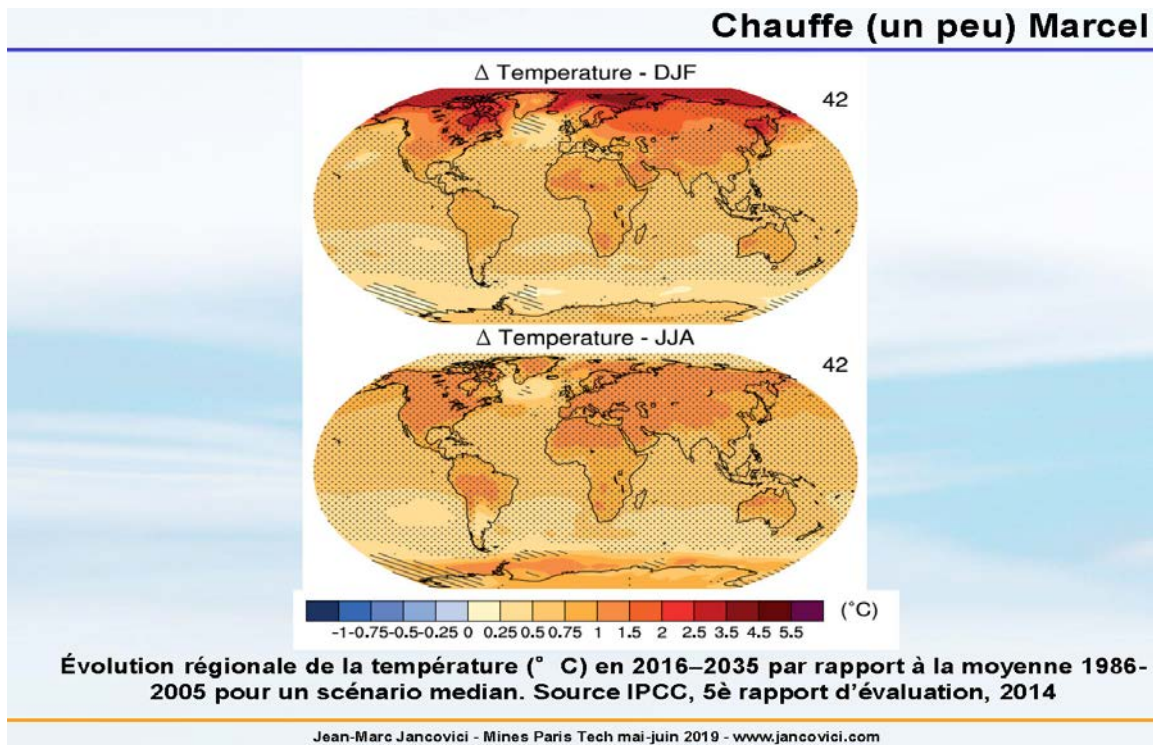
Règle 1 : l'ampleur des impacts dépend de l'ampleur des émissions

- impacts sur les écosystèmes (affaiblissements, disparitions et déplacements)
- impacts sur les océans (augmentation du niveau, modification des courants marins et donc des climats régionaux, acidification des océans, ...)
- impacts sur les phénomènes météorologiques extrêmes (accroissement en nombre et en intensité des pics de chaleur, des précipitations intenses, des sécheresses, ...)
- impacts sur la santé humaine (déplacement des zones endémiques pour les maladies, ...)
- impacts politiques / géopolitiques

Règle 2 : impossible de prévoir à l'avance, à quelques dizaines d'années, l'ensemble des impacts du dérèglement climatique car

- la situation est inédite
- et le système climatique trop cahotique pour pouvoir prévoir tous les changements, anticiper les dates des phénomènes et leur localisation régionale.

Des mauvaises surprises ne cesseront d'être découvertes au fur et à mesure du dérèglement climatique.



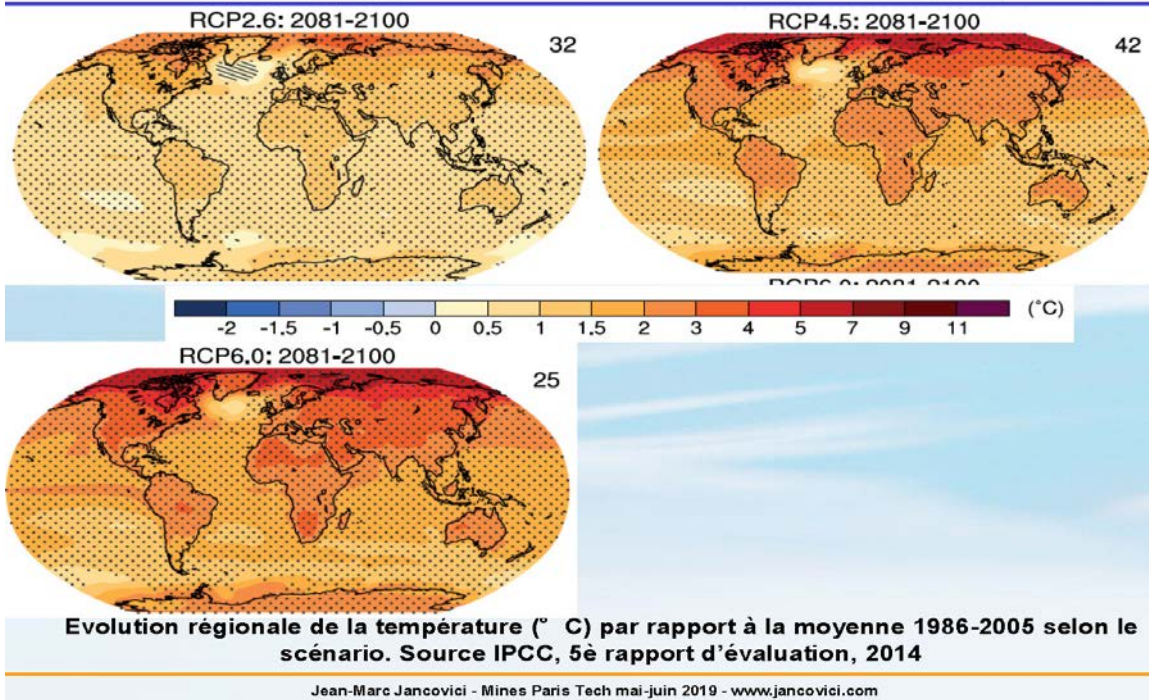
Des constantes ont été mises au jour concernant le réchauffement global.

### La structure spatiale est connue approximativement

- > l'élévation des températures est plus importante - quelle que soit la saison - sur les terres émergées que sur les océans (qui disposent de plus d'inertie thermique)
- > l'élévation est plus importante sur l'hémisphère Nord que sur l'hémisphère Sud
- > l'élévation de température est proportionnellement plus marquée l'hiver dans les hautes latitudes Nord que l'été (= l'élévation de température sera proportionnellement plus marquée l'hiver que l'été).
- > l'élévation de température est moins marquée qu'ailleurs dans l'hémisphère Nord - quelle que soit la saison - au Sud du Groënland

Conclusion : l'endroit où le réchauffement sera particulièrement marqué, la Région Arctique. Déjà on constate des températures totalement "hallucinantes" en hiver (température positive au Pôle Nord au 1er janvier 2018)

## Chauffe (un peu plus) Marcel



L'élévation de température dépendra du scénario d'émissions.

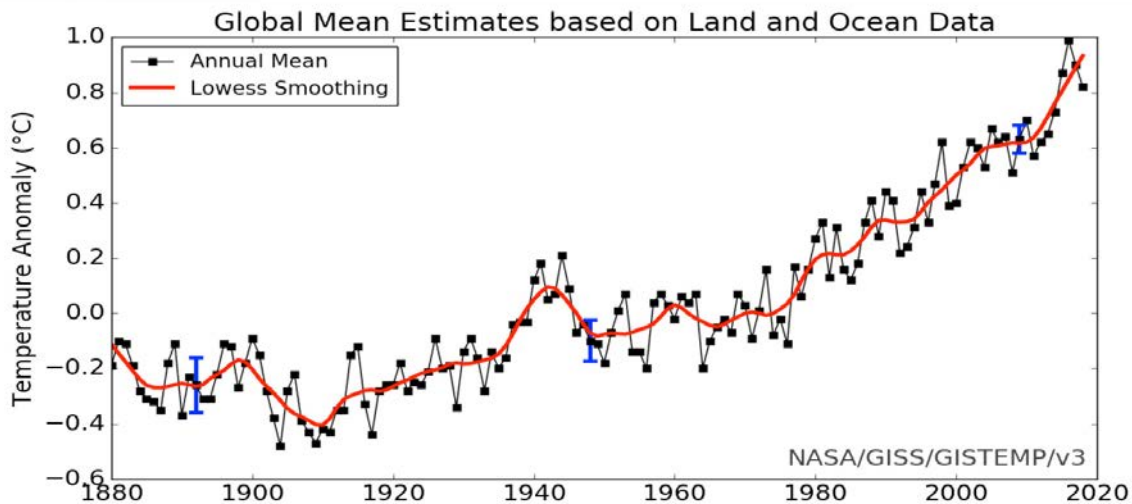
RCP (Representative Concentration Pathway) = concentration des GES dans l'atmosphère imputable à l'homme depuis la Révolution industrielle, mesurée en Watt par m<sup>2</sup>

Plusieurs scénarii en fonction de l'intensification de l'effet de serre :

- RCP 2.6 = forçage radiatif de 2,6 W/m<sup>2</sup> en 2100 (2.6 est approximativement le forçage radiatif d'aujourd'hui)
- RCP 4.5
- RCP 6.0
- RCP 8.5 = scénario purement théorique car impliquerait une économie florissante dans un contexte de Nature ravagée

Dans chacun des cas la distribution régionale du réchauffement est confirmée.

## Notre affaire a déjà commencé ?



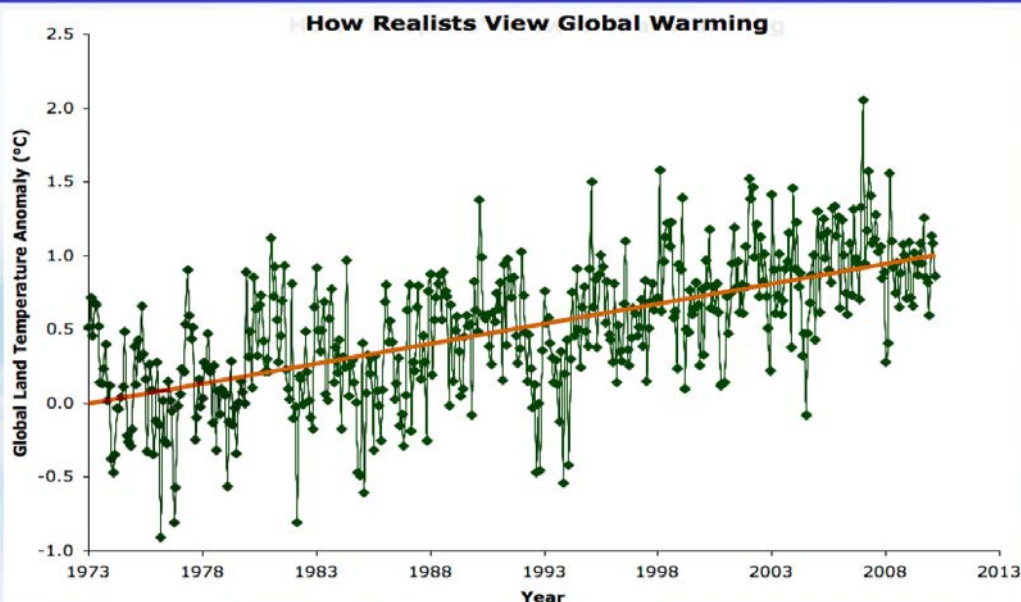
**Ecart entre la température annuelle moyenne et la moyenne 1951-1980 (0 des ordonnées). La barre bleue représente l'incertitude. Source : GISS/NASA, 2019**

Jean-Marc Jancovici - Mines Paris Tech mai-juin 2019 - [www.jancovici.com](http://www.jancovici.com)

Augmentation de la température constatée depuis les années 70.

Les 20 premières années des 30 Glorieuses, ère de l'industrialisation accélérée du monde, a paradoxalement abouti à un refroidissement des températures (hypothèse : usage massif de charbon et de pétrole sans mesures d'antipollution, aboutissant à l'envoi dans l'atmosphère de particules soufrées réfléchissantes)

## Attention aux manipulations statistiques...



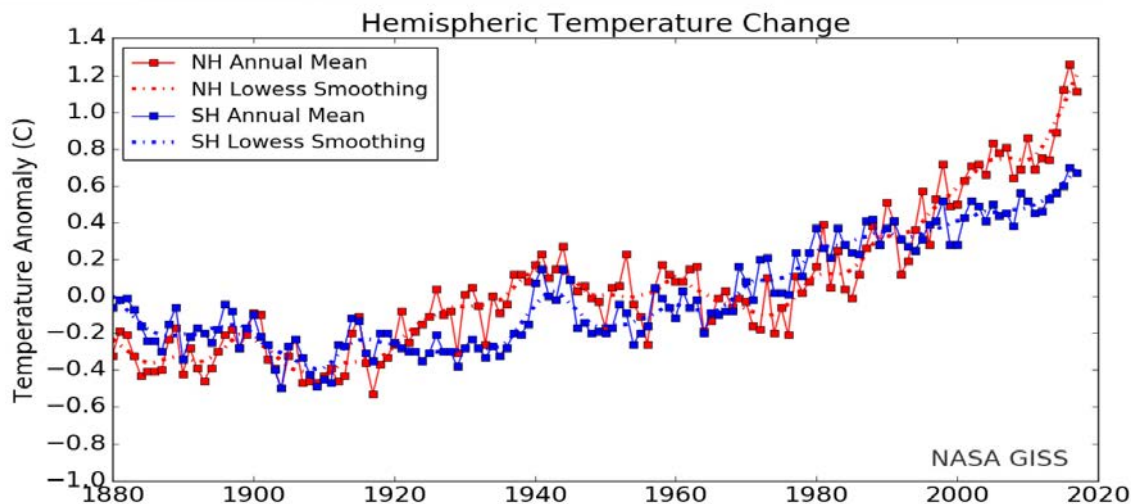
**Evolution des températures terrestres de 1973 à 2010.**

Jean-Marc Jancovici - Mines Paris Tech mai-juin 2019 - [www.jancovici.com](http://www.jancovici.com)

Attention à bien considérer des séries longues : le biais des climatosceptiques consiste à utiliser des séries courtes contredisant la tendance globale du réchauffement.

A propos des climatosceptiques : la population des Etats-Unis est la plus climatosceptique (devant l'Arabie Saoudite, l'Egypte et la Norvège).

## Notre affaire a déjà commencé ?



**Ecart entre la température annuelle moyenne et la moyenne 1951-1980 (0 des ordonnées), pour chaque hémisphère. Source : GISS/NASA, 2019**

Jean-Marc Jancovici - Mines Paris Tech mai-juin 2019 - [www.jancovici.com](http://www.jancovici.com)

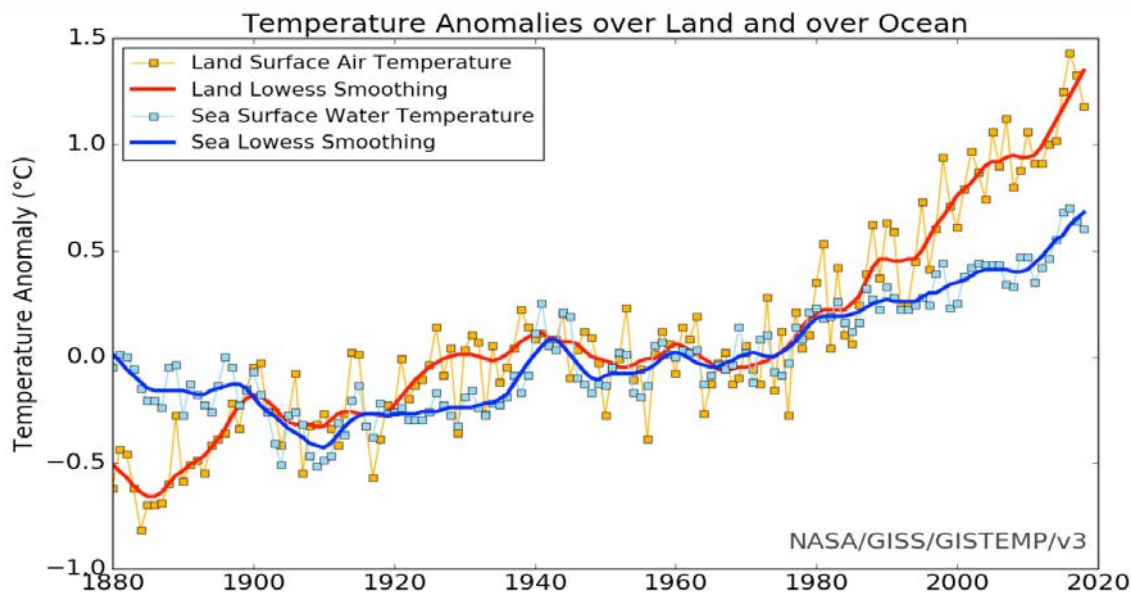
Evolution de la température hémisphérique

- les variations de température de l'hémisphère sud sont globalement moins heurtées que celles du nord
- l'augmentation de température y est également un peu moins rapide

Explication :

- plus de terres émergées dans l'hémisphère nord
- évolution plus rapide en Arctique

## Notre affaire a déjà commencé ?



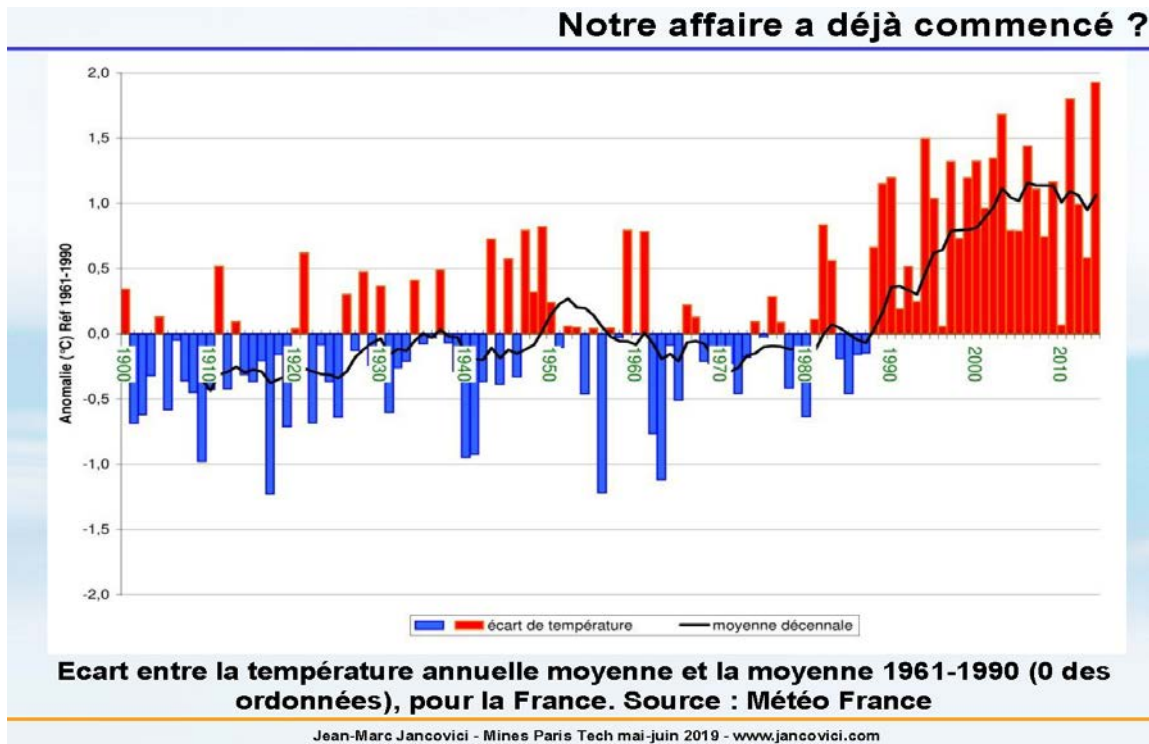
**Ecart entre la température annuelle moyenne et la moyenne 1951-1980 (0 des ordonnées), pour l'océan et les terres émergées. Source : GISS/NASA, 2019**

Jean-Marc Jancovici - Mines Paris Tech mai-juin 2019 - [www.jancovici.com](http://www.jancovici.com)

Analyse des moyennes différenciées Continents / Océans :



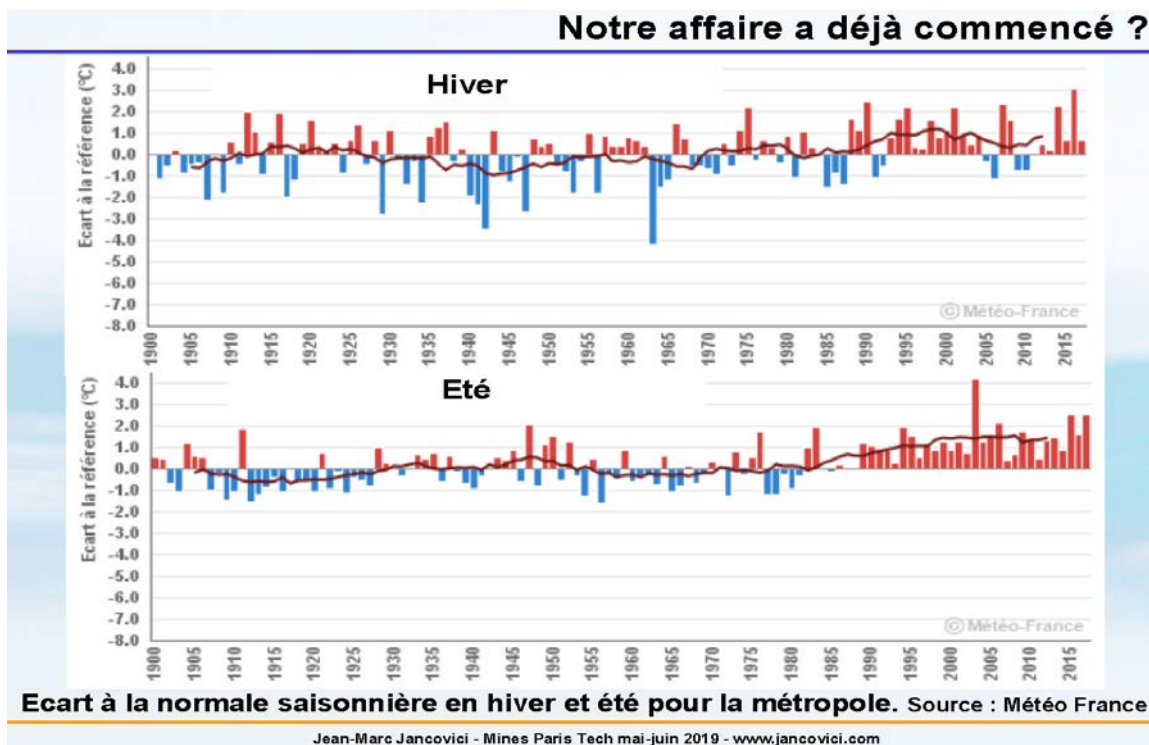
- baisse des températures sur les continents dans les 2 premières décennies des 30 Glorieuses (SO2) qui conduit la courbe des températures des continents à rejoindre celle des océans
- découplage à partir des années 80, la température sur les continent augmente plus vite que sur les océans du fait de l'inertie thermique plus grande des océans



Courbe de l'évolution annuelle des température pour la France depuis 1900

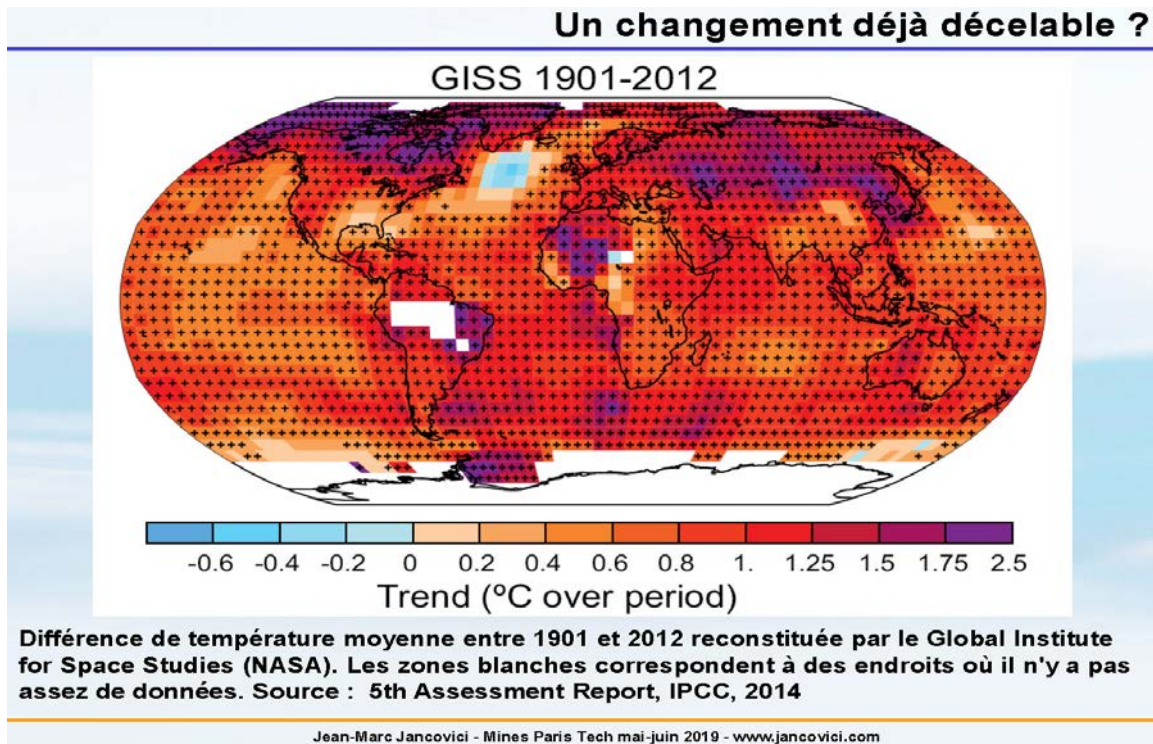
- par rapport à la moyenne trentenaire des températures connues de 1961 à 1990
- les moyennes annuelles sont systématiquement supérieures depuis 1990
- il n'y a plus d'alternance / d'années "froides"

Cela explique que d'années en années ou presque les journaux titrent sur les records de températures battus. Ce n'est que le début, un "marronnier".



Variation des températures hivernales et estivales en métropole depuis 1900

- l'évolution de température en hiver et en été sont tendancielle à la hausse
- la variabilité des températures durant la saison hivernale est plus importante, le réchauffement climatique dans son ensemble n'empêche pas la survenue d'hivers plus froids que la moyenne (c'est moins fréquent mais ce n'est pas impossible)



Reconstruction de la variation de température au XXe siècle

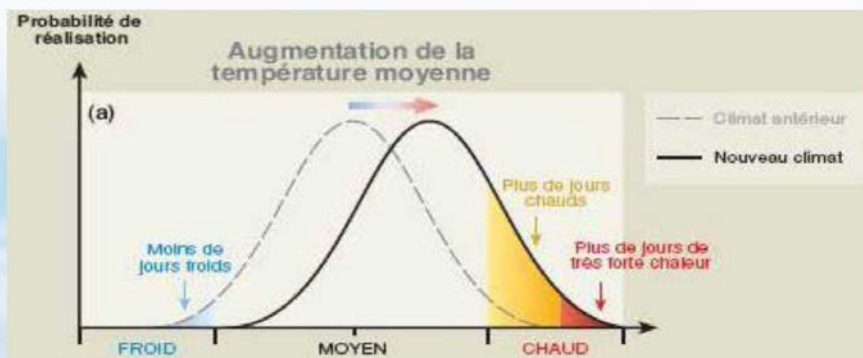
Est-ce que la structure spatiale de l'élévation de température correspond à ce que l'on est en droit d'attendre d'un climat qui se réchauffe avec un supplément d'effet de serre ?

Dans un climat qui se réchauffe par supplément d'effet de serre, un des phénomènes prévisibles est :

- une élévation de température plus marquée sur les continents
- et particulièrement marquée en zone Arctique

Dans l'élévation de température déjà observée durant le XXe siècle, c'est exactement ces deux phénomènes qui sont constatés. Plus la singularité au sud du Groënland.

## Un simple déplacement de moyenne sera déjà un problème



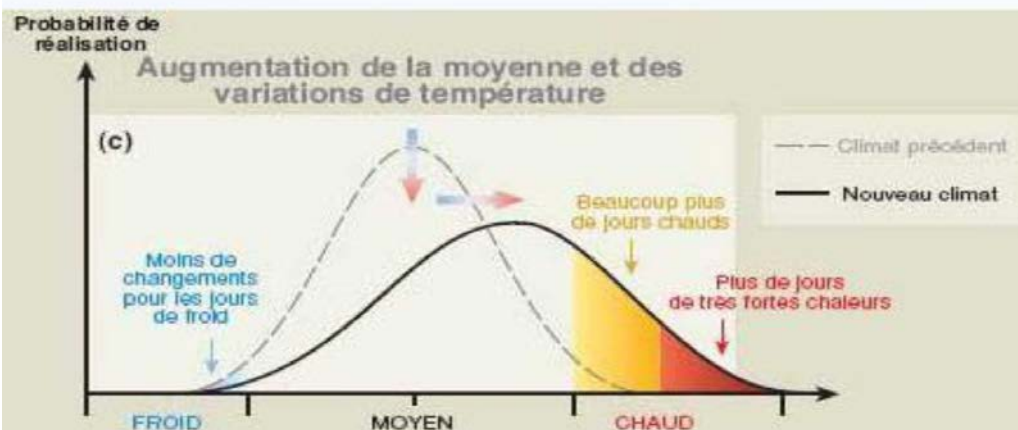
**Elevation probable des épisodes de canicule. Source : Climate Change 2001, the scientific Basis, GIEC**

Jean-Marc Jancovici - Mines Paris Tech mai-juin 2019 - www.jancovici.com

Conséquences du réchauffement global des températures

- une augmentation des températures maximales
- l'élévation probable des épisodes de canicule

## Et en plus la variabilité peut s'en mêler !



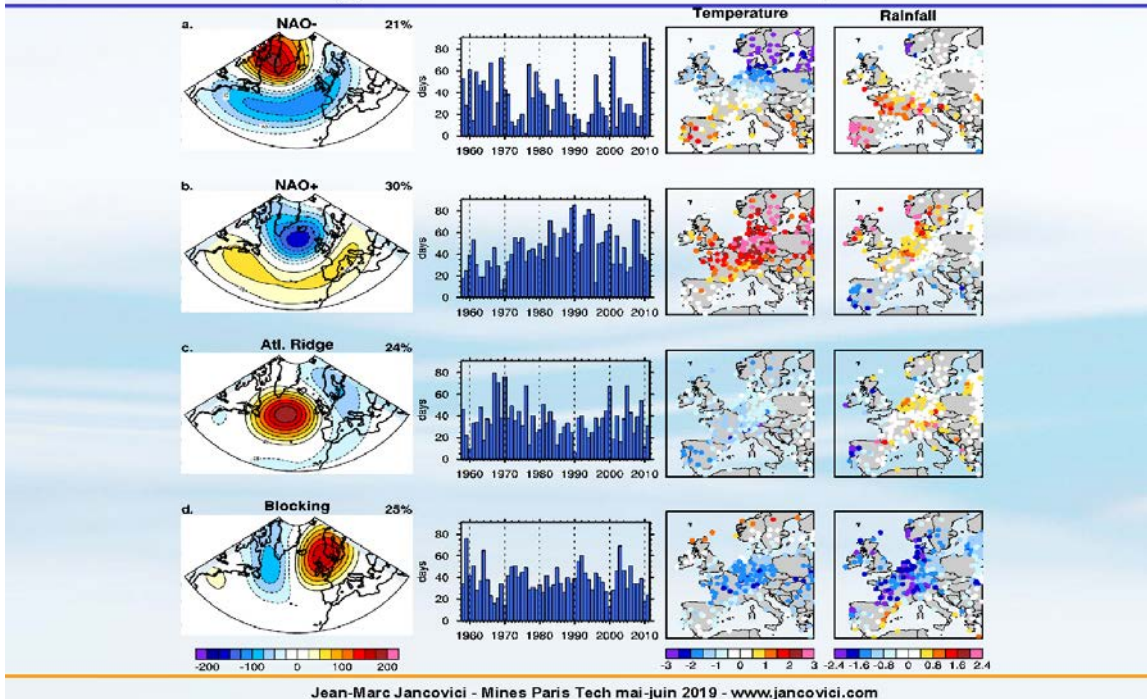
**Forte élévation possible des épisodes de canicule. Source : Climate Change Source GIEC, 4è rapport d'évaluation, 2007**

Jean-Marc Jancovici - Mines Paris Tech mai-juin 2019 - www.jancovici.com

Le risque caniculaire s'accroît si la variabilité augmente, or la variabilité des températures est une des caractéristiques attendues de l'élévation globale des températures.

Les périodes extrêmement chaudes et / ou extrêmement sèches vont avoir tendance à se répéter plus souvent.

## Du global au local : une autre paire de manches



Autre élément de variabilité à considérer :

Exemple de l'Europe, continent soumis à un régime de vent d'ouest et donc sensible au positionnement relatif de l'anticyclone et de la dépression située sur l'Atlantique.

Quatre combinaisons possibles :

- régime NAO- : l'anticyclone se situe au Nord et la dépression au Sud
- régime NAO+ : l'inverse
- régime Atlantic Ridge : l'anticyclone se situe à l'ouest et la dépression à l'est
- régime Blocking : l'inverse

Ces régimes commandent à la localisation sur le continent des précipitations et font également varier localement les températures.

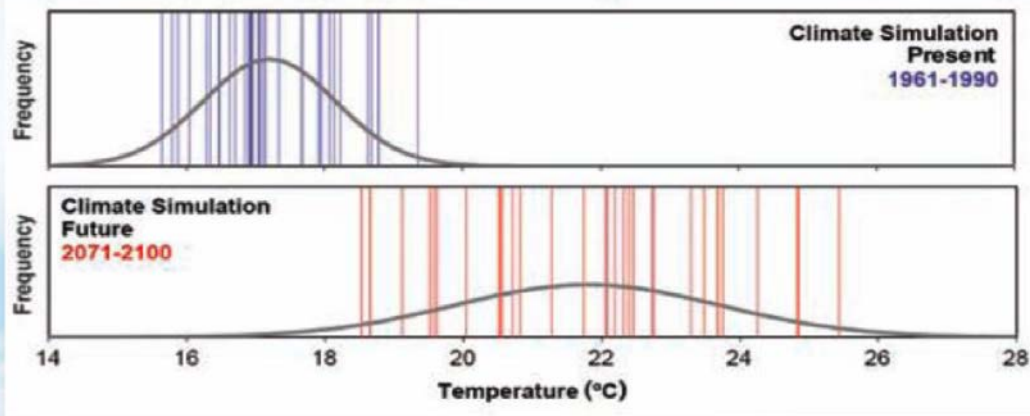
La question - non résolue à ce jour par les climatologues - est de savoir si la fréquence de survenue de ces régimes (actuellement distribué à 25% chaque environ) va rester stable dans un contexte de réchauffement global.

Si la fréquence d'occurrence change, cela signifie qu'il y aura un phénomène d'amplification sur l'Europe par rapport à l'évolution globale du réchauffement.

Scénario catastrophe (qu'il est impossible pour l'instant de modéliser) :

- moins de précipitations et hausse des températures
- activité agricole menacée

## Et de fait la variabilité devrait s'en mêler...



Modification de la distribution des températures en Suisse avec un scénario intensif (A2) en 2100. On note une très forte augmentation de la variabilité : les épisodes de canicules sont encore plus intenses qu'avec un simple déplacement de moyenne.

Source : 4th Assessment report, 2007, GIEC

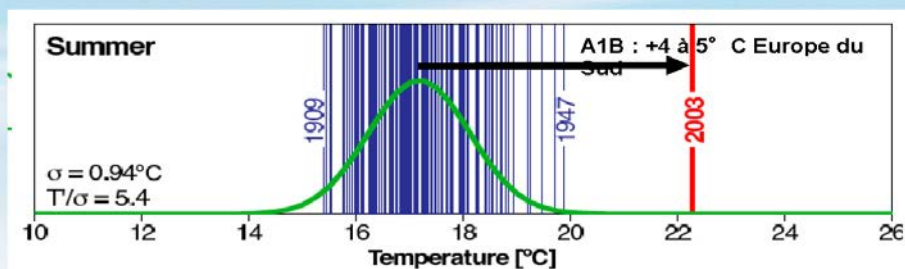
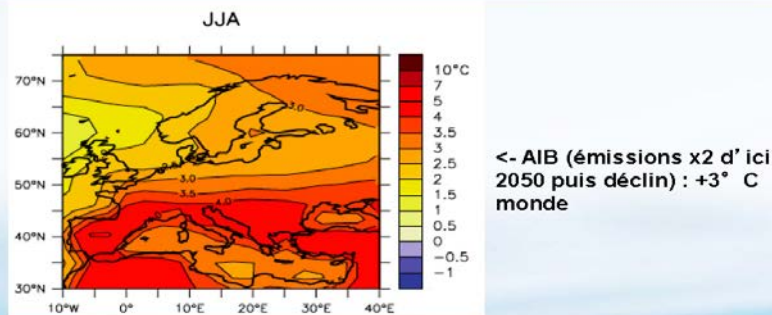
Jean-Marc Jancovici - Mines Paris Tech mai-juin 2019 - www.jancovici.com

Application.

- Distribution des températures en Suisse des années 60 à 90
- Comparée au climat futur à la fin du XXIe siècle

Non seulement on constate une augmentation de la moyenne des températures mais également un accroissement sensible de la variabilité des températures. Par conséquent les températures extrêmement élevées ne seront pas "un peu plus fréquentes" mais très sensiblement plus fréquentes.

## L'été 2003 deviendra-t-il la norme ?

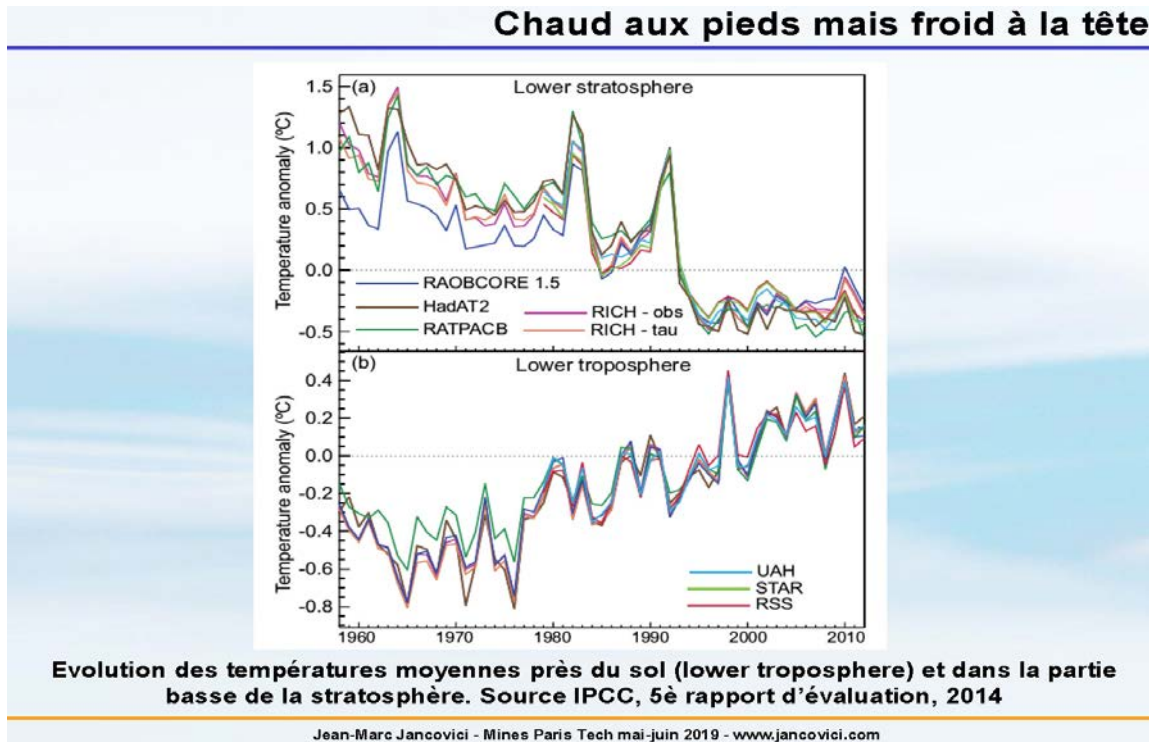


Distribution des températures moyennes des étés en Suisse entre 1864 et 2003.  
Source GIEC, 4<sup>e</sup> rapport d'évaluation, 2007

Jean-Marc Jancovici - Mines Paris Tech mai-juin 2019 - www.jancovici.com

Dans un climat qui se réchauffe de quelques degrés, la canicule connue en 2003 devient un été "moyen" à la fin du siècle (50% des étés seront plus chauds : adieu aux forêts et aux récoltes). A retenir : le nombre de

degré du réchauffement global est une moyenne qui masque les variations extrêmes.



Un autre marqueur du dérèglement climatique / du supplément d'effet de serre induit par l'activité humaine : la baisse de température de la stratosphère

Phénomène physique :

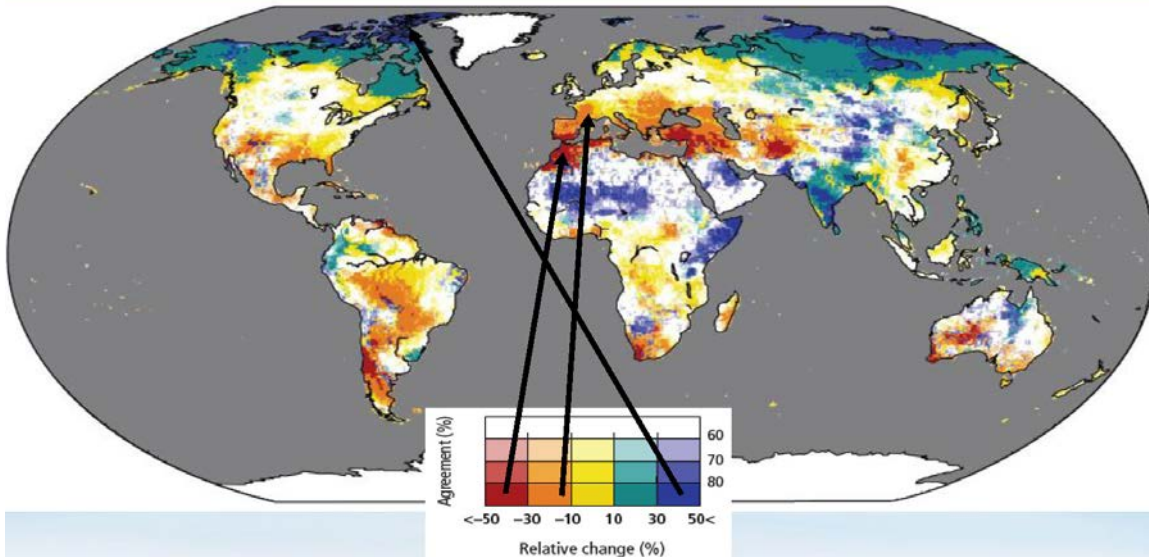
- > augmentation de la concentration de gaz à effet de serre dans l'atmosphère
- > augmentation de l'opacité de l'atmosphère au rayonnement des infrarouges lointains émis par la planète
- > réchauffement de la basse atmosphère (troposphère, les 10 premiers kilomètres) et du sol (qui augmente la restitution de la chaleur par ses 3 processus habituels)
- > refroidissement de la haute atmosphère qui intercepte moins d'infrarouges lointains

Conséquence :

- creusement de l'écart de température entre les températures au sol (troposphère) et les températures de la partie basse de la stratosphère
- plus grande violence des "accidents" climatiques

## B / La variation des précipitations

## Un climat, ce n'est pas juste une température moyenne



**Moyenne inter-modèles de l'évolution des précipitations pour une élévation de 2,7° C de la température moyenne (soit +2° C par rapport à 1980-2010). Source : GIEC, 5<sup>e</sup> rapport d'évaluation, 2014**

Jean-Marc Jancovici - Mines Paris Tech mai-juin 2019 - [www.jancovici.com](http://www.jancovici.com)

Deuxième conséquence du dérèglement climatique, en plus du réchauffement, la variation des précipitations :

- dans un climat plus chaud il y a globalement plus d'évaporation, donc plus de précipitations
- toutefois ces précipitations n'ont aucune raison de se répartir de manière homogène sur la planète, ni spatialement ni temporellement.

Les chercheurs tentent de savoir comment va se répartir cette augmentation des précipitations. Les prévisions sont plus complexes que pour l'élévation des températures car la modélisation de la couverture nuageuse est moins facile.

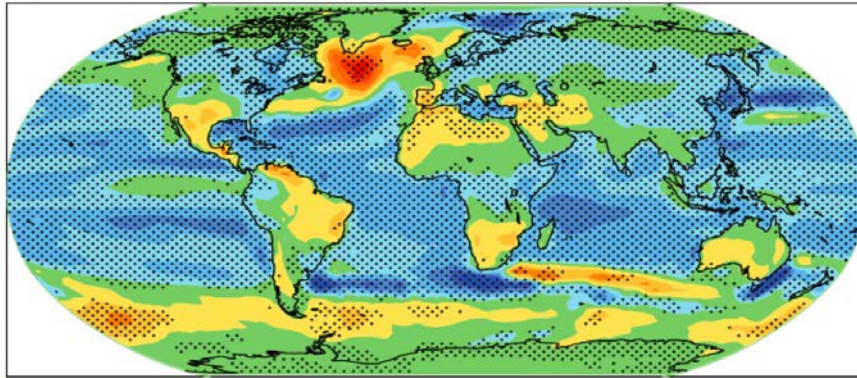
Quelques conclusions tout de même :

- globalement, les précipitations vont avoir tendance à augmenter fortement dans les hautes latitudes nord et sur une partie de la bande équatoriale
- mais des régions où les précipitations vont avoir tendance à baisser, notamment forte baisse dans les bandes tropicales.

Le bassin méditerranéen est l'espace où les précipitations vont le plus baisser. Ce phénomène :

- a déjà produit des effets, il est en partie responsable des émeutes de la fin à l'origine du printemps arabe (dans des pays non autosuffisant sur le plan alimentaire et incapables de compenser les pertes par des importations supplémentaires de nourriture)
- se répètera à l'avenir car les causes climatiques seront toujours présentes et de plus en plus pressantes
- va atteindre rapidement le sud de l'Europe (exemple de l'Espagne dont une partie de l'agriculture repose sur le pompage de nappes phréatiques qui ne se renouvellent pas)

## Un climat, c'est plus qu'une température moyenne (ter)



Moyenne inter-modèles de l'évolution de l'évaporation en 2090-2099 par rapport à la moyenne 1980-1999, pour deux saisons et un scénario « charbon haut » (pas de couplage avec le cycle du carbone). Attention ! La couleur bleue signifie une augmentation de l'évaporation, donc un assèchement toutes choses égales par ailleurs

Source : GIEC, 4<sup>e</sup> rapport d'évaluation, 2007

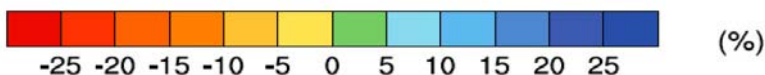
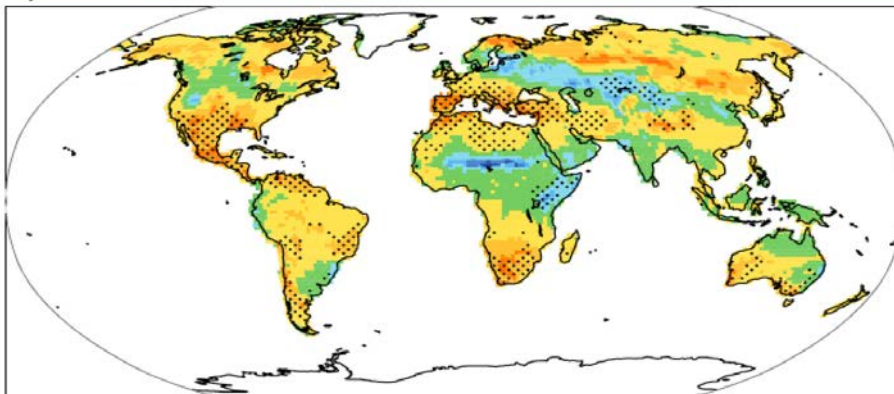
Jean-Marc Jancovici - Mines Paris Tech mai-juin 2019 - [www.jancovici.com](http://www.jancovici.com)

La variation de l'évaporation est également à prendre en compte : la teneur en eau du sol est le résultat des précipitations moins le résultat de ce qui s'évapore et de qui ruisselle.

Par exemple dans les zones de mousson, les pluies peuvent être plus abondantes mais si elles interviennent après une période extrêmement sèche, une partie accrue de la pluie ruisselle et l'eau n'est pas conservée par le sol et ne sert à rien du point de vue de la végétation (au contraire, des inondations).

Globalement l'évaporation aura tendance à s'intensifier partout sur le globe.

## Un climat, c'est plus qu'une température moyenne (quater)



Moyenne inter-modèles de l'évolution de l'humidité des sols en 2090-2099 par rapport à la moyenne 1980-1999, pour deux saisons et un scénario « charbon haut » (AIB, pas de couplage avec le cycle du carbone).

Source : GIEC, 4<sup>e</sup> rapport d'évaluation, 2007

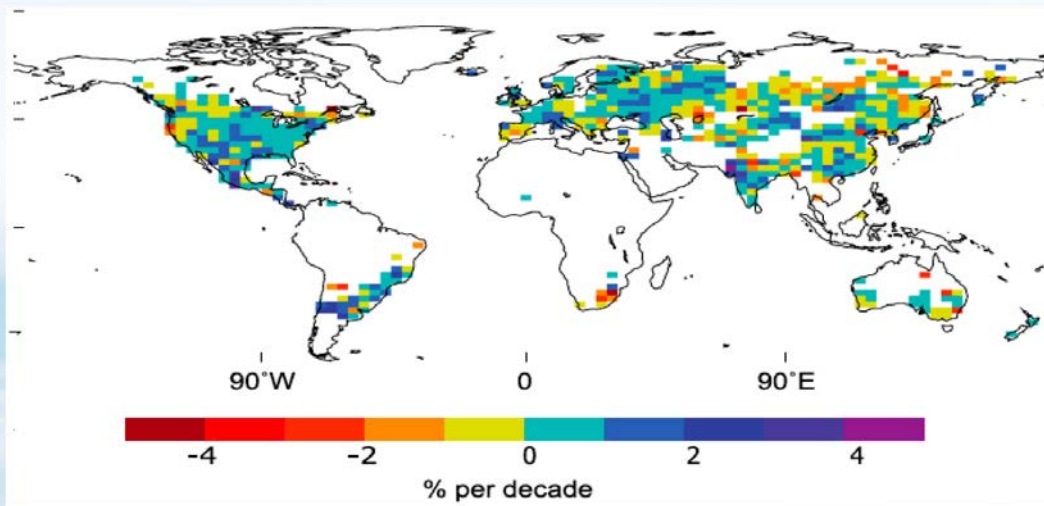
Jean-Marc Jancovici - Mines Paris Tech mai-juin 2019 - [www.jancovici.com](http://www.jancovici.com)

L'évolution de l'humidité des sols (évaluée à partir des prévisions de précipitations et d'évaporation) est une donnée cruciale pour anticiper les rendements agricoles et la stabilité / santé des écosystèmes.



- assèchement du pourtour du bassin méditerranéen,
- assèchement du quart sud-ouest de l'Australie (bassin agricole)
- assèchement du sud de l'Afrique,
- assèchement du bassin amazonien (risque de dépérissement de la forêt et donc libération de CO2 puisque l'Amazonie constitue le plus grand stock de carbone sur pied de la planète),
- assèchement du golfe du Mexique, Amérique centrale et sud des Etats-Unis

### Déjà plus d'épisodes pluvieux intenses ?



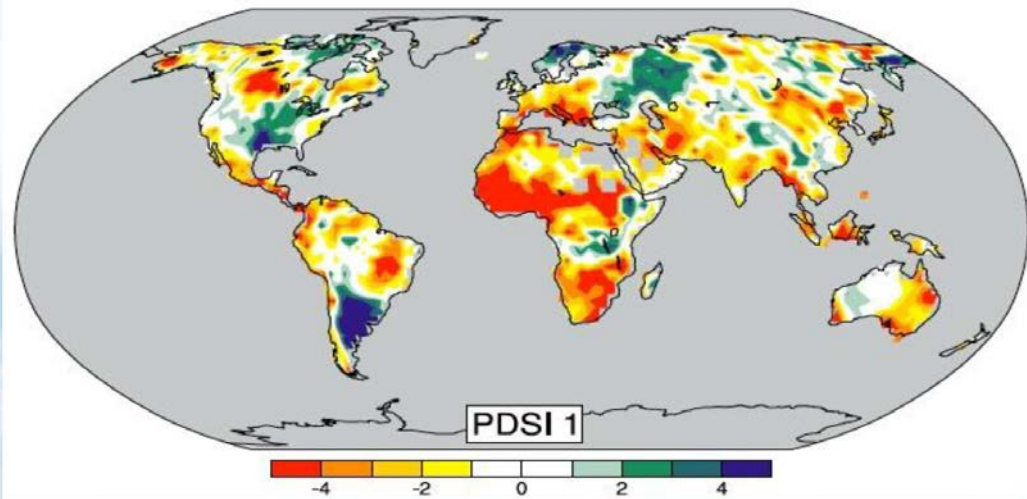
**Variation décennale moyenne, sur la période 1951 - 2003, des épisodes pluvieux intenses dans le monde (seules les zones colorées sont suffisamment documentées pour permettre l'établissement d'une série longue).  
Source : GIEC, 4<sup>e</sup> rapport d'évaluation, 2007**

Jean-Marc Jancovici - Mines Paris Tech mai-juin 2019 - [www.jancovici.com](http://www.jancovici.com)

L'analyse de l'évolution des phénomènes pluvieux intenses montre une tendance à l'augmentation des épisodes, notamment dans l'hémisphère nord.

Non seulement ces épisodes sont sources de catastrophes humaines mais sont également ravageurs pour la nature (les précipitations ruissellent et ne servent pas à la croissance végétale).

## Déjà des sols plus secs ?



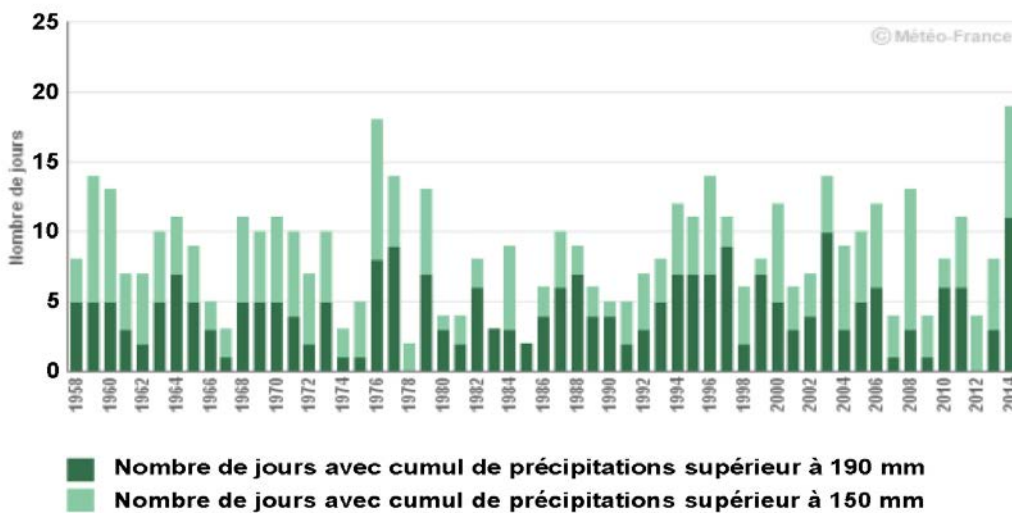
Evolution de 1900 à 2005 de l'index utilisé pour évaluer l'état de sécheresse d'une région, l'index Palmer (en anglais : PDSI, pour Palmer Drought Severity Index). Le sol des régions en jaune et rouge s'est asséché, le sol des régions en bleu et vert humidifié.  
Source : GIEC, 4<sup>e</sup> rapport d'évaluation, 2007

Jean-Marc Jancovici - Mines Paris Tech mai-juin 2019 - [www.jancovici.com](http://www.jancovici.com)

On constate déjà un assèchement des sols de certaines régions, qui préfigure ce qui est attendu pour les décennies à venir : Bassin méditerranéen, sud de l'Afrique, bassin amazonien, Amérique centrale, ...

## Plus « d'épisodes cévenols » en France ? : pas clair

Pluies diluviennes en région méditerranéenne



Nombre annuel d'épisodes pluvieux intenses dans le Sud-Est de la France depuis 1958.  
Source : Météo France

Jean-Marc Jancovici - Mines Paris Tech mai-juin 2019 - [www.jancovici.com](http://www.jancovici.com)

Les épisodes cévenols - phénomène de précipitations intenses - se produisent en fin d'été,

- à un moment où la Méditerranée est encore chaude
- alors que la température sur la terre a commencé à refroidir
- les nuages passés par la Méditerranée, chargés en eau, remontent en altitude (= condensation de la vapeur d'eau) en entrant en contact avec le massif des Cévennes / les contreforts du Massif Central
- des trombes d'eau

La question : avec une Méditerranée qui reste chaude plus longtemps, les épisodes cévenols ne vont-ils

pas être plus fréquents / plus intenses ? Pour l'instant difficile de dégager une tendance à la hausse.

En revanche, 1 certitude, la quantité de biens à inonder augmente :

- le processus d'urbanisation est toujours en marche en France / la taille des villes continue à augmenter
- la pression foncière incite à une moins grande prudence et la plupart des villes étant traversées par un cours d'eau, c'est souvent dans ces zones "à risques futurs" que sont bâtis les nouveaux logements

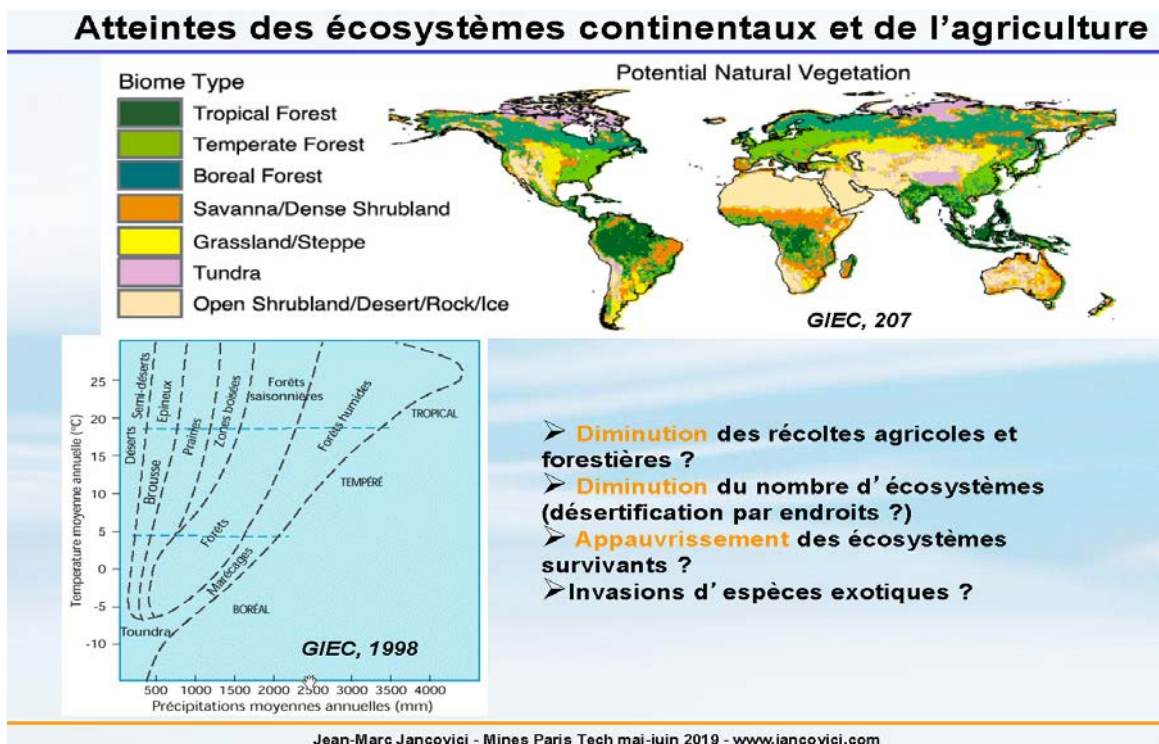
----

Résumé des paramètres physiques

- augmentation de la température, pas partout de la même manière
- plus d'énergie qui réchauffe l'océan que d'énergie qui réchauffe l'atmosphère
- réchauffement qui impacte le régime des pluies

----

## C / Impacts du changement climatique sur les écosystèmes



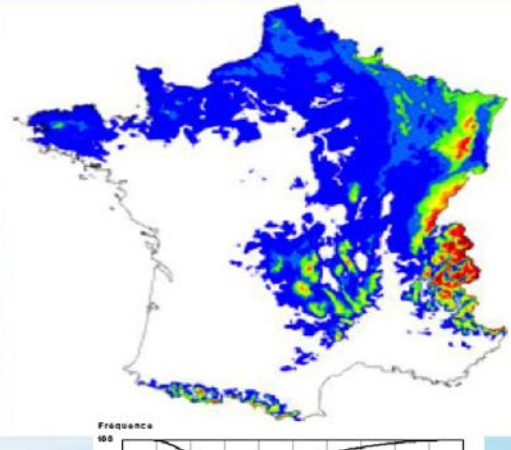
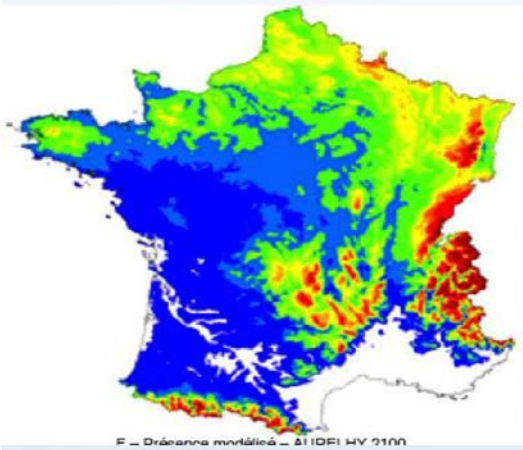
Première conséquence de ces phénomènes physiques sur le vivant : l'impact sur les écosystèmes.

Questions :

- diminution des récoltes (agricoles et forestières)
- diminution du nombre d'écosystèmes existants (désertification par endroits)
- appauvrissement des écosystèmes survivants
- invasions d'espèces exotiques

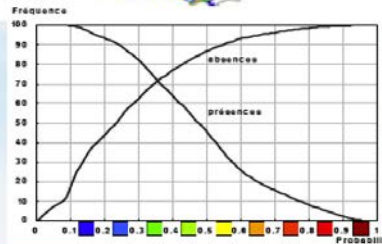
Le changement des régimes des pluies est le premier déterminant de reproduction des écosystèmes, la température joue un rôle moindre.

## Exemple : le hêtre en France



Aire de répartition du hêtre aujourd'hui (à gauche) et potentiel en 2100 (à droite) avec un scénario « peu émissif » (B2).

Source : Badeau et al., CARBOFOR, INRA Nancy, 2004



Jean-Marc Jancovici - Mines Paris Tech mai-juin 2019 - [www.jancovici.com](http://www.jancovici.com)

Avec le dérèglement climatique, la végétation va nécessairement changer avec une ligne directrice :

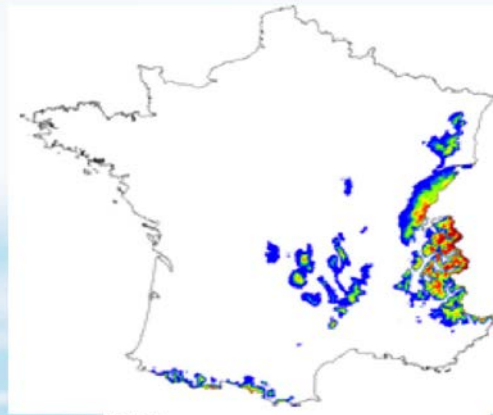
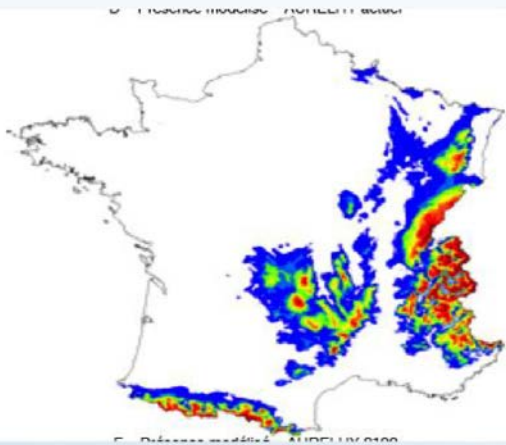
- beaucoup plus de disparitions que d'apparitions d'espèces
- du fait de la rapidité / de la brutalité du changement (pas le temps pour les espèces endémiques d'évoluer / de s'adapter)

Pour anticiper le changement de végétation, plusieurs paramètres qui s'interpénètrent sont à prendre en compte :

- non seulement l'évolution des températures et des précipitations
- mais également la concurrence entre espèces (apparition / prolifération des ravageurs, microbes, virus, champignons...), qui constituent des interactions très difficilement modélisables

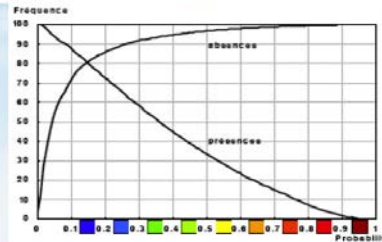
Exemple du hêtre : pour un scénario d'émission optimiste, le hêtre disparaît de l'ouest du pays (pointe bretonne mise à part) du fait du manque d'eau

## Exemple (2): le sapin en France



Aire de répartition du sapin aujourd'hui (à gauche) et potentiel en 2100 (à droite) avec un scénario « peu émissif » (B2).

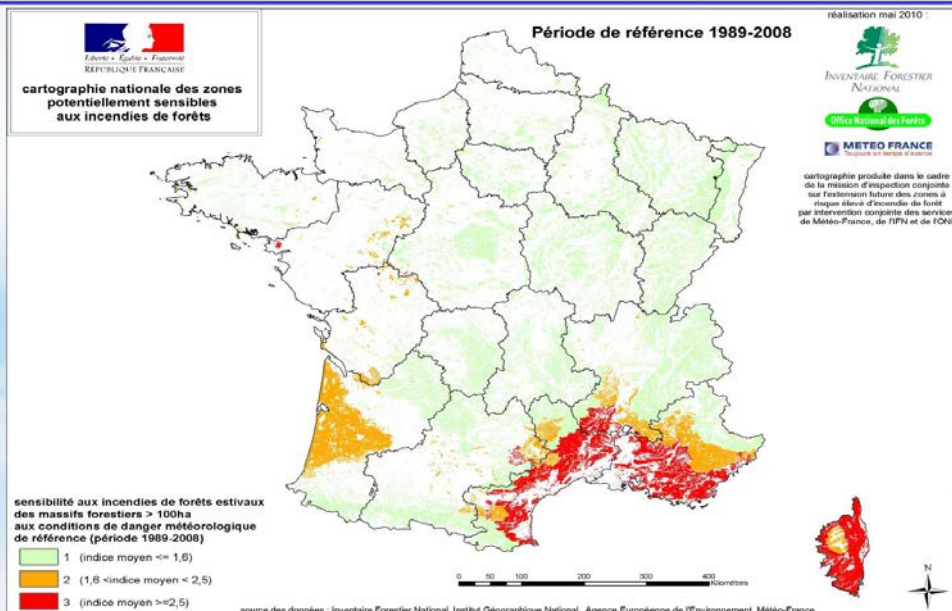
Source : Badeau et al., CARBOFOR, INRA Nancy, 2004



Jean-Marc Jancovici - Mines Paris Tech mai-juin 2019 - www.jancovici.com

Exemple du sapin : arbre qui apprécie la fraîcheur de l'hiver, par conséquent il ne subsiste que dans les massifs les plus élevés.

## Ca brûle ! (aujourd'hui)



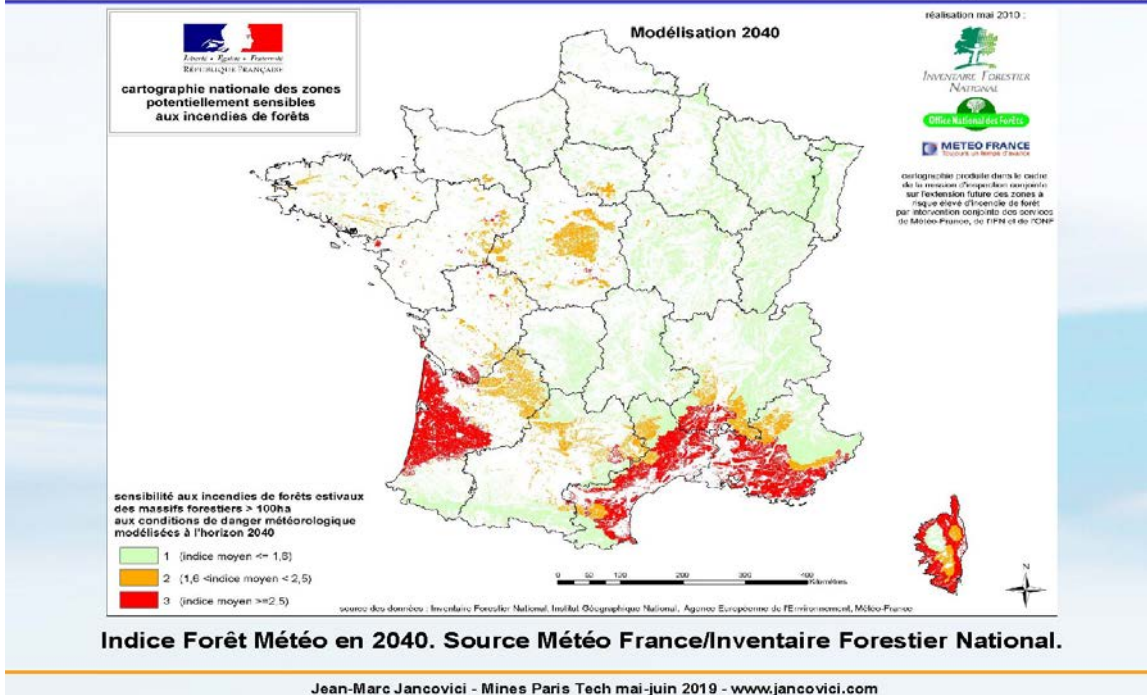
**Indice Forêt Météo aujourd'hui. L'IMF combine la probabilité d'un départ de feu ainsi que sa vitesse probable de propagation. Source Météo France/Inventaire Forestier National.**

Jean-Marc Jancovici - Mines Paris Tech mai-juin 2019 - www.jancovici.com

IMF : Indice Forêt Météo = inflammabilité des forêts

- probabilité d'un départ de feu
- et vitesse de propagation

## Ca brûle ! (aujourd'hui)



IMF en 2040 :

- fort inflammabilité des Landes
- inflammabilité de forêts jusque là épargnées, même au nord de la Loire

---

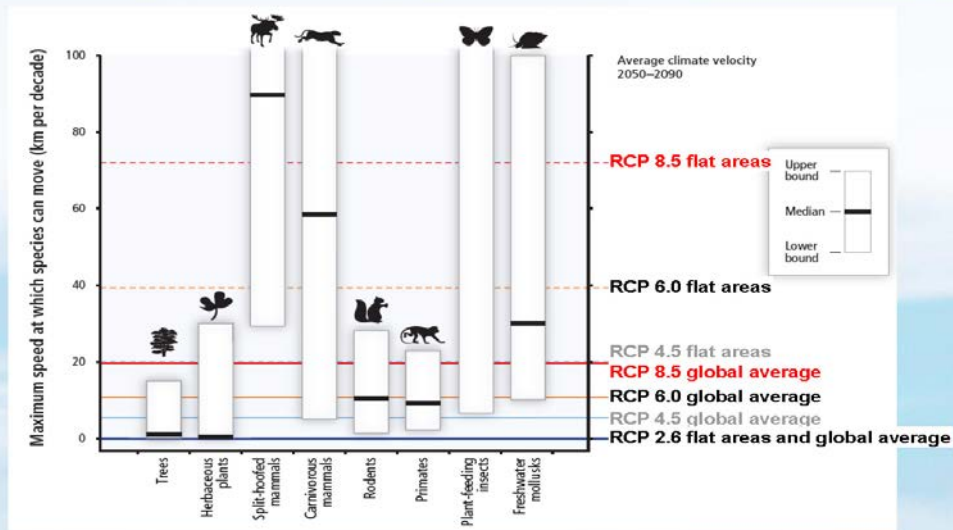
A propos de l'inertie du système climatique

2040 : les prévisions sont certaines, cela va advenir. Car quelque soit le scénario d'augmentation des émissions, la trajectoire d'augmentation des températures d'ici 2040 est la même. Dit autrement,

- l'évolution du climat d'ici 2040 est déjà actée, quelque soit les efforts / réductions d'émission de CO2 décidés aujourd'hui
- c'est ce qui se passera après 2040 qui est désormais en jeu dans les politiques de réduction des GES. Au mieux, on agit pour la génération suivante.

---

## Survivra, survivra pas ?



Vitesse de migration possible de diverses classes d'espèces, et vitesse de déplacement des zones climatiques vers les pôles.

Source GIEC, 5<sup>e</sup> rapport d'évaluation, 2014

Jean-Marc Jancovici - Mines Paris Tech mai-juin 2019 - [www.jancovici.com](http://www.jancovici.com)

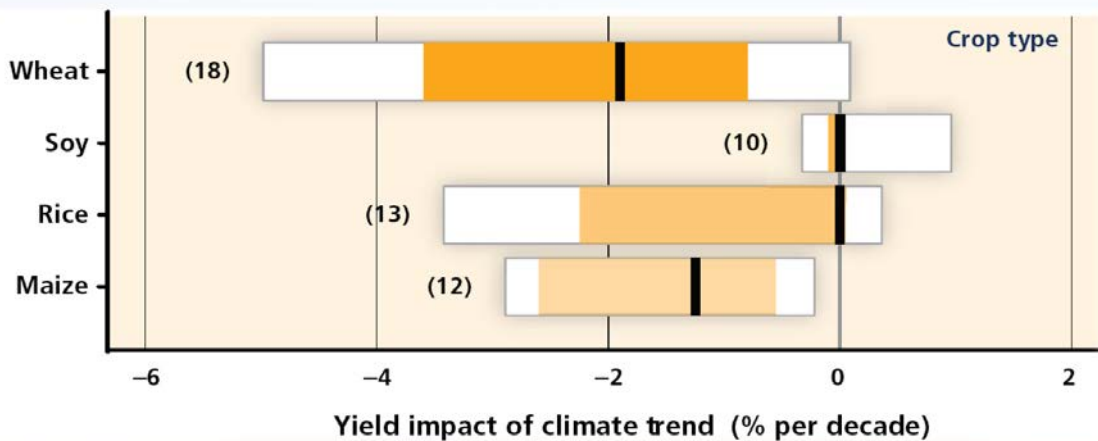
### A propos des écosystèmes sauvages.

Plage de migration possible des espèces (arbres, plantes herbacées, mammifères à sabots fendus, mammifères carnivores, rongeurs, primates, insectes se nourrissant de plantes, mollusques d'eau douce) en km par décennies.

Quelles espèces sont capables de suivre la remontée (en ° de latitude, poussée vers les pôles) des températures ? Sachant que les températures s'élèvent plus vite dans les plaines (explication : là où il y a du relief les espèces peuvent se réfugier en altitude) ?

- pour les arbres, les scénarii RCP 4.5 et 6.0 excèdent de beaucoup leur vitesse de déplacement moyenne. C'est logique : la maturité d'un arbre prend plusieurs décennies, par exemple 40 ans = 1 génération pour les chênes. L'essentiel des forêts est appelé à disparaître dans ces scénarii.
- pour la base des écosystèmes, c'est-à-dire les plantes, la vitesse de migration est très inférieure à la vitesse de déplacement des paramètres climatiques à venir. Conséquence : la perte d'écosystèmes.

## Poussera, poussera pas ?



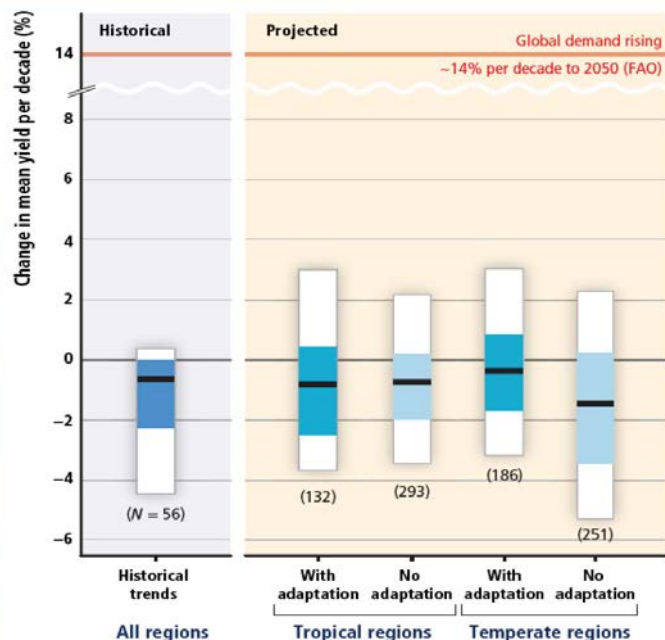
Tendance actuelle sur la variation décennale des rendements par type de production (moyenne mondiale). Source GIEC, 5<sup>e</sup> rapport d'évaluation, 2014

Jean-Marc Jancovici - Mines Paris Tech mai-juin 2019 - www.jancovici.com

### A propos des écosystèmes dirigés.

La tendance actuelle par décennies de la variation des rendements agricoles : dès aujourd'hui la production de blé et de maïs montrent une tendance à la baisse des rendements agricoles.

## Mangera, mangera pas ?



Variation des rendements (% par décennie) des cultures selon la zone climatique et l'existence ou non de mesures d'adaptation.

Source GIEC, 5<sup>e</sup> rapport d'évaluation, 2014

Jean-Marc Jancovici - Mines Paris Tech mai-juin 2019 - www.jancovici.com

Prévisions sur la variation des rendements (% par décennies) des cultures :

- selon la zone climatique
- et selon l'existence ou non de mesures d'adaptation

On s'attend à une tendance à la décroissance des rendements agricoles, même en prenant des mesures adaptées au dérèglement climatique dans les régions tempérées (d'ailleurs difficilement applicables car



cela comprend des infrastructures d'irrigation).

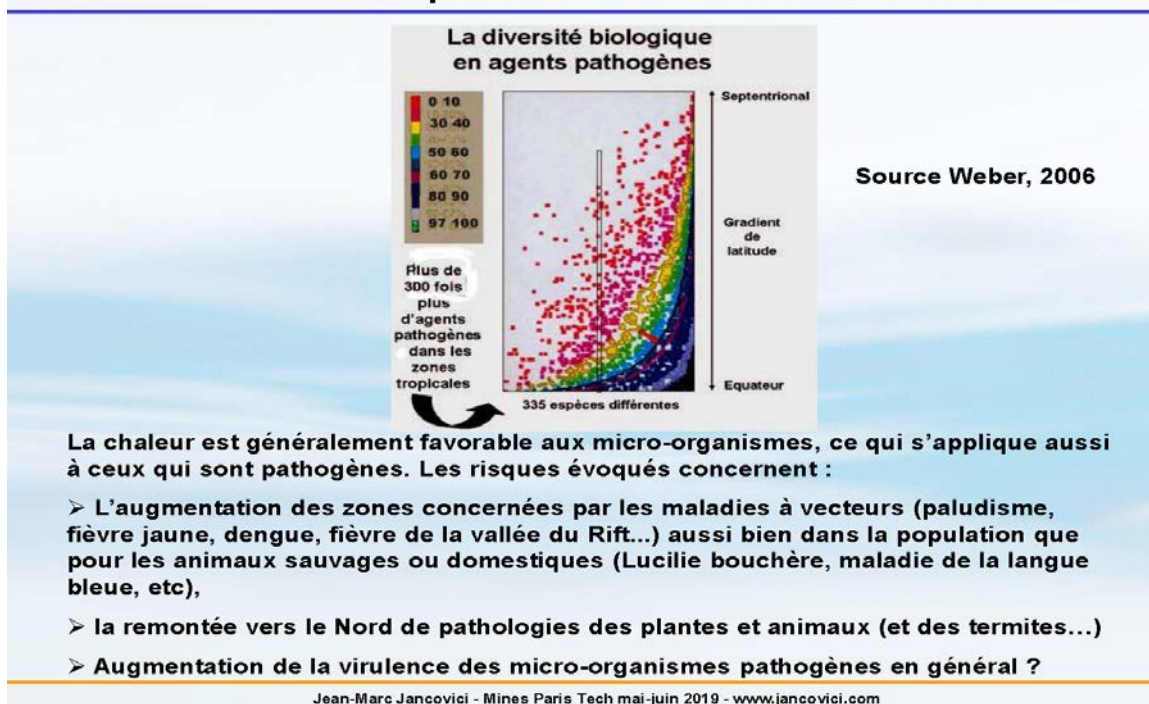
Conséquence prévisible (selon le vieux dicton "ventre affamé n'a point d'oreilles")

- dans un monde où la croissance de la population se poursuit
  - et où jusqu'en 2050, il est prévu 14% d'augmentation de la demande alimentaire par décennies
- > migrations, émeutes, révolutions, guerres, ...

Les effets du dérèglement climatique vont s'intensifier au cours du XXI<sup>e</sup> siècle, au moment où précisément l'énergie abondante fera défaut pour amortir les "accidents" (typiquement : réfrigération des denrées permettant d'amortir une année de mauvaises récoltes). Effet de tenailles entre intensification des processus et moindre capacité à y faire face.

## D / Les impacts du changement climatique : santé humaine

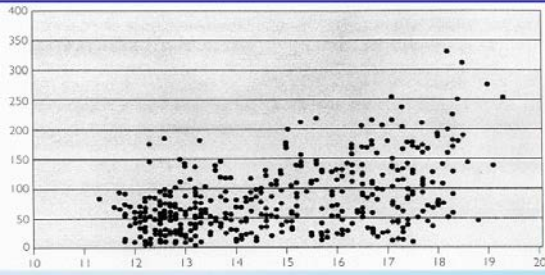
### Impacts sur la santé : fiche biodiversité !



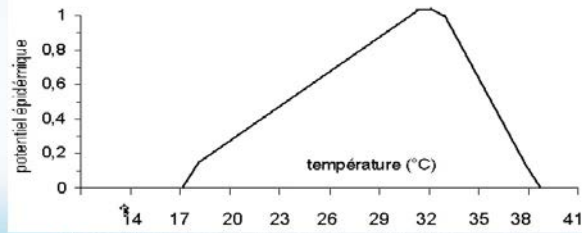
Autre conséquence du réchauffement climatique : changement de la biodiversité microbienne et donc risques pour la santé. Les zones tropicales abritent 300 fois plus d'agents pathogènes que les zones tempérées.

- élargissement géographique des zones concernées par les maladies à vecteurs (paludisme, fièvre jaune, dengue, ...) et touchant tout le vivant, hommes et cheptels domestiques et animaux sauvages
- les maladies des plantes et des animaux vont remonter vers le nord avec le réchauffement global
- possible augmentation de la virulence des micro-organismes pathogènes en général ?

## Impacts sur la santé : exemples

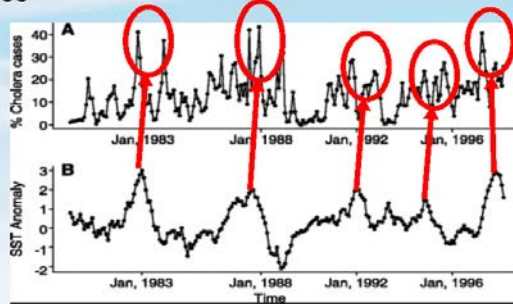


Nombre de cas mensuels de salmonellose en Nouvelle Zélande en fonction de la température moyenne. Source OMS, 2003



Potentiel épidémique du paludisme en fonction de la température. J.-P. Besançon, La jaune et La Rouge, 2000

Corrélation entre les cas de choléra et la température de surface de l'océan pacifique est.  
Source : Colwell, Science, 1996 et Pascual et col., Science, 2000.



Jean-Marc Jancovici - Mines Paris Tech mai-juin 2019 - [www.jancovici.com](http://www.jancovici.com)

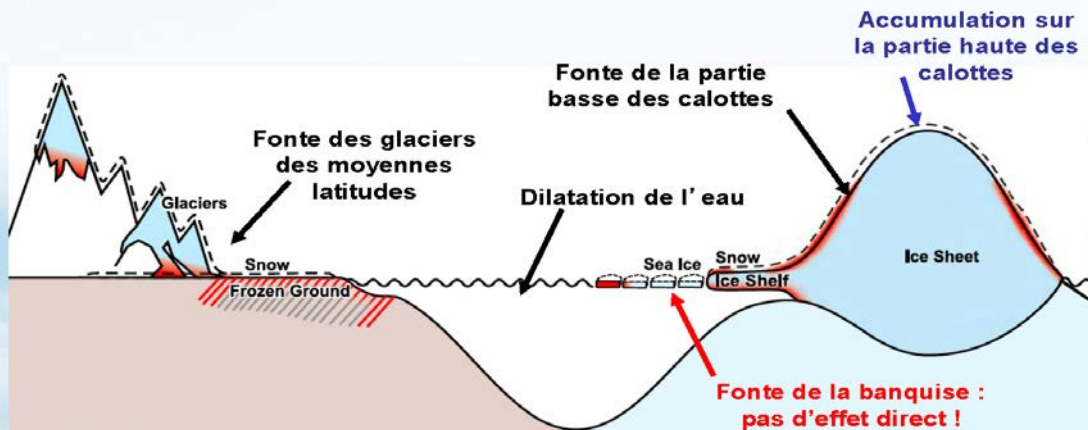
Exemples de pathologies et des effets de l'augmentation de température :

- Salmonellose
- Paludisme
- Choléra. Exemple les cas de choléra au Bangladesh augmentent parallèlement à l'augmentation de la température de surface du Pacifique-est (= el niño)

Mécanisme : el niño modifie le régime des pluies et provoque l'augmentation des eaux saumâtres (eau constituée d'un mélange d'eau douce et d'eau de mer) au Bangladesh, ce qui favorise le développement du vibrio du choléra.

## E / Les impacts du changement climatique : la montée des océans

## Elévation du niveau des océans : Archimède or not ?



**Facteurs contributeurs à la hausse du niveau de la mer.**

**D'après GIEC, 4<sup>e</sup> rapport d'évaluation, 2007**

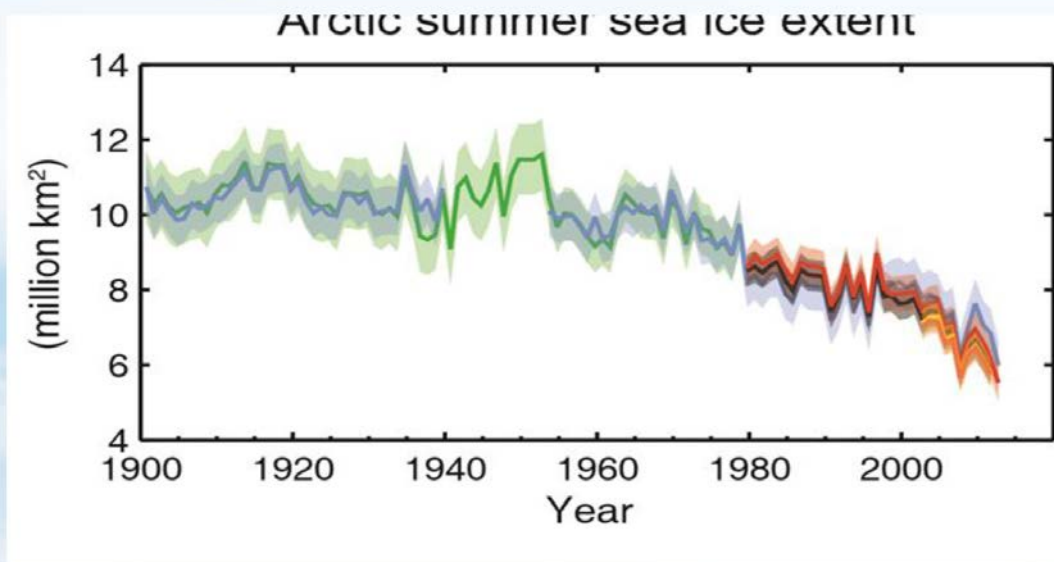
Jean-Marc Jancovici - Mines Paris Tech mai-juin 2019 - [www.jancovici.com](http://www.jancovici.com)

Autre conséquence du réchauffement global : l'élévation du niveau de la mer

Ce qui fait varier le niveau de la mer :

- la quantité de chaleur emmagasinée par la mer augmente, elle se dilate (l'eau chaude occupe plus de volume que l'eau froide)
- la fonte des glaciers (exemple la fonte vertigineuse de la Mer de glace, plus grand glacier français près de Chamonix)
- la fonte des calottes glacières est plus complexe à estimer : la base tend à fondre tandis qu'en altitude (à 3000 mètres) la neige accumulée tend à "reprendre" de l'eau à la mer. Aujourd'hui la tendance est à la fonte plus rapide de la base et donc à la contribution des calottes glacières à la hausse du niveau de la mer
- la fonte de la banquise n'a pas d'impact direct sur le niveau de la mer (théorème d'Archimède). Toutefois en substituant une matière réfléchissante par de l'eau de mer, une matière "sombre" particulièrement absorbante de chaleur, la fonte de la banquise contribue indirectement au réchauffement climatique et à la fonte accélérée de la calotte.

## Not Archimède : la banquise fond



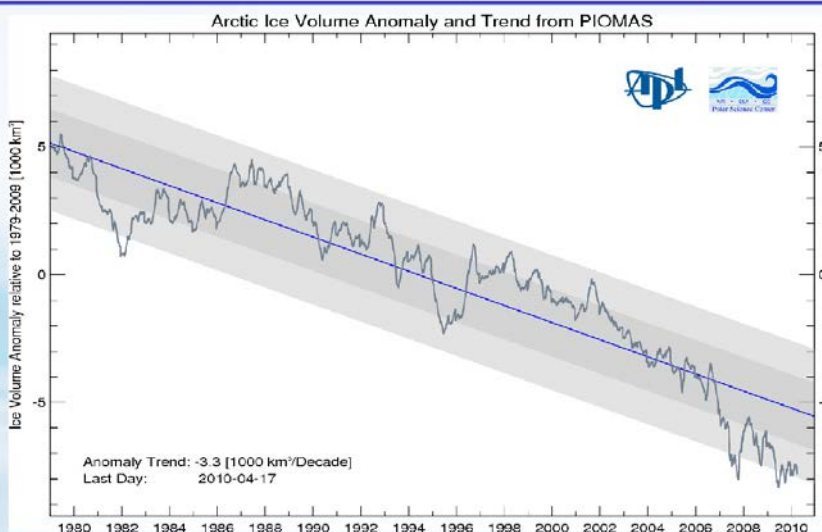
Evolution de l'étendue minimale de la banquise dans l'hémisphère Nord depuis 1900.

Source : IPCC, Technical Summary WG1, 2013

Jean-Marc Jancovici - Mines Paris Tech mai-juin 2019 - www.jancovici.com

L'étendue minimale de la banquise ne cesse de décroître (de 10 millions de km<sup>2</sup> au milieu du XXe siècle à moins de 6 millions aujourd'hui, divisée par 2 en 1 siècle), ce n'est qu'un début et directement lié au réchauffement global et parce que le phénomène est particulièrement marqué en Arctique.

## Not Archimède again : la banquise mincit aussi



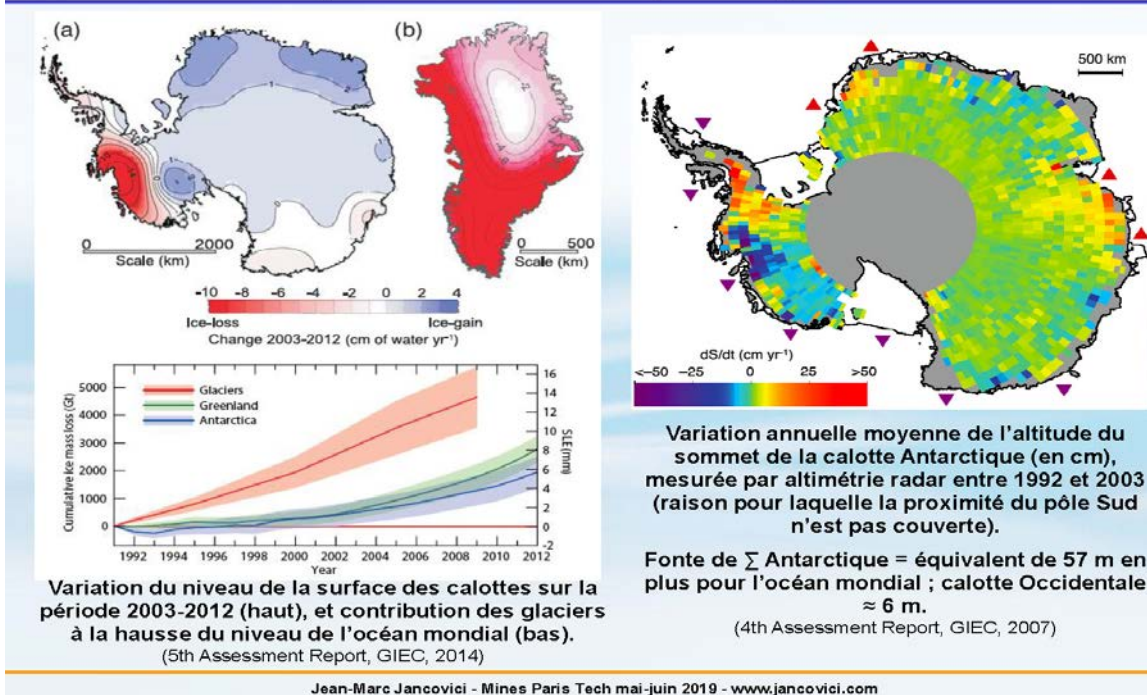
Evolution du volume calculé de la banquise de l'hémisphère Nord depuis 1979, en milliers de km<sup>3</sup> (c'est l'anomalie par rapport à la moyenne 1979-2009 qui est représentée).

Source : Polar Science Center, University of Washington, 2010

Jean-Marc Jancovici - Mines Paris Tech mai-juin 2019 - www.jancovici.com

La banquise diminue non seulement en superficie mais également en épaisseur. L'épaisseur de la banquise est connue depuis les années 1970 du fait des mesures militaires (passage des sous-marins nucléaires)

## Mais beaucoup d'Archimède se profile peut-être à l'horizon

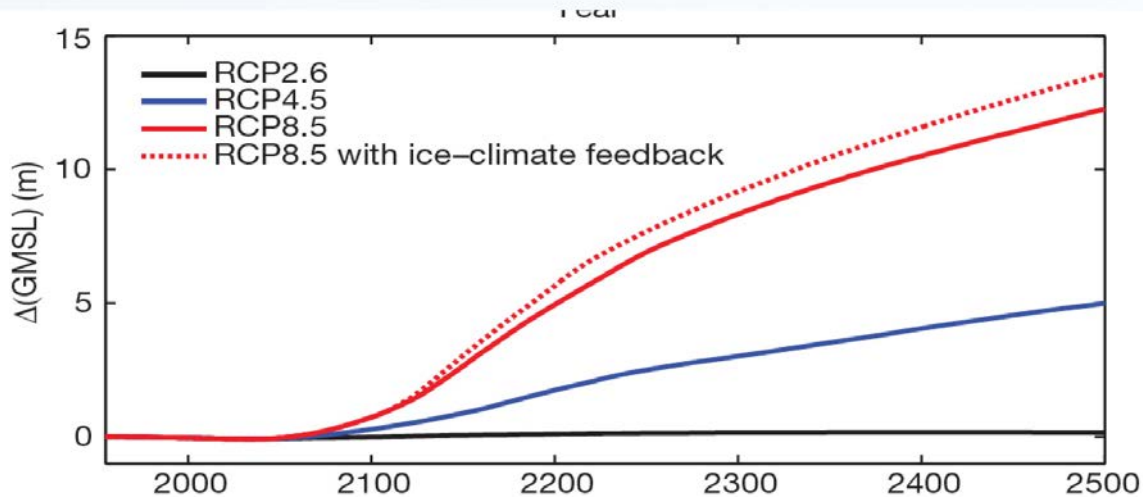


Du point de vue de la montée du niveau de la mer, la fonte des calottes est de loin le problème le plus préoccupant. Processus qui s'emballent puisque lorsque la calotte fond :

- son sommet perd en altitude, il est moins susceptible de se régénérer par l'accumulation de neige
- le sommet accumule alors davantage les poussières apportées par le vent (la neige fond, les poussières restent) qui absorbent les rayons solaires
- et parallèlement la fonte de la banquise qui seint la calotte contribue à chauffer l'eau environnante et donc à amplifier la fonte de la calotte

La calotte du Groënland a commencé à fondre (mesures satellitaires de l'épaisseur de la calotte) et est partie pour disparaître partiellement ou totalement dans les siècles à venir.

S'agissant de l'Antarctique, la partie ouest du continent a commencé à perdre du volume. Cette partie de l'Antarctique repose sur un socle rocheux sous-marin "déversant" (plus on s'éloigne de la côte, plus l'épaisseur de glace diminue). Dans cette configuration en pente, chaque glacier agit comme un arc-boutant pour celui qui se situe au-dessus. En quelques siècles et avec un réchauffement de  $+2^\circ$ , il existe une possibilité de disparition de l'Antarctique de l'ouest.



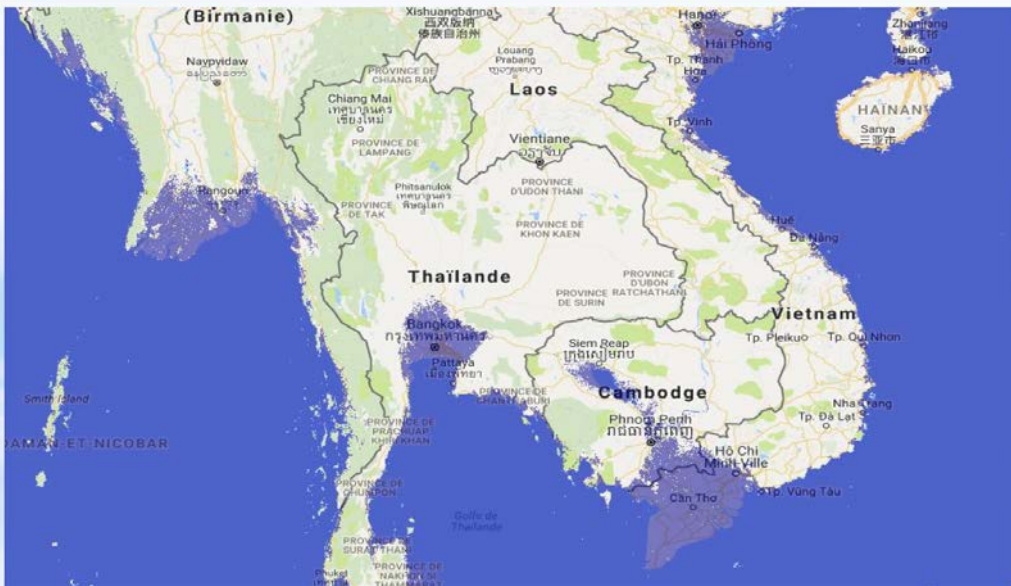
**Contribution possible de l'Antarctique à l'élévation de l'océan au cours des siècles à venir.**  
De Conto et al., Nature, Mars 2016

Jean-Marc Jancovici - Mines Paris Tech mai-juin 2019 - www.jancovici.com

Contribution des différentes sources d'élévation du niveau de la mer avec le scénario modéré d'un réchauffement de 2° :

- Antarctique 5 mètres en 5 siècle
  - Groënland 3 à 6 mètres sur la même période
  - 1 mètre de plus du fait de la dilation de l'eau de mer réchauffée
- ... le trait de côte ne sera plus le même.

### Gérer un port en 2478, ça risque d'être compliqué



**Zones inondées avec un océan plus haut de 9 m**

Jean-Marc Jancovici - Mines Paris Tech mai-juin 2019 - www.jancovici.com

## Gérer un port en 2478, ca risque d'être compliqué



Zones inondées avec un océan plus haut de 9 m

Jean-Marc Jancovici - Mines Paris Tech mai-juin 2019 - [www.jancovici.com](http://www.jancovici.com)

La question de la rapidité de la montée de la mer est discutée. Aucune garantie que le phénomène ne soit pas constaté à l'échelle des décennies plutôt que des siècles.

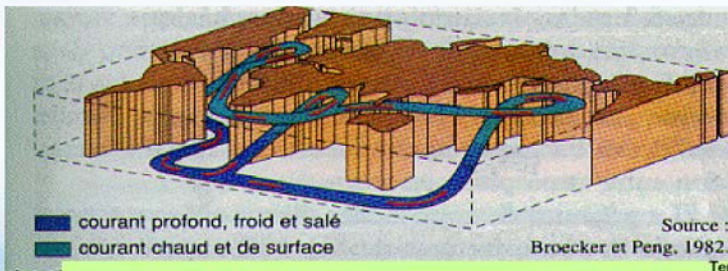
Montée de la mer problématique :

- forte activité économique sur le littoral (ports avec leurs infrastructures proche de la ligne de flottaison, raffineries pour stocker le pétrole acheminé par tankers, nombreuses centrales électriques situées en bord de mer pour leur refroidissement, une bonne partie des silos agricoles pour stocker les céréales acheminés par vraciers...)
- forte démographie littorale

Le phénomène de la montée des eaux ne se manifestera pas de manière douce et continue. Ce sera à l'occasion de phénomènes climatiques discontinus et violents, de tempêtes extrêmes et / ou inondations hivernales cumulées, que les défenses habituelles seront submergées et il ne sera pas possible de reconstruire à chaque débordement.

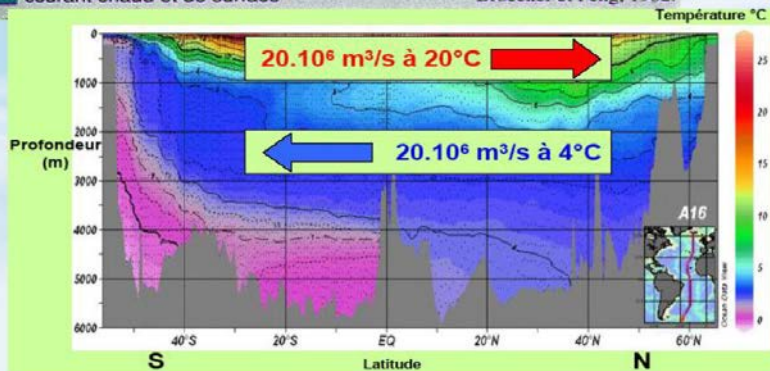
**F / Impact du réchauffement climatique sur la circulation des courants océaniques**

## Le Jour d'Après est-il pour demain ?



Une plongée des eaux a lieu en permanence près du Groenland. Cela influe de manière déterminante sur les transports de chaleur entre les latitudes.

Source : Broecker et Peng, 1982.



Les eaux profondes remontent également les éléments nutritifs (sels minéraux) indispensables à la faune marine de surface.

Jean-Marc Jancovici - Mines Paris Tech mai-juin 2019 - [www.jancovici.com](http://www.jancovici.com)

Conséquence supplémentaire du réchauffement climatique : la modification à large échelle de la circulation des courants océaniques.

Du fait des alizés qui poussent en permanence l'eau dans le même sens au niveau de l'équateur et de la force de Coriolis, il y a un grand mouvement de circulation dans les océans :

- est / ouest en surface, avec un contournement de l'Afrique par le sud
- ouest / est en profondeur, avec une plongée de l'eau au sud du Groënland

Au Groënland, l'eau est particulièrement froide et salée, c'est-à-dire particulièrement dense. L'eau y est enrichie en sel notamment en raison du processus de formation de la banquise (il s'agit d'eau salée glacée mais moins salée que l'eau de mer, en se formant la banquise expulse du sel en mer).

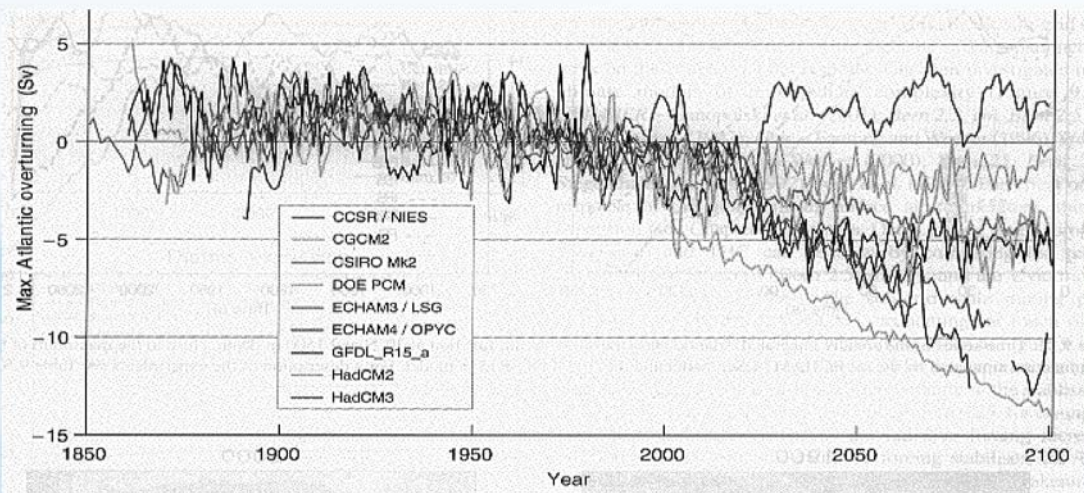
Particulièrement froide et salée, l'eau plonge vers les profondeurs et crée un syphon qui permet de comprendre que :

- la dérive nord-atlantique remonte jusqu'au sud du Groënland
- le réchauffement est moins marqué au sud du Groënland (l'enfouissement de la chaleur de surface agit comme une pompe à chaleur, phénomène unique sur le globe)

La question qui taraude les climatologues : est-ce que cette plongée dans les eaux profondes peut être affectée par le dérèglement climatique ? Si oui, le refroidissement au sud du Groënland disparaît.



## Petit coup de frein ou gros crash, là est la question



Évolution du flux nord atlantique ( $1\text{Sv} = 10^6 \text{ m}^3/\text{s}$ ) pour le scénario IS 92a (720 ppmv de  $\text{CO}_2$  en 2100 ; élévation de température moyenne de  $2,5^\circ \text{C}$  en 2100). Le niveau actuel est de 20 à 25 Sv. Source : Climate Change 2001, The Scientific Basis, GIEC

Jean-Marc Jancovici - Mines Paris Tech mai-juin 2019 - [www.jancovici.com](http://www.jancovici.com)

Question de l'affaiblissement de cette circulation océanique. Oui, car le réchauffement climatique n'est pas distribué de manière uniforme :

- réchauffement des tropiques moins important que le réchauffement de l'Arctique
- amoindrissement de la différence de température entre les tropiques et l'Arctique
- affaiblissement de la force de circulation

Les simulations du GIEC montrent que le débit de la dérive Nord-atlantique va baisser progressivement (entre -5 et -10 millions de  $\text{m}^3$  / seconde d'ici la fin du XXI<sup>e</sup> siècle).

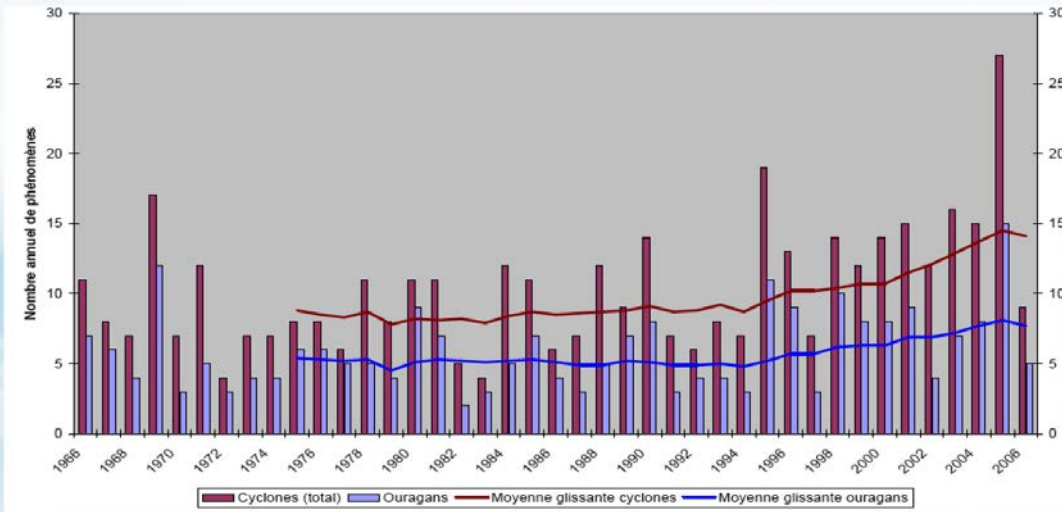
Des épisodes connus d'arrêts brutaux de la dérive Nord-atlantique :

- en période glaciaire
- au moment d'énormes débâcles d'icebergs qui - en chariant de grandes quantités d'eau douce - ont fait chuté la densité de l'océan Nord-atlantique et interrompu le syphon

Ces épisodes très brutaux sont constatés dans l'évolution très sensible de la végétation en quelques dizaines d'années, à partir des pollens retrouvés dans les carottages des sédiments près des côtes.

## G / Impact du changement climatique sur l'intensification des phénomènes météorologiques extrêmes

## Déjà plus de cyclones ? P'têt ben qu'oui, p'têt ben qu'non...



Evolution du nombre de cyclone sur l'Atlantique tropical de 1966 à 2006. Source Météo France

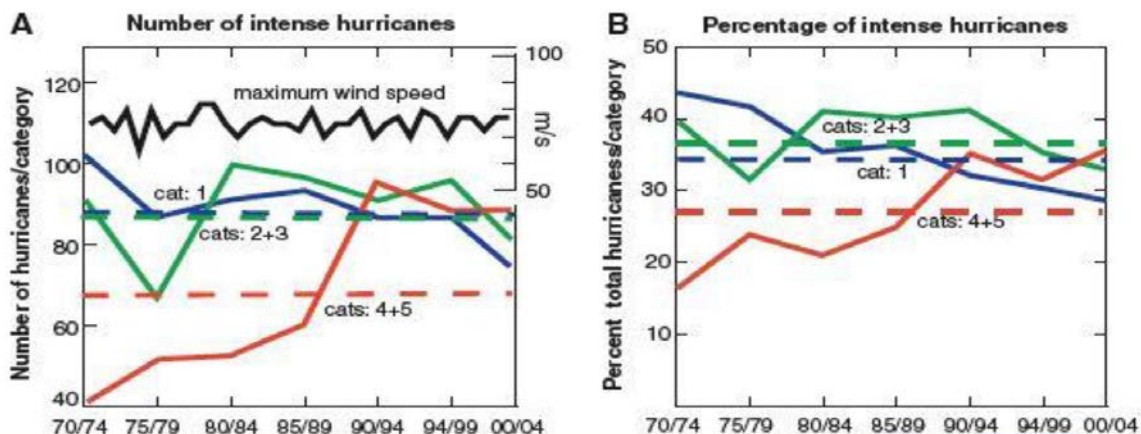
Jean-Marc Jancovici - Mines Paris Tech mai-juin 2019 - www.jancovici.com

Autre conséquence : l'intensification des phénomènes météorologiques extrêmes. Processus déjà à l'oeuvre aujourd'hui.

Explication physique : pompe convective qui s'intensifie du fait

- d'une différence de température accrue entre une surface terrestre (troposphère) chaude / réchauffée et une stratosphère froide / refroidie
- de l'évaporation qui augmente

## Une puissance cyclonique accrue ? P'têt ben qu'oui....

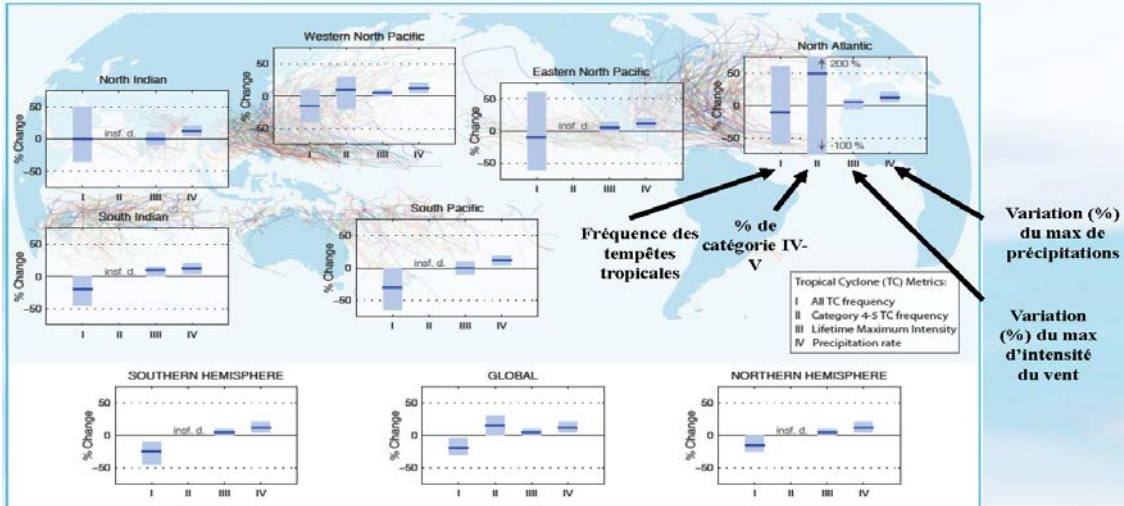


Evolution sur 30 ans du nombre de cyclone dans le monde par catégorie (gauche), et proportion de chaque catégorie dans le total (droite). Source Science, 2005

Jean-Marc Jancovici - Mines Paris Tech mai-juin 2019 - www.jancovici.com

Le nombre de cyclones dans l'Atlantique nord a une légère tendance à augmenter mais c'est surtout leur intensité qui a tendance à fortement s'accroître. Les cyclones de Catégories 4 et 5 (les plus violents) ont sensiblement augmenté durant les dernières décennies (40 en 1970, plus de 90 en 2000).

## Tourne (et monte) Marcel



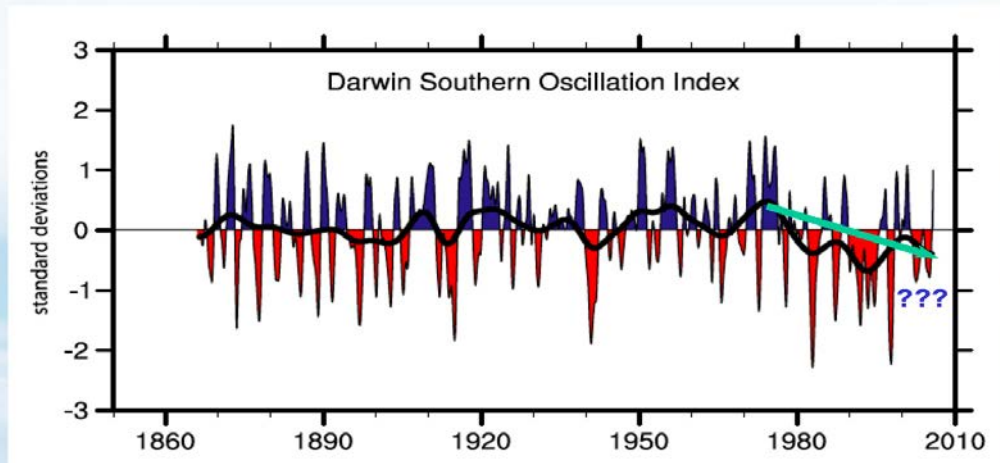
Variation en 2080-2100 (par rapport à 2000-2019) de caractéristiques diverses des tempêtes tropicales. Source GIEC, 5<sup>e</sup> rapport d'évaluation, 2014

Jean-Marc Jancovici - Mines Paris Tech mai-juin 2019 - www.jancovici.com

Les prévisions confirment les tendances observées dès aujourd'hui.

- les précipitations et le vent vont s'intensifier
- pas nécessairement plus de cyclones (cela dépendra des régions) mais quand ils se formeront il seront en moyenne plus destructeurs

## Plus d'El Nino ? A voir...



Evolution de l'indice mesurant l'intensité de l'oscillation El Nino-La Nina. Le bleu correspond à une situation « La Nina », le rouge à une situation « El Nino.

Source : GIEC, AR4, 2007

Jean-Marc Jancovici - Mines Paris Tech mai-juin 2019 - www.jancovici.com

Interrogations à propos de l'oscillation El niño / La niña. Va-t-elle être modifiée par le réchauffement climatique ? Difficile de trancher même si on constate dans les dernière décennies :

- moins de situations El niño (les côtes du Chili, du Pérou et de l'Équateur sont baignées par le courant froid de Humboldt)
- plus de situations El niño (températures anormalement élevées de l'eau dans la partie est de l'océan Paci-

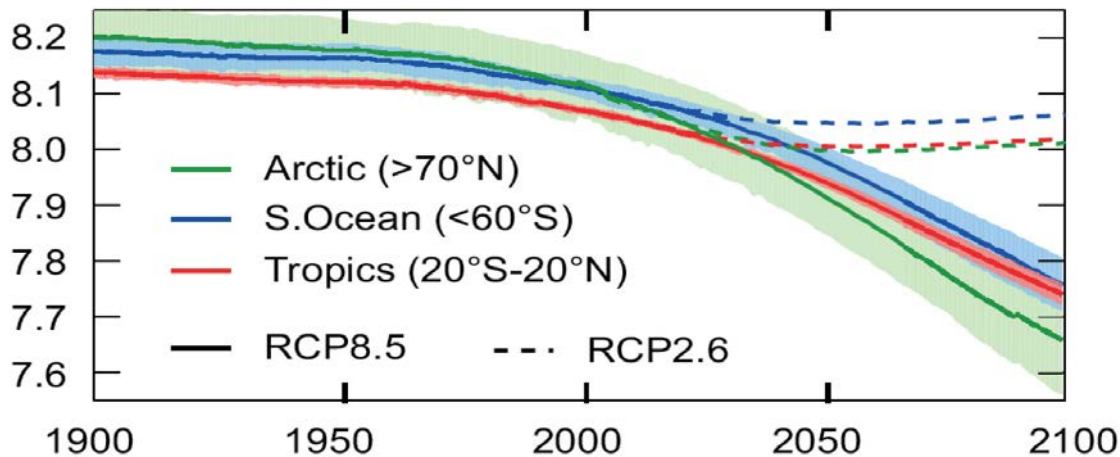
fique sud, se déclenche fin décembre en principe, pour une durée de 9 mois à 2 ans et tous les 2 à 7 ans)

Plus El niño et La niña sont intenses, plus les phénomènes extrêmes sont importants et peuvent

- dérouter les cyclones tropicaux de leurs routes habituelles, y compris la mousson,
- déplacer les zones de précipitations et de sécheresse

## H / Impact du changement climatique : l'acidification des océans

### Il n'est pas toujours souhaitable d'être acide



Simulation de variation du pH de l'océan d'ici 2100 en fonction du scénario.

Source IPCC, 5<sup>e</sup> rapport d'évaluation, 2014

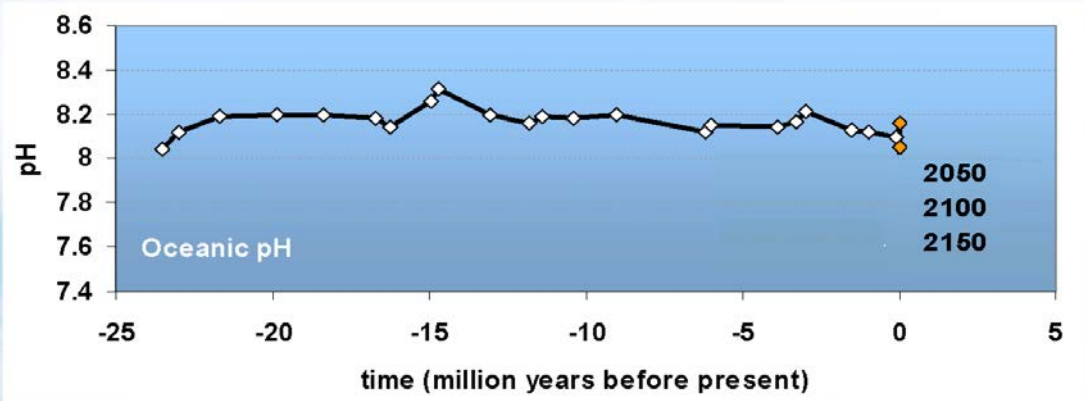
Jean-Marc Jancovici - Mines Paris Tech mai-juin 2019 - [www.jancovici.com](http://www.jancovici.com)

Autre conséquence du dérèglement climatique : l'acidification de tous les océans.

Phénomène physique :

- une partie du CO<sub>2</sub> supplémentaire passe dans l'océan (= équilibrage de pression partielle)
- réaction du CO<sub>2</sub> et formation d'hydrogencarbonate et d'ion H<sup>+</sup> qui va acidifier l'eau

## Le pH de l'océan, bien plus stable que tout régime politique !



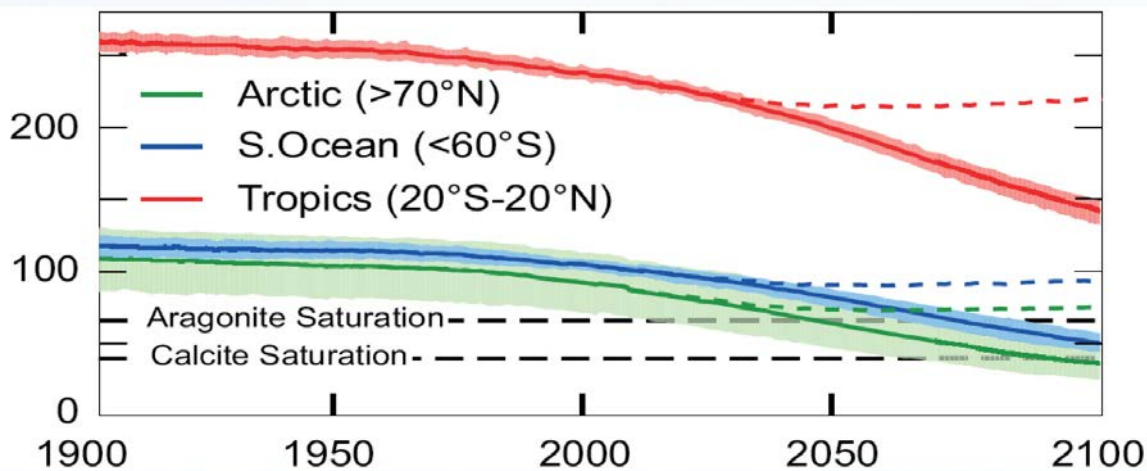
Variation du pH de l'océan reconstruite depuis 24 millions d'années, et évolution possible à l'avenir.

Source Turley et al. 2006

Jean-Marc Jancovici - Mines Paris Tech mai-juin 2019 - www.jancovici.com

La stabilité du Ph des océans est une constante depuis 25 millions d'années. Les changements apportés aujourd'hui avec le supplément de CO<sub>2</sub> est extrêmement disruptif. Les modifications prévues sont très brutales à l'échelle des temps géologiques.

## Moins de calcaire produit = pas de pot pour les coraux

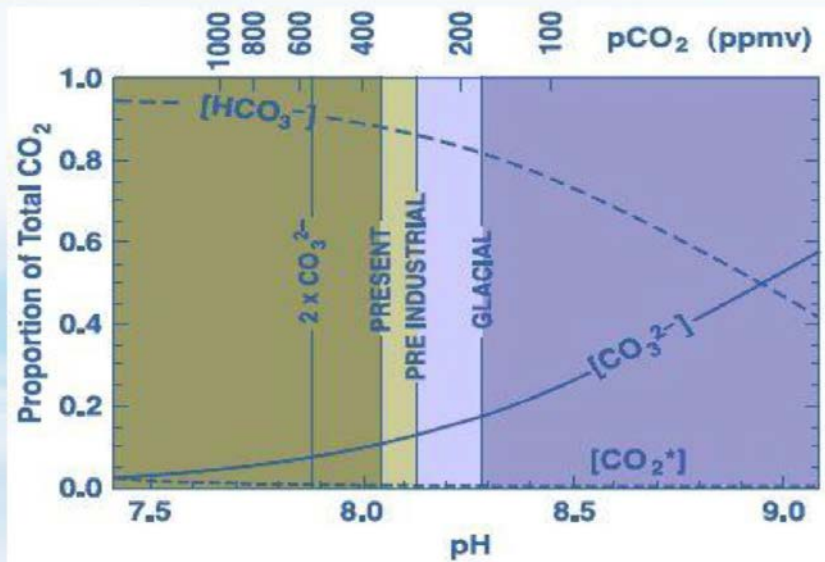


Concentration océanique en ions CO<sub>3</sub><sup>2-</sup> (µmoles par kg) en fonction de la concentration atmosphérique en CO<sub>2</sub>. Source IPCC, 5<sup>e</sup> rapport d'évaluation, 2014

Jean-Marc Jancovici - Mines Paris Tech mai-juin 2019 - www.jancovici.com

L'acidification des océans sera fatale à plusieurs espèces vivantes à commencer par les coraux mais également les planctons qui ont besoin de synthétiser du calcaire (de l'aragonite, non pas la calcite qui est l'autre forme du calcaire). L'aragonite est utilisée par les formes de vie planctoniques qui se forment des coquilles. Si ces espèces de planctons ne parviennent plus à former ces coquilles, elles disparaissent.

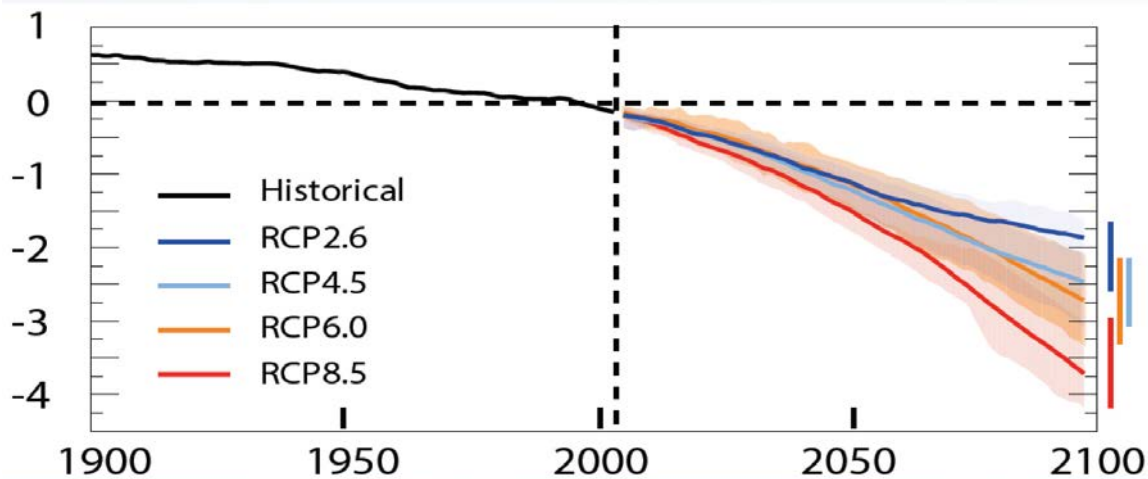
## Un océan plus acide = moins de calcaire produit



Proportions respectives de carbonates et de bicarbonates en fonction du pH. Dans un océan plus acide, la disponibilité en carbonates diminue.

Jean-Marc Jancovici - Mines Paris Tech mai-juin 2019 - [www.jancovici.com](http://www.jancovici.com)

## Dissous, ou pas dissous ?

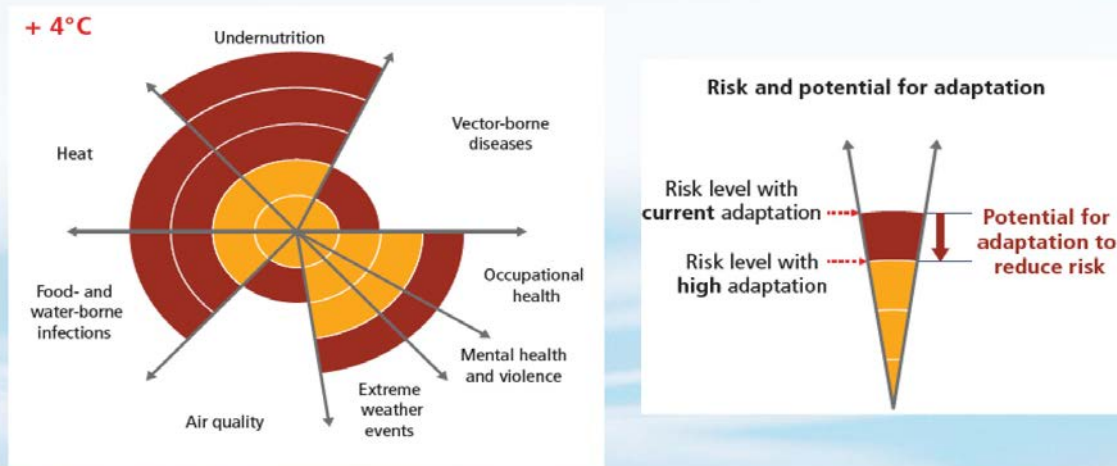


Variation (en %) du contenu de l'océan en oxygène dissous selon les scénarios de forçage radiatif. Source IPCC, 5<sup>e</sup> rapport d'évaluation, 2014

Jean-Marc Jancovici - Mines Paris Tech mai-juin 2019 - [www.jancovici.com](http://www.jancovici.com)

## I / Impact du changement climatique pour l'espèce humaine

## S'adaptera, s'adaptera pas ?



**Illustration des divers risques sanitaires liés au changement climatique à l'horizon du siècle. Source GIEC, 5<sup>e</sup> rapport d'évaluation, 2014**

Jean-Marc Jancovici - Mines Paris Tech mai-juin 2019 - [www.jancovici.com](http://www.jancovici.com)

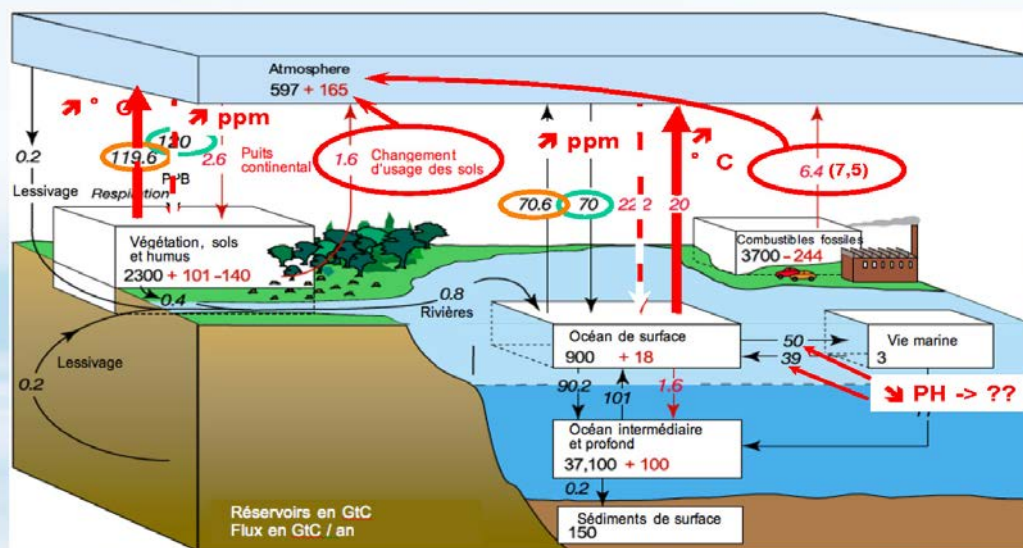
Les risques pour l'espèce humaine.

- malnutrition
- maladie à transmission vectorielle
- santé au travail
- santé mentale et violence
- événements météorologiques extrêmes
- qualité de l'air
- infections d'origines alimentaire et hydrique
- chaleur

Peuvent être classés en risques directs (événements climatiques...) et indirects (géopolitiques...)

## Chapitre 23 - Les retro-actions positives du système climatique

## Plus de CO<sub>2</sub> = plus chaud, mais l'inverse est vrai aussi !



Chiffres en noir : stocks et flux préindustriels, en milliards de tonnes de carbone. Chiffres en rouge : modifications d'origine anthropique (flux pour la moyenne de la décennie 1990 ; modifications des stocks sur la période 1750-1994). Source GIEC, 4<sup>e</sup> rapport d'évaluation, 2007

Jean-Marc Jancovici - Mines Paris Tech mai-juin 2019 - www.jancovici.com

### Asservissement du cycle du carbone et du climat

#### En situation pré-industrielle

- L'océan échange du carbone avec l'atmosphère car la capacité à dissoudre du carbone est plus élevée quand l'eau est froide. Partout où se trouvent des courants qui refroidissent l'eau, se produit un flux descendant de CO<sub>2</sub>. Exemple : la dérive Nord-atlantique est une pompe à CO<sub>2</sub>, au contraire du courant du Labrador au nord du Canada qui est un émetteur de CO<sub>2</sub>.
- Le cycle de la végétation est un deuxième vecteur d'échange de carbone. Pour croître les plantes prélèvent du carbone sous forme de CO<sub>2</sub> dans l'atmosphère, CO<sub>2</sub> qui est restitué à l'atmosphère sous forme de respiration (des animaux microscopique via la décomposition ou macroscopique)

#### Action des hommes

- déforestation
  - déstockage de combustibles fossiles
- ... c'est-à-dire on prend du carbone qui se trouve dans un stock (végétation ou sous-sol) pour le placer dans l'atmosphère

#### L'augmentation de la concentration de CO<sub>2</sub> dans l'atmosphère provoque

- l'augmentation de sa température
- l'augmentation de la surface de l'eau
- renvoie davantage de CO<sub>2</sub> dans l'atmosphère

#### Pour les échanges atmosphère / océan

Puisqu'il y a plus de CO<sub>2</sub> dans l'atmosphère que dans l'océan en pression partielle, on crée un flux descendant de CO<sub>2</sub> de l'atmosphère vers l'océan. Actuellement les deux s'équilibrent.

#### Pour les échanges atmosphère / surface émergées

Puisqu'il y a plus de CO<sub>2</sub> dans l'atmosphère, il y a plus de nourriture pour les plantes (accroissement de la photosynthèse). Mais en même temps l'augmentation de la température favorise le développement microbien, donc l'émission de CO<sub>2</sub> par les terres émergées.

#### A plus ou moins long terme sur le surface émergées

L'augmentation de température va s'intensifier, intensification de l'émission de carbone par les sols et



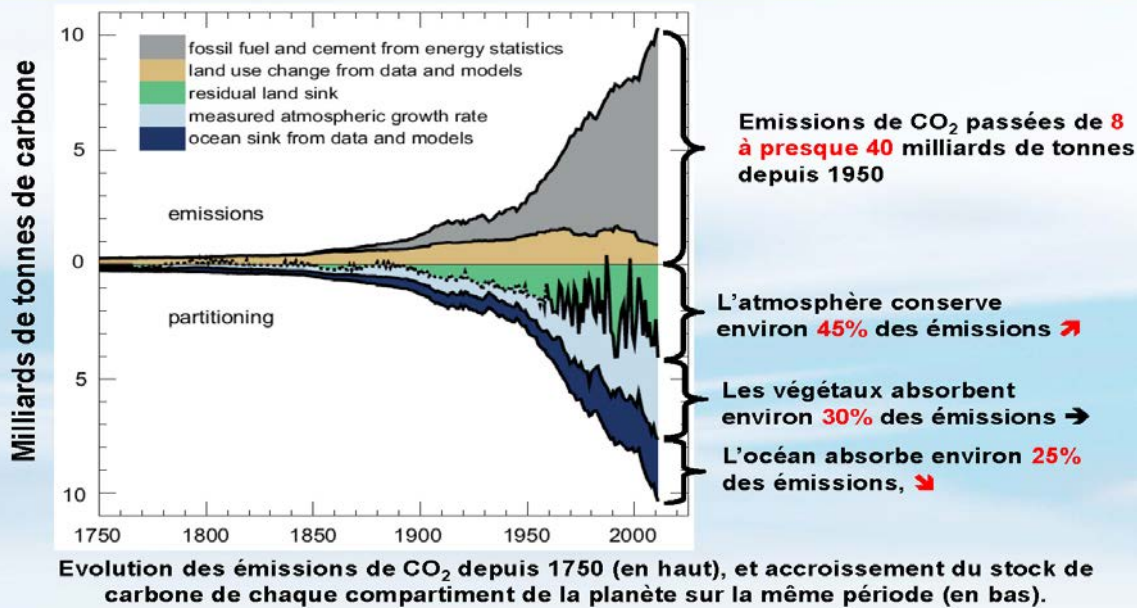
affaiblissement de la photosynthèse (les écosystèmes vont de plus en plus mal supporter l'élévation de température et le stress hydrique).

A plus ou moins long terme dans les océans

Intensification du CO<sub>2</sub> rejeté par l'eau en même temps que le flux descendant (enfouissement du CO<sub>2</sub> dans l'océan) va se réduire.

Ensemble de rétroactions positives qui affecte le système climatique, qui a donc la capacité à "s'emballer" à cause de la rétroaction du climat sur le cycle du carbone. Le système climatique trouvera son point d'équilibre mais rien n'assure que ce point soit compatible avec l'écosystème existant.

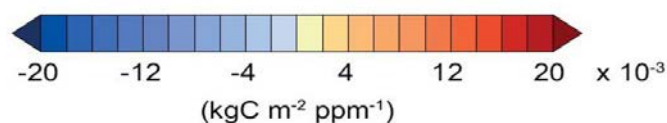
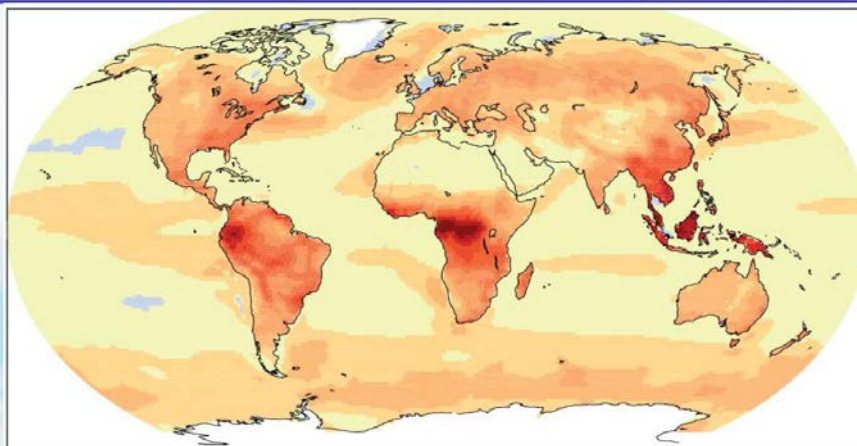
## Le CO<sub>2</sub> dans l'air : un petit tour et puis s'en va... ou pas ?



Source : IPCC, 5<sup>e</sup> rapport d'évaluation, 2013

Jean-Marc Jancovici - Mines Paris Tech mai-juin 2019 - www.jancovici.com

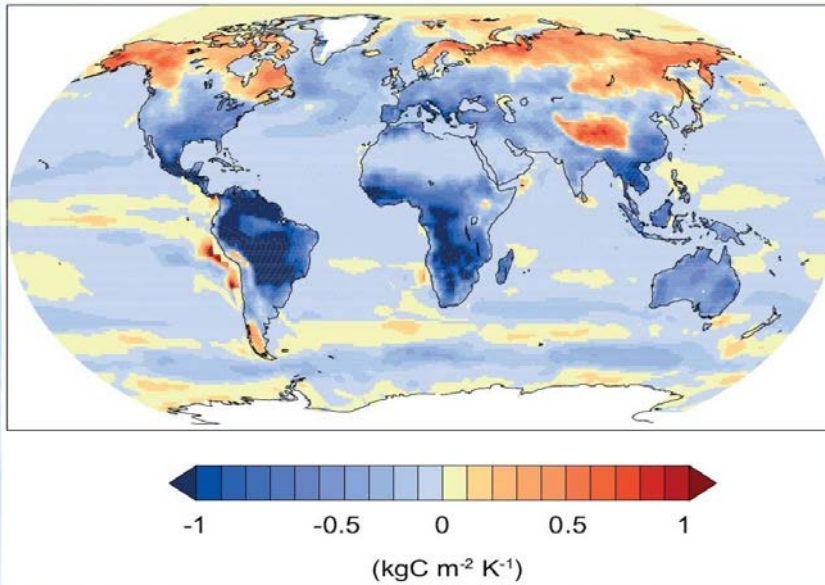
## Mets la pression ! (partielle)



Réponse du flux net de carbone vers le sol par ppm additionnel de CO<sub>2</sub> (à climat constant).  
Source IPCC, 5<sup>e</sup> rapport d'évaluation, 2014

Jean-Marc Jancovici - Mines Paris Tech mai-juin 2019 - www.jancovici.com

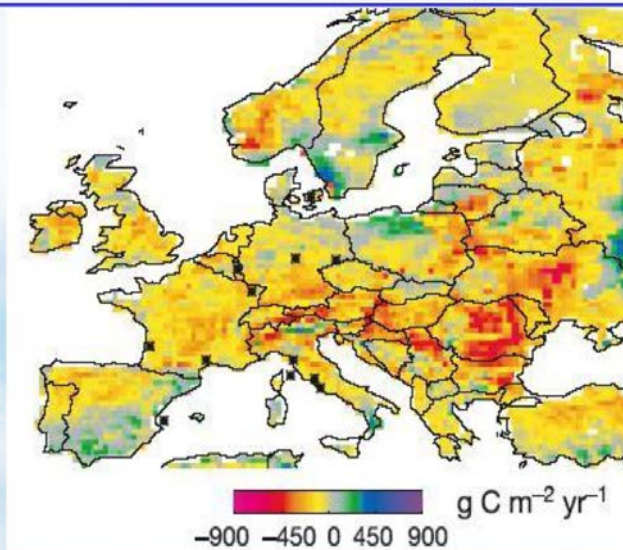
## L'amortisseur amortit un peu moins bien



Réponse du flux net de carbone vers le sol par K de température additionnelle. Source IPCC, 5<sup>e</sup> rapport d'évaluation, 2014

Jean-Marc Jancovici - Mines Paris Tech mai-juin 2019 - [www.jancovici.com](http://www.jancovici.com)

## Le déstockage est-il pour bientôt ?

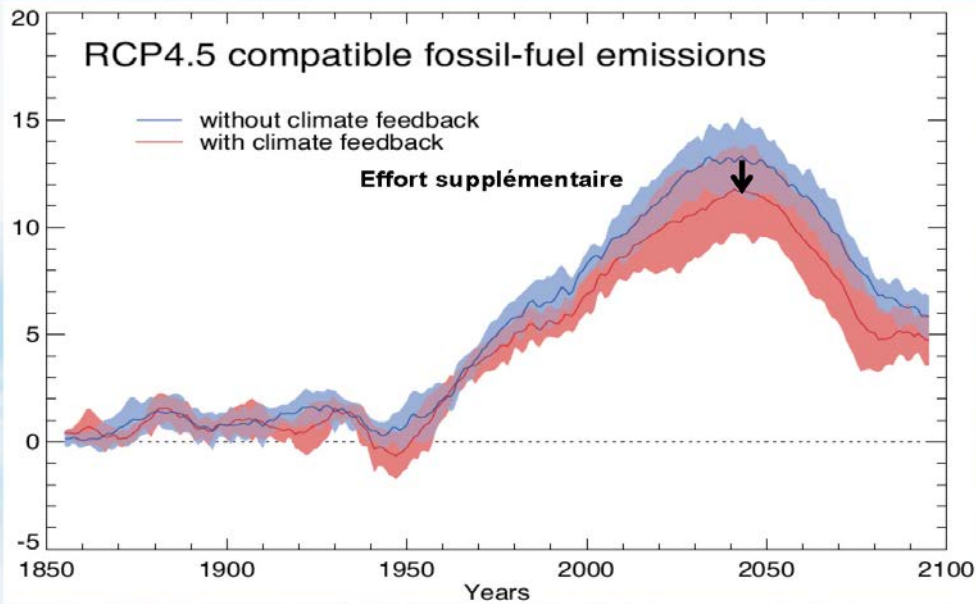


Comparaison de la productivité primaire nette des écosystèmes en 2003 avec la moyenne 1998-2002. Quasiment partout le flux descendant s'est affaibli, et en 2003 les écosystèmes européens ont « recraché » 4 ans de « pompage » du  $\text{CO}_2$

Source Ciais et al., Nature, septembre 2005

Jean-Marc Jancovici - Mines Paris Tech mai-juin 2019 - [www.jancovici.com](http://www.jancovici.com)

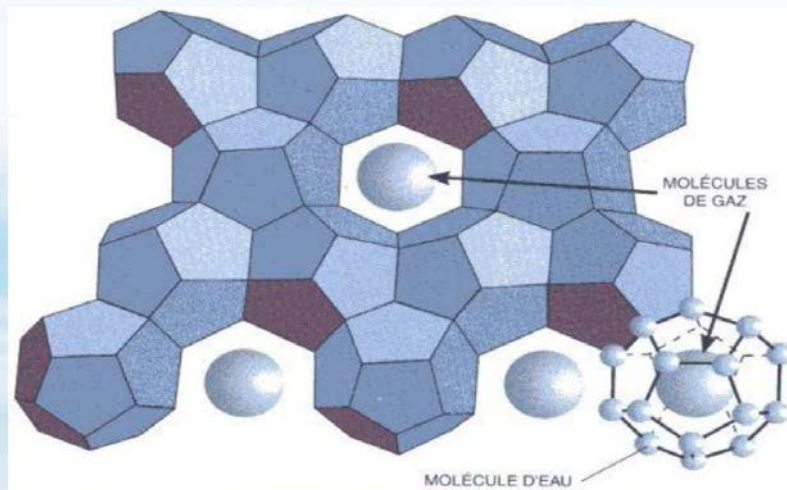
## Et l'ingénieur devra bosser un peu plus



Trajectoire maximale pour les émissions pour limiter le forçage radiatif . Source IPCC, 5<sup>e</sup> rapport d'évaluation, 2014

Jean-Marc Jancovici - Mines Paris Tech mai-juin 2019 - [www.jancovici.com](http://www.jancovici.com)

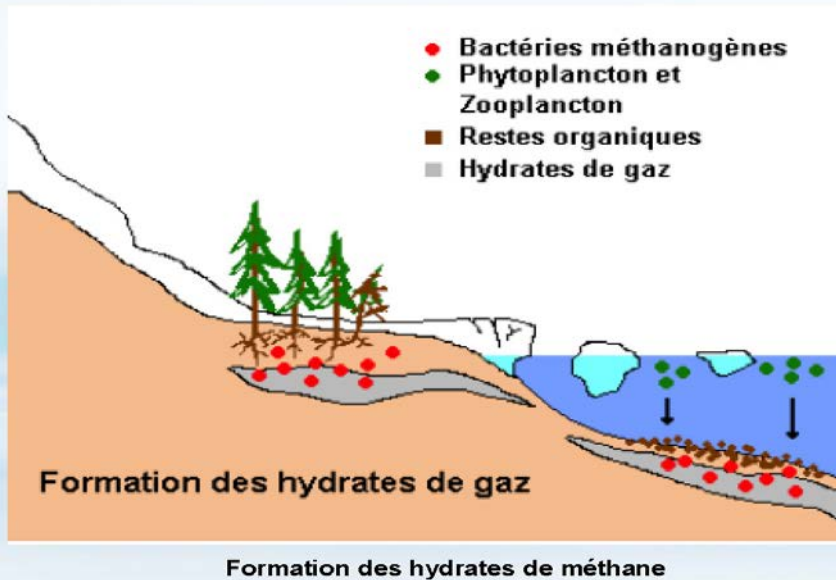
## Encore plus fort : les hydrates de méthane



Structure d'un hydrate de méthane

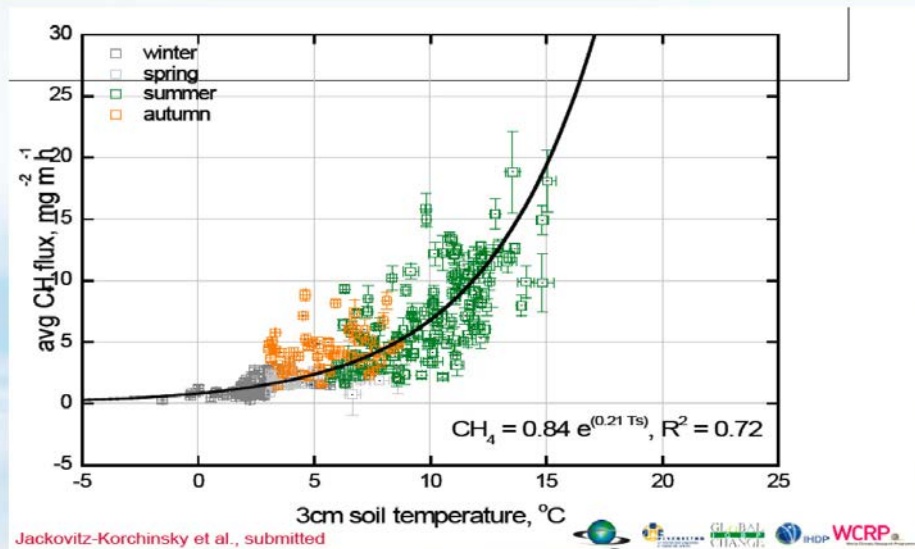
Jean-Marc Jancovici - Mines Paris Tech mai-juin 2019 - [www.jancovici.com](http://www.jancovici.com)

## Les hydrates de méthane, c'est où ?



Jean-Marc Jancovici - Mines Paris Tech mai-juin 2019 - [www.jancovici.com](http://www.jancovici.com)

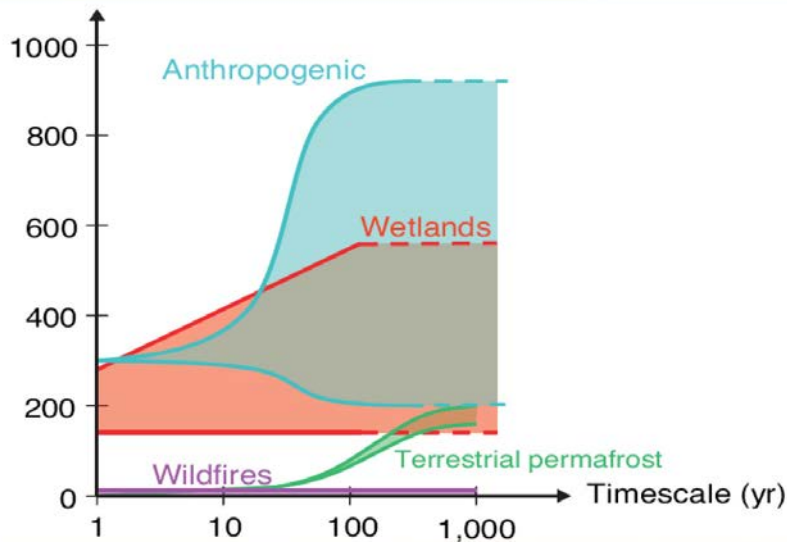
## Plus chaud (et plus humide), le CH<sub>4</sub> aime aussi



Emissions de CH<sub>4</sub>, en mg par m<sup>2</sup> et par heure, en fonction de la température du sol (3 cm sous la surface). Source sur le graphique.

Jean-Marc Jancovici - Mines Paris Tech mai-juin 2019 - [www.jancovici.com](http://www.jancovici.com)

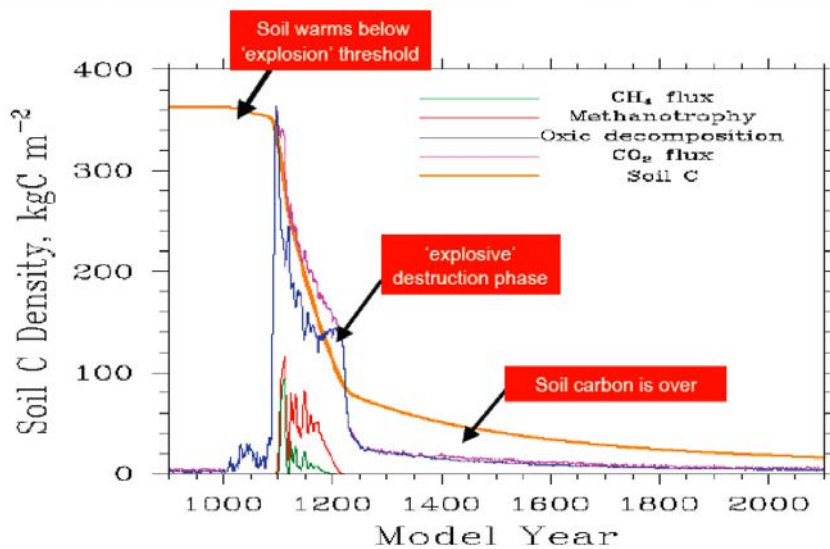
## Les hydrates de méthane, c'est où ?



Ordres de grandeur des émissions de méthane, en millions de tonnes par an, selon la source et l'horizon de temps. La possible déstabilisation des hydrates marins n'est pas représentée car l'incertitude est trop grande. Source IPCC, 5<sup>e</sup> rapport d'évaluation, 2014

Jean-Marc Jancovici - Mines Paris Tech mai-juin 2019 - www.jancovici.com

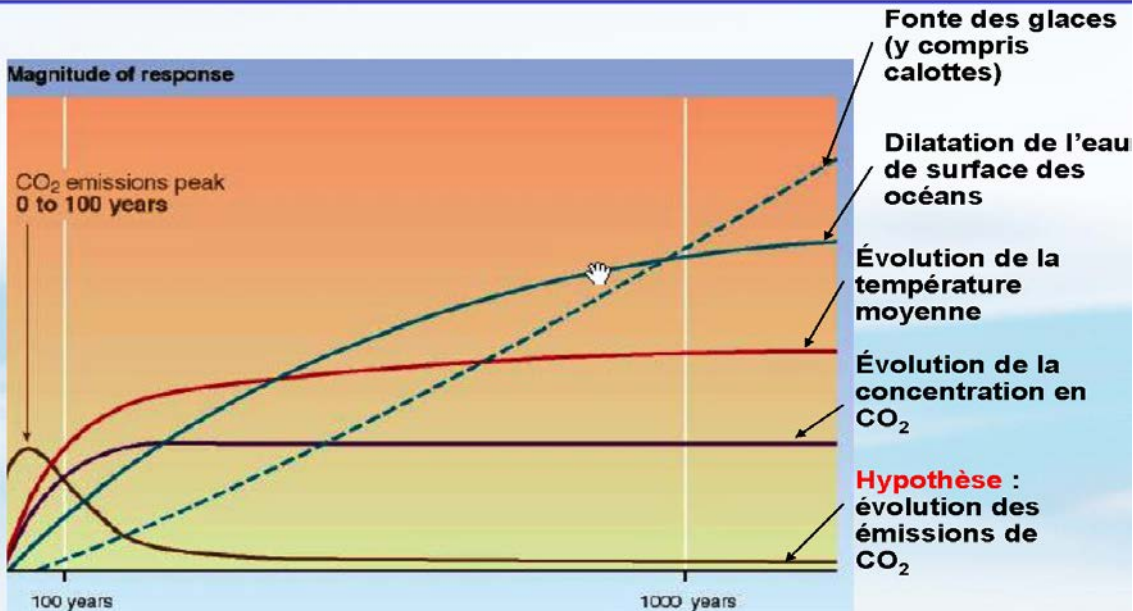
## Le carbone du sol : un petit tour dans l'air... ou pas ?



Carbone résiduel dans le sol des hautes latitudes, en kg par m<sup>2</sup>, si la température franchit le « seuil de réveil » des bactéries contenues dans le sol. Source : P Ciaï, en cours de soumission, 2009

Jean-Marc Jancovici - Mines Paris Tech mai-juin 2019 - www.jancovici.com

## Au secours ! Où est le bouton « reset » ?



Source : Climate Change 2001, the scientific Basis, GIEC

Jean-Marc Jancovici - Mines Paris Tech mai-juin 2019 - www.jancovici.com

Echelonnement dans le temps des différents processus :

- évolution des émissions de CO<sub>2</sub> (augmentation au début puis diminution du fait de la limitation du stock des combustibles fossiles)
- fonte des glaces (continuera pendant des milliers d'années après le pic des émissions)
- dilatation de l'eau de surface des océans (continuera pendant des milliers d'années après le pic des émissions)
- évolution de la température moyenne (augmentation continuera à augmenter longtemps après le maximum des émissions atteint)
- évolution de la concentration en CO<sub>2</sub> (chimiquement stable, reste stable durant des siècles et atteint son maximum bien après la diminution des émissions)

Pas de possibilité de "guérir". On peut prévenir, s'adapter en partie, mais on ne peut pas guérir dans le sens où on ne peut pas se débarrasser de la cause de la maladie.

## Quelques éléments de conclusion

La connaissance des risques **restera** toujours partielle. Il faut faire avec.

Attention à ne pas confondre conditionnels et futurs simples : tout ce qui est possible n'arrivera pas nécessairement, mais plus nous émettons, et plus le risque est sérieux

Attention aussi à ne pas confondre « ignorance » et « garantie qu'il ne se passera rien » ! **L'ignorance n'est pas une police d'assurance.**

Attention enfin à **ne pas raisonner à capacité de réaction constante** : ce qui fait notre capacité de résistance à l'adversité aujourd'hui, c'est essentiellement l'abondance de l'énergie, et ce qu'il restera de cette abondance dans un siècle est un énorme point d'interrogation

Jean-Marc Jancovici - Mines Paris Tech mai-juin 2019 - [www.jancovici.com](http://www.jancovici.com)

- processus de dérèglement climatique ira croissant, avec son lot de mauvaises surprises imprévisibles
- ce qui peut être entrepris aujourd'hui c'est amortir les conséquences du dérèglement climatique pour la génération future
- l'accès à l'énergie va se raréfier au moment même où celle-ci sera le plus nécessaire pour faire face aux effets du dérèglement climatique. La capacité de réponse aux problèmes posés par le dérèglement climatique va avoir tendance à s'affaiblir avec le temps.
- l'affectation des ressources énergétique devrait être revue

# LEÇON V - LES ÉCONOMIES D'ÉNERGIE

## Chapitre 24 - Pourquoi faire des économies d'énergie ?

La civilisation industrielle, basée sur l'accès à une énergie sur-abondante, se heurte à au moins deux limites physiques :

- l'approvisionnement en ressources fossiles n'est pas infini
- l'activité humaine émet des sous-produits indésirables divers et variés, dont des GES dans l'atmosphère, ce qui entraîne un dérèglement climatique tel qu'il remet en cause les modes de vie

Deux manières d'aborder cette situation :

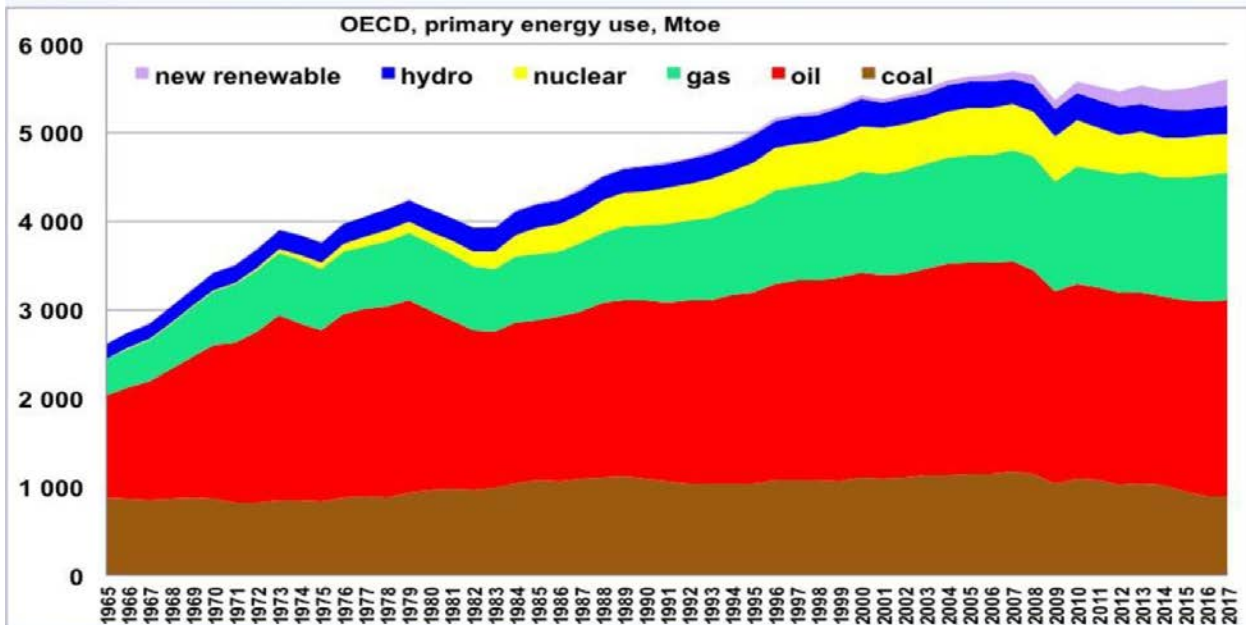
- 1ère approche "économie d'énergie" : comment faire fonctionner un système socialement stable avec moins d'énergie (objet de cette Leçon V) ?
- 2e approche "décarbonation de l'énergie" : comment disposer d'énergie en émettant moins de GES (leçons V, VI et VII) ?

La discussion peut avoir un aspect un peu théorique mais dans la pratique ne pas perdre de vue :

- les différentes zones de la planète ne vont pas être concernées simultanément par les mêmes problématiques économies d'énergie et décarbonation. S'agissant des pays développés, l'Europe, après le Japon (qui n'a rien), est la région du monde la plus pauvre en ressources énergétiques (gaz et pétrole en Mer du nord et charbon en Pologne et Allemagne).
- les décennies à venir seront nécessairement agitées par ces questions d'économies d'énergie et de décarbonation de l'énergie, soit de manière planifiée soit de manière subie. Que l'on fasse ou non quelque chose, il y a "la voiture balai" puisque l'approvisionnement énergétique sera contraint.



## Une première raison de faire des économies



Jean-Marc Jancovici - Mines Paris Tech mai-juin 2019 - [www.manicore.com](http://www.manicore.com)

Le phénomène est déjà enclenché dans les pays de l'OCDE (Europe de l'ouest, Australie, Japon, Corée du sud, Turquie, Etats-Unis et Canada) depuis 2008 :

- l'approvisionnement a atteint son maximum en 2007
- pour le cas particulier de l'Europe les approvisionnements de charbon, de pétrole et de gaz sont en déclin. 80% de l'approvisionnement est déjà en déclin.

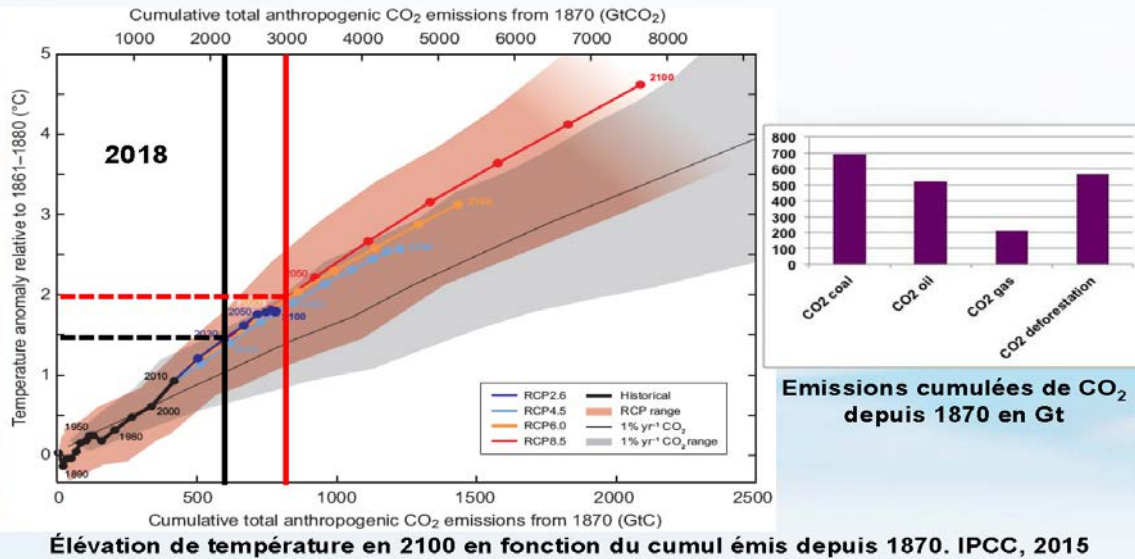
Le fait de faire fonctionner un système socialement stable avec moins d'énergie

- est déjà une équation posée depuis une dizaine d'années dans la zone OCDE
- est une situation qui a des effets concrets pour certaines tranches de la population les moins favorisées. Les économies forcées sont une réalité pour les populations situées dans les zones périphériques des villes (baisse du revenu, augmentation des inégalités, hausse du chômage, les working poor...)

En Europe donc faire des économies d'énergie pour anticiper la baisse de l'approvisionnement est déjà une raison caduque puisque c'est déjà la réalité.

Les économies d'énergies = moins de machines au travail = moins de PIB

## Et une deuxième !



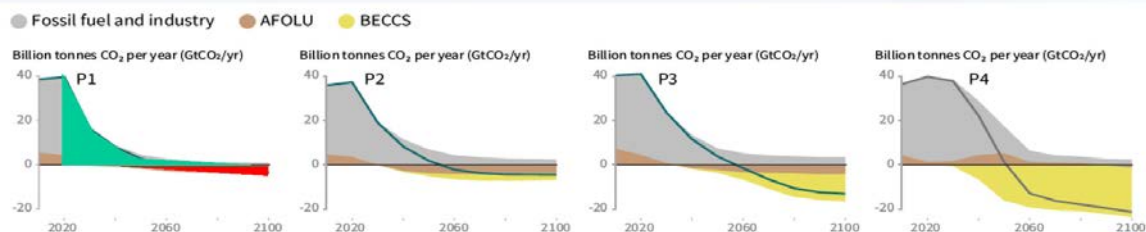
Jean-Marc Jancovici - Mines Paris Tech mai-juin 2019 - www.manicore.com

La seconde raison de faire des économies d'énergie est le changement climatique.

- 2200 milliards de T de CO<sub>2</sub> déjà émis dans l'atmosphère depuis 1870 : le réchauffement embarqué est de +1,5°. Dit autrement, en arrêtant les émissions de GES immédiatement, le réchauffement global sera de 1,5° à la fin du XXI<sup>e</sup> siècle
- pour limiter le réchauffement à +2° à la fin du XXI<sup>e</sup> siècle, il faut limiter les émissions à 3000 milliards de Tonnes de CO<sub>2</sub>. 2200 ont déjà été émises en 150 ans, il resterait 800 milliards de tonnes en 80 ans, c'est à dire le 1/3 de ce qui a été émis précédemment avec une population en moyenne 3 fois moins nombreuse. Dit autrement, le droit à émettre des être humains serait 1/9 de ce qui est consommé actuellement.

C'est dire l'absolue nécessité des économies d'énergie pour limiter le réchauffement global.

## 1,5° C : si on émet encore, il faudra séquestrer



Scénarios permettant de limiter la hausse à 1,5 ° C. IPCC, 2018

Jean-Marc Jancovici - Mines Paris Tech mai-juin 2019 - www.manicore.com

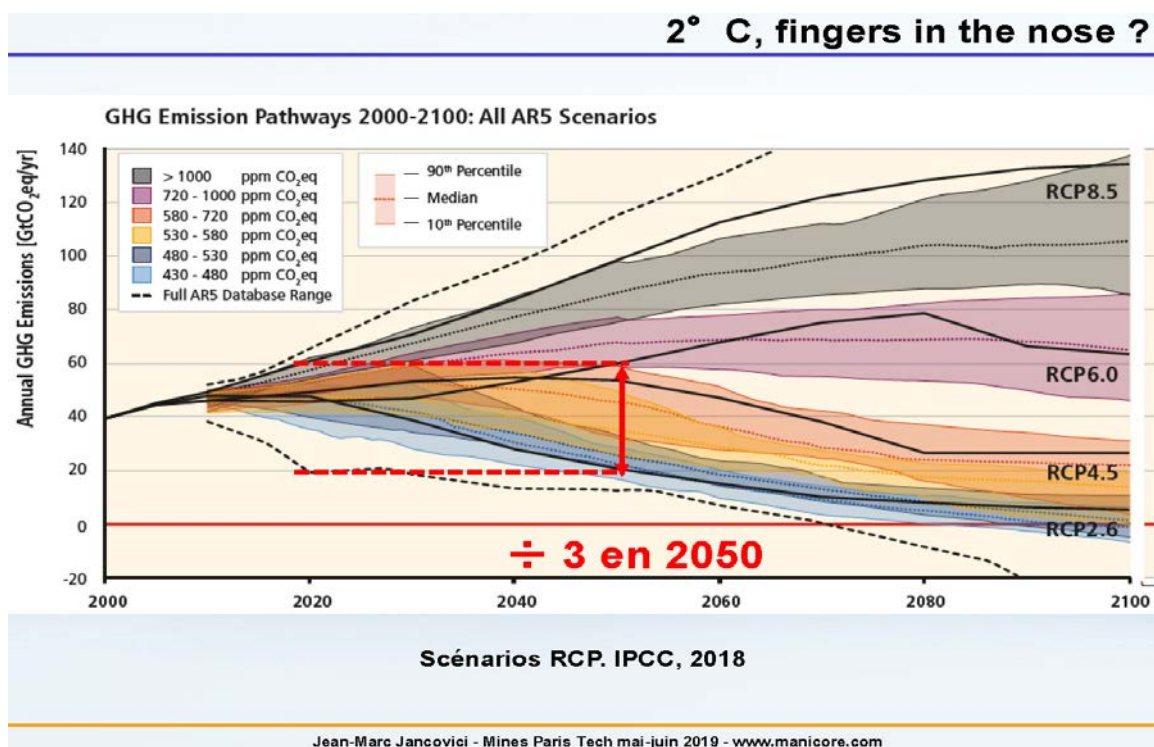
Plusieurs trajectoires d'émissions permettant de limiter le réchauffement global à 1,5° à la fin du XXIe siècle sont envisageables mais toutes indiquent qu'il faut mettre en oeuvre de la séquestration nette. Ce qui signifie :

- possibilité de placer du CO2 dans l'atmosphère pendant quelques décennies (mi-XXIe)
- mais séquestration nette du CO2 par la suite (très faibles émissions + retirer de l'atmosphère ce qui a été émis par le passé, bien au-delà du XXIe)

Deux leviers :

- AFOLU : Aforestation & the Land use : changement d'usage des sols. Autrement dit transformer des sols qui ne captent pas de carbone pour qu'ils captent du carbone. Cela consiste soit à reforester des terres sans forêts (transfert du carbone de l'atmosphère vers le sol), soit à changer les pratiques agricoles (par exemple moins labourer remet du carbone dans le sol)
- BECCS : Biomass Energy and Carbone Capture : centrales électriques au bois (capture du CO2 pour le remettre sous terre : la forêt capte du CO2 de l'atmosphère, puis combustion du bois dans une centrale électrique, captation du CO2 de la centrale électrique et enfouissement sous terre). "Passer l'aspirateur à CO2 dans l'atmosphère", faire en accéléré ce que les temps géologiques ont réalisés avec la fossilisation du pétrole et du charbon. Destiné à produire de l'électricité pour remplacer le charbon et le gaz, mais de nombreuses limites...

Autrement dit, pour limiter le réchauffement global à 1,5° en 2100, il faudrait arrêter d'émettre très très rapidement.



Pour limiter le réchauffement global à 2° en 2100, l'arrêt des émissions doit être encore plus rapide et brutal.

- RCP 2.6 (scénario bas) : trajectoire d'émissions de CO2 qu'il faut respecter pour limiter le réchauffement global à 2° en 2100. Entendre par "limiter à 2° en 2100" la probabilité de limiter à 2°, il y a 1 chance sur 3 que ce soit supérieur
- actuellement, en additionnant tous les GES, les émissions se situent à 60 milliards de tonnes d'équivalent CO2 / an
- l'objectif serait 20 milliards de tonnes aux alentours de 2050, soit une division par 3 des émissions planétaires

Ordre de grandeur à mémoriser : si l'on veut avoir une chance de limiter le réchauffement global à 2° d'ici

la fin du XXIe siècle, il faut diviser par 3 les émissions planétaires d'ici 2050.

Si on ne parvient pas à cette réduction, il y a une absolue certitude que le réchauffement sera supérieur à 2° à la fin du siècle.

### **Au restaurant « Le bon développement durable », plat unique**

**20 milliards de tonnes de CO<sub>2</sub>-eq pour 7 milliards d'individus, cela fait 3 par personne, pour 9 milliards, en gros 2**

**En l'état actuel des technologies, l'une des choses suivantes suffit à atteindre le « droit maximal à émettre sur une année » :**

**faire 15 000 km en avion (un A/R Paris-Chicago)**

**ou consommer de 4 000 kWh d'électricité en Allemagne, mais 20 000 kWh en France (consommation annuelle moyenne par Français : environ 8 000 kWh),**

**ou acheter 10 à 500 kg de produits manufacturés (en France ≈ 2 000 à 6 000 euros de produits industriels, 8 000 à 15 000 euros de services)**

**ou construire 4 à 5 m<sup>2</sup> de logement,**

**ou brûler 7 000 kWh de gaz naturel, en tenant compte des émissions amont (quelques mois de chauffage d'un logement).**

**ou parcourir ≈ 6000 à 8000 km en zone urbaine en voiture « moyenne » (2 fois moins en 4x4)**

Source : Jancovici, 2019

Jean-Marc Jancovici - Mines Paris Tech mai-juin 2019 - [www.manicore.com](http://www.manicore.com)

20 milliards de tonnes de CO<sub>2</sub>

= pour 7 milliards d'individus, cela fait 3 tonnes de CO<sub>2</sub> par personne,

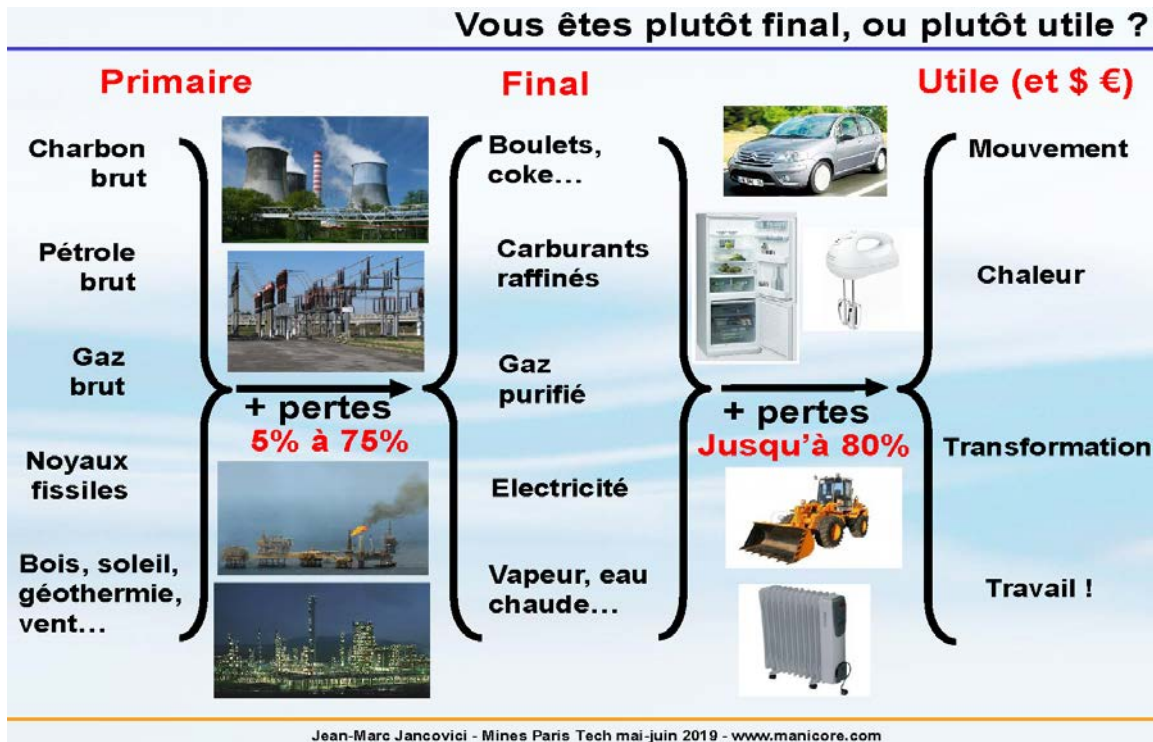
= pour 9 milliards en 2050, environ 2 tonnes de CO<sub>2</sub> par personne

En l'état actuel des technologies, l'une des choses suivantes suffit à atteindre le « droit maximal à émettre sur une année » :

- faire 15 000 km en avion (un A/R Paris Chicago). 1 km / passager en avion équivaut à 150 gr de CO<sub>2</sub> - km / passager en train en France se situe entre quelques grammes et quelques dizaines de grammes. En Allemagne où une part de l'électricité provient du charbon, il s'agit de quelques dizaines de grammes : le ferroviaire reste bien en-dessous des émissions de l'aviation.
- ou parcourir 6000 à 8000 km en zone urbaine en voiture « moyenne » 2 fois moins en 4 x 4
- ou consommer de 4 000 kWh d'électricité en Allemagne mais 20 000 kWh en France (consommation annuelle moyenne par Français environ 8 000 kWh),
- ou acheter de 10 à 500 kg de produits manufacturés (en France 2 000 à 6 000 euros de produits industriels, par exemple : 4 ordinateurs, 4 écrans TV connectés, ...
- ou acheter de 8 000 à 15 000 euros de services. Par exemple : facture de téléphone, place de cinéma...
- ou construire 4 à 5 m<sup>2</sup> de logement (1m<sup>2</sup> en structure béton dans un immeuble équivaut à 300 à 400 kilo de CO<sub>2</sub>, pour une maison classique de 90 m<sup>2</sup> un ménage émet 35 tonnes de CO<sub>2</sub> via les cimenteries, les aciéries, tuiles, fenêtres ...
- ou brûler 7 000 kWh de gaz naturel, en tenant compte des émissions amont (quelques mois de chauffage d'un logement)

Conclusion : les populations sont très très loin des modes de consommation en ligne avec une limitation du réchauffement global de 2°

# Chapitre 25 - Optimiser la chaîne des énergies primaire, finale et utile



Pour économiser de l'énergie, une des manières de procéder est d'améliorer l'efficacité du système énergétique, l'optimisation de la chaîne énergies primaire, finale et utile.

L'énergie primaire : correspond à l'énergie telle qu'on la trouve dans la Nature (ressources fossiles à brûler, bois, force des éléments, rayonnement électromagnétique avec le soleil, ...)

L'énergie primaire alimente le système énergétique / l'industrie de l'énergie dont le rôle est de transformer l'énergie primaire en énergie finale dans le but d'alimenter une machine hors du système énergétique (voitures, appareils électroménagers, ...). L'énergie finale est toujours inférieure à l'énergie primaire.

L'énergie utile est une notion parfois utilisée : il s'agit de l'énergie qui rend réellement un service. Exemple : le frigo, qui utilise une énergie finale (l'électricité) et qui extrait des calories de son contenu, a un rendement. L'énergie utile est l'énergie de refroidissement des aliments, il y a un rendement de conversion entre énergie finale et énergie utile.

Les pertes :

- entre énergies primaire et finale : de 5 à 75% (barrage ou de l'éolienne avec très peu de frottement pour les pertes les plus faibles, aux machines de Carnot - faire de l'électricité avec de la chaleur - qui ont des pertes au-dessus de 50%). Le rendement moyen d'une centrale à charbon est le même que celui d'une centrale nucléaire, 1/3 environ.
- entre énergies finale et utile : jusqu'à 80%, par exemple pour un moteur de voiture mis en dehors de sa plage de régime.

## Prenons un exemple

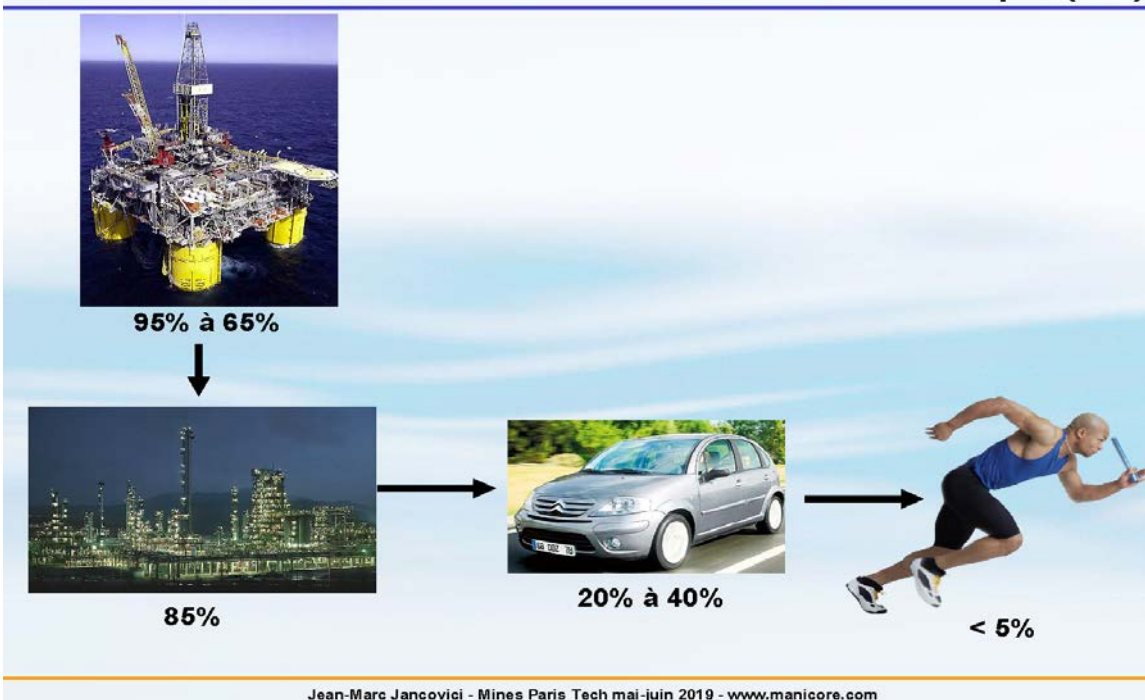


### Exemple 01

Rendement proche de 1 pour aller du primaire vers l'utile

- L'excavatrice à lignite (charbon jeune riche en eau et en cendre) allemande Bagger 288 alimente une centrale à charbon.
- 30 à 45% de la lignite se retrouve sous forme d'énergie électrique
- 8% de pertes supplémentaires pendant le transport
- le rendement du frigo supérieur à 1 (jusque 3)

## Prenons un exemple (bis)



### Exemple 02

- Puit de forage (5 à 35% de perte car besoin d'énergie pour pomper le pétrole et l'extraire de terre, 1/3 pour les "mauvais" pétroles de schistes et les sables bitumineux du Canada)

- Raffinage du pétrole, avec une perte de 15% du au chauffage / à la distillation du pétrole initial
- Alimentation d'une machine externe, par exemple une voiture dont le rendement est de 20 à 40%
- L'énergie utile (le déplacement du conducteur à la vitesse du véhicule, par exemple 1 homme de 70kg à 80 km/h) est inférieure à 5%

Difficultés à optimiser cette chaîne et les rendements physiques :

- l'exploitation des nouveaux gisements de pétrole est de plus en plus gourmande en énergie
- les pertes dues à la distillation sont inévitables
- le moteur à explosion / machine de Carnot, pertes importantes inévitables également

## Économies ? Quelles économies ?

**J'obtiens les mêmes services avec moins d'énergie -> Efficacité**

**Je parcours la même distance, dans une voiture de même puissance et même capacité, mais elle consomme moins grâce à des améliorations techniques**

**J'ai le même espace habitable, mais la performance thermique de mon logement est meilleure**

**J'achète la même quantité de poulets, de chemises et de billets de cinéma, mais ils ont été fabriqués avec des processus plus efficaces**

**J'utilise délibérément moins de services, et du coup il faut moins d'énergie pour me les fournir -> Sobriété**

**Je conduis moins, ou dans une plus petite voiture (moins puissante ou moins grande)**

**Je diminue mon espace habitable (co-location, appartement plus petit...)**

**J'achète moins de poulet, de crème de soins, mes enfants vont moins tard à l'école et j'accepte d'attendre à l'hôpital**

**J'utilise moins de services, et du coup il faut moins d'énergie pour me les fournir... mais je le fais de manière subie -> Pauvreté**

Jean-Marc Jancovici - Mines Paris Tech mai-juin 2019 - www.manicore.com

Efficacité énergétique : obtenir exactement les mêmes services avec moins d'énergie, améliorer les rendements de chaîne de bout en bout. Exemples :

- parcourir la même distance avec une voiture aux mêmes caractéristiques (formes et poids) mais en consommant moins de pétrole
- consommer moins d'électricité / d'énergie pour chauffer son habitat à la même température
- consommer des produits et services provenant d'industriels plus économes en énergie

Sobriété : utiliser délibérément moins de services afin d'économiser l'énergie. C'est la démarche inverse : pas d'exigence sur les rendements mais la consommation et la quantité d'énergie utilisée.

Une "variante" de la sobriété, ou la limitation est subie : la pauvreté. En commun

- la caractéristique physique (moins de consommation = moindre empreinte),
- économiquement récessif (moins de consommation = moins de production = décroissance de la base fiscale = politiquement / budgétairement compliqué)
- mais opposition sur le plan social : souhaité / subi. Cela ne se gère pas de la même manière du point de vue politique.

Entre efficacité et sobriété, la première voie est politiquement plus acceptable :

- contraindre des industriels par des normes et challenger des ingénieurs
- est moins difficile à présenter que soumettre une population entière à un "rationnement"

En raison de la baisse de l'approvisionnement en ressources fossiles :

- tout ce qui ne sera pas réalisé au titre de l'efficacité ou de la sobriété
- sera réalisé manière subie sous la forme de la pauvreté

## Vous êtes plutôt primaire, ou plutôt final ?

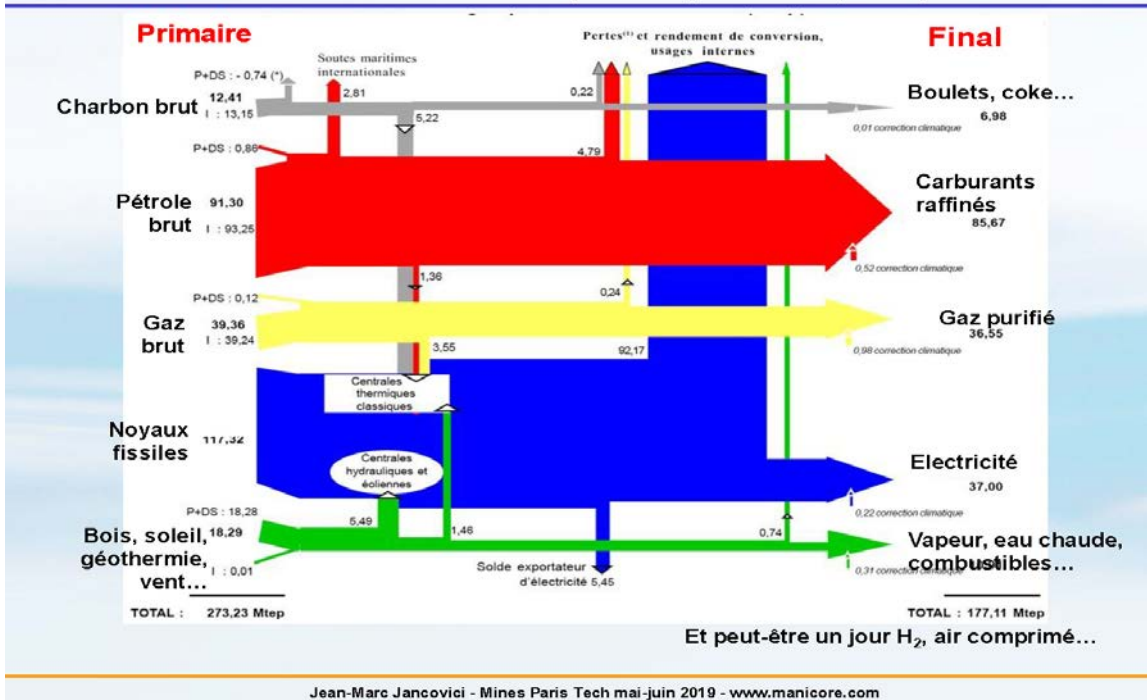
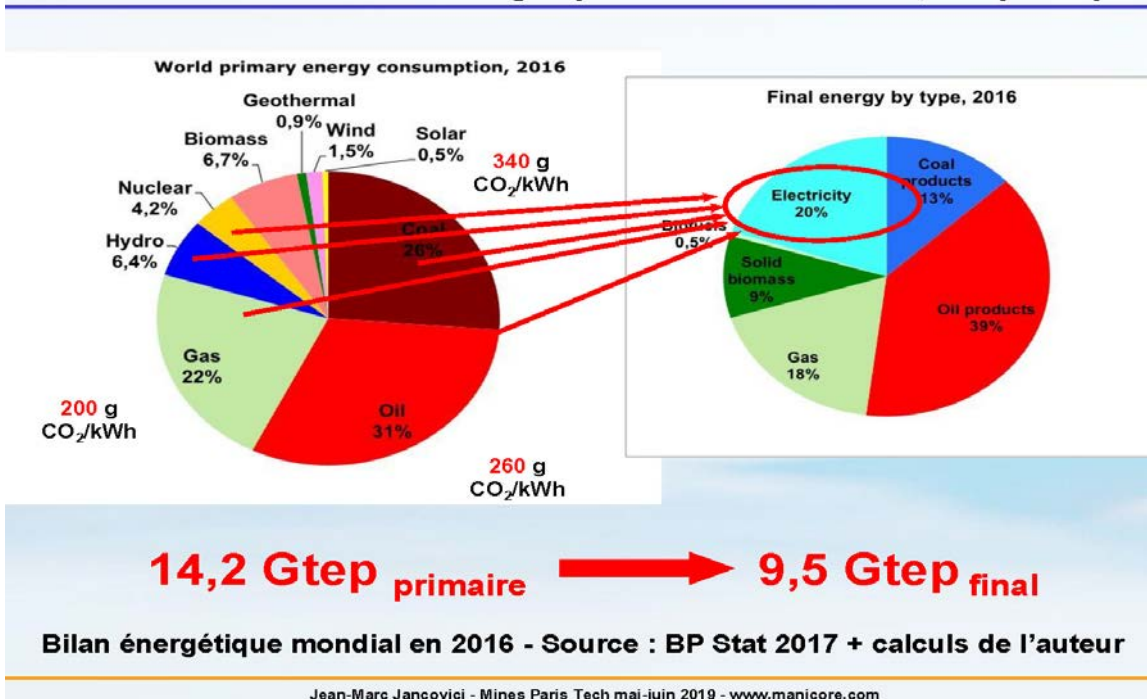


Diagramme Energies Primaire / Finale de la France :

- très peu de perte intermédiaire sur le pétrole
- énormément de perte sur l'électricité primaire (chaleur perdue)

## Energie primaire = carbone, ou presque



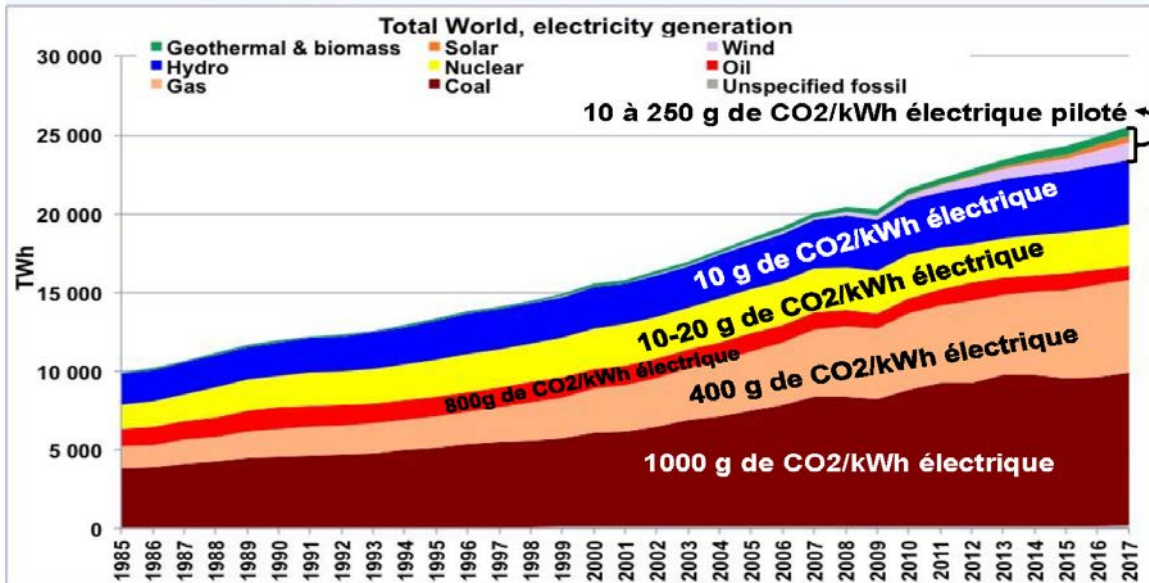
Dans le monde, la conversion primaire vers finale nous fait perdre environ 5 milliards de tonnes équivalent pétrole d'énergie, c'est-à-dire 40% de l'énergie primaire.

Cette déperdition

- est essentiellement due à la production électrique, qui est en grande partie faite avec des combustibles fossiles via une machine de Carnot
- et par conséquent elle est inévitable



## L'électricité sent plus fort le carbone que le panneau



Évolution de la production électrique mondiale entre 1985 et 2017. Source BP Statistical Review

Jean-Marc Jancovici - Mines Paris Tech mai-juin 2019 - www.manicore.com

Décomposition de la production électrique dans le monde :

- la quantité d'électricité consommée dans le monde a considérablement augmenté en quelques décennies (x2.5 en 20 ans)
- l'essentiel est fossile (charbon + gaz + pétrole > 15 000 TW/h sur les 25 000 produits)
- les 2 grands modes décarbonés de production d'électricité sont l'hydroélectricité et le nucléaire
- très minoritaires, les nouvelles énergies renouvelables (éoliennes et géothermie dominants)

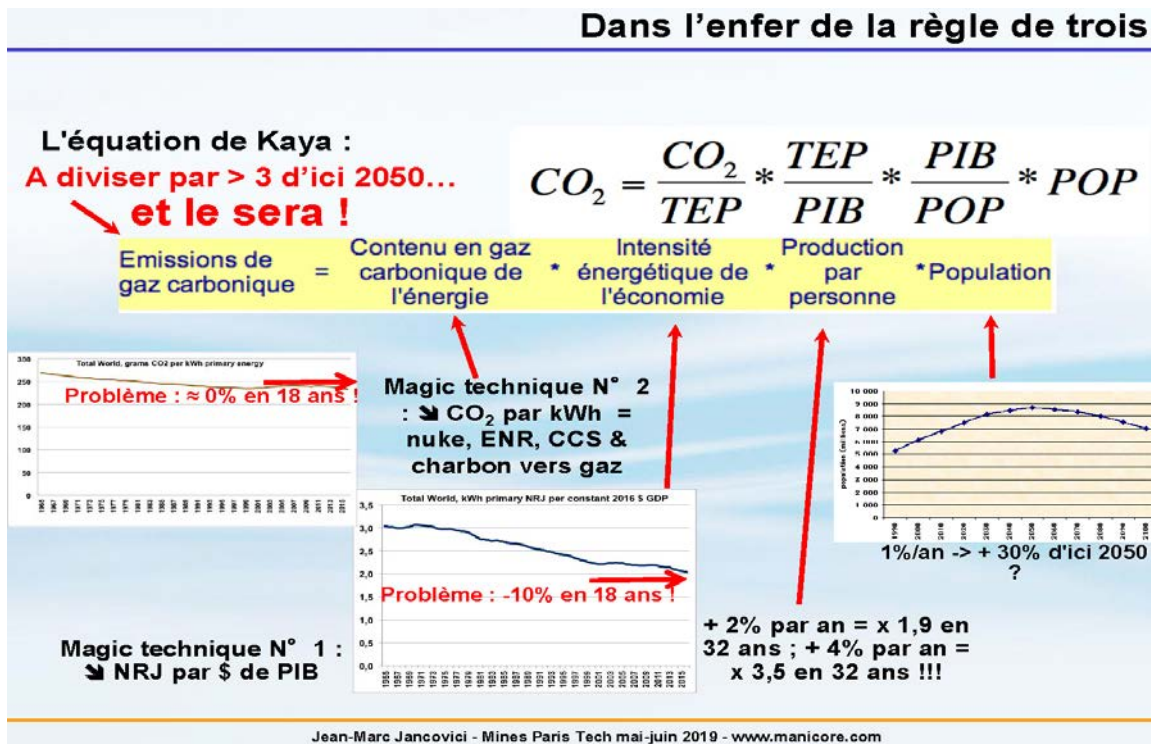
Pour produire 1 kW/h d'électricité

- au charbon, on émet 1 kilo de CO<sub>2</sub>
- au gaz, 400 gr
- au pétrole, 800 gr
- au nucléaire, 10 à 20 gr
- avec l'hydroélectricité, 10 gr
- avec les nouvelles énergies renouvelables, entre 10 et 250 gr

Grande plage de pollution des nouvelles énergies renouvelables s'explique :

- éolienne avec électricité non pilotable = 10 gr
- panneau solaire avec stockage sur batteries = 250 gr

# Chapitre 26 - L'équation de Kaya



Pour savoir à quel niveau il faut situer les économies d'énergie on peut recourir à une petite règle de trois connue sous le nom d'équation de Kaya.

Equation de Kaya = équation de la baisse des émissions de CO2 sous forme d'une règle de trois.

$CO_2 = CO_2$

$CO_2$  : quantité des émissions de CO2 dans le monde

$CO_2 = CO_2/TEP * TEP$

TEP : quantité d'énergie qu'on utilise dans le monde

> 1er terme :  $CO_2/TEP$  : la quantité de CO2 libérée dans l'atmosphère par unité d'énergie disponible par unité de machines en fonctionnement

$CO_2 = CO_2/TEP * TEP/PIB * PIB$

PIB : la production économique

> 2e terme :  $TEP / PIB$  : à quelle hauteur / niveau, exprimée en KW/h, j'ai eu besoin de transformer l'environnement (nrj = transformation de l'environnement) pour disposer d'1 dollars de valeur ajoutée

$CO_2 = CO_2/TEP * TEP/PIB * PIB/POP * POP$

POP : population mondiale

> 3e terme :  $PIB / POP$  : la quantité de services économiques par personne

Traduction : les émissions mondiales de CO2 / de GES sont le produit de 4 termes

- la quantité de CO2 par unité d'énergie, plus mon unité d'énergie est riche en CO2, plus toutes choses égales par ailleurs, j'émet de GES
- la quantité d'énergie utilisée par unité de production économique, plus j'utilise d'énergie par unité de production économique, plus toutes choses égales par ailleurs les émissions augmentent
- la production économique, plus on produit par personne, plus on transforme, plus on émet de GES

- la population, toutes choses égales par ailleurs, plus on est nombreux plus les émissions sont élevées

Le terme initial "Emissions de CO2" est mis sous contrainte puisque l'objectif d'ici 2050 est la division par trois des émissions de GES. Qu'est-ce qui dans l'équation est susceptible d'être réduit pour coïncider avec cette contrainte ?

Première option : diviser en 30 ans la population humaine par 3. C'est la solution ultime, qui adviendra si aucun des autres termes de l'équation n'est réduit. Les démographes misent sur l'inverse, sur une augmentation de la population de 30% (jusqu'à 9 ou 10 milliards d'humains). Donc

- si le terme Population \*1.3
- pour équilibrer l'équation, la division à opérer n'est plus par 3 mais par 4

Diviser le PIB / personne par 4 dans les 30 ans à venir ? Les décideurs politiques n'oeuvrent pas du tout pour la décroissance du PIB, dont ils espèrent une augmentation annuelle de 2%. Avec une telle évolution, sur les 30 prochaines années, cela multiplie par 2 le terme de l'équation. Donc

- si le terme PIB \*2
- si le terme Population \*1.3
- pour équilibrer l'équation, la division à opérer n'est plus par 3 mais par 7.5

Restent les deux termes :

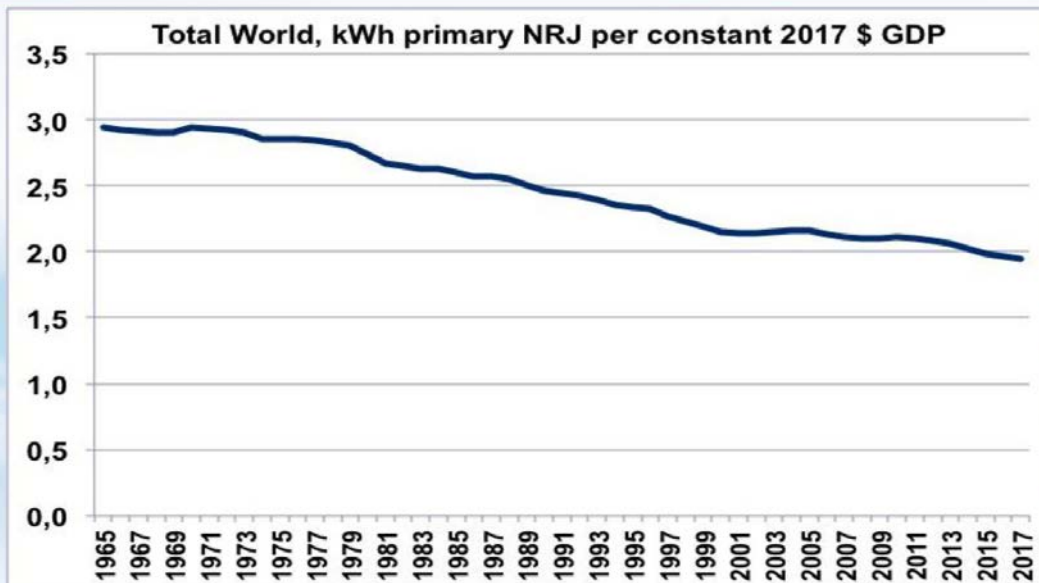
- efficacité énergétique de l'économie : déjà 50% gagné en 1/2 siècle, -10% sur les 20 dernières années. On gagne péniblement 1/2 point d'efficacité énergétique par an. Reste un facteur 5 à trouver sur le dernier terme.
- énergie plus décarbonée serait la meilleure solution. Mais la baisse des émissions de CO2 par KW/h est de 10%, gagnés durant les 50 dernières années. Depuis le "boom" des nouvelles énergies renouvelables des 15 dernières années, plus aucun gain (les ENR augmentent, mais également le charbon et le gaz)

Si rien n'est plus possible pour ces deux derniers termes :

- la prospérité sera entamée, sobriété et / ou pauvreté à prévoir
- voire atteinte de la démographie (maladies, faim, guerres, ...)

L'équation de Kaya nous apprend qu'il n'y a pas d'échappatoire. Le problème ne pourra pas être repoussé éternellement à plus tard.

## Soyons efficaces !

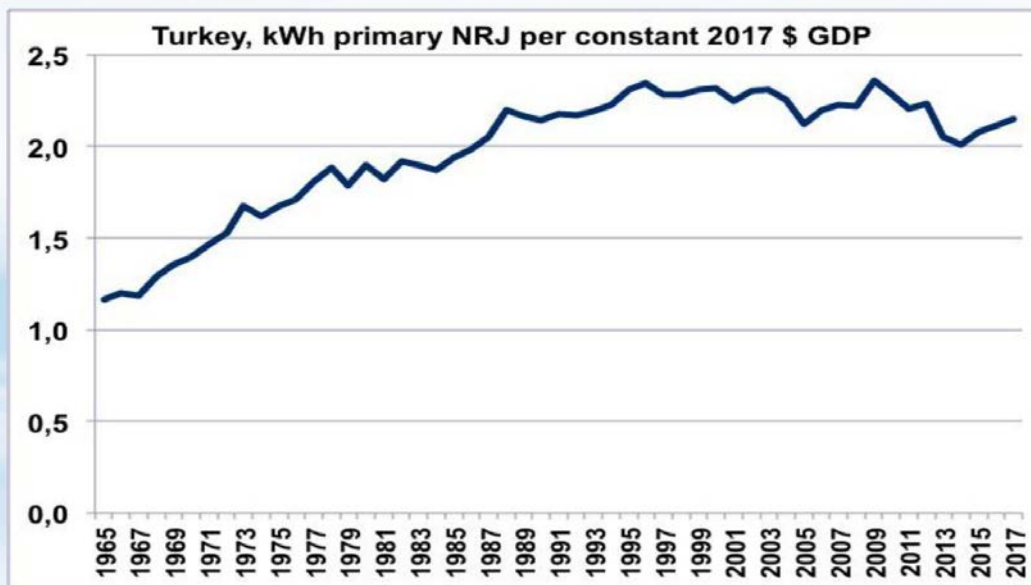


kWh d'énergie primaire utilisés pour produire un dollar de PIB dans le monde. Calculs Jancovici ; données primaires BP Statistical Review et World Bank.

Zoom 1 sur la complexité de la situation : l'efficacité énergétique de l'économie mondiale.

- Globalement plus d'efficacité.
- L'amélioration était plus soutenue avant les années 2000

### Mais pas partout...

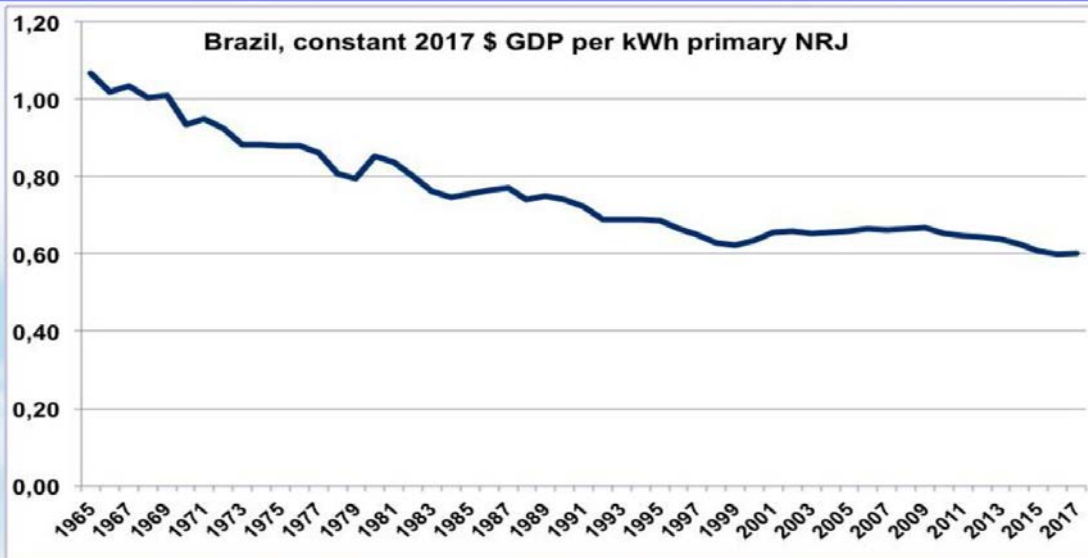


kWh d'énergie primaire utilisés pour produire un dollar de PIB en Turquie. Calculs Jancovici ; données primaires BP Statistical Review et World Bank.

Jean-Marc Jancovici - Mines Paris Tech mai-juin 2019 - www.manicore.com

Zoom 2 : l'efficacité énergétique de l'économie se dégrade dans certains pays, exemple la Turquie. Aujourd'hui il faut plus d'énergie pour faire 1 \$ de valeur ajoutée qu'il n'en fallait il y a 50 ans.

### Ni là...

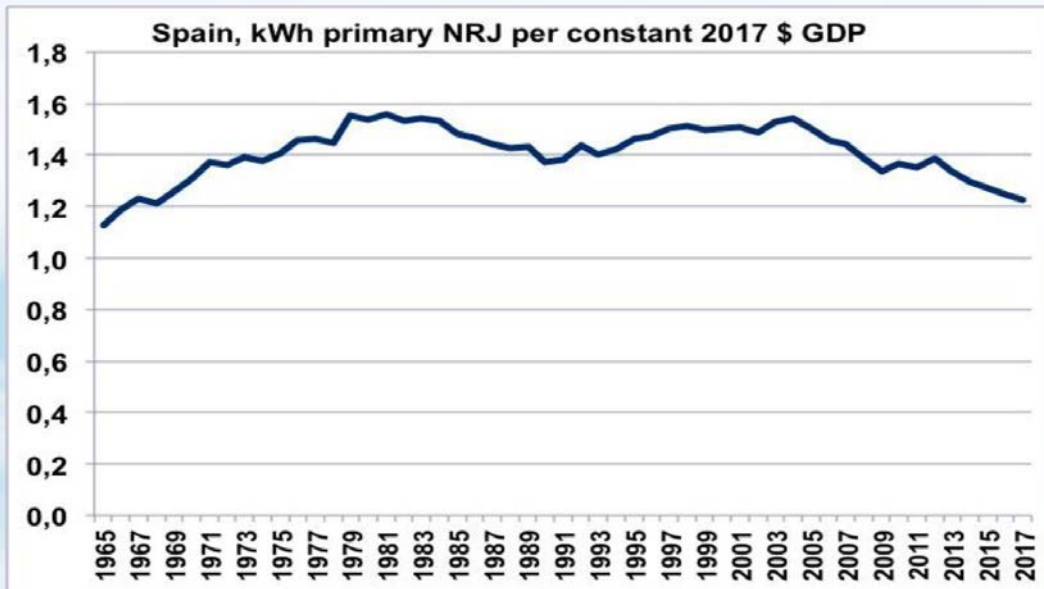


kWh d'énergie primaire utilisés pour produire un dollar de PIB en Turquie. Calculs Jancovici ; données primaires BP Statistical Review et World Bank.

Jean-Marc Jancovici - Mines Paris Tech mai-juin 2019 - www.manicore.com

Zoom 3 : l'efficacité énergétique du Brésil est de moins en moins efficace (ordonnée KW/h)

## Et pas là non plus !



kWh d'énergie primaire utilisés pour produire un dollar de PIB en Espagne. Calculs Jancovici ; données primaires BP Statistical Review et World Bank.

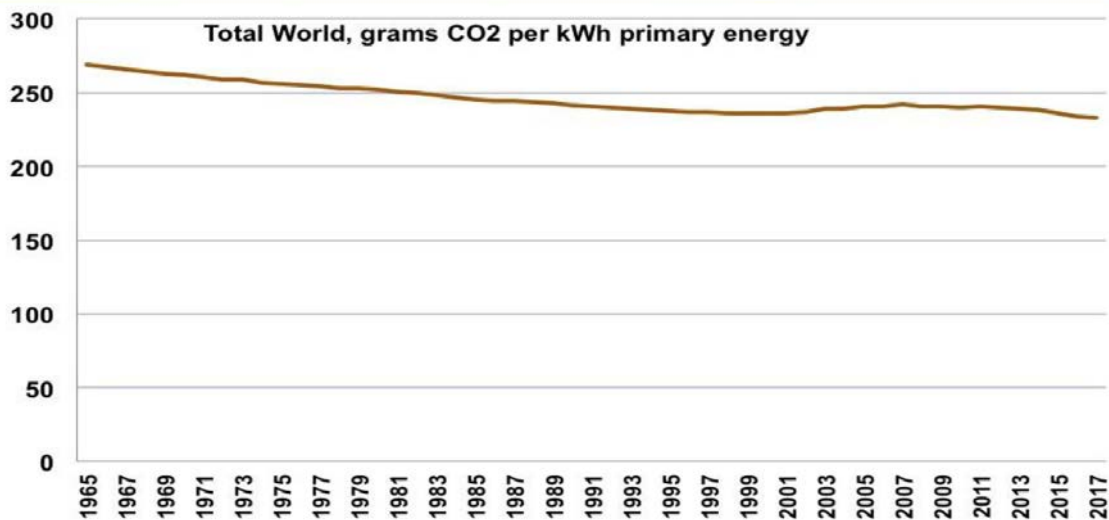
Jean-Marc Jancovici - Mines Paris Tech mai-juin 2019 - www.manicore.com

Zoom 4 : Espagne. Efficacité énergétique équivalente à celle de 1965, en baisse depuis 20 ans.

Conclusion : les gains d'efficacité énergétique ne sont pas linéaires

- amélioration globale mais moins soutenue depuis le début des années 2000
- et au cas par cas, certains pays ont une efficacité énergétique en baisse

## Soyons décarbonés !



Emissions de CO2 correspondants à l'utilisation d'un kWh d'énergie primaire dans le monde. Calculs Jancovici ; données primaires BP Statistical Review.

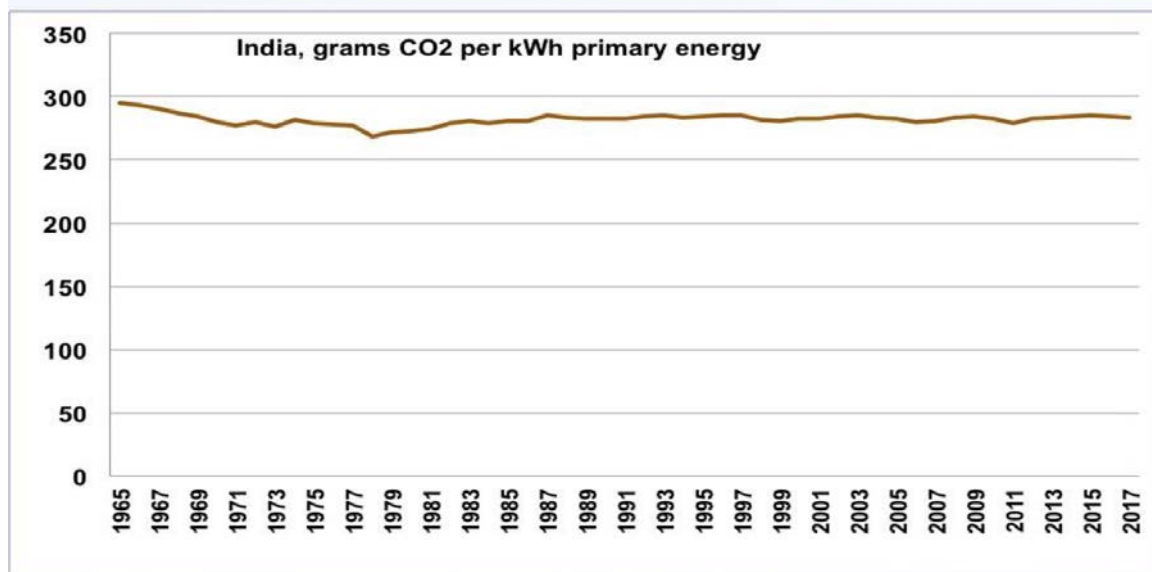
Jean-Marc Jancovici - Mines Paris Tech mai-juin 2019 - www.manicore.com

Efficacité carbone de l'énergie : combien de gr de CO2 il faut mettre dans l'atmosphère quand on utilise 1 kWh d'énergie primaire (et non d'électricité) ?

- Amélioration lente pendant 50 ans jusqu'au début des années 2000 (montée ne puissance du gaz, la moins carbonée des énergies fossiles + développement de l'hydroélectricité puis du nucléaire)
- Niveau constant depuis (retour du charbon compensé + ou - par le développement des nouvelles énergies renouvelables)

Courbe très contre-intuitive par rapport au discours ambiant qui annonce que le développement des nouvelles énergies renouvelable permet de décarboner l'énergie. C'est faux.

### Mais pas partout non plus

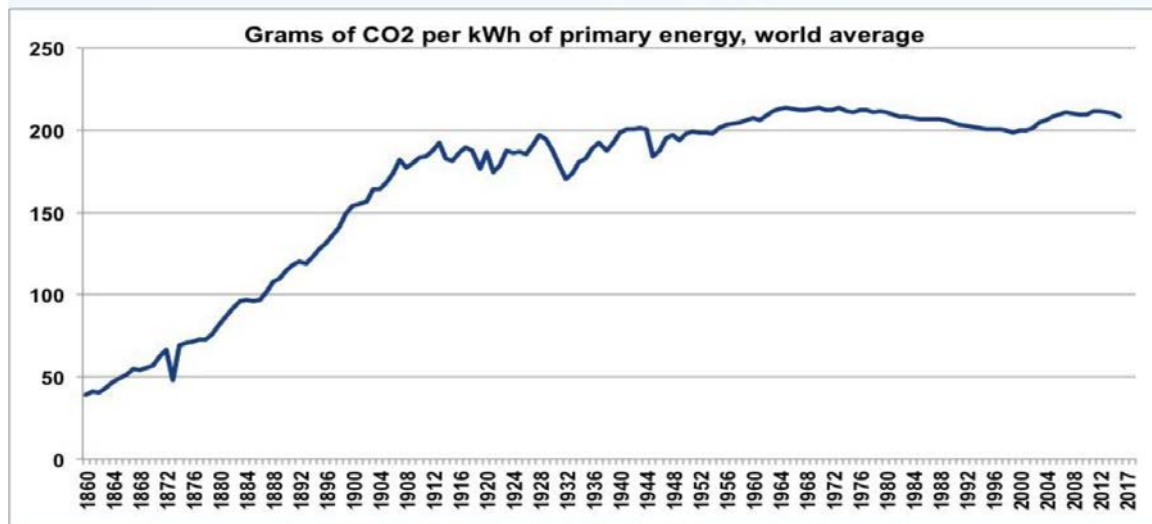


Emissions de CO2 correspondants à l'utilisation d'un kWh d'énergie primaire en Inde. Calculs Jancovici ; données primaires BP Statistical Review.

Jean-Marc Jancovici - Mines Paris Tech mai-juin 2019 - www.manicore.com

Zoom Inde : très stable depuis 50 ans. Donc des évolutions à regarder de près selon les pays / régions.

### Soyons... heu quoi au fait ?



Emissions de CO2 correspondants à l'utilisation d'un kWh d'énergie primaire dans le monde depuis un siècle et demi. Calculs Jancovici ; données primaires BP Statistical Review & Shilling et al., 1977.

Jean-Marc Jancovici - Mines Paris Tech mai-juin 2019 - www.manicore.com

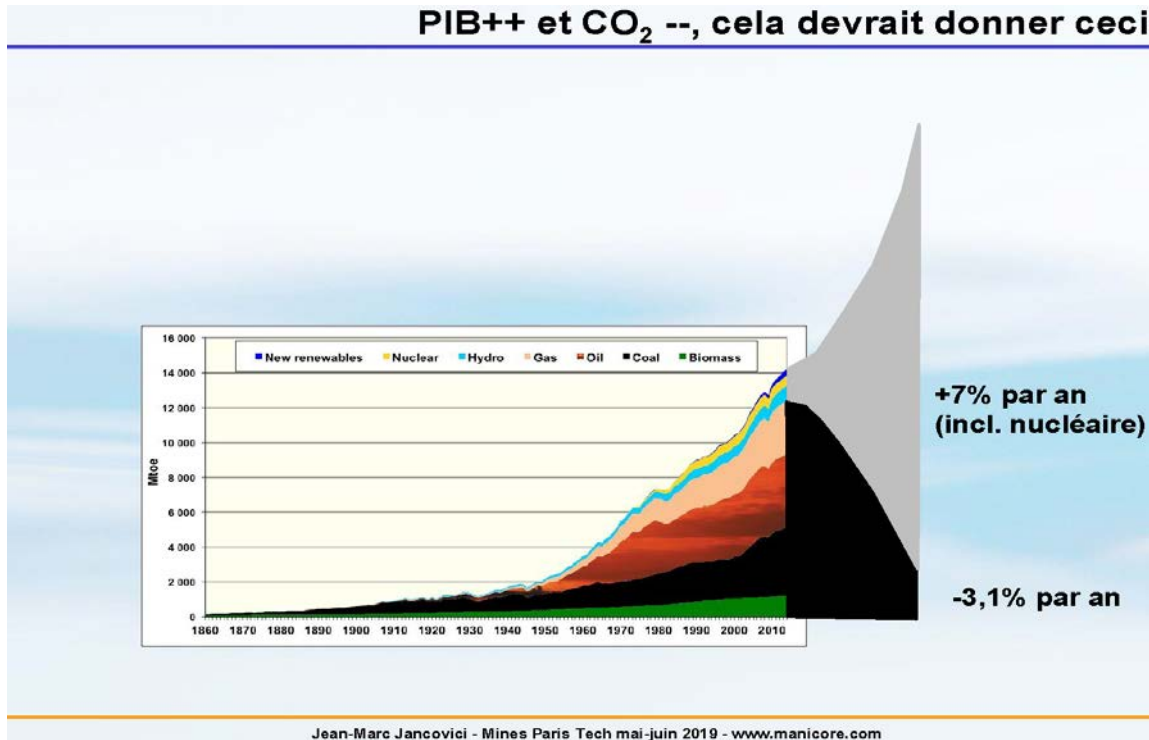
Efficacité énergétique sur une série portant sur 150 ans : comment a évolué le contenu carbone de l'énergie utilisée depuis 1860.

Note : la biomasse non comptabilisée alors qu'une partie de la biomasse a été de la déforestation, donc impacte en fait la teneur en CO2 de l'efficacité énergétique

Constats :

- la Révolution industrielle a précisément consisté à carboner l'énergie, à utiliser plus de combustibles fossiles
- depuis le début du XXe siècle, la teneur en CO<sub>2</sub> de l'énergie est grosso modo restée constante.
- les chocs pétroliers, une oscillation parmi d'autres, de même les nouvelles énergies renouvelables

Il semble très difficile de pouvoir sortir des énergies fossiles.



Discours politiques / médiatiques irréels mêlant :

- la décarbonation de l'économie, la quantité d'énergie fossile doit décroître
- la croissance du PIB, l'économie doit continuer à croître

Signifierait :

- croissance du PIB (= une transformation) = besoin de plus d'énergie
- avec moins d'énergies fossiles

Concrètement seule solution, d'ici 2050 :

- décroissance des énergies fossiles de 3 à 4 % par an
- croissance de l'énergie non fossile (incluant le nucléaire) de 7% par an

Pose la question de la faisabilité physique d'une croissance aussi rapide des énergies décarbonées, sachant que ce développement demeure dépendant des énergies fossiles pour leur mise en place, construction, etc.

## Une autre possibilité...

L'équation de Kaya :

**Est divisé par 3  
d'ici 2050**

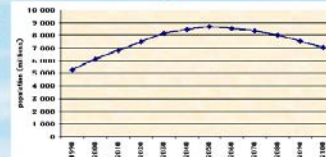
$$CO_2 = \frac{CO_2}{TEP} * \frac{TEP}{PIB} * \frac{PIB}{POP} * POP$$

Emissions de gaz carbonique = Contenu en gaz carbonique de l'énergie \* Intensité énergétique de l'économie \* Production par personne \* Population

-2,5% par an

-1,3% par an

0% d'augmentation (et donc une division par 2 à 3 en France si égalité)



+ 20% d'ici 2050 ?

Jean-Marc Jancovici - Mines Paris Tech mai-juin 2019 - www.manicore.com

A quelles conditions serait-il possible de tenir la division par 3 des émissions de CO2 d'ici 2050 ?

Pas de baisse de la démographie, mais par rapport aux 30% d'augmentation prévue d'ici 2050, mise en place de mesures pour une croissance réduite à 20%. Cela nécessite

- une réelle aide au développement des pays en développement (et non pas une aide aux firmes occidentales)
- d'orienter l'aide au développement vers les trois mesures éprouvées pour faire baisser la natalité, à savoir l'éducation des femmes, le planning familial et le système des retraites

Sobriété, ne pas faire croître le PIB mondial. On se contente de l'actuel niveau de développement. Toutefois, pour que les populations du Sud rattrapent le développement du Nord, cela consiste à diviser par 2 ou 3 le PIB des pays riches.

Développement des économies d'énergie avec attention portée à l'efficacité énergétique. Soit une réduction de 1,3% / an

Efforts intensifs sur la décarbonation de l'énergie :

- constructions massives de barrages, de centrales nucléaires, d'éoliennes et de panneaux solaires.
- capture et séquestration du CO2 à large échelle

Soit une réduction de 2,5% par an

=> cette organisation de l'équation est la seule permettant de résoudre le problème du climat et de la pauvreté. Elle consiste à appauvrir les riches.

2 manières de supprimer la pauvreté :

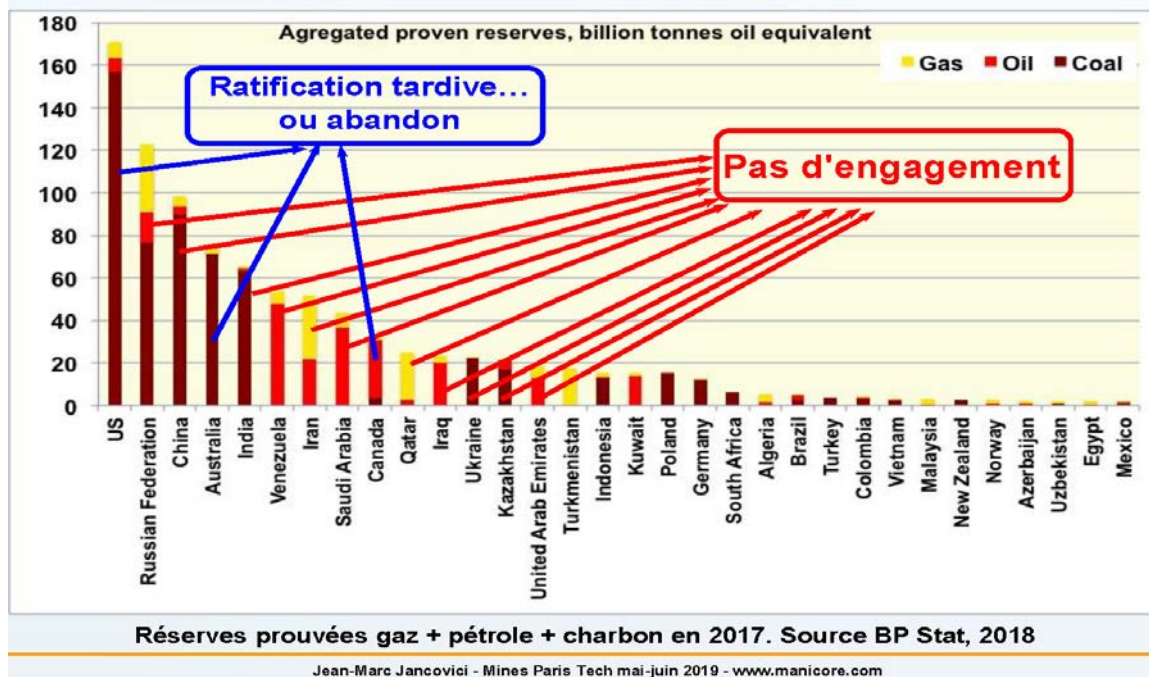
- Appauvrir les riches. Faire un Dirac, faire en sorte que tout le monde gagne la même chose, et du coup personne ne se situe à moins de 50% du revenu médian.
- Enrichir les pauvres. Augmenter la production, donc augmenter les émissions de CO2.

D'un point de vue arithmétique, seule la première solution est compatible avec les objectifs du développement durable.



# Chapitre 27 - Considérations sur l'organisation des démocraties et le fonctionnement des médias.

## Et qui arrive en tête des réserves de carbone?



Hiérarchie des réserves en combustibles fossiles par pays.

Utiliser moins de combustibles fossiles ? Cela consiste à exiger des pays détenteurs des réserves de ressources fossiles à ne pas les extraire du sol.

Le pré-requis à laisser sous terre les réserves dont les pays disposent se trouve dans l'engagement à limiter leurs émissions lors de l'accord de Paris (COP21).

4 pays ont ratifié tardivement ou ont abandonné l'engagement à limiter leurs émissions de CO<sub>2</sub>:

- Canada (abandon)
- Australie
- Etats-Unis (accord mais jamais de ratification)
- Russie (ratification extrêmement tardive)

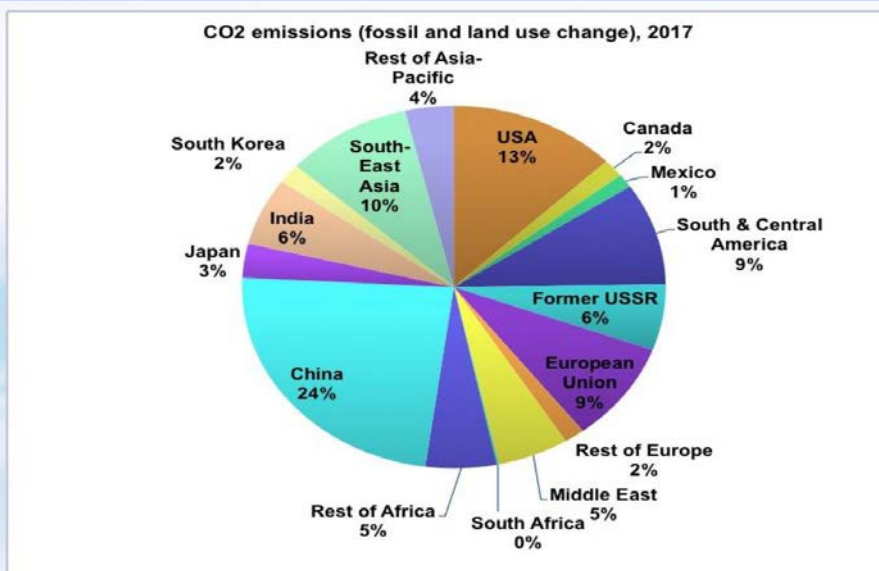
L'ensemble des autres pays gros détenteurs de réserves fossiles n'ont jamais pris d'engagement à limiter leurs émissions de CO<sub>2</sub>.

- Chine
- Inde
- Venezuela
- Iran
- Arabie Saoudite
- Qatar
- Irak
- Ukraine
- Kazakhstan
- Emirats Arabes Unis

Faible enthousiasme de la part des détenteurs de ressources fossiles à limiter l'extractivisme. Les pays qui s'engagent à agir contre le dérèglement climatique sont essentiellement ceux qui n'ont pas de réserves fossiles dans leur sous-sol.

Le charbon qui représente l'essentiel des ressources extractibles restantes, est une énergie essentiellement domestique. Par conséquent tant que les pays sont souverains sur cette question, les Etats font ce qu'ils veulent de leurs ressources. Cela ne dépend que de leur politique intérieure de décider de produire de l'électricité au charbon.

## Les cochons de pollueurs... sont des cochons qui votent



Répartition par pays des émissions de CO<sub>2</sub> en 2017, déforestation incluse. Calculs de l'auteur sur sources BP Statistical Review pour l'énergie, et Woods Hole Centre pour la déforestation

Jean-Marc Jancovici - Mines Paris Tech mai-juin 2019 - www.manicore.com

A prendre en compte avant d'en venir aux mesures techniques : l'essentiel des pays émetteurs ont actuellement un régime dit démocratique. Exceptions : Chine & Moyen-Orient.

## L'idée qu'on se fait d'une organisation « normale »



Jean-Marc Jancovici - Mines Paris Tech mai-juin 2019 - www.manicore.com

Le système démocratique n'est pas familier aux individus dans leur vie quotidienne / dans leur vie de salarié : verticalité du pouvoir et système de contrôle du respect des règles.

## Une démocratie, ce n'est pas une entreprise



**Je veux ! (ou je ne vote pas pour toi)**



**Je veux ! (ou je ne vote pas pour toi)**



**Je veux ! (ou je ne vote pas pour toi)**



**Je veux ! (ou je ne vote pas pour toi)**



Jean-Marc Jancovici - Mines Paris Tech mai-juin 2019 - [www.manicore.com](http://www.manicore.com)

Dans les démocraties le fonctionnement est tout à fait différent, cf De la démocratie en Amérique de Tocqueville. Le dirigeant est chargé d'arbitrer entre différentes forces, qui votent, c'est-à-dire décident du futur dirigeant.

Le chef n'est pas un vrai chef qui impose sa volonté aux populations, il est élu et se trouve placé dans un rapport de séduction permanent avec l'électorat. Ce qui explique que ses orientations sont dictées par "l'air du temps" et fluctuantes.

Exemple de la taxe carbone. Passées successivement en 1 semaine avec l'irruption des gilets jaunes :

- "nous serons inflexibles sur la taxe carbone"
- "on va remettre plus tard"
- "on abandonne"

## Il a dit quoi, Tocqueville, déjà ? (en 1840)

**La démocratie rendra les gens individualistes, court-termistes, jouisseurs, rouspéteurs, consuméristes.**

**La démocratie poussera à la consommation de masse (de produits médiocres).**

**Accessoirement (?!) elle confèrera aux media un pouvoir central, permettra l'égalisation des droits des hommes et des femmes, verra l'avènement de la publicité...**

**« [en démocratie, on accordera un grand prix aux] conceptions superficielles de l'intelligence, [et peu à la réflexion] profonde et lente »**

**La démocratie sera donc myope, poussant structurellement les citoyens à peu se soucier des dangers de long terme**

Jean-Marc Jancovici - Mines Paris Tech mai-juin 2019 - [www.manicore.com](http://www.manicore.com)

La démocratie considère une égalité fondamentale des individus, s'il existe des inégalités c'est qu'il y a une injustice. Encouragement à l'individualisme et aux intérêts particuliers.

Dans une monarchie, les individus sont fatalistes, se contentent de ce qu'ils ont et acceptent un système politique immuable, "naturel".

La démocratie favorise la consommation de masse. Par conséquent quel effet sur la démocratie d'une nécessaire réduction de la consommation de masse ? Comment réduire le droit à consommer ?

Prédominance des médias en démocratie, sans contre-pouvoir et avec une prime donnée au superficiel.

Conclusion : la démocratie recèle en elle-même sa propre fragilité, son incapacité à régler correctement les dangers de long terme. Prendre des décisions restrictives / supprimer des droits / prendre rapidement des mesures contraignantes : les systèmes démocratiques ne sont pas prévus pour.

Par conséquent si la démocratie est incapable de gérer la question du dérèglement climatique, c'est-à-dire

- faire des économies d'énergie,
- réduire la production / le PIB
- agir sur la démographie

... la solution qui adviendra finalement (de force, du fait du contexte) se passera de démocratie.

## Les media sont (hélas ou heureusement ?) incontournables

Nature du moyen de communication	Population touchée
Conférence d'un spécialiste, 1 fois par semaine, à 100 personnes en moyenne, pendant 40 ans	40 (ans)*46 (semaines par an)*100 (personnes par conférence) = 180.000 personnes environ
Ecriture d'un livre sur le climat	Quelques milliers de lecteurs
Réalisation d'un site Internet sur le climat	Quelques centaines de milliers de visites par an ; mais quel nombre réel d'internautes ? Le dixième ?
Journal de 20h d'une grande chaîne nationale	5 à 10 millions de personnes tous les jours
Un exemplaire de quotidien	Quelques millions de personnes par jour : l'Equipe (2,5 millions de lecteurs quotidiens), Ouest France (2,2 millions), Le Monde (2,2 millions), Le Parisien (2 millions avec la diffusion de Aujourd'hui en France)...

**L'électeur est concerné quand le problème est > dans les media de masse**

**Par ailleurs, attention à bien examiner la « logique » des comportements avec ce que les autres savent, et non avec ce que l'on sait soi-même !**

Jean-Marc Jancovici - Mines Paris Tech mai-juin 2019 - www.manicore.com

Dernière considération s'agissant de la logique de fonctionnement du système démocratique : l'expression du vote n'est pas dépendant des connaissances préalables de l'électeur. Pas de tests de connaissance sur le programme des candidats par exemple.

Les médias constituent la pièce centrale de la démocratie.

Ordres de grandeur :

- 1 conférencier à la fac touche 180 000 personnes dans sa vie
- 1 présentateur du JT : plusieurs millions de personnes par jour

L'enjeu est de faire relayer par le speaker l'information du spécialiste, ce qui est important et non pas ce qui est nouveau.

Ce qui figure en Une

- n'est pas représentatif de ce qui est important dans le monde (les faits)
- et pourtant c'est à partir de cette source que se forment les opinions des électeurs

## Dur métier que celui de journaliste

**Matière première sur le climat : > 400.000 pages de littérature scientifique**



**Rapport du GIEC = 2000 pages de littérature scientifique (taux de compression = 200 environ, soit de 100 heures à... 30 minutes)**



**Le résumé pour décideur = 40 pages (taux de compression = 50 ; on passe de 30 minutes à... 36 secondes)**



**Un article dans le journal = 1/2 page (taux de compression = 20 ; on passe de 36 secondes à 1,8 seconde)**

Jean-Marc Jancovici - Mines Paris Tech mai-juin 2019 - www.manicore.com

Rapport du GIEC : 2000 pages

Résumé pour décideurs : 40 pages (presque jamais lu par le personnel politique)

1 article dans le journal : 2 pages, division par 2000, forcément une information incomplète

## Parlez moi de transparence !

**Le lecteur/auditeur/télespectateur ne saura jamais :**

**Pourquoi ce sujet et pas un autre**

**Pourquoi la presse est allée voir Dupont et pas Durand**

**Si les propos tenus ont été correctement interprétés**

**Si le/la journaliste avait un parti pris avant le tournage (nous en avons tous, tout le temps)**

**Pourquoi « on » a sélectionné ceci et pas cela dans les propos enregistrés ou notés**

**Si l'intéressé(e) a relu son interview le cas échéant...**

Jean-Marc Jancovici - Mines Paris Tech mai-juin 2019 - www.manicore.com

Comprendre la logique de fonctionnement typique des médias : la nouveauté / le scoop, les faits divers, logique marchande / audimat, formation des journalistes / filtres inconscients, éventuels partis-pris / filtres conscients...

Un journal n'est pas une source opposable (pas fiable scientifiquement), il délivre une première information fabriquée qu'il faut nécessairement vérifier. Remonter à la source d'une information journalistique est le minimum : un journal c'est la fin d'un téléphone arabe dont on ne connaît ni le nombre de maillons intermédiaires ni la qualité de transmission entre chaque maillons.

## Chapitre 28 - La séquestration du CO2

### Moins de GES, revenons à la théorie (simple !)

Pour émettre moins de gaz à effet de serre, il y a deux moyens :

Basculer, « toutes choses égales par ailleurs », sur des énergies émettant moins de CO<sub>2</sub> ou pas du tout  
-> **transition charbon vers gaz, capture du CO<sub>2</sub>, renouvelables, et nucléaire(s)**

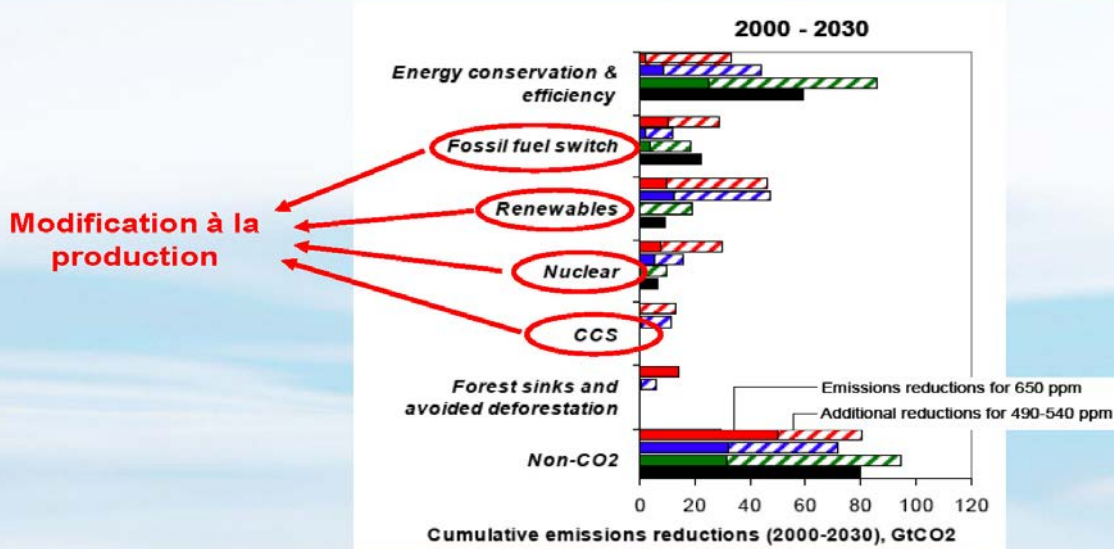
Utiliser, à mix énergétique constant, moins d'énergie  
-> **économies d'énergie**

Jean-Marc Jancovici - Mines Paris Tech mai-juin 2019 - www.manicore.com

Retour à la technique après l'organisation des démocratie et le fonctionnement des médias.

Avant de parler des économies d'énergie, retour à la technique avec la capture et séquestration du CO<sub>2</sub>, qui est 1 des 2 façons de réaliser des économies de CO<sub>2</sub>.

### Moins de CO<sub>2</sub>, revenons à la théorie (simple !)



Potentiels de réduction par technologie et répartition « à la louche » par grande famille de marges de manœuvre. Emissions cumulées de 2000 à 2030 ≈ 1000 GtC  
Source GIEC, 2007

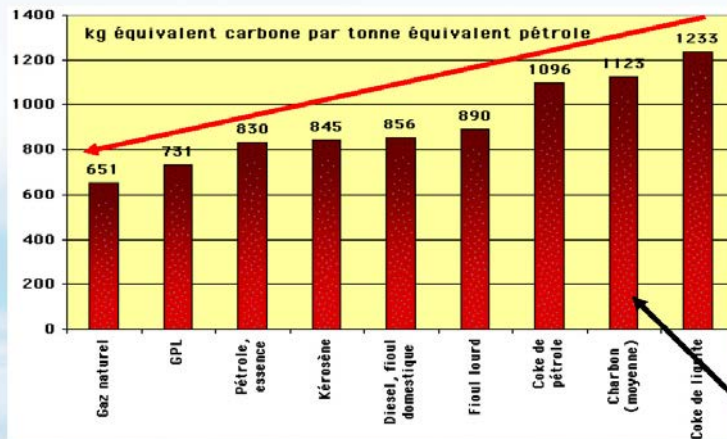
Jean-Marc Jancovici - Mines Paris Tech mai-juin 2019 - www.manicore.com

Potentiel de réduction des émissions de CO<sub>2</sub> par technologie.

Pour tenir les 2° de réchauffement global à la fin du XXIe siècle, c'est :

- 30% : économies d'énergie via les gains d'efficacité énergétique
- 70% : économies d'énergie via le passage aux nouvelles énergies renouvelables, nucléaires et CCS (Séquestration géologique du CO<sub>2</sub>)

## Moins de CO<sub>2</sub>, on commence par le plus facile (ou presque)



**Pas de chance : les grosses réserves sont là !**

Source Bilan Carbone, Ademe

Jean-Marc Jancovici - Mines Paris Tech mai-juin 2019 - www.manicore.com

Les émissions en équivalent carbone des différentes ressources fossiles.

Une première manière de réduire les émissions de GES consiste à conserver les énergies fossiles mais de remplacer le charbon par le gaz. En passant du gaz au charbon, on divise par 2 les émissions :

- 400 gr par kWh électrique pour le gaz
- 1 k de CO<sub>2</sub> par kWh électrique pour le charbon

Les Etats-Unis ont très fortement baissé la consommation de charbon dans la production électrique durant les 10 dernières années, remplacé pour l'essentiel par du gaz. L'explication se trouve dans l'essor du gaz de schiste qui a fait s'effondrer le prix du gaz aux Etats-Unis et rendu le gaz plus rentable.

En Europe, les fournisseurs de gaz - c'est à dire les majors pétrolières - sont très favorables à l'instauration d'un prix du CO<sub>2</sub> car ils en seraient les grands bénéficiaires (renchérissement de l'électricité produite avec du charbon).

Passer de la production électrique au charbon vers le gaz est un moyen de diviser les émissions de la production électrique par 3.

Sauf que les réserves de charbon sont bien plus importantes que les réserves de gaz. Il s'agit donc d'une marge de manoeuvre pour décarboner la production électrique mais transitoire.



## On produit le CO<sub>2</sub>, mais on le met dans un trou

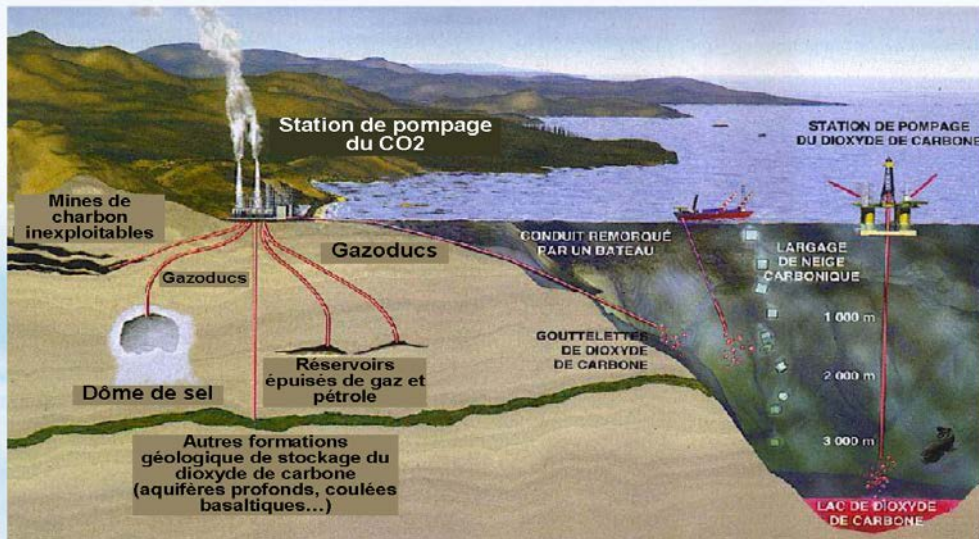


Schéma d'ensemble de la capture et séquestration.

Jean-Marc Jancovici - Mines Paris Tech mai-juin 2019 - www.manicore.com

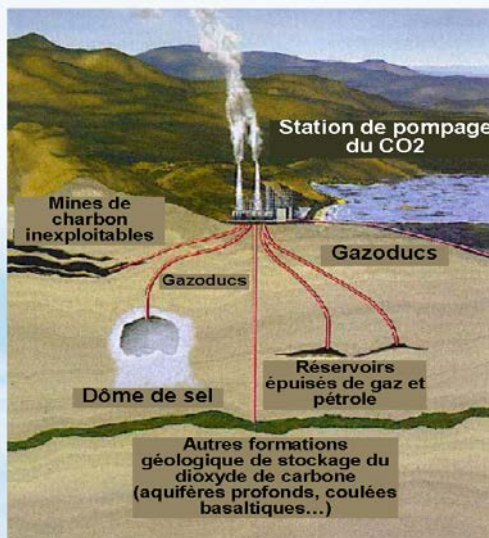
Une deuxième manière de réduire les émissions de GES consiste à séquestrer le CO<sub>2</sub> produit.

- capturer le CO<sub>2</sub> là où il est émis
- puis le stocker à un endroit d'où il ne sortira plus, sous terre et sous l'océan (idée techniquement compliquée donc abandonnée)

Sous terre :

- des réservoirs d'hydrocarbures épuisés (les roches poreuses qui contenaient le pétrole et le gaz). Avantage de cette solution pour les pétroliers : placer du CO<sub>2</sub> dans ces cavités permet de lessiver le pétrole restant. Cette pratique existe déjà aux Etats-Unis : les pétroliers achètent du CO<sub>2</sub> pour nettoyer / vider complètement les puits de pétrole
- les aquifères salins profonds, typiquement du sable imprégné d'eau, les coulées basaltiques.

## Attraper (rien que) le CO<sub>2</sub>, 1<sup>ère</sup> difficulté



Combustion à l'air = 80% d'azote en sortie, que l'on ne souhaite pas enterrer

Capture de 90% du CO<sub>2</sub>, reste 10%

La capture se fait là où sont les centrales = là où sont les mines ; la séquestration là où sont les formations géologiques -> transport

Jean-Marc Jancovici - Mines Paris Tech mai-juin 2019 - www.manicore.com

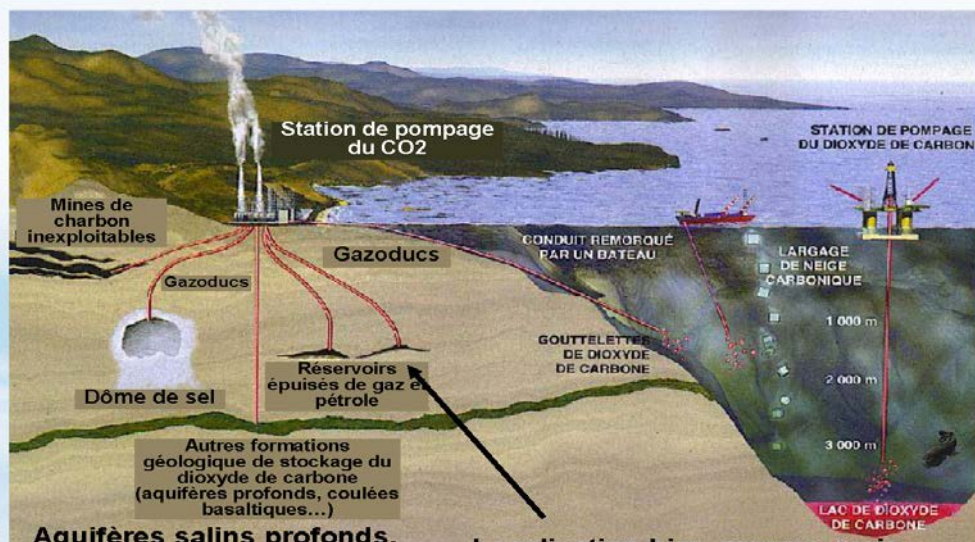
La consommation d'énergie se situe surtout au niveau du traitement du CO2

- capture (environ 20% à 30% de l'énergie du processus)
- épuration des fumées pour supprimer toutes traces (par exemple de suie)
- la fumée passe alors sur un lit d'amines / dans un bain d'amines (molécules qui vont absorber le CO2 de manière sélective puisque l'azote est écarté)
- chauffage du bain d'amines pour dessorber le CO2, ne récupérer que du CO2 pur (c'est la grosse part de la consommation d'énergie du processus)
- le CO2 est comprimé, acheminé jusqu'au point d'injection (les lieux de capture et les lieux d'injection ne coïncident pas nécessairement, il faut prévoir des infrastructures de transport pour l'acheminement du CO2)
- le CO2 est injecté sous forme supercritique (état de la matière soumise à une forte pression et à une forte température).

Sous forme supercritique (état intermédiaire entre gaz et liquide, le CO2 mis à haute pression prend cette forme supercritique),

- le CO2 devient dense comme un fluide, bien plus pratique à injecter que sous forme gazeuse
- le poids du CO2 est quasiment suffisant pour l'injection dans la réserve. Pas besoin d'une grande quantité d'énergie pour l'enfouissement (quelques % de la consommation d'énergie du processus)

## Trouver le trou (bien étanche), 2è difficulté



**Aquifères salins profonds, veines de charbon non exploitées, coulées basaltiques**

**Localisation bien connue, mais petite taille, et « trous » mal connus !**

**Schéma d'ensemble de la capture et séquestration.**

## La séquestration c'est bien, sauf que

**Peu d'exploitations commerciales aujourd'hui (exemple le plus connu = Sleipner en Mer du Nord)**

**Le rendement électricité/chaleur primaire passe de 45% à 35% (donc moins de PIB... ou plus de combustible !)**

**Pas de rétrofit commode sur les centrales existantes**

**Pas d'applications sur les sources diffuses (résidentiel - tertiaire - transports)**

**Tout cela a donc un coût (> 60 \$/tCO<sub>2</sub> voire... ) et sans obligation économique les électriciens ne feront rien, ou pas grand chose**

Jean-Marc Jancovici - Mines Paris Tech mai-juin 2019 - [www.manicore.com](http://www.manicore.com)

Limites de la technique de la séquestration du CO<sub>2</sub>

La difficulté majeure se situe dans la question du rendement. La séquestration du CO<sub>2</sub> est très gourmande en énergie. Environ 30% de l'énergie produite par une centrale électrique à charbon ou gaz devrait être reversé à la séquestration.

Comment mettre en place cette "économie forcée" de production électrique, c'est à dire jusqu'à -30% d'activité économique ? Augmenter la puissance des centrales de 30 % ? Cela pose de gros problèmes logistiques, notamment pour les centrales à charbon (tout doit être redimensionné convoyeurs, brûleurs, évacuation des cendres, ...), insolubles à bref délais. Pas de rétrofit commode sur les centrales existantes.

Donc le problème n°1 :

- non pas le prix de la séquestration
- mais une perte physique de production électrique qu'on ne sait pas compenser, problème de la pénalité énergétique

Explique qu'il n'y ait qu'une exploitation commerciale aujourd'hui en activité (Mer du Nord).

Autres difficultés :

- Pour injecter de grandes quantités de CO<sub>2</sub> dans le sol, il faut multiplier les puits d'injection car le débit par unité ne peut pas être très élevé.
- Pour capturer le CO<sub>2</sub>, le dispositif ne peut être installé que sur des sources d'émissions concentrées : les centrales à charbon (20% des émissions mondiales), centrales à gaz et à pétrole (7%), les cimenteries (6%), ... soit environ 40% des émissions de CO<sub>2</sub> qui pourraient être séquestrées.
- Du fait des coûts, les électriciens ne feront rien pour la séquestration / la CCS sans une obligation légale

## Chapitre 29 - Faire des économies en fin de chaîne : réglementation et planification

## Faire une maison « zéro énergie », on peut



**Exemple de maison passive (pas de chauffage, pas de climatisation)  
située en Suède**

Jean-Marc Jancovici - Mines Paris Tech mai-juin 2019 - [www.manicore.com](http://www.manicore.com)

Autre solution, l'efficacité en fin de chaîne plutôt qu'en début.  
Plusieurs solutions.

**Performance énergétique des bâtiments neufs** avec la création de logements passifs (pas de système de chauffage)

## L'impossible définition des économies : le chauffage



**Le logement de 1950 : 250 kWh/m<sup>2</sup>  
quand il y a le chauffage central**

**Le logement de 2008 : 80 kWh  
(finaux) par m<sup>2</sup>**

**3 fois moins d'énergie par m<sup>2</sup> de logement**

**Economies !**

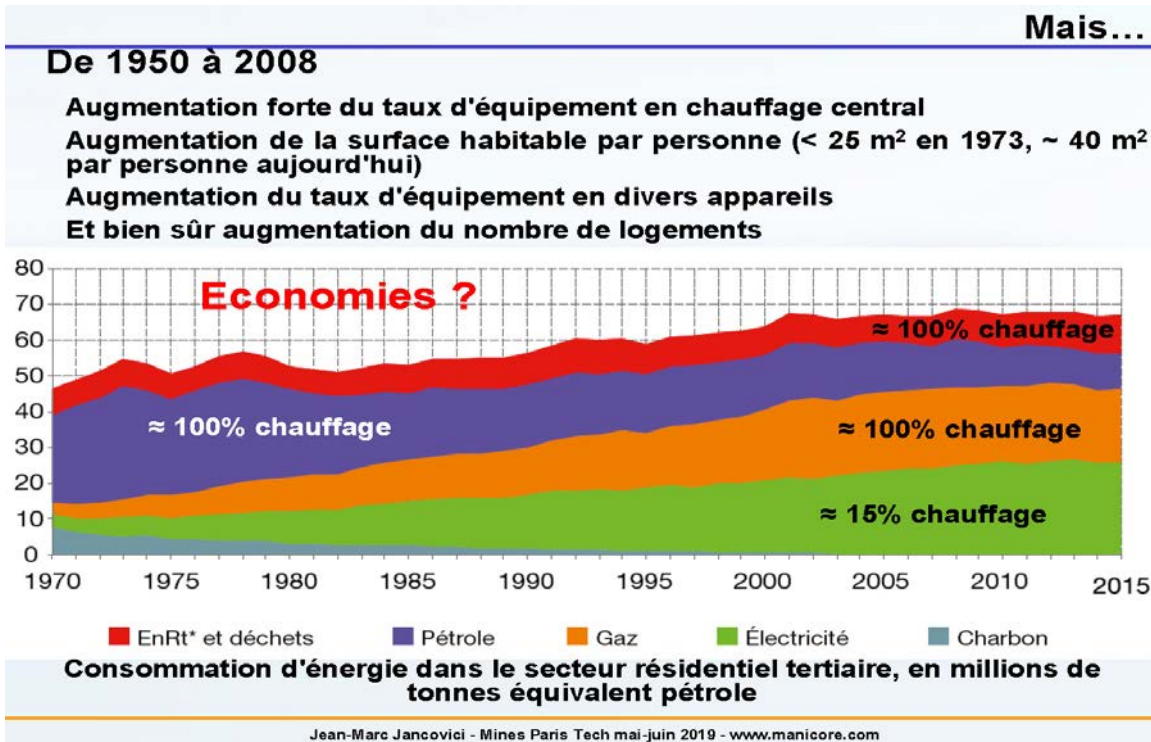
Jean-Marc Jancovici - Mines Paris Tech mai-juin 2019 - [www.manicore.com](http://www.manicore.com)

L'amélioration de l'efficacité énergétique des bâtiments n'est pas une nouveauté, et en France le mouvement a été encouragé par les chocs pétroliers et l'urbanisation (avec nécessairement plus de logements collectifs, intrinsèquement plus efficaces).

Comparaison :

- 1950 un bâtiment au chauffage central consomme 250 kWh/m<sup>2</sup>
- 2008 : 80 kWh/m<sup>2</sup>

- soit une division par 3 en 60 ans



Gains d'efficacité synonymes d'économies d'énergie et donc de réduction des émissions ? Non pour plusieurs raisons :

- les bâtiments non chauffés de plus en plus rares, l'équipement en chauffage central en forte augmentation
- la surface habitable par personne a augmenté (40 m<sup>2</sup> aujourd'hui contre 25 m<sup>2</sup> au début des années 70, avant les chocs pétroliers)
- l'augmentation du taux d'équipement des logements (équipement électro-ménager pléthorique qui n'existait pas ou peu dans les décennies passées) accroît la consommation d'énergie
- l'augmentation du nombre de logements

La quantité

- d'énergie totale consommée dans le secteur résidentiel tertiaire est demeurée à peu près constante depuis 50 ans (60 millions de TEP)
- d'énergie fossile utilisée n'a pas sensiblement diminué (elle a changé de nature, disparition du charbon, diminution du fioul et remplacement par le gaz)

Taux de renouvellement du parc résidentiel :

- le neuf ne remplace pas l'ancien, parc existant en France de 30 millions de résidences principales qui s'incrémente chaque année de quelques centaines de milliers de logements supplémentaires, + 1% chaque année qui correspond à l'accroissement naturel de la population et aux divorces)
- le taux de renouvellement n'est donc pas de 1% mais plutôt 1 pour 1000, par conséquent impossible de tabler sur la rotation du parc pour faire des économies d'énergie via l'efficacité énergétique des constructions neuves

## Laissez les ingénieurs faire des voitures économes !



La 2CV de 1950 : 375 cm<sup>3</sup> de cylindrée, 9 CV de puissance, 60 km/h, 500 kg



La C3 de 2008 (diesel) : 1.400 cm<sup>3</sup> de cylindrée, 70 CV de puissance, 160 km/h, 1.000 kg

**4 fois moins** de carburant consommé par cm<sup>3</sup> de cylindrée

**2,5 fois moins** de carburant consommé par km/h de vitesse maximale

**7 fois moins** de carburant consommé par CV de puissance nominale

**2 fois moins** de carburant consommé par kg de masse

**4,5 litres aux 100**

**5 à 6 litres aux 100**

**Economies ?**

Jean-Marc Jancovici - Mines Paris Tech mai-juin 2019 - [www.manicore.com](http://www.manicore.com)

Le parc automobile rencontre le même phénomène paradoxal

Comparaison de 2 voitures faiblement consommatrices d'essence à 60 ans d'intervalle :

- plus grande efficacité énergétique obtenue par l'innovation technologique (moins de carburant consommé, par exemple 2 fois moins de carburant consommé par kg de masse du véhicule)
- pourtant la consommation des véhicules d'hier et d'aujourd'hui n'a pas varié : 5 litres aux 100 km

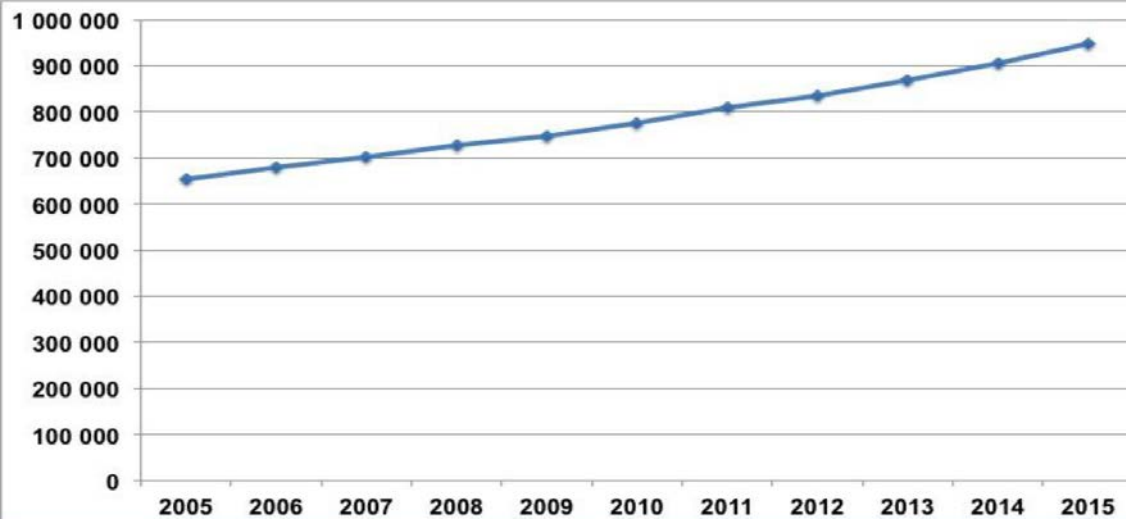
On a augmenté la performance de la voiture à consommation constante. On ne s'est pas soucié de la baisse réelle de la consommation d'énergie (possibilité technique aujourd'hui de construire des voitures consommant 2 litres / 100km : 500 kg, vitesse plafonnée à 90km/h ... soit la 2cv d'hier qui aurait bénéficié des innovations technologiques avec l'optique de réduction de consommation)

Même phénomène que pour les bâtiments :

- approximativement la même quantité d'énergie consommée à 60 ans d'écart
- mais augmentation de l'espace habitable et de l'équipement / confort
- qui annule le gain potentiel d'économie d'énergie fourni par l'innovation technologique

Si elle n'est pas "fléchée" vers une réduction effective de la consommation d'énergie, les innovations technologiques débouchent sur un accroissement des performances avec une consommation constante voire croissante.

## Mais...



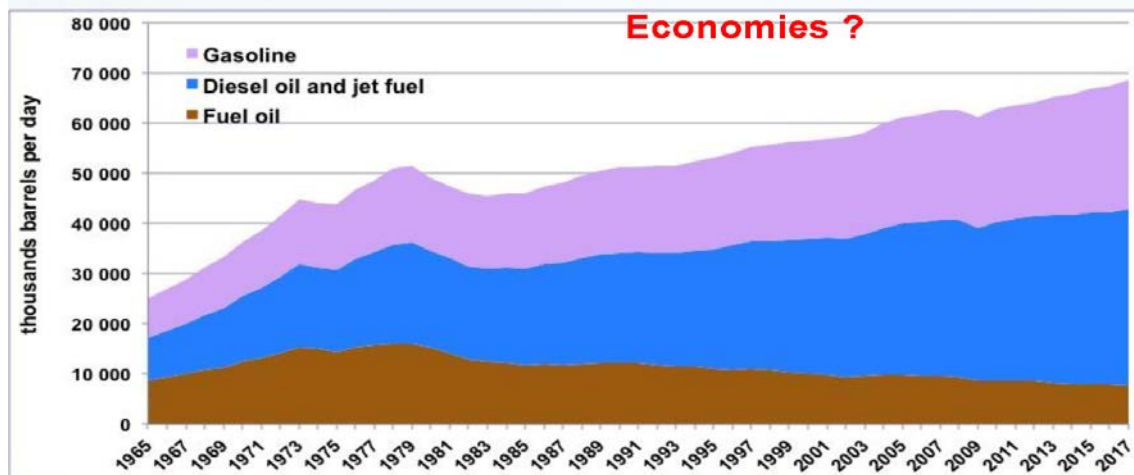
**Flotte mondiale de voitures particulières. Source International Organization of Motor Vehicle Manufacturers, 2018**

Jean-Marc Jancovici - Mines Paris Tech mai-juin 2019 - www.manicore.com

Augmentation du parc de voitures particulières dans le monde :

- 2005 : 650 millions de voitures
- 2015 : 950 millions de voitures
- presque 50% de hausse en 10 ans

## En voiture, tout le monde !



**Consommation mondiale de carburants depuis 1965 (pour le fuel oil, une partie va dans l'industrie). Données BP Statistical Review.**

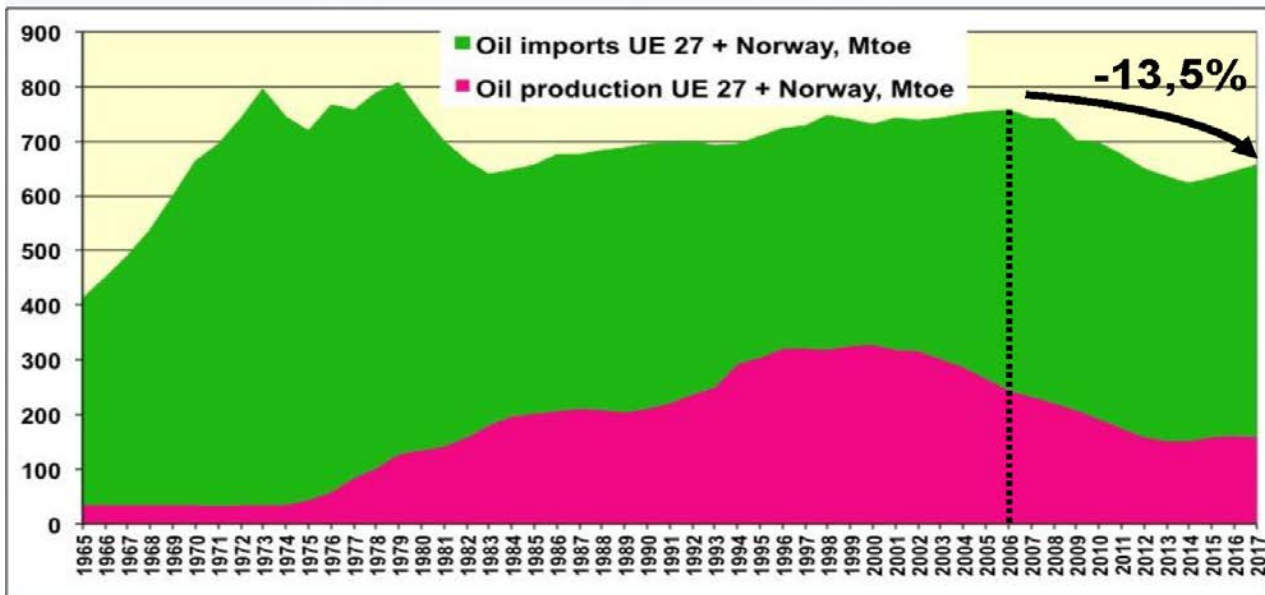
Jean-Marc Jancovici - Mines Paris Tech mai-juin 2019 - www.manicore.com

Consommation de carburant dans le monde augmente (pour le moment) :

- 1965 : 25 000 barils / jour
- 2017 : 70 000 barils / jour
- multiplié par 3

Aucune économie constatée au niveau mondial.

## Mais l'Europe n'est pas le monde...



Approvisionnement pétrolier de l'Union+Norvège depuis 1965. Jancovici, sur données BP Statistical Review, 2018

Jean-Marc Jancovici - Mines Paris Tech mai-juin 2019 - [www.manicore.com](http://www.manicore.com)

Pas d'économie ... sauf en Europe où l'approvisionnement en pétrole est sous contrainte (impossibilité d'importer davantage ou de produire plus) et les économies de carburant y sont forcées.

Les Européens sont déjà des "pauvres" du pétrole :

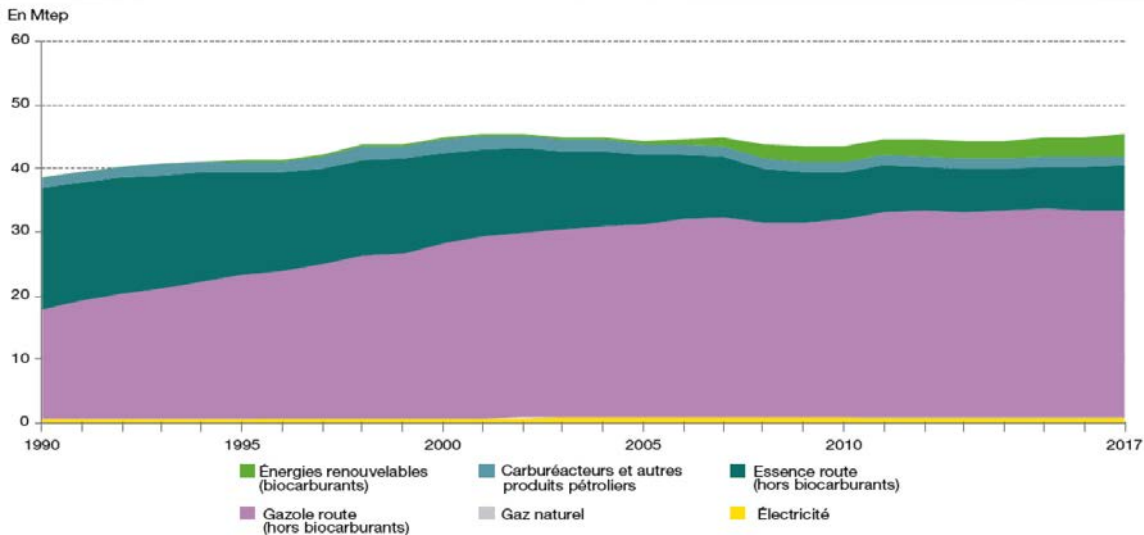
- baisse à partir de 2006 de la consommation de carburant
- 2006 à 2017, baisse de 13,5% de la consommation

Effet d'optique de la remontée depuis 2014, concomitance de deux évolutions :

- mise en oeuvre de projets en Mer du Nord pour mieux extraire le fond des puits
- approvisionnement en pétrole de schiste (alors rentable du fait d'une augmentation du prix élevé du baril) fait augmenter l'approvisionnement mondial



## Et nous autres gaulois sommes européens



### Consommation française de carburants depuis 1970. Données Service de l'Observation et des Statistiques, 2016.

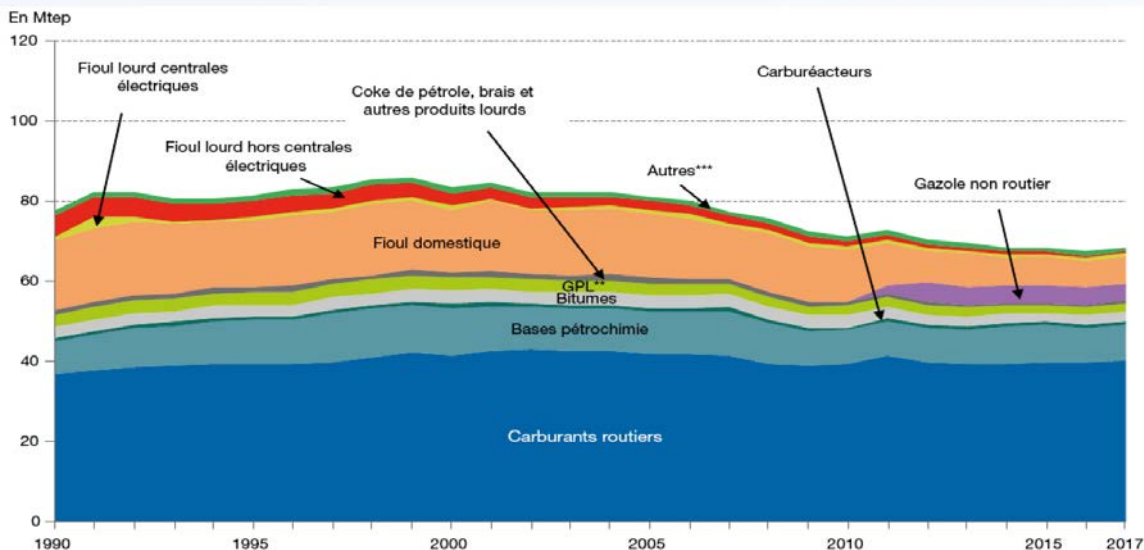
Jean-Marc Jancovici - Mines Paris Tech mai-juin 2019 - www.manicore.com

Evolution sur 27 ans de la consommation de carburants en France.

- un maximum atteint au début des années 2000
- depuis la consommation est stable

La consommation "se tasse" sous la contrainte : ce n'est ni du fait d'une plus grande efficacité ni du fait d'une sobriété souhaitée. C'est un problème d'approvisionnement.

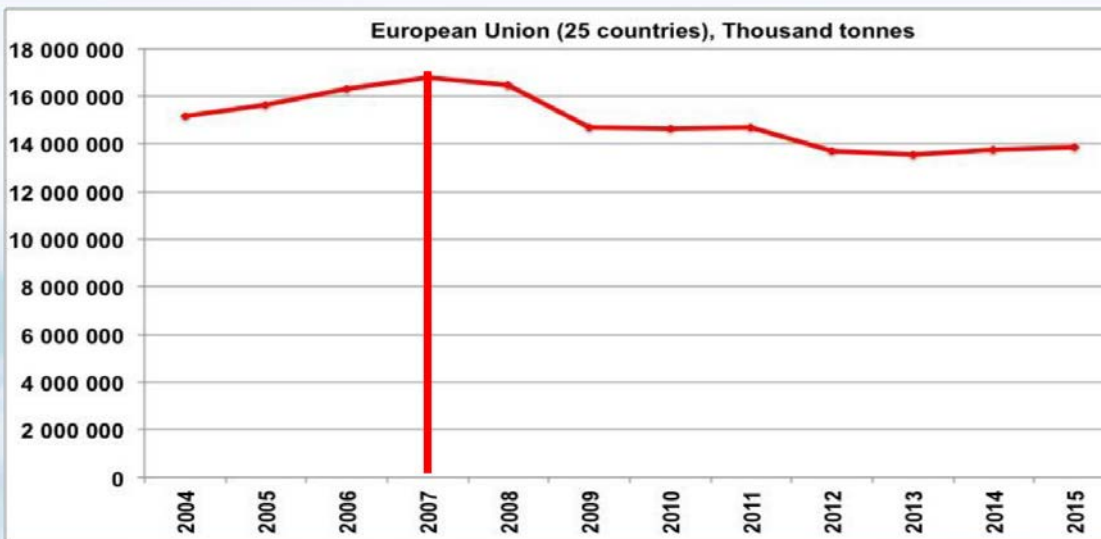
## « Economiser » est plus facile quand il y a une alternative



### Consommation française de produits pétroliers depuis 1990. Données CGDD, 2017

Jean-Marc Jancovici - Mines Paris Tech mai-juin 2019 - www.manicore.com

## Moins de pétrole, moins de camions



Tonnes chargées en Europe depuis 2004. Données Eurostat

Jean-Marc Jancovici - Mines Paris Tech mai-juin 2019 - www.manicore.com

Moins de pétrole a pour conséquence moins de trafic marchandise via les camions.

- maximum atteint en 2007, 17 millions de tonnes
- aujourd'hui autour de 14 millions de tonnes

Autres maximums atteints en 2007 :

- la production industrielle européenne
- la construction

En Europe des économies obligées sont constatées depuis 2007 en observant les flux physiques de la production.

## L'impossible définition des économies : l'électricité



Le frigo de 1950 : ~100 litres, ~400 kWh/an



Le frigo de 2010 : 280 litres, 30% en compartiment surgelés, 320 kWh/an

2 à 4 fois moins d'électricité par litre refroidi

Par rapport à 1970, 4 fois moins d'électricité consommée par réfrigérateur

**Economies !**

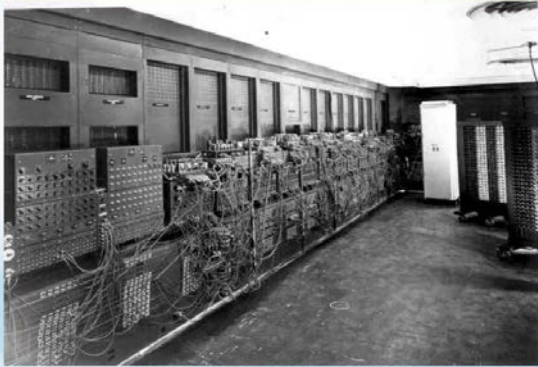
Jean-Marc Jancovici - Mines Paris Tech mai-juin 2019 - www.manicore.com

Exemple de l'électroménager.

- 1950 : volume 100 litres / consommation 400 kWh/an

- 2010 : capacité triplée dont 1/3 en compartiment surgelé / consommation 320 kWh / an
- 2 à 4 fois moins d'électricité nécessaire pour refroidir 1 litre.
- par rapport à 1970, cela signifie 4 fois moins d'électricité consommée par réfrigérateur, une réelle économie

## L'impossible définition des économies : l'électricité



L'ordinateur de 1950 (ENIAC) : 27 tonnes, 18.000 tubes à vide, 150 kW.



L'ordinateur de 2015 : 2 kg, 50 millions de transistors, 20 W

Un million de fois moins de puissance électrique consommée par transistor

Un million de fois moins de poids par transistor

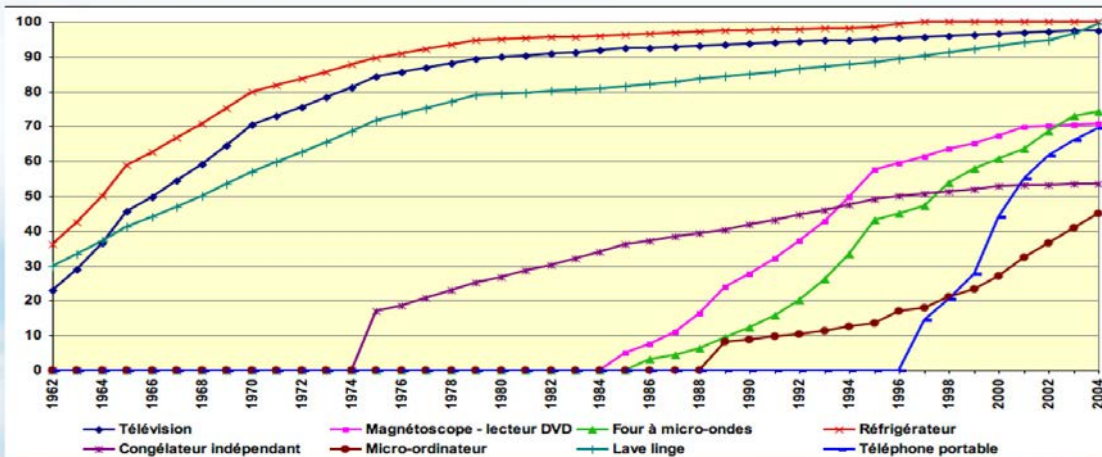
**Economies !**

Jean-Marc Jancovici - Mines Paris Tech mai-juin 2019 - www.manicore.com

L'efficacité énergétique des ordinateurs est phénoménale.

Les ordinateurs portables d'aujourd'hui sont plus puissants que les supercalculateurs de la mission Apollo.

## Mais...

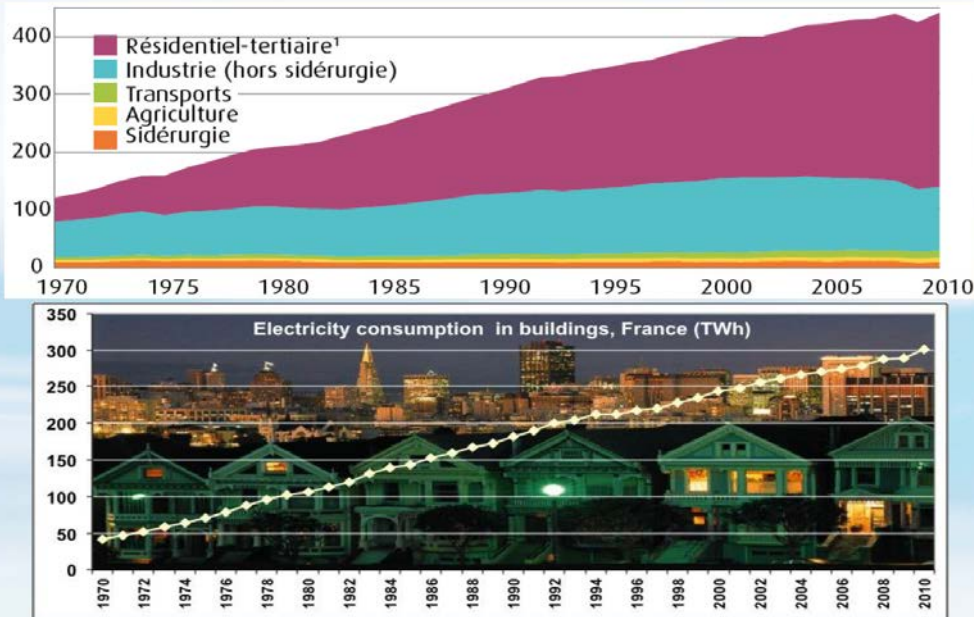


Evolution du taux d'équipement des ménages français de 1962 à 2004. Source : INSEE, 2010

Jean-Marc Jancovici - Mines Paris Tech mai-juin 2019 - www.manicore.com

Mais pas d'économie d'énergie véritable du fait de l'explosion du taux d'équipement des ménages en électroménager (réfrigérateurs, lave-linge, télévision, four à micro-ondes, magnétoscopes / lecteurs DVD, téléphones portables, congélateurs, micro-ordinateurs, ...)

## Economies ?



Consommation d'électricité en France, 1970 - 2010. Source CGDD, 2011

Jean-Marc Jancovici - Mines Paris Tech mai-juin 2019 - www.manicore.com

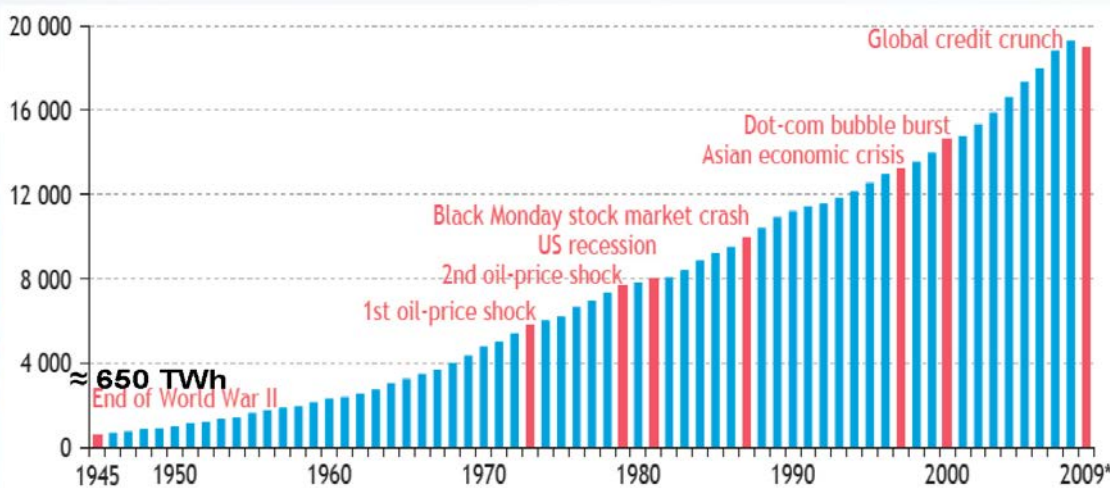
Cet équipement des ménages en électroménagers divers se constate sur l'évolution de la consommation d'électricité utilisée dans les bâtiments.

En France, le résidentiel-tertiaire en quarante ans est responsable de l'augmentation de la consommation d'électricité (et ce n'est pas le chauffage mais tous les appareils électriques qui équipent les logements).

Même si tous ces équipements sont bien plus efficaces sur le plan énergétique qu'il y a 50 ans (quand ils existaient), leur diffusion massive dans la population aboutit en valeur absolue à une augmentation sensible de la consommation d'électricité.

## Plus d'électrons pour tous

≈ 21.000 TWh



Evolution de la consommation mondiale d'électricité depuis 1945, en TWh  
Source : World Energy Outlook, AIE, 2009

Jean-Marc Jancovici - Mines Paris Tech mai-juin 2019 - www.manicore.com

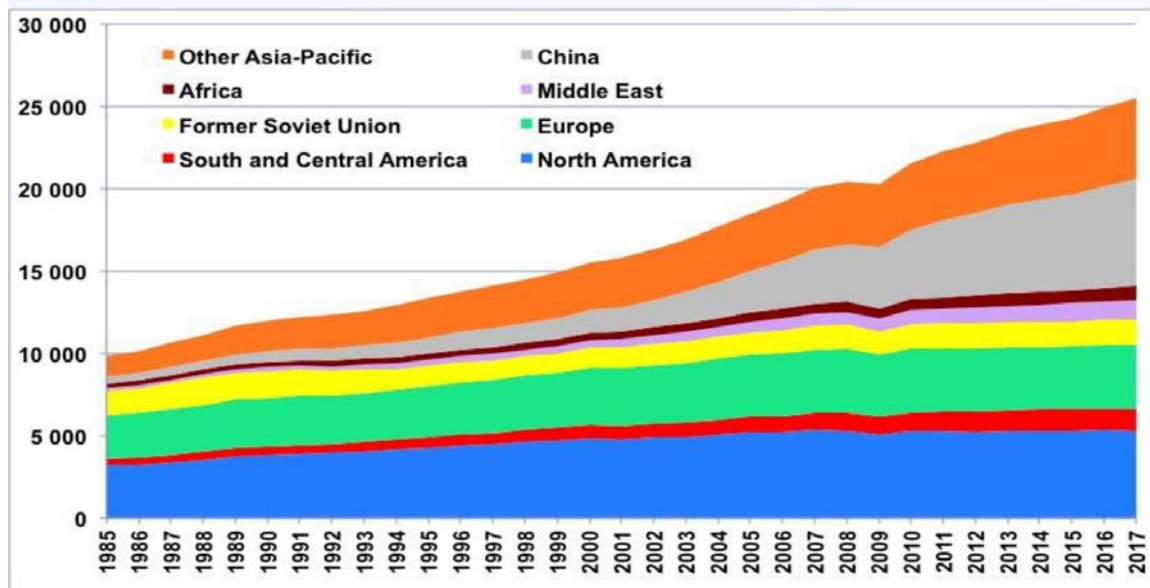
Evolution de la consommation d'électricité dans le monde depuis 1945

- de 650 tWh en 1945 à 21000 tWh en 2009 (à titre de comparaison la production électrique de la France

aujourd'hui est de 550 tWh, la terre entière en 1945 consommait à peine plus d'électricité que la France aujourd'hui)

- l'électricité pour tous est l'évolution majeure de la seconde moitié du XXe siècle

### Et encore plus !



Consommation mondiale d'électricité, 1980-2017.

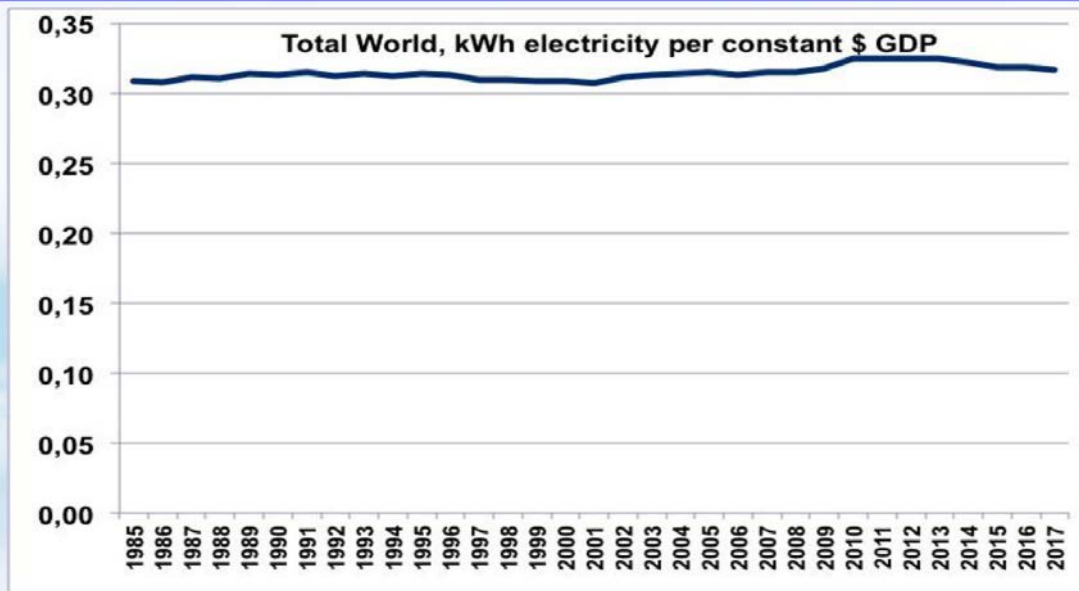
Source BP Statistical Review

Jean-Marc Jancovici - Mines Paris Tech mai-juin 2019 - www.manicore.com

Zoom sur la période 1980 / 2017

- essor de la Chine
- et de la zone Asie Pacifique

### Efficacité ?

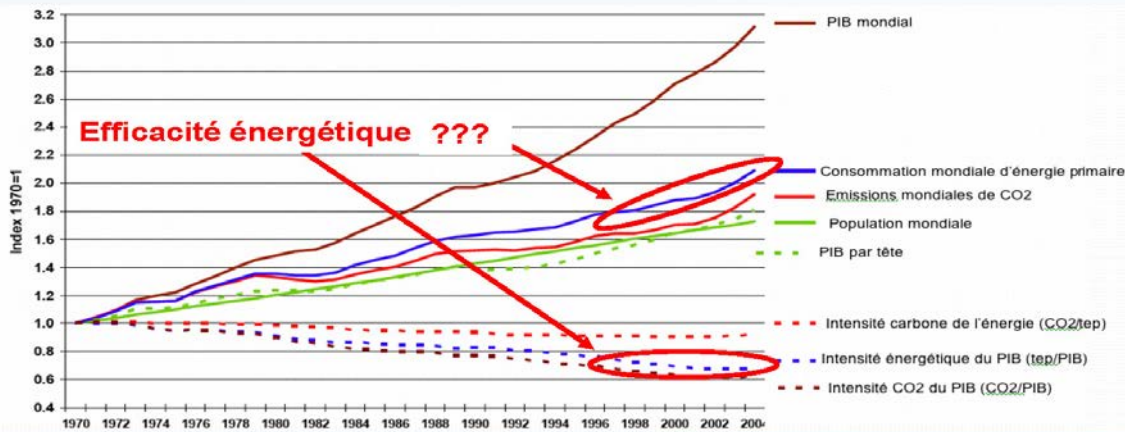


kWh d'électricité utilisés pour produire un dollar de PIB dans le monde. Calculs Jancovici ; données primaires BP Statistical Review et World Bank.

Jean-Marc Jancovici - Mines Paris Tech mai-juin 2019 - www.manicore.com

L'électricité est une énergie finale qui est particulièrement difficile à faire baisser par unité de PIB. La quantité d'électricité qui est utilisée dans le monde (moyenne mondiale) par \$ de valeur ajoutée / de PIB La valeur est quasi-constante : aucun gain d'efficacité électrique par \$ de PIB sur les 30 dernières années.

## Moins d'énergie, c'est quoi exactement ?



Evolution comparée du PIB, de la consommation d'énergie et des émissions de gaz à effet de serre. Source GIEC, 2007

Jean-Marc Jancovici - Mines Paris Tech mai-juin 2019 - www.manicore.com

A propos des innovations technologiques.

Il convient de faire très attention lorsqu'il s'agit d'économies d'énergie à ne pas confondre :

- l'efficacité unitaire (intensité énergétique du PIB, intensité CO2 du PIB), c'est à dire combien d'efficacité est gagnée par appareil ou par usage
- l'efficacité globale, la capacité à faire baisser globalement la consommation d'énergie à partir du gain d'efficacité unitaire

En permanence, depuis que l'on réalise des statistiques :

- l'efficacité unitaire s'améliore (doucement sur les 50 dernières années)
- en même temps qu'une quantité globale utilisée augmente

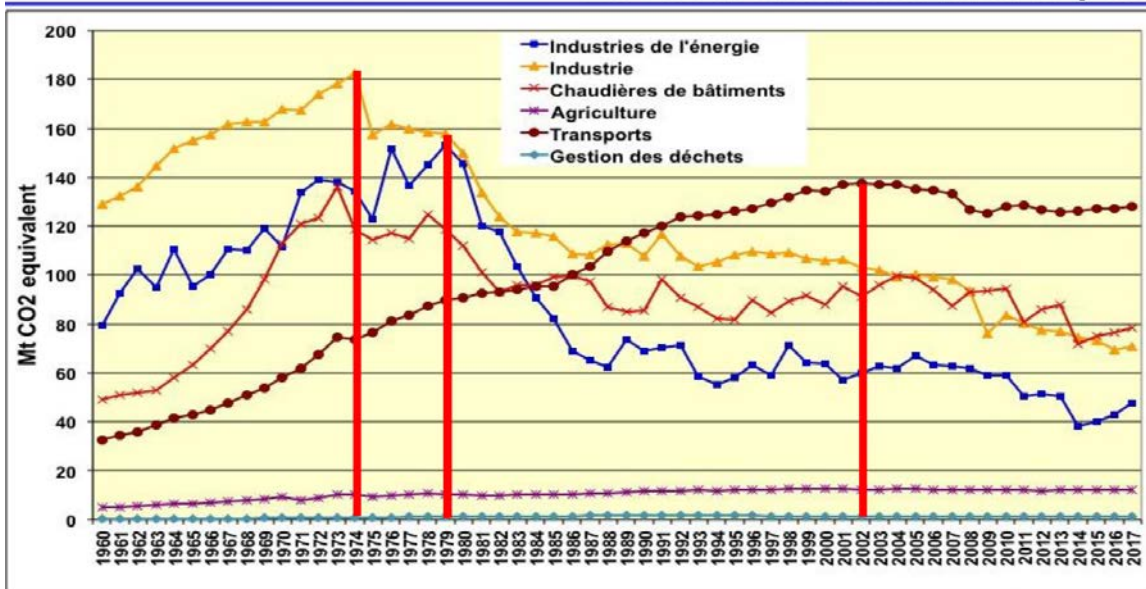
Si on se place soit du point de vue de l'atmosphère, soit des stocks de combustibles fossiles, ce qui compte n'est pas l'efficacité par appareil mais les émissions et les extractions. Ce qui doit être baissé ce sont les émissions totales / la consommation totale des combustibles fossiles.

Jusqu'à présent, et à quelques exceptions près, tout ce qui a été gagné en efficacité unitaire a toujours été plus que compensé par une multiplication / une extension des usages.

Compter sur les gains d'efficacité sans réglementer les usages ne fonctionnera jamais.

## Chapitre 30 - La variable prix à l'épreuve du temps

## En fait la vérité est dans le prix



Emissions de CO<sub>2</sub> par secteur entre 1960 et 2017 en France. Source CITEPA, format SECTEN, 2018

Jean-Marc Jancovici - Mines Paris Tech mai-juin 2019 - www.manicore.com

### La contrainte est la seule manière efficace de faire baisser les émissions de CO<sub>2</sub>.

Les émissions de CO<sub>2</sub> de la France découpées en 6 secteurs :

- tous les secteurs augmentent jusqu'aux chocs pétroliers (forte croissance de l'économie du fait de la manne d'énergie elle-même croissante)
- brusque contrainte prix en 1973 sur le pétrole.

2 secteurs réagissent très rapidement :

- les émissions de l'industrie chutent immédiatement (rationalité économique / exigence de faire des économies d'énergie bien plus élevée dans le monde économique que dans les ménages) et le 2nd choc accélère encore le processus
- les émissions de l'industrie de l'énergie (raffineries et centrales électriques) réagissent très fortement après le second choc pétrolier. Les raffineries ont moins à raffiner donc émettent moins et parallèlement se met en route le programme nucléaire français.

1 secteur réagit également à la baisse (de manière moins brusque) : les chaudières de bâtiment. Avant les chocs pétroliers, la norme était l'installation de chaudières à fioul : après 1973 on passe aux radiateurs électriques et aux chaudières à gaz partout.

1 secteur paraît insensible aux 2 chocs pétroliers, continuant à émettre de plus en plus : les transports. L'explication essentielle est les transports concernent essentiellement des individus au volant de leur voiture et dépourvus d'une rationalité économique suffisante pour limiter leur consommation proportionnellement à l'augmentation du prix. D'autant que

- cette augmentation de prix a été transitoire
- que les modes de vie ont changé (croissance du mode de vie urbain et des couronnes péri-urbaines)

S'agissant des transport, la contrainte prix n'ayant pas suffi, il faudra attendre la contrainte physique sur l'approvisionnement en pétrole en Europe, au début des années 2000, pour que les émissions de CO<sub>2</sub> des voitures et camions baissent.

La contrainte a fonctionné durant les 40 dernières années :

- le prix (chocs pétroliers)

- la réglementation thermique associée pour faire des économies d'énergie
- un approvisionnement limité en pétrole, contrainte physique

## La morale c'est bien, mais le prix c'est mieux



**Prix du pétrole en \$ constants (de 2004) depuis 1861. Source BP Statistical Review, juin 2005**

**Consommation aux 100 km des voitures neuves vendues dans divers pays de l'OCDE.**

Source GIEC



Jean-Marc Jancovici - Mines Paris Tech mai-juin 2019 - www.manicore.com

### Zoom sur les transports

Le secteur des transports n'a pas été totalement insensible à la contrainte prix consécutive aux chocs pétroliers. En regardant en détail, on s'aperçoit que cette contrainte a agité mais qu'elle a été de trop courte durée pour entraîner de véritables effets visibles sur les émissions de CO<sub>2</sub>.

La mise en parallèle

- de la courbe des prix du pétrole
- et de la consommation aux 100km des véhicules neufs vendus dans l'année

La baisse de la consommation s'observe au début des années 80 :

- de 1979 à 1985, alors que le prix du carburant est très élevé, dans tous les pays de l'OCDE, les consommateurs achètent des véhicules moins consommateurs d'essence
- après 1985, lorsque se produit le contre-choc pétrolier et que les prix se stabilisent, les achats "vertueux" des consommateurs de l'OCDE prennent fin. Les véhicules achetés sont aussi polluants que ceux des années précédentes.

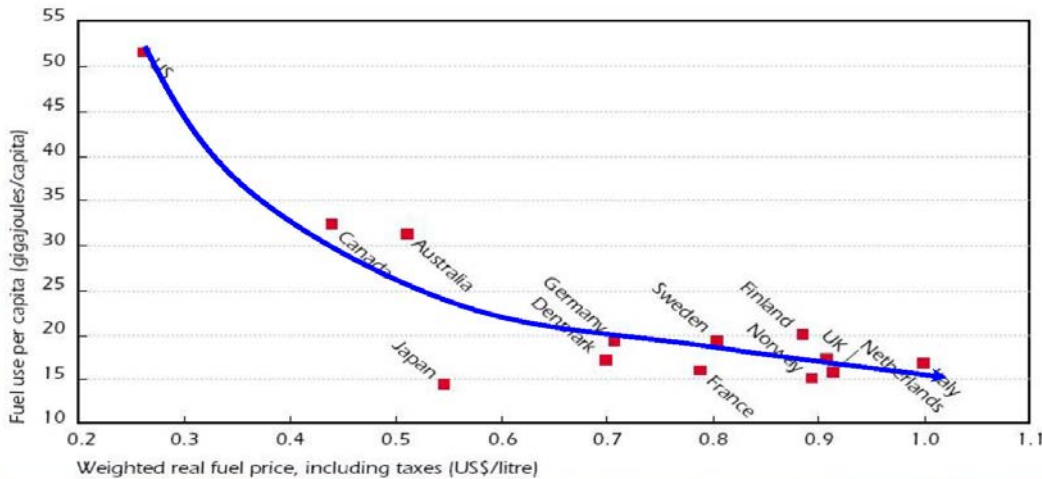
Evolution du parc automobile lié à l'évolution des villes :

- En 1974, le parc automobile est la moitié de ce qu'il est aujourd'hui. Il y a alors beaucoup moins de personnes habitant dans les couronnes péri-urbaines et qui sont tributaires de la voiture pour se rendre au travail.
- Forte dépendance à la voiture qui explique le mouvement des gilets jaunes, qui n'était pas advenu lors des chocs pétroliers.



## Bis repetita placent....

Car Fuel Use per Capita versus Average Fuel Price, 1998



**Consommations de carburants routiers par habitant en 1998 (axe vertical, en gigajoules ; une tonne de pétrole  $\approx$  42 GJ) en fonction du prix de détail TTC des carburants en \$ par litre (axe horizontal). Source AIE, 2004**

Jean-Marc Jancovici - Mines Paris Tech mai-juin 2019 - www.manicore.com

Quantité de carburant consommé dans différents pays

- par personne et par an
- en fonction du prix du carburant à la pompe
- en 1998, c'est-à-dire à un moment où les prix du pétrole sont relativement bas (donc pilotés par la politique fiscale du pays)

On observe que :

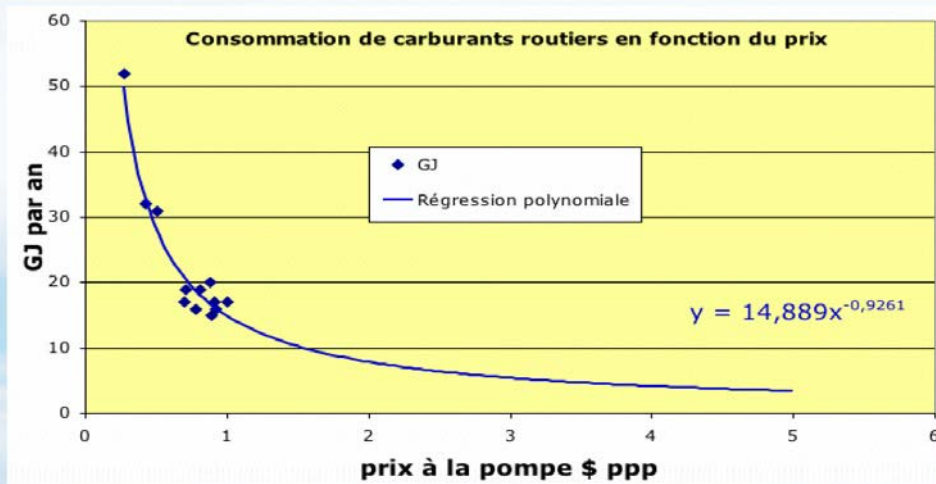
- plus la politique fiscale a consisté à taxer les carburants
- et moins forte est la consommation de carburant

Les système s'adapte sur le moyen terme :

- si pendant une longue période le prix des carburants sont élevés,
- alors les constructeurs mettent au point de petites voitures économes (dès le départ en Europe, continent importateur les constructeurs ont construits des modèles de dimensions plus réduite que leurs homologues américains)

Pour qu'un tel système vertueux se mette en place il faut laisser le temps à la population de s'ajuster / de renouveler sa voiture (marché des occasions).

## Combien plus cher ?



Même graphique que précédemment, avec prolongation tendancielle. Si celle-ci est valide, il faudrait que l'essence coûte (sur une période longue) environ 4 \$/litre (en prix constants) pour que la consommation soit divisée par 4 en France.

Extrapolation de l'auteur.

Jean-Marc Jancovici - Mines Paris Tech mai-juin 2019 - [www.manicore.com](http://www.manicore.com)

Pour que le prix agisse réellement sur la consommation (= taxe carbone), par exemple diviser la quantité de carburant par 4 (GJ),

- il faudrait multiplier le prix du carburant par 4
- passer donc à 6 € le litre

Mettre en oeuvre une telle augmentation n'est pas possible à bref délais. Sachant qu'il existe une autre manière de parvenir à faire baisser la consommation de carburant et de manière beaucoup plus rapide : régler.

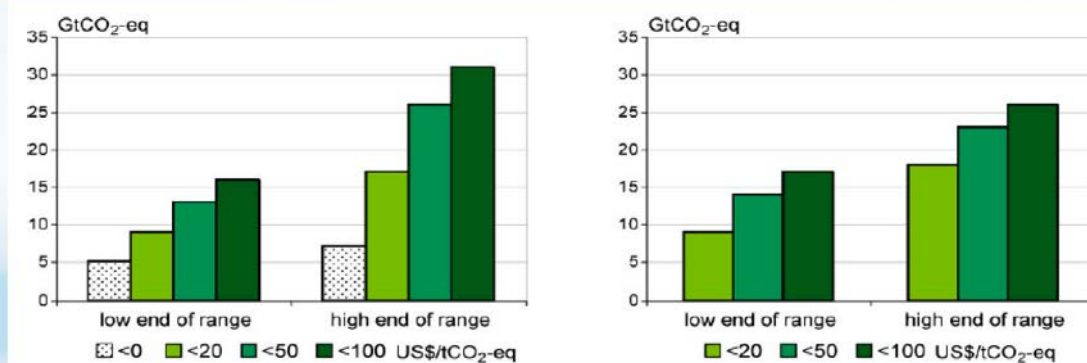
Exemple

- interdire dans 5 ans aux constructeurs de construire des voitures consommant plus de 2 litres pour 100 km
- dans ce cas le parc français voit sa consommation de carburant diminuer par 3

Des mesures d'ajustements à mettre en place :

- il y aura une dépréciation inévitable et très forte des voitures d'occasion,
- des primes à la casse à prévoir pour sortir du parc automobile ces véhicules qui consomment plus de 2 litres

## La vertu a un prix, tout le monde le dit



**Ordre de grandeur des émissions évitées en fonction du prix de la tonne de CO<sub>2</sub> (taxe, ou dispositif équivalent) :**

à gauche, addition d'études sectorielles

à droite, analyses macro.

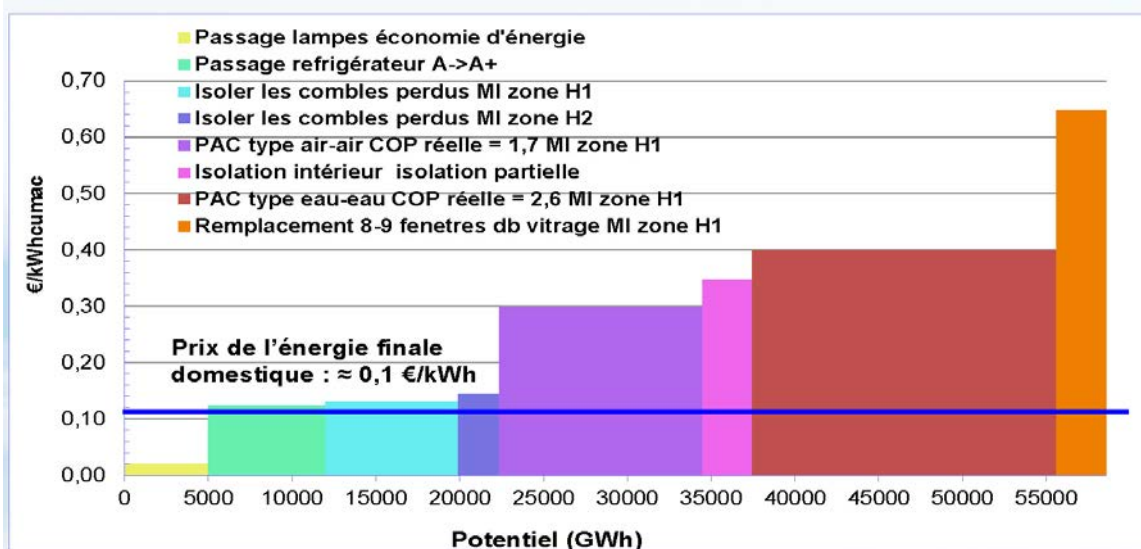
**NB : les émissions tendanciennes en 2030 sont comprises entre 50 et 80 Gt CO<sub>2</sub>-equ.**

Source : GIEC, 2007

Jean-Marc Jancovici - Mines Paris Tech mai-juin 2019 - www.manicore.com

Non traité

## La vertu a un prix, cela reste vrai même pour vous !



**Coût par kWh évité de diverses mesures permettant d'économiser de l'énergie de chauffage en France. Source Carbone 4, 2011**

Jean-Marc Jancovici - Mines Paris Tech mai-juin 2019 - www.manicore.com

Economies d'énergie de chauffage en France

Le prix peut inciter les individus à moins consommer d'énergie. Dans le domaine du chauffage / de l'isolation des bâtiments, cela s'avère insuffisant.

Coût au kWh évité de diverses actions pour économiser de l'énergie :

- lampes à économie d'énergie : coût = 0,010 € / kWh pour un gisement de 5000 gWh
- passage du réfrigérateur A à A+ = 0,11 € / kWh pour un gisement de 7000 gWh
- isolation des combles perdus MI zone H1 = 0,12 € / kWh pour un gisement de 8000 gWh
- isolation des combles perdus MI zone H2 = 0,13 € / kWh pour un gisement de 2000 gWh

...

L'énergie finale facturée aux ménages aujourd'hui : 0,1 €/kWh

Pour que le signal prix soit efficient il faudrait que l'énergie finale facturée aux ménages soit multipliée par 4. La solution de la multiplication des prix peut être mixée avec une réglementation contraignante. Cela revient à imposer des actions aux propriétaires (sous peine d'un bien invendable, sous peine d'augmentation des impôts fonciers, ...)

Le signal prix est une option mais pas la seule.

### **Un prix suppose quelqu'un qui paye...**

**En pratique, le « prix du CO<sub>2</sub> » peut désigner :**

**L'achat d'un quota négociable sur le « marché du CO<sub>2</sub> »**

**L'achat d'un quota aux enchères à l'Etat**

**Le paiement d'une taxe ou d'un droit de douane à l'Etat**

**Un « coût d'ajustement » pour une nouvelle réglementation**

**Ou... l'achat de ce qui va permettre d'émettre du CO<sub>2</sub>**

Jean-Marc Jancovici - Mines Paris Tech mai-juin 2019 - www.manicore.com

Plusieurs réalités derrière la notion de "prix du CO<sub>2</sub>"

Dans le système européen, le prix du CO<sub>2</sub> peut désigner une des grandeurs suivantes :

- l'achat d'un quota aux enchères à l'Etat
- ou le paiement d'une taxe ou d'un droit de douane à l'Etat.

Quota : une autorisation administrative d'émettre qui peut être achetée aux enchères. Exemple d'une cimenterie qui

- a le droit d'émettre 1 million de tonnes de CO<sub>2</sub> l'année 1, 950 000 l'année 2, 900 000 l'année 3 ...
- elle achète ces droits d'émissions aux enchères à l'Etat ou bien elle les achète de gré à gré sur un marché à une autre entreprise

Exemple la taxe carbone en France représente le paiement d'une taxe, un prix fiscal du CO<sub>2</sub> :

- dans 1 litre de carburant acheté il y a 3 kg de CO<sub>2</sub>
- avec un prix du CO<sub>2</sub> fixé à 30 € / t, il faut payer 9 cts de taxe

La réglementation peut en outre imposer la diminution d'émission de CO<sub>2</sub>. Dans ce cas, le coût du CO<sub>2</sub> est un coût d'ajustement, exemple :

- obligation de remplacer les chaudières à fioul lorsqu'elles ne fonctionnent plus (ni achat neuf ni réparation autorisée)
- le coût de l'achat d'une pompe à chaleur = le prix du CO<sub>2</sub>

## L'argent ne va pas au même endroit...

Selon le système qui fait naître un « prix du CO<sub>2</sub> » l'argent ne va pas au même endroit :

**Taxe ou quotas aux enchères : Etat**

**Achat d'un quota négociable sur le « marché du CO<sub>2</sub> » : dans les poches d'un autre assujetti (rien pour l'état).**

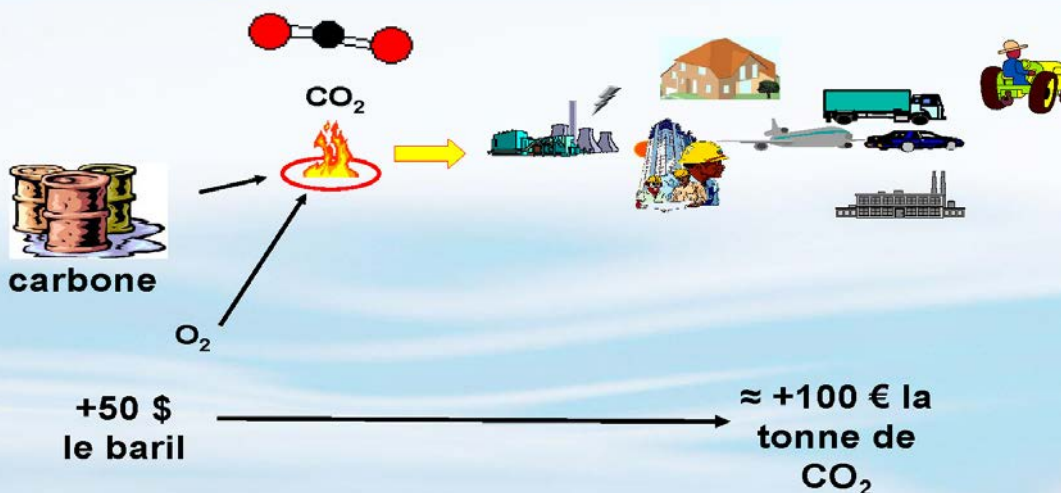
**Hausse du prix de marché d'un hydrocarbure : dans les poches du pays producteur**

Jean-Marc Jancovici - Mines Paris Tech mai-juin 2019 - www.manicore.com

La notion de prix du CO<sub>2</sub> recouvre plusieurs réalités, avec des récipiendaires différents. Les transactions se font avec des acteurs très différents :

- l'Etat qui perçoit l'argent de la taxe carbone,
- l'Etat qui perçoit l'argent d'une enchère de quota d'émission de CO<sub>2</sub>,
- l'entreprise qui vend une part de son droit d'émission de CO<sub>2</sub> sur le marché,
- l'artisan qui installe la pompe à chaleur (cas d'un coût d'ajustement imposé par la réglementation)
- le pays de l'Opep qui a augmenté le prix du baril,
- ...

## Une autre manière de voir le prix du CO<sub>2</sub>



Jean-Marc Jancovici - Mines Paris Tech mai-juin 2019 - www.manicore.com

Ordre de grandeur prix du pétrole / taxe carbone

Une augmentation du prix du baril de 50\$ revient à créer une taxe carbone à 100 € / tonne.

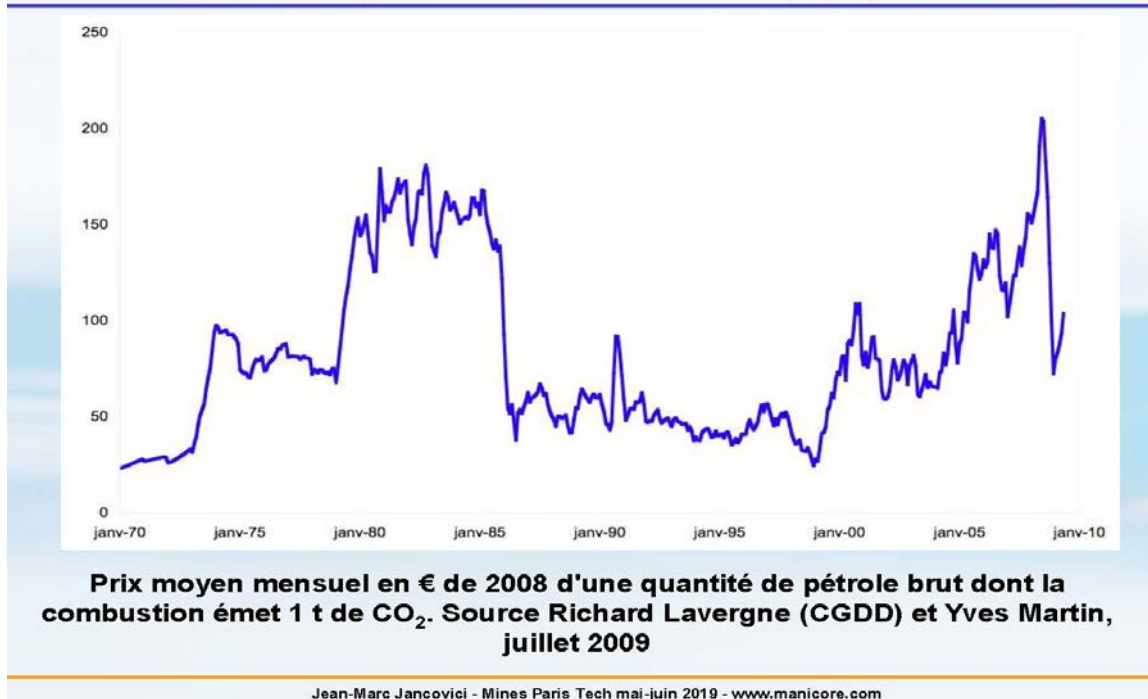
Sachant que le pétrole se raréfie, sur le long terme l'augmentation du prix est inévitable (même si le lien prix / quantité n'est pas direct, pas "d'élasticité de long terme"). Au moment où le prix augmente, cela revient à faire payer à l'automobiliste français une taxe carbone mais au lieu de le payer à l'Etat français, il le paye au pays fournisseur.

Au motif de ne pas vouloir / pouvoir payer une taxe nationale qui diminuerait notre consommation actuelle, on accepte de payer plus tard - lorsque le prix du baril augmente - une taxe aux pays étrangers.

La vraie question est d'aider les individus qui n'ont pas les moyens de payer la taxe carbone nationale à s'organiser autrement :

- augmenter la taxe carbone sans se soucier de la question des transports collectifs c'est évidemment source d'un mécontentement légitime.
- et à l'inverse ne pas augmenter le prix des carburants c'est du court termisme, se condamner à chaque augmentation du baril à financer les pays producteurs de pétrole, de plus en plus cher sur le long terme (déficit de la balance commerciale, baisse du PIB, augmentation du chômage...)

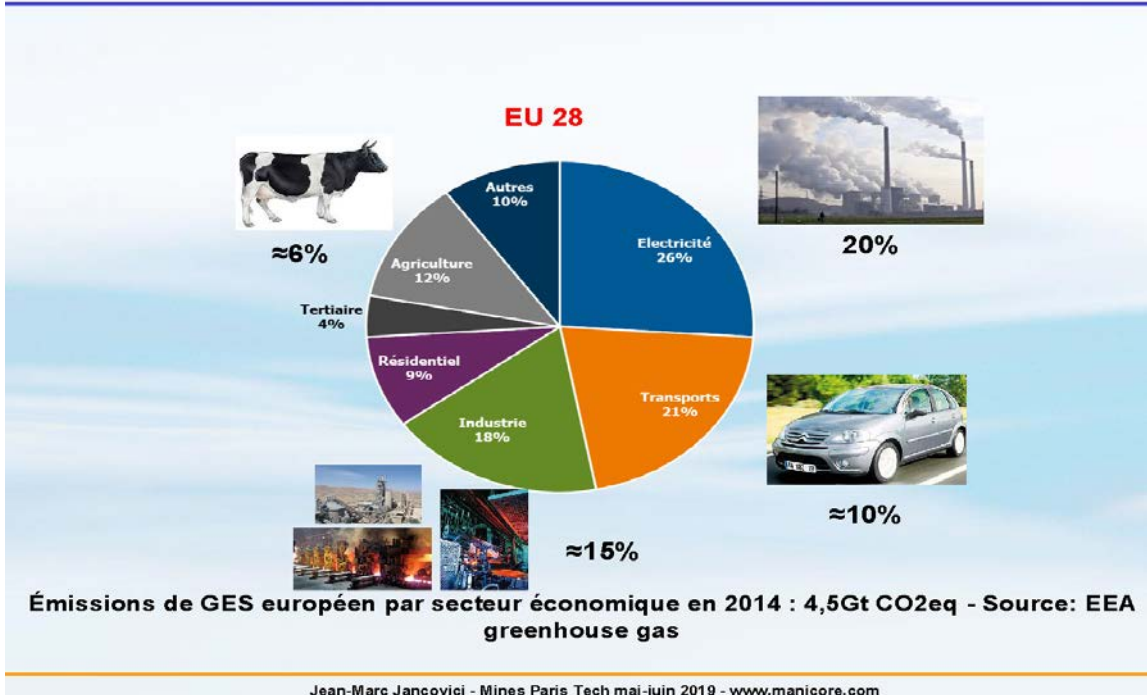
### En fait, nous aimons beaucoup payer le carbone !



Non traité

## Chapitre 31 - Cas pratique : décarbonisation de l'UE

## Carbone ? Vous avez dit carbone ?



Décomposition des émissions des GES de l'Union européenne + RU par grands secteurs.

Types d'instruments de régulation qu'il serait possible de mettre en place pour faire des économies d'énergie réduire les émissions de GES. Il en ressort que la taxe carbone est juste un instrument parmi d'autres.

- Secteur de l'industrie de l'électricité : 26%. Les centrales à charbon représentent 20% du total des émissions (même taux dans l'UE que dans le monde)
- Secteur des transports : 21%. Les automobiles représentent 10% des émissions totales
- Secteur industriel : 15%
- Secteur de l'alimentation : 12%. 6 à 8% des émissions totales imputables au cheptel bovin.

[www.decarbonizeurope.org](http://www.decarbonizeurope.org)

<p><b>ÉLECTRICITÉ</b> Fermer toutes les centrales à charbon (réglementation et prix)</p>		

Jean-Marc Jancovici - Mines Paris Tech mai-juin 2019 - www.manicore.com

Mesures "obligatoires" pour réduire les émissions par 3 et qui consistent à s'attaquer aux premiers postes de chaque secteur.

Electricité : fermer toutes les centrales à charbon par une incitation prix (taxe sur l'électricité au charbon, comme au Royaume-Uni) et la réglementation, pour les remplacer par de la fabrication d'électricité décarbonée (nucléaire, éolienne, ...)

Une quasi-taxe sur l'électricité au charbon est déjà en place au Royaume-Uni et fonctionne :

- augmentation du prix des quotas
- fixation d'un prix plancher (impossible de les acquérir sous un certain prix, qui augmente avec le temps)

La voie réglementaire consiste par exemple, comme aux Etats-Unis sous Obama, à interdire la construction de centrale dont les émissions sont supérieures à 1 livre par kWh (or le charbon émet 2 livres, soit 1 kg). Cela interdit le remplacement du parc des anciennes centrales à charbon.

Encore plus "violent" du point de vue réglementaire :

- sans se poser la question de savoir si les centrales nucléaires allemandes étaient compétitives, elles sont en voie de fermeture.
- il serait donc envisageable de fermer réglementairement les centrales à charbon

Transport :

- mesure réglementaire visant à interdire à la vente tous les véhicules qui consomment plus de x litres au 100 km.
- mesure prix : monter le prix des carburants et attendre que les constructeurs et consommateurs s'adaptent
- mesure fiscale : impôt à la détention, la vignette qui est en réalité un malus annuel. Appliquer la logique de l'impôt foncier appliqué à la voiture : plus le véhicule consomme, plus le propriétaire paye et d'année en année le plancher est relevé. Une manière efficace de faire disparaître du parc les véhicules qui consomment plus de x litres aux 100 km. Des mesures d'aide à l'achat de véhicules économes à prévoir pour que les populations à faible revenu puissent s'adapter à ce type de mesure fiscale.
- mesures réglementaires diverses : rendre difficile / coûteux le parking, ...

Ces mesures, pas exclusivement prix, doivent s'accompagner d'alternatives qui nécessitent de la planification

- mutualisation des moyens de transport, covoiturage, train
- vélo
- marche

La planification est d'ordre réglementaire, elle consiste à donner des règles du jeu aux personnes chargées d'organiser les transports (et non pas directement au consommateurs finaux) :

- élus locaux
- constructeurs et exploitants d'infrastructures
- ...

Exemple : remplacer les avions par les trains à grande vitesse partout où c'est possible. Exemple de proposition réglementaire (François Ruffin), consistant à interdire les vols en avion nationaux lorsque le train permet d'arriver à destination en moins de 5 heures.

Seule la voie réglementaire est capable d'initier les investissements pour de nouvelles infrastructures ferroviaires. Le prix ne sera jamais incitatif.

Industrie lourde :

- gagner de l'efficacité énergétique dans ce secteur est devenu très très difficile



- la solution consiste donc logiquement à limiter la production de matériaux de base (faire 3 fois moins de ciment, de plastique, d'acier, ...)

Encore une fois, ce ne sont pas les prix qui permettront de baisser la production. Des contraintes réglementaires devront être mises en place.

Logement / bâtiments / Tertiaire public :

- ne pas attendre l'augmentation du prix du fioul pour réduire les émissions
- l'obligation réglementaire est indispensable, il faut obliger les propriétaires à agir / remplacer leurs chaudières par des pompes à chaleur
- typiquement comme au Royaume-Uni, interdiction du remplacement d'une chaudière au fioul d'ici 2022. Au Danemark l'interdiction est plus drastique : interdiction de détenir une chaudière au fioul depuis 2016.

Filière bois : développer des puits de carbone, séquestration des émissions

Sachant qu'il faut de 60 et 100 ans entre le moment où un arbre est planté et le moment où il est coupé, il paraît évident que le prix n'est absolument pas pertinent pour développer les forêts durables. C'est le domaine de la réglementation et de la fiscalité.

Exemple : plus aucune parcelle agricole sans une haie de 2m d'épaisseur avec des arbres de hautes tiges

Alimentation :

- la moitié de l'emprunte carbone d'un Français provient du cheptel bovin
- il faut donc réduire le cheptel bovin pour réduire les émissions

Passer par les prix de marché (par exemple taxer le méthane) augmentera le prix du boeuf pour le consommateur mais le producteur ne gagnera pas plus, au contraire perte de chiffre d'affaire. Résultat : désertification des campagnes.

La seule voie est réglementaire :

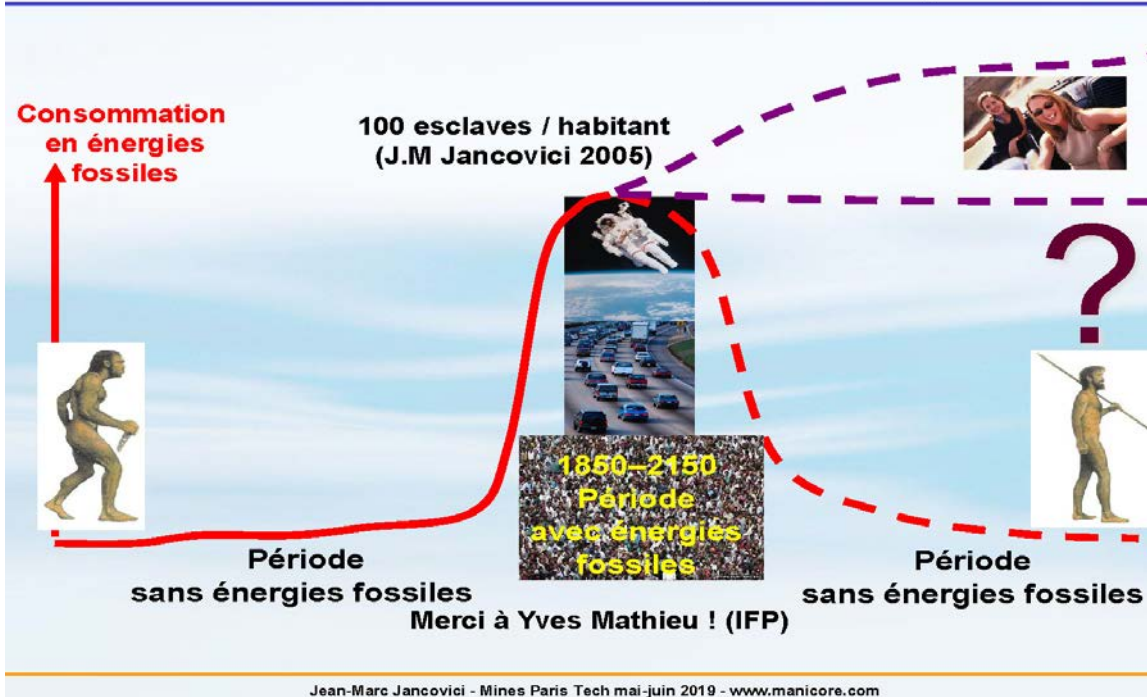
- encadrement des prix en sortie de ferme
- c'est-à-dire garantir au producteur l'achat du kilo de boeuf 3x plus cher en contrepartie d'une augmentation qualité (AOC, baisse des intrants, haies, ...)
- baisse des ventes en quantité compensé par prix d'achat élevé et garanti

Cas des AOC : typiquement une voie réglementaire, protection de type réglementaire d'une production qui permet de faire monter les prix

Dans un secteur où le changement des pratiques culturelles changent au mieux à chaque génération, il ne faut pas compter sur un signal prix (consistant à taxer la nuisance) pour réduire rapidement les émissions.

En conclusion si on regarde attentivement chaque secteur, le signal prix ne permet pas d'atteindre l'objectif de réduction des émissions à la bonne vitesse (ou alors violentes secousses à anticiper).

## Du passé vers quel avenir ?



Des économies d'énergie drastique à réaliser.

A quoi ressemblera la civilisation dans quelques décennies ? La question reste ouverte toutefois :

- la division de la consommation d'énergie dans le monde par 2 ou 3
- avec le maintien du PIB actuel
- est très peu plausible

Les économies d'énergie vont de toutes manières advenir pour des raisons physiques (fin des stocks d'hydrocarbures notamment). Comment gérer cette contrainte physique ?

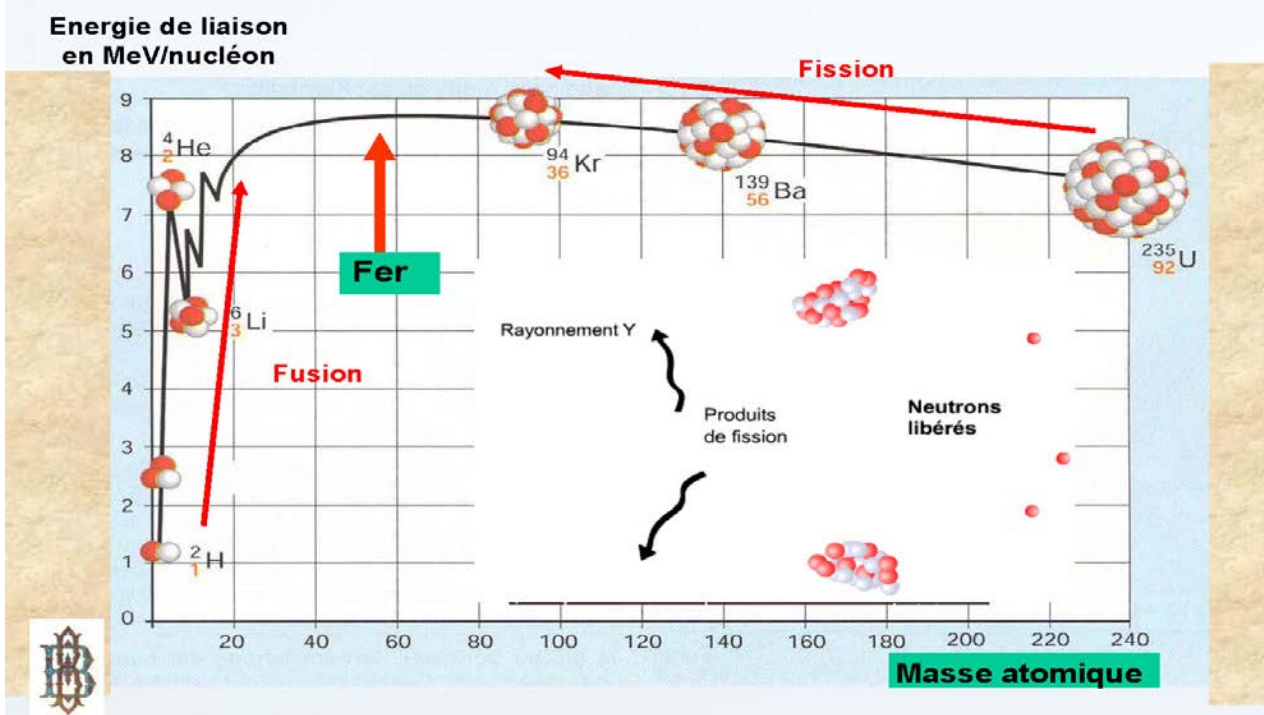
# LEÇON VI - LE NUCLÉAIRE

## Chapitre 32 - Qu'est-ce que l'énergie nucléaire ?

Deux manières distinctes d'obtenir de l'énergie impliquant un atome :

- réarranger les couches électroniques (excitation ou réaction chimique)
- réarranger les nucléons (énergie nucléaire)

### Fusion et fission, deux manières de viser la stabilité



Jean-Marc Jancovici - Mines Paris Tech mai-juin 2019 - [www.jancovici.com](http://www.jancovici.com)

Deux manières d'avoir de l'énergie nucléaire :

- l'énergie associée à la fission, qui consiste à casser un gros noyau en 2 gros morceaux et plein d'autres petits morceaux. Réaction qui libère de l'énergie.
- ou au contraire prendre des noyaux très légers pour les fusionner. Processus qui libère également de l'énergie.

Pourquoi des gros ou des petits noyaux ? Dans les deux cas de figure on profite du fait que l'énergie de liaison dans les noyaux :

- diffère selon la taille des noyaux
- dans les petits et très gros noyaux, l'énergie de liaison est un petit plus faible que dans les noyaux intermédiaires
- et donc en réarrangeant la taille des noyaux on peut obtenir de l'énergie

Explication physique : la masse du / des noyaux d'arrivée est plus faible que la masse du / des noyaux de départ, la différence constitue l'énergie cinétique pour les produits de fission et rayonnement gamma.

Fission = casser un noyau en 2 avec libération d'énergie, essentiellement contenue :

- soit dans du rayonnement électromagnétique
- soit dans l'énergie cinétique des "bouts" de noyau obtenus suite à la fission

Exact inverse, la fusion : on assemble des noyaux et le différentiel d'énergie de liaison se retrouve également libéré sous forme de rayonnement électromagnétique et d'énergie cinétique.

---

A savoir :

- énorme coefficient multiplicateur entre l'énergie chimique (= énergie du réarrangement des électrons) et l'énergie nucléaire (= énergie du réarrangement des nucléons), d'environ 1 million.
- dit autrement, il y a 1 million de fois plus d'énergie dans la fission d'1 gramme d'uranium que dans la combustion d'1 gr de pétrole
- dit encore autrement, la combustion d'1 gr d'uranium (U235 ou Pu239) libère la même quantité d'énergie thermique que de brûler 1 tonne de pétrole

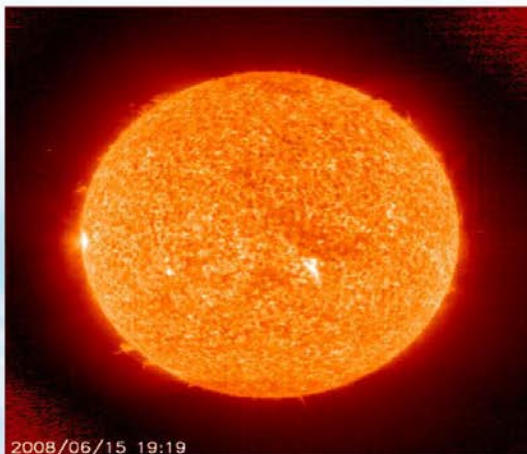
L'énergie nucléaire est très concentrée. Raison :

- l'énergie typique de réarrangement d'une couche électronique, c'est quelques électrons / volts tandis que l'énergie typique d'une réaction de fission c'est quelques centaines de millions d'électrons / volts
- dit autrement l'énergie de réarrangement des noyaux dans un atome est bien plus intense que l'énergie de réarrangement des électrons

## Le nucléaire, c'est d'abord la vie...

**Sans énergie nucléaire, nous ne serions pas ici**

**Pas de soleil (fusion)**



**Le Soleil vu par SOHO le 15 juin 2008 (il va toujours bien merci)**

**Pas de planète Terre : les éléments constitutifs de la terre sont issus d'étoiles de la génération qui a précédé le Soleil**

Jean-Marc Jancovici - Mines Paris Tech mai-juin 2019 - [www.jancovici.com](http://www.jancovici.com)

Le soleil = une grosse bombe thermonucléaire permanente / fusion permanente

Toutes les énergies que nous utilisons sur Terre sont des dérivés directs ou indirects de l'énergie nucléaire :

- rayonnement solaire bien sûr
- mais également toutes les énergies fossiles (= des énergies dérivées de la photosynthèse)
- végétaux et dérivés
- hydroélectricité (cycle de l'eau = soleil)
- géothermie (= radioactivité naturelle des roches)

---

## D'abord se taper dessus, ensuite penser à autre chose

Comme beaucoup d'autres technologies (hélas), les premiers usages de l'énergie nucléaire « humaine » ont été militaires :



Fission -> bombe A



Fusion -> bombe H

Jean-Marc Jancovici - Mines Paris Tech mai-juin 2019 - [www.jancovici.com](http://www.jancovici.com)

L'origine de la physique nucléaire est militaire. Ou presque puisque auparavant (1942) apparaît la pile atomique de Fermi (qui avait la puissance ridicule d'1/2 watt de puissance).

C'est une partie de l'explication de la mauvaise image du nucléaire. Mais pas uniquement (sinon beaucoup de technologies auraient également mauvaise presse : robotique, internet, ...)

## Si on reste pacifique, c'est quoi l'idée de départ ?

Le nucléaire civil, c'est un procédé **compliqué** pour faire bouillir de l'eau

**En grande quantité**

**Sans combustion**

**Pas (très) cher**

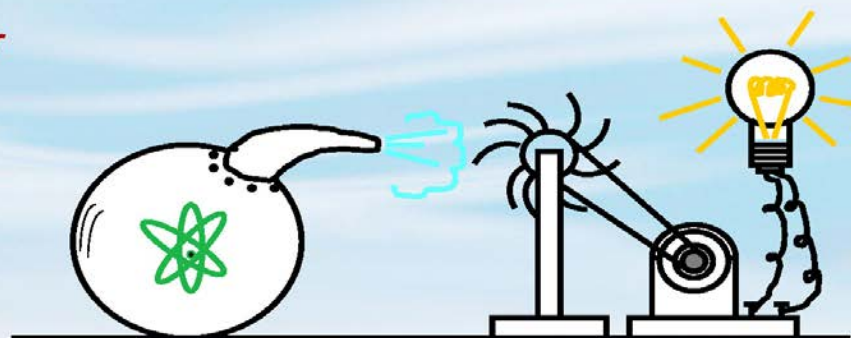


Illustration Bertrand Barré

Jean-Marc Jancovici - Mines Paris Tech mai-juin 2019 - [www.jancovici.com](http://www.jancovici.com)

Une centrale nucléaire = une bouilloire compliquée

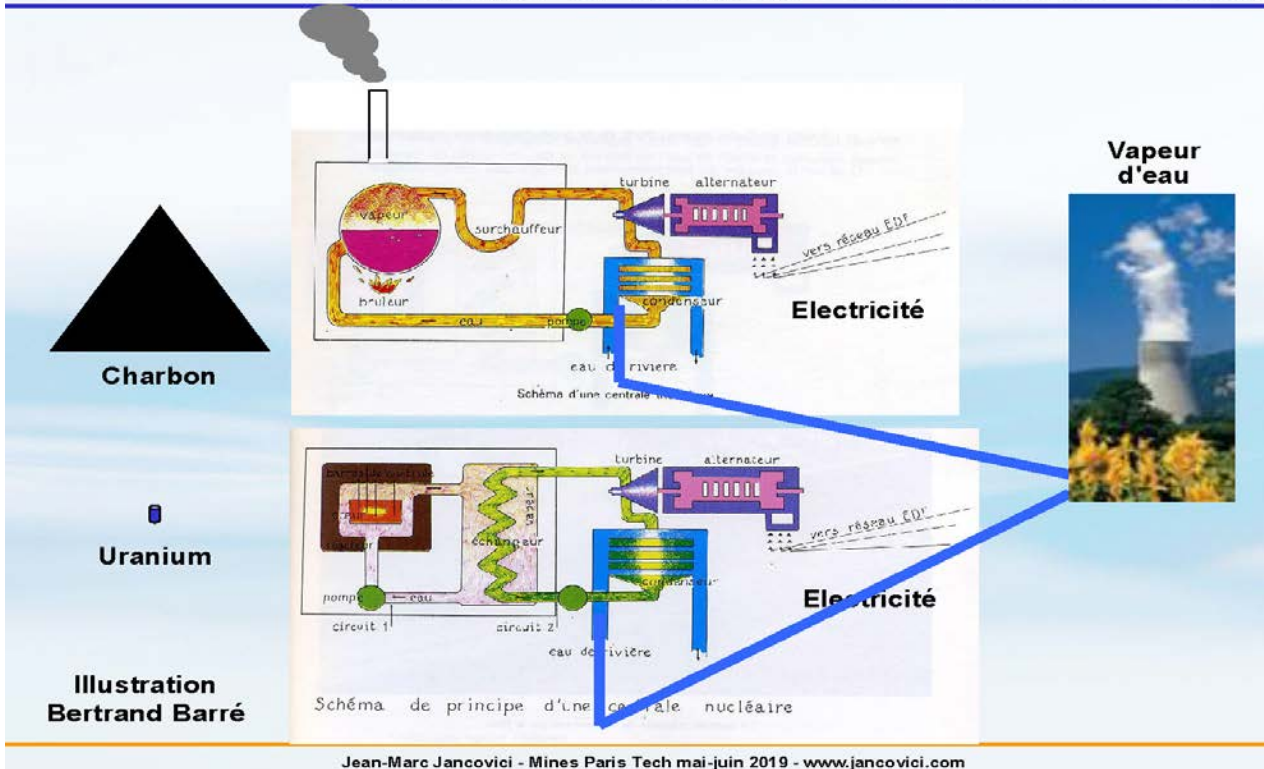
Le nucléaire civil est un procédé compliqué consistant à faire bouillir de l'eau

- en grande quantité
- sans combustion / sans utiliser d'oxydation du carbone
- et pour pas très cher

La différence entre une centrale nucléaire et une centrale thermique (à charbon, ...) se trouve dans la manière de produire la chaleur :

- dans une centrale à charbon, cela consiste à faire brûler du charbon
- dans une centrale nucléaire, cela consiste à faire fissionner des atomes

## Nucléaire ou charbon, c'est - presque - pareil



Tout le reste est identique :

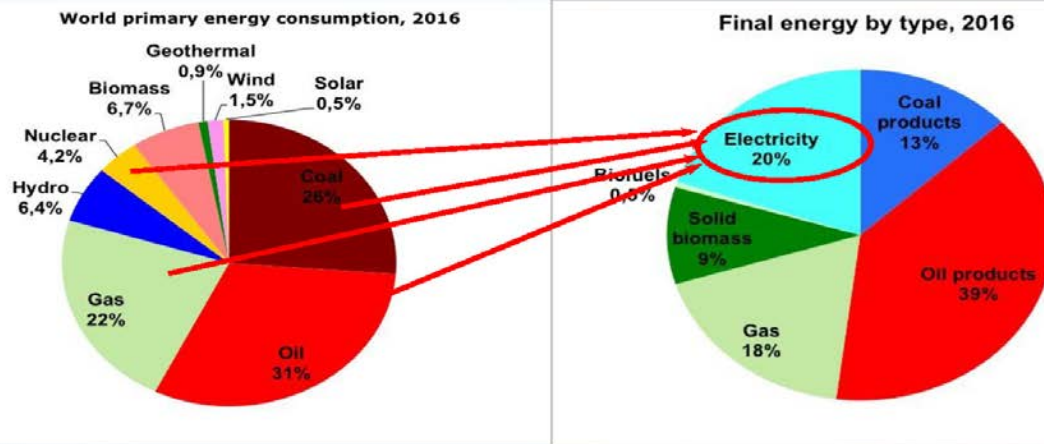
- dégagement de grandes quantités de chaleur
- création de vapeur
- rotation d'une turbine
- au niveau de l'alternateur, le rotor dans le champ magnétique produit du courant
- éventuellement en sortie, présence d'un aéro-réfrigérant (la source froide de la machine de Carnot). C'est l'apanage des centrales électriques en bord de rivière : indispensable si la centrale se situe en bord de rivière car besoin de la chaleur latente d'évaporation pour refroidir car le débit de la rivière n'est pas suffisant pour simplement refroidir par conduction thermique)

## Le nucléaire, vraiment trop mauvais ?

Dès qu'il s'agit de faire bouillir de l'eau (nucléaire, mais aussi charbon, gaz, et fioul lourd, soit 85% de l'électricité mondiale) :

Il faut une source chaude et une source froide

Carnot limite le rendement et on chauffe les petits oiseaux



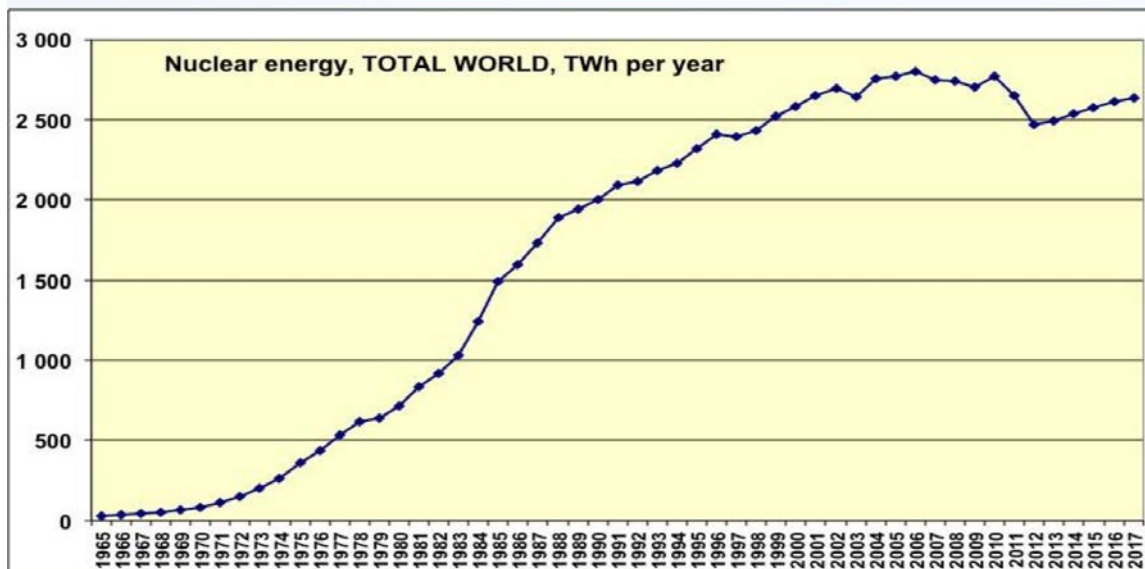
**14,2 Gtep primaire** → **9,5 Gtep final**

Jean-Marc Jancovici - Mines Paris Tech mai-juin 2019 - www.jancovici.com

- 85% de l'électricité mondiale est produite par le gaz, le charbon et le fioul lourd
- 15% de l'électricité mondiale produite avec l'énergie nucléaire (en recul)

La production d'électricité nucléaire est très variable selon les pays

## L'atome, une affaire récente



Électricité d'origine nucléaire dans le monde depuis 1965, en TWh.

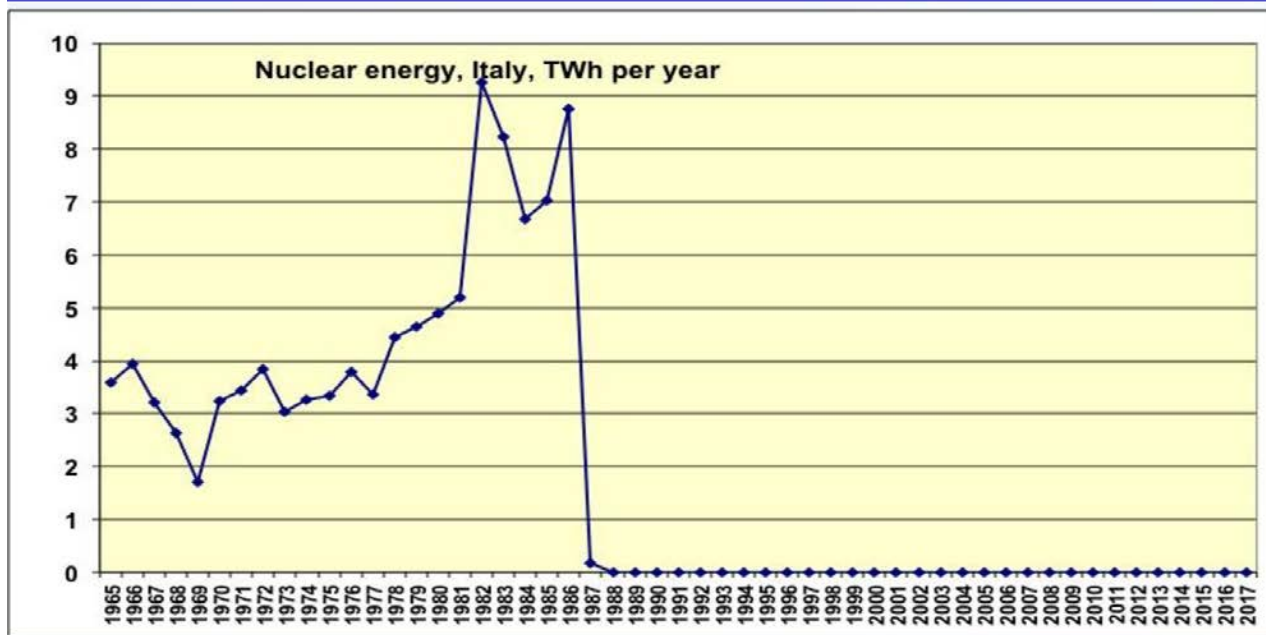
Source : BP Statistical review, 2018

Jean-Marc Jancovici - Mines Paris Tech mai-juin 2019 - www.jancovici.com

La production d'électricité nucléaire mondiale s'est fortement accélérée après les chocs pétroliers, ralentie

durant la période du contre-choc et baisse après l'accident de Fukushima et la crise de 2008. Redémarrage des réacteurs au Japon explique en partie la remontée depuis 2014.

### Certains se sont déjà arrêtés (pour le moment)



Électricité d'origine nucléaire en Italie depuis 1965, en TWh.

Source BP Statistical review, 2018

Jean-Marc Jancovici - Mines Paris Tech mai-juin 2019 - www.jancovici.com

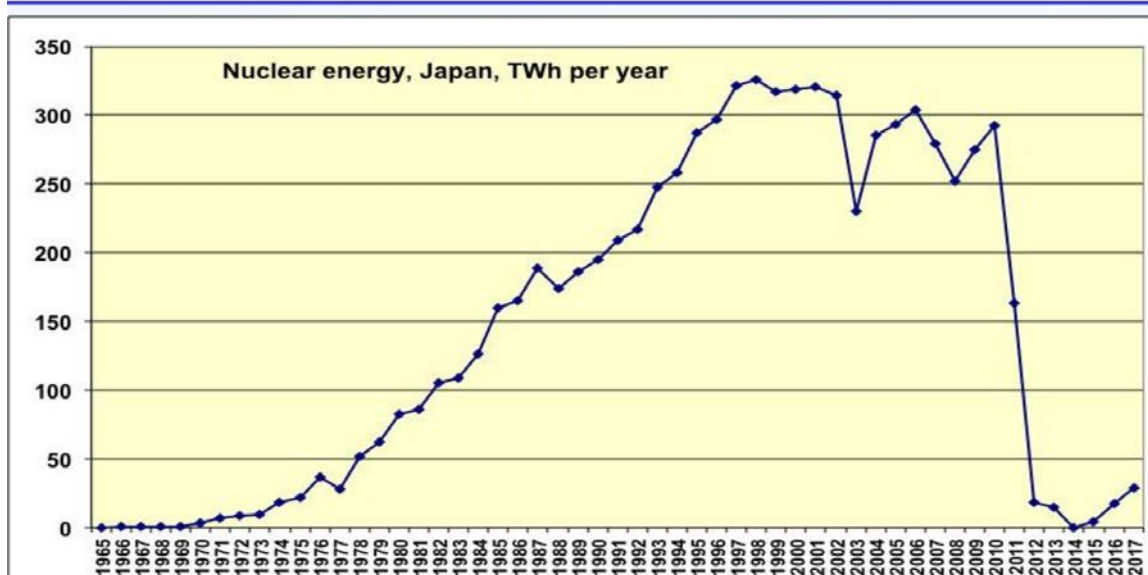
Puissance typique d'un réacteur nucléaire :

- entre 1/2 Gw et 1 Giga watt (1,5 Gw pour un EPR)
- 2760 Giga watt / heure sur 1 année (8,8 tera watt heure)
- avec les arrêts / maintenance, de 6 à 8 tera watts / heure par an

Production en Italie à l'arrêt depuis l'accident de Tchernobyl :

- sortie du nucléaire décidée par référendum
- arrêt de ses 2 centrales

### D'autres ont mis la centrale sur la mauvaise plage



Électricité d'origine nucléaire au Japon depuis 1965, en TWh.

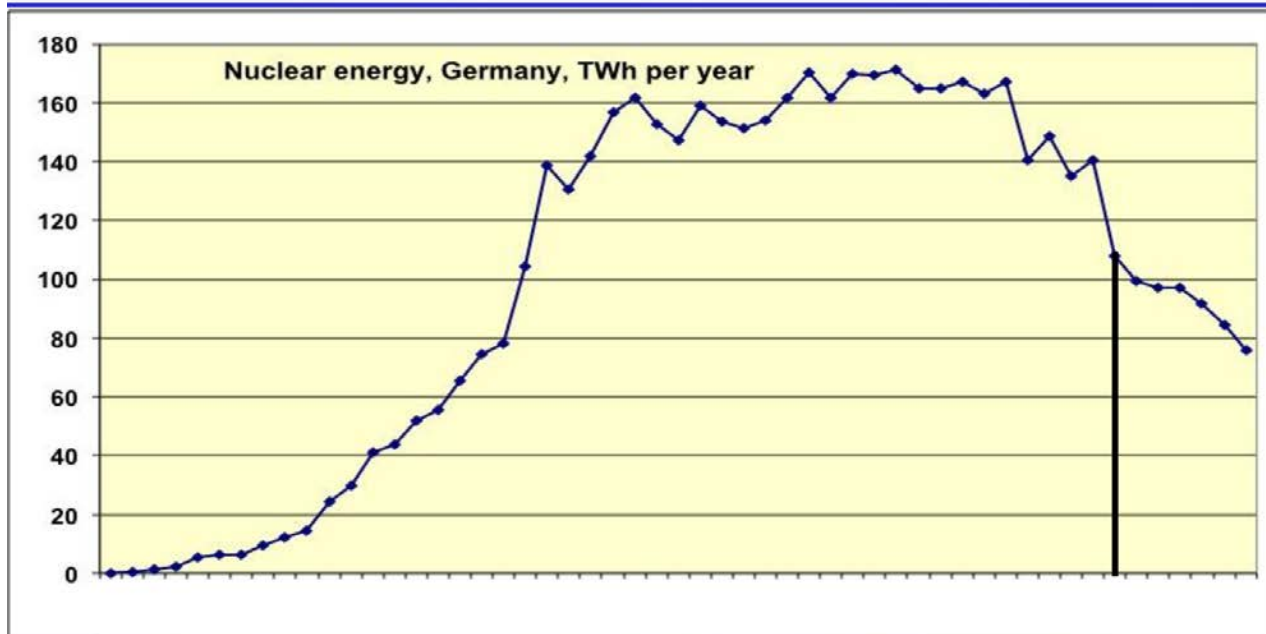
Source BP Statistical review, 2018

Jean-Marc Jancovici - Mines Paris Tech mai-juin 2019 - www.jancovici.com



Redémarrage progressif des centrales au Japon suite à l'accident de Fukushima.

## D'autres ont peu de plages mais quelques électeurs



Électricité d'origine nucléaire en Allemagne depuis 1965, en TWh.  
Source BP Statistical review, 2018

Jean-Marc Jancovici - Mines Paris Tech mai-juin 2019 - www.jancovici.com

Début du plan Schröder coïncide avec une baisse sensible de la production nucléaire d'électricité. Lorsque l'Allemagne accélère sa sortie du nucléaire suite à l'accident de Fukushima, elle ne fait qu'entériner une tendance amorcée au début des années 2000 : l'accident de Fukushima rend impossible politiquement le redémarrage souhaité par Merkel.

## D'autres mettent le paquet



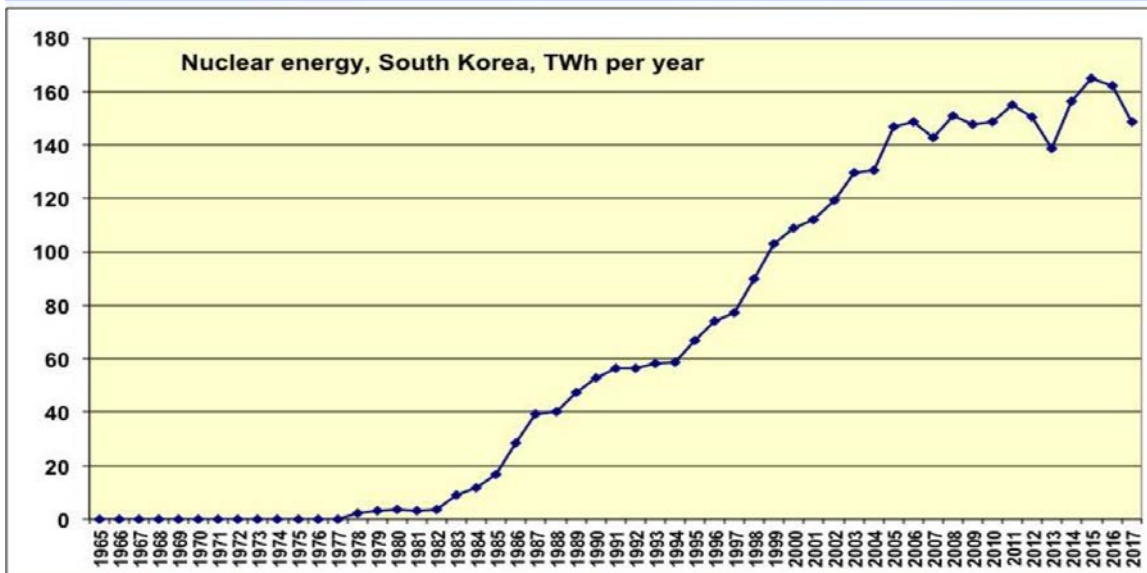
Électricité d'origine nucléaire en Chine depuis 1965, en TWh.  
BP Statistical review, 2018

Jean-Marc Jancovici - Mines Paris Tech mai-juin 2019 - www.jancovici.com

Chine

- plus d'1/3 des réacteurs en construction se trouvent en Chine
- plusieurs EPR en service

## D'autres mettent le paquet (bis)



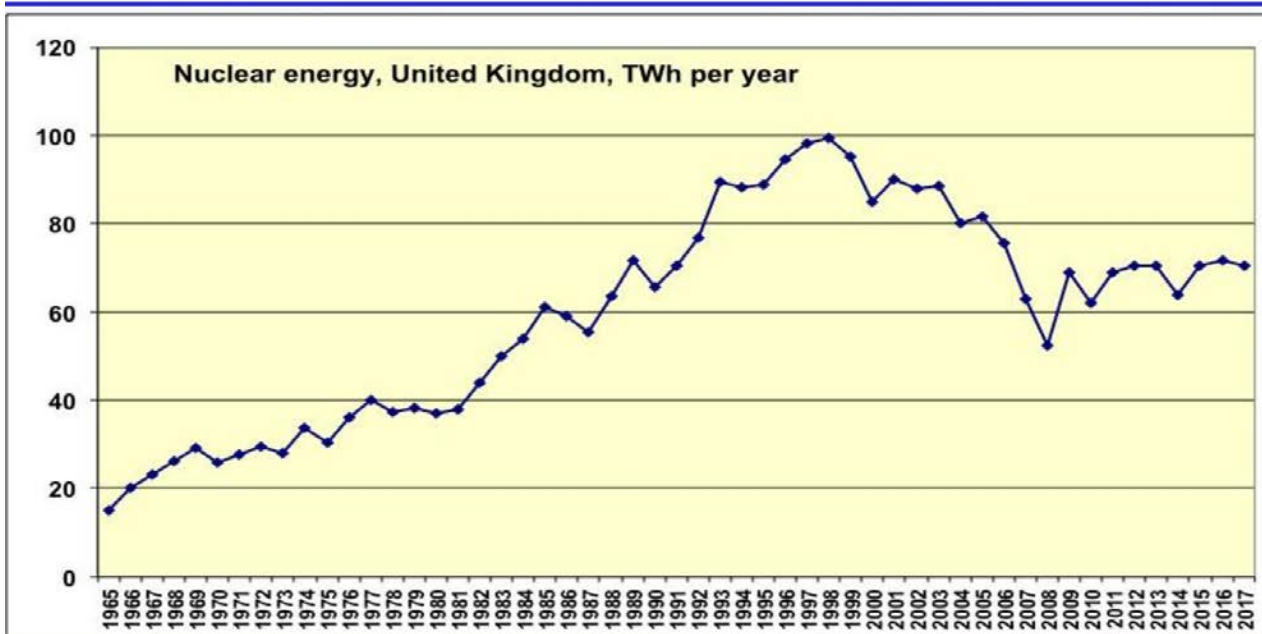
Électricité d'origine nucléaire en Corée du Sud depuis 1965, en TWh.

BP Statistical review, 2018

Jean-Marc Jancovici - Mines Paris Tech mai-juin 2019 - www.jancovici.com

La Corée du sud a une part significative de son électricité produite avec de l'énergie nucléaire. S'interroge sur une sortie.

## D'autres voudraient bien, mais ne peuvent point



Électricité d'origine nucléaire en Grande Bretagne depuis 1965, en TWh.

BP Statistical review, 2018

Jean-Marc Jancovici - Mines Paris Tech mai-juin 2019 - www.jancovici.com

Le Royaume Uni

- très intéressé par la production d'électricité nucléaire
- mais en produit de moins en moins par défaut d'investissement (secteur de la production électrique dirigé par le privé)

La logique d'une économie libérale (court terme) pas compatible avec un programme nucléaire car il faut un investissement massif avant de pouvoir produire la moindre électricité (parfois plus de 10 ans avant le démarrage d'une centrale neuve)

## D'autres ont dit qu'ils feraient sans, sauf que...



Électricité d'origine nucléaire en Suède depuis 1965, en TWh.

BP Statistical review, 2018

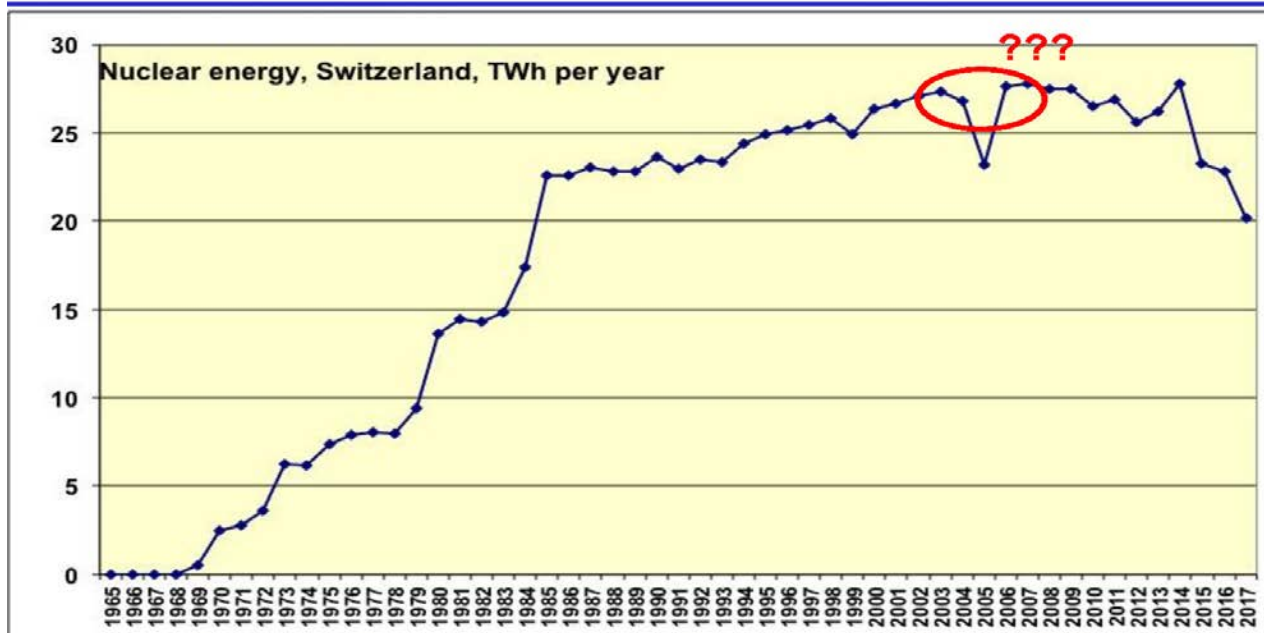
Jean-Marc Jancovici - Mines Paris Tech mai-juin 2019 - www.jancovici.com

La Suède a une production nucléaire conséquente.

Pourtant référendum en 1981 décide la sortie du nucléaire. Les investissements étant déjà réalisés et l'amortissement de la production d'électricité nucléaire étant extrêmement peu chère (une fois les équipements en place), la production a continué à croître au cours des 10 années suivantes.

Remplacer le nucléaire est très coûteux et il est très difficile d'en sortir.

## D'autres ont dit qu'ils aimaient, et puis non, et oui, et non...



Électricité d'origine nucléaire en Suisse depuis 1965, en TWh.

BP Statistical review, 2018

Jean-Marc Jancovici - Mines Paris Tech mai-juin 2019 - www.jancovici.com

## Hésitation des Suisses

- un moratoire sur la construction de nouvelles centrales, on s'interdit de construire de nouvelles centrales
- 2003, levée du moratoire, la construction redevient une possibilité
- depuis décision de sortie du nucléaire

## D'autres « explosent », puis « redémarrent »



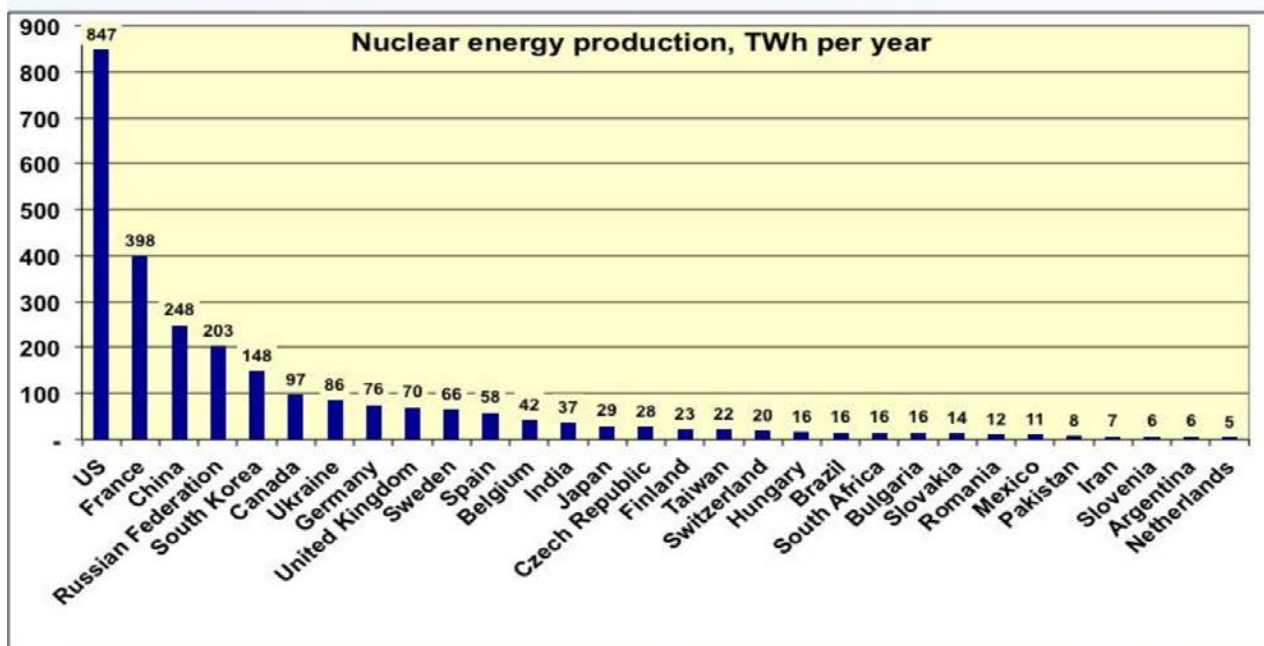
Électricité d'origine nucléaire en Ukraine depuis 1985, en TWh.

BP Statistical review, 2018

Jean-Marc Jancovici - Mines Paris Tech mai-juin 2019 - www.jancovici.com

Après l'accident de Tchernobyl, l'Ukraine a doublé sa production nucléaire.

## Atome, qui en fait finalement ?



Production nucléaire en TWh en 2017. Source BP Statistical review, 2018

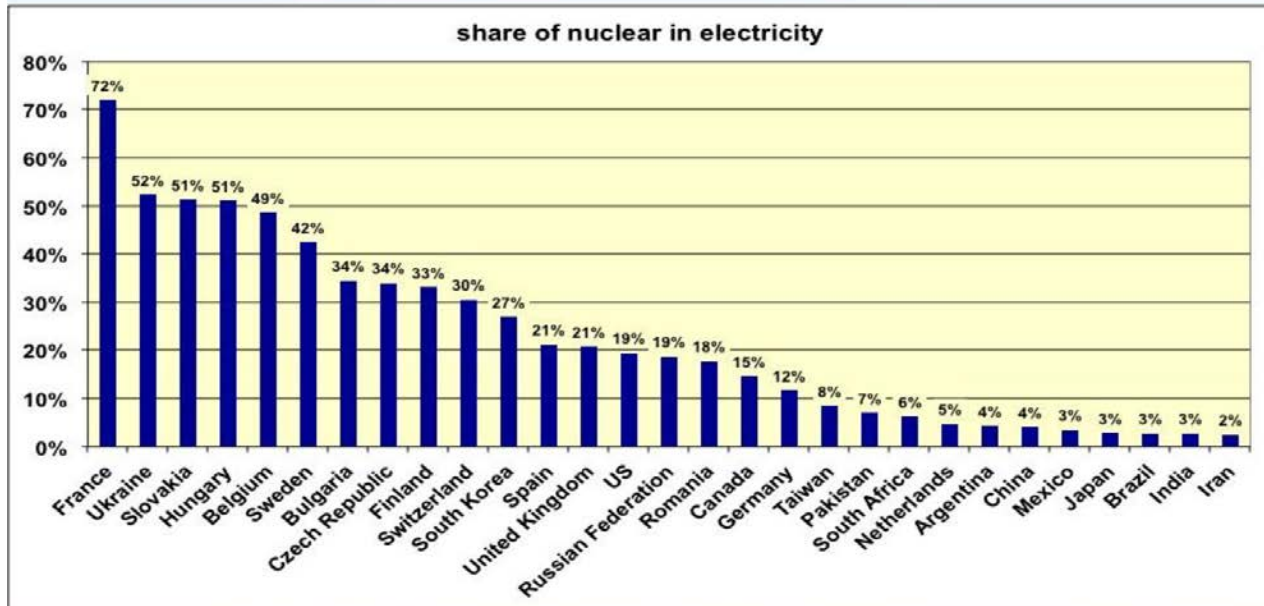
Jean-Marc Jancovici - Mines Paris Tech mai-juin 2019 - www.jancovici.com

Pays producteurs d'électricité nucléaire, classement par valeur absolue

1ère place pour les Etats-Unis avec 847 Twh par an

- 20% de la production électrique)
- un peu plus du double du 2e
- une centaine de réacteurs en activité

## Atome, qui en fait beaucoup en proportion ?



% de nucléaire dans la production électrique en 2017

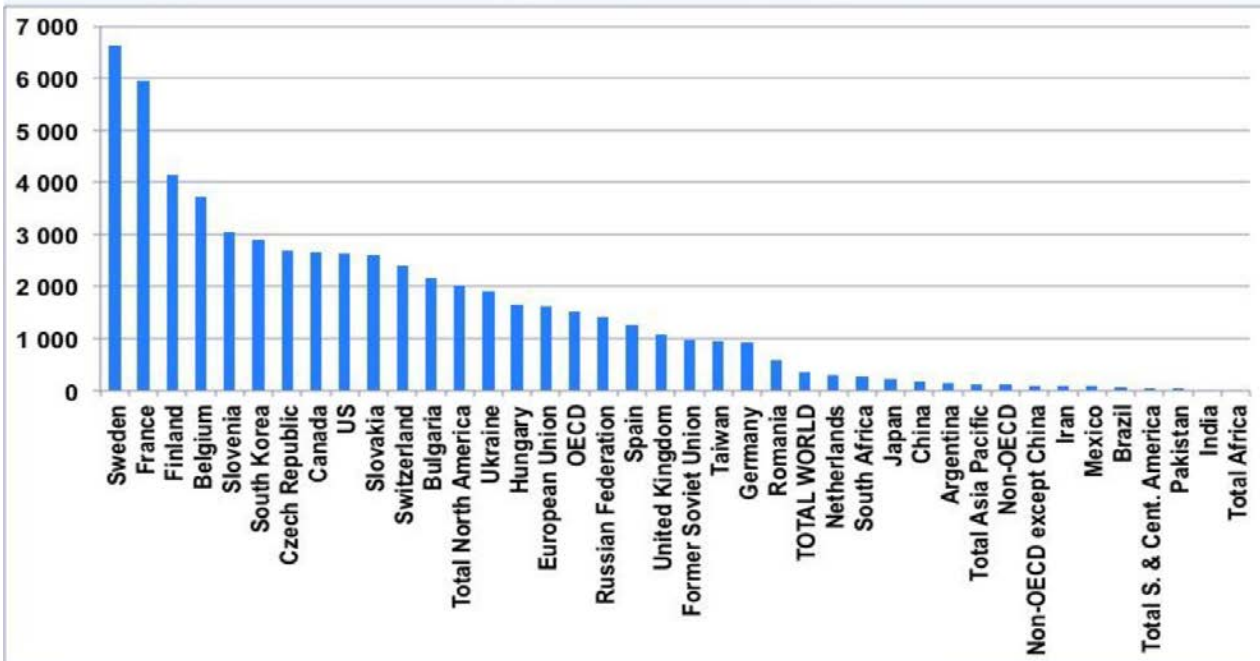
BP Statistical review, 2018

Jean-Marc Jancovici - Mines Paris Tech mai-juin 2019 - [www.jancovici.com](http://www.jancovici.com)

Classement des pays producteurs d'électricité nucléaire par part dans la production électrique

- 1ère place pour la France avec 70%
- plusieurs pays ont la moitié de leur électricité produite avec l'énergie nucléaire : Ukraine, Slovaquie, Hongrie, Belgique

## Atome, qui en fait beaucoup en proportion ?



kWh nucléaires par personne en 2017. BP Statistical review, 2018

Jean-Marc Jancovici - Mines Paris Tech mai-juin 2019 - www.jancovici.com

Classement par pays en fonction de la production en valeur absolue par personne (= la quantité de kWh nucléaire utilisée par personne et par an dans le pays)

- 1ère place : la Suède a la plus grosse capacité nucléaire installée et la plus grosse production par personne
- signifie également une très forte la consommation électrique par personne en Suède (comme celle de la Norvège, 3 fois supérieure à celle de la France)

## Chapitre 33 - La fission nucléaire

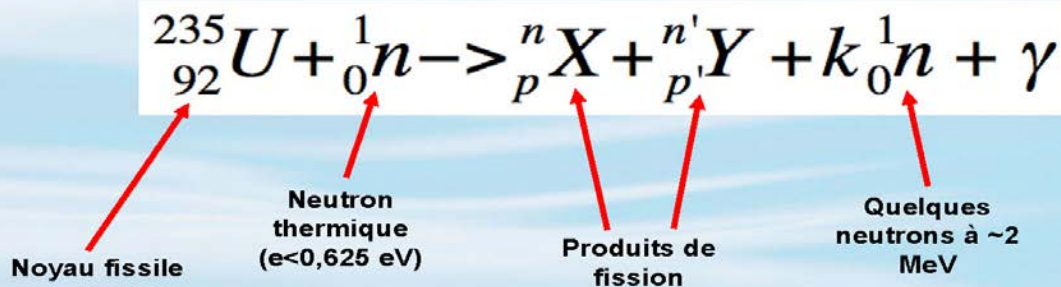
## La fission : smaller is beautiful

La fission consiste à exploiter l'énergie libérée par le fractionnement en plusieurs petits noyaux d'un gros noyau avec  $Z > 89$

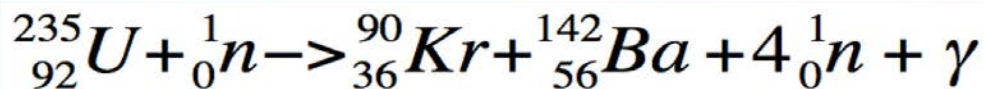
Cette fission peut intervenir spontanément (cas rare)

Elle peut intervenir après absorption d'un neutron (cas standard).

Exemple de l'uranium 235 :



Exemple « pour de vrai » :



Jean-Marc Jancovici - Mines Paris Tech mai-juin 2019 - [www.jancovici.com](http://www.jancovici.com)

Fission :

- casser un très gros noyau en 2 pour libérer de l'énergie
- exploiter l'énergie libérée par le fractionnement en plusieurs petits noyaux d'un gros noyau

A savoir :

- ne peut se pratiquer que pour les noyaux dont le numéro atomique (Z) est supérieur à 89
- ne peut se pratiquer qu'avec des isotopes impaires (par exemple l'uranium 238 ou le plutonium 240 ne fissionnent pas)

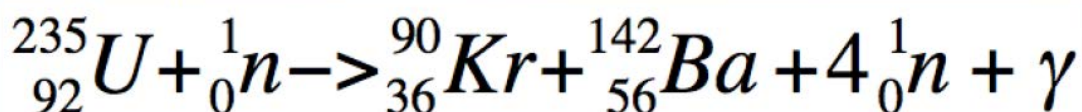
Equation générale d'une fission :

01 : un noyau d'uranium capture un neutron, d'un type particulier. Il y a 2 catégories de neutrons présents dans un réacteur nucléaire,

- les neutrons rapides, les neutrons éjectés juste au moment de la fission nucléaire qui ont une énergie de quelques millions d'électrons-volts (eV). Ces neutrons sont absorbés par des atomes
- les neutrons lents ou neutrons thermiques, avec une énergie cinétique de l'ordre de l'électron-volt

02 : cela lui donne une "indigestion", il éclate en n morceaux

- 2 gros morceaux, dits "produits de fission" (X et Y)
- et plusieurs très petits, quelques neutrons (x4)
- et du rayonnement gamma / rayonnement électromagnétique



Fission d'un noyau d'uranium :

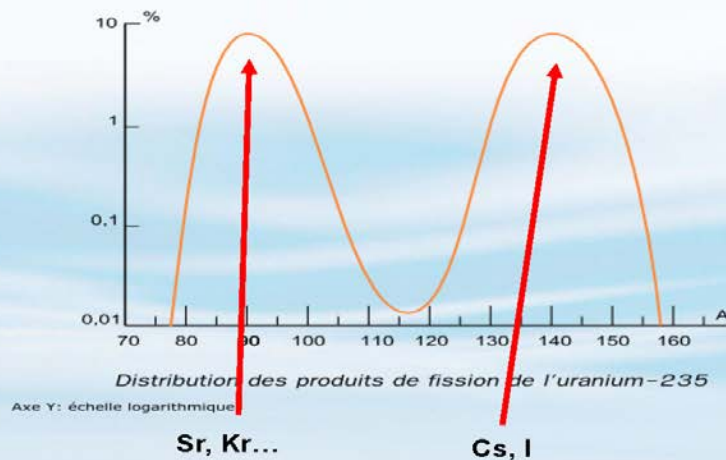
- X = 1 noyau de krypton (un gaz noble, inodore et incolore, chimiquement il ne s'associe à rien et tendrait à sortir du cœur)
- Y = 1 noyau de barium
- 4 neutrons

- du rayonnement gamma

## La fission, c'est le grand bazar...

**Après une fission, on obtient :**

**Deux noyaux plus petits, porteurs d'énergie cinétique : les produits de fission**



**Leur demi-vie est généralement comprise entre quelques heures et quelques dizaines d'années, et leurs descendants sont souvent radioactifs eux-mêmes**

Jean-Marc Jancovici - Mines Paris Tech mai-juin 2019 - [www.jancovici.com](http://www.jancovici.com)

Les produits de fission de l'uranium initial (n° atomique 92) ne sont jamais identiques à chaque fission :

- couvrent une très large variété de numéros atomiques
- avec deux "pics" aux alentours de 30 et 60

Les noyaux produits par la fission

- sont très souvent radioactifs : iode (53), césium (55), strontium (38), krypton (36)...
- avec des "demi-vies", d'une fraction de seconde à des milliers d'années, avec pour l'essentiel quelques dizaines d'années. Par conséquent la radioactivité des produits de fission est une radioactivité qui décroît très vite.

Les neutrons créés par la fission

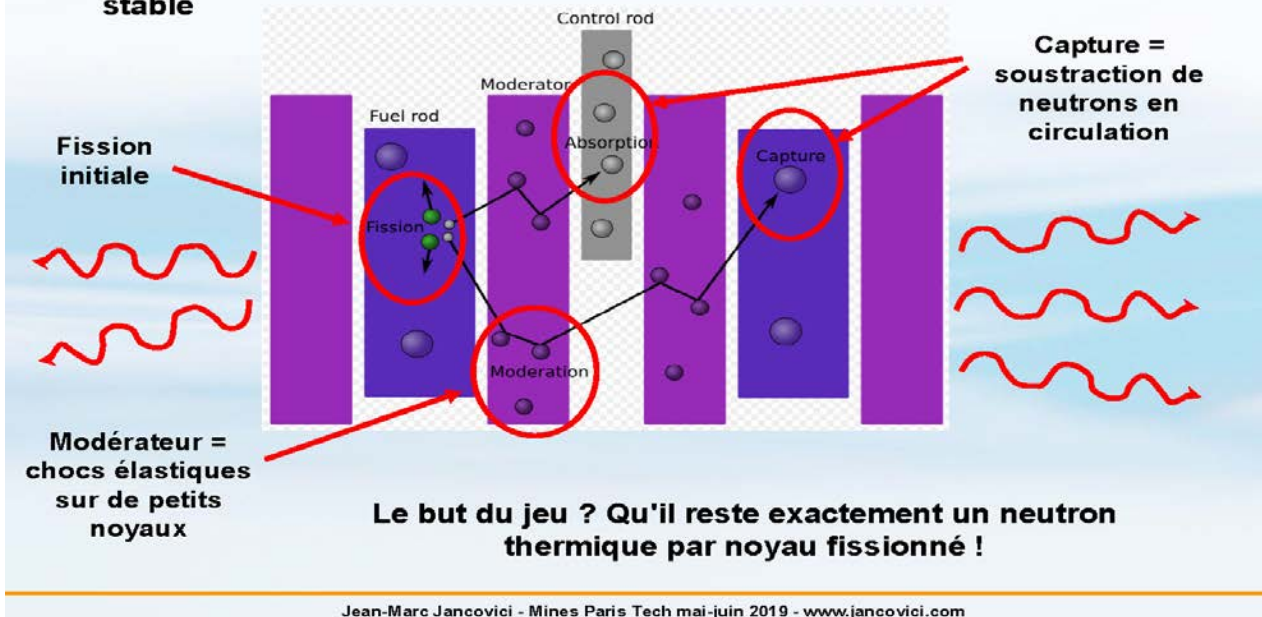
- une partie va être absorbée par les noyaux d'uranium présents dans le réacteur (en particulier l'Uranium 238)
- ce qui crée des noyaux dont le numéro atomique est au-delà de l'uranium (92) : plutonium(94), américium (95), curium (96)...
- dans le tableau de Mendeleïev, il s'agit des actinides. Présents en petite quantité dans la barre d'oxyde d'uranium du cœur de la centrale, ils sont qualifiés d'actinides mineurs.
- on les retrouve dans le combustible utilisé des centrales



## Après une fission, c'est le grand bazar... (bis)

Après une fission, on obtient (2) :

**Des neutrons, bien trop énergétiques pour être absorbés par les noyaux fissiles, et en trop grand nombre pour que la réaction soit stable**



L'uranium 235 "apprécie" les neutrons thermiques : au moment de leur éjection consécutive à la fission, ces neutrons sont trop énergétiques pour pouvoir être récupérés par un autre noyau d'uranium 235.

Ces neutrons sont utilisés dans la réaction nucléaire pour fissionner d'autres noyaux d'uranium 235 :

- le neutron qui va aller fissionner un nouveau noyau d'uranium 235 ne doit pas aller trop vite sinon il n'est pas attrapé par le noyau
- il faut donc le ralentir, c'est-à-dire utiliser un modérateur, qui consiste à faire rebondir le neutron sur de petits noyaux (en l'occurrence, les plus efficaces : noyaux d'hydrogène de l'eau) jusqu'à ce qu'il perde une part de son énergie cinétique et devienne un neutron thermique
- c'est pourquoi le modérateur d'un réacteur nucléaire est juste de l'eau (qui sert en plus de caloporteur, à évacuer la chaleur)

Il s'agit d'un élément de sécurité passive : si on perd le caloporteur (par exemple une fuite dans le circuit), on perd certes la faculté de refroidir le coeur, mais d'un autre côté la fission s'arrête d'elle-même.

---

Chaque fission d'uranium produit entre 1 et 4 neutrons. Pour obtenir toujours la même quantité d'énergie et empêcher l'emballement, il faut, par fission, faire capturer 1 neutron par noyau d'uranium. Et surtout pas plus : 2 neutrons capturés revient à faire une bombe atomique, où les premières fissions provoquent une réaction en chaîne.

Du coup lorsqu'il y a plus d'1 neutron créé par la réaction de fission, il faut absorber les neutrons excédentaires. Présence dans le réacteur de 2 constituants essentiels :

- les absorbeurs de neutrons, notamment le Bore (5)
- un modérateur, typiquement de l'eau. Il existe aussi des modérateurs en graphite comme à Tchernobyl mais moins sécurisé car en cas de dysfonctionnement il n'y a pas de sécurité passive, pas de possibilité de refroidir le coeur. N'existe pas en France en fonctionnement (certains en cours de démantèlement).

But de l'opération : qu'il reste exactement 1 neutron thermique par noyau fissionné. Possibilité de réguler très légèrement pour faire monter en puissance ou au contraire faire baisser la production.

---

### L'émission de rayonnement gamma

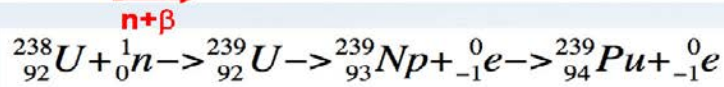
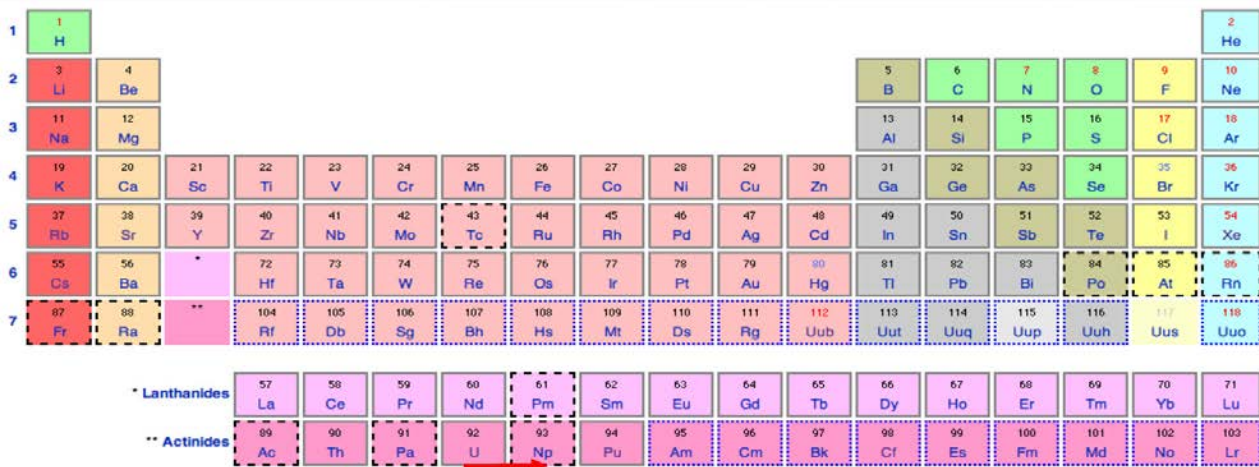
Un réacteur en fonctionnement (cuve en acier contenant l'assemblage d'oxyde d'uranium et l'eau circulant autour) émet des rayonnements gamma, ce qui explique la présence autour d'une enceinte de confinement en béton qui empêche les rayons de sortir.

## Après une fission, c'est le grand bazar... (ter)

Après une fission, on obtient encore :

Du rayonnement gamma

Des actinides, dont le plutonium, dont les isotopes impairs sont fissiles

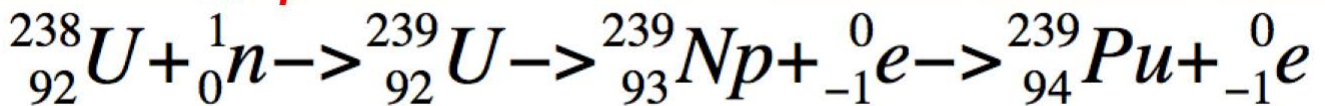


Jean-Marc Jancovici - Mines Paris Tech mai-juin 2019 - www.jancovici.com

Les actinides sont les produits qui

- se situent au-delà de l'uranium dans le tableau périodiques des éléments (= table de Mendeleïev)
- et qui sont créés par absorption successive de neutrons et désintégration radioactive

Exemple passage au Plutonium (actinide) à partir de l'Uranium 238 : cela commence par l'absorption d'un neutron (uniquement à partir de l'uranium 238, s'agissant de l'uranium 235, s'il absorbe un neutron il fissionne)



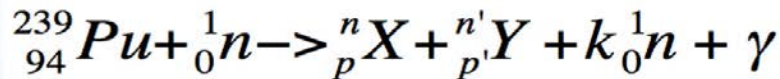
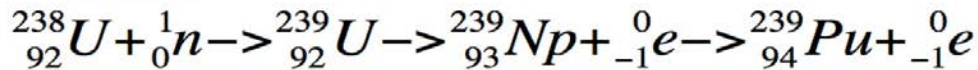
Dans un réacteur nucléaire

- on trouve les 2 isotopes : uranium 235 et 238
- l'uranium 235 dans un réacteur (français) au départ représente 3,5% du total de l'uranium enfourné (96,5% est donc de l'uranium 238)

Note : 3,5% est le taux de concentration idéal. Au dessus, cela devient incontrôlable (et à 90% c'est une bombe nucléaire). En dessous, la fission ne crée pas assez de neutrons et la réaction en chaîne ne se produit pas.

Certains réacteurs dans le monde fonctionnent avec de l'uranium "naturel", c'est-à-dire avec 0,7% d'uranium 235. Nécessite de l'eau lourde pour fonctionner.

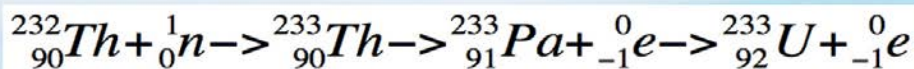
## Vous n'aimez pas les lents ? Prenez le rapide



**Il faut donc 2 neutrons au lieu d'un pour passer du noyau fertile à la fission**

**Dans le cas du Pu, le neutron de fission est « rapide » ( $e > 0,9 \text{ MeV}$ )**

**Il existe deux isotopes fertiles présents dans la nature : U238 (99,3% de U total) et Th232 (100% de Th)**



**La réaction fournit les neutrons permettant de « régénérer » du combustible à partir de l'isotope initial : on parle donc de « **surgénérateur** »**

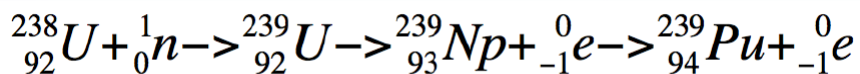
Jean-Marc Jancovici - Mines Paris Tech mai-juin 2019 - [www.jancovici.com](http://www.jancovici.com)

Le plutonium peut fissionner : on pourrait donc imaginer un réacteur basé non pas sur la fission de l'uranium 235 mais sur

- la génération en continue de plutonium
- puis sur sa fission

C'est ce qu'on appelle le sur-générateur (Phoenix ou Super Phoenix) où

- c'est l'uranium 238 qui sert de combustible
- en ayant besoin de 2 neutrons



C'est une réaction plus complexe à piloter : elle n'est pas instantanée,

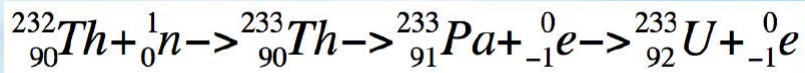
- il faut tenir compte des temps de formation U238 / U239
- et des temps de décroissance radioactive pour obtenir le plutonium

2 avantages aux réacteurs au plutonium

- pas besoin de modérateur : le plutonium s'est fissionné avec des neutrons lents / thermiques et des neutrons rapides, pas besoin de modérer les neutrons
- au lieu de profiter d'une toute petite partie de l'uranium (l'uranium 235 représente 0,7% de l'uranium trouvé dans la nature), on peut utiliser la totalité de l'uranium trouvé dans la Nature

Autrement dit, faculté à augmenter très sensiblement (x100) le potentiel énergétique de l'uranium trouvé dans la Nature.

SuperPhoenix, "réacteur rapide" industriel qui a longtemps fonctionné en France, a été démantelé. Phoenix a fonctionné pendant 30 ans est en fin de démantèlement.



Le thorium peut également être exploité :

- après absorption d'un neutron il se transforme en Uranium 233
- l'Uranium 233 est fissile (impair)

2 couples dans la Nature peuvent servir dans des réacteurs nucléaires (à neutron rapide et surgénérateurs) :

- Uranium 238 / Plutonium 239
- Thorium 232 / Uranium 233

Pour faire fissionner l'Uranium 238 ou le Thorium 232, il faut leur envoyer des neutrons et donc nécessité de disposer d'une source de neutrons pour démarrer la réaction. Par conséquent pour démarrer un réacteur nucléaire, on a besoin d'une matière qui fissionne naturellement (Uranium 235).

Faire fissionner l'Uranium 238 ou le Thorium 232, c'est mettre en place des cycles qui permettent d'augmenter le potentiel d'une énergie nucléaire qui existe déjà à base d'Uranium 235. Mais cela ne permet pas de remplacer en totalité l'Uranium 235.

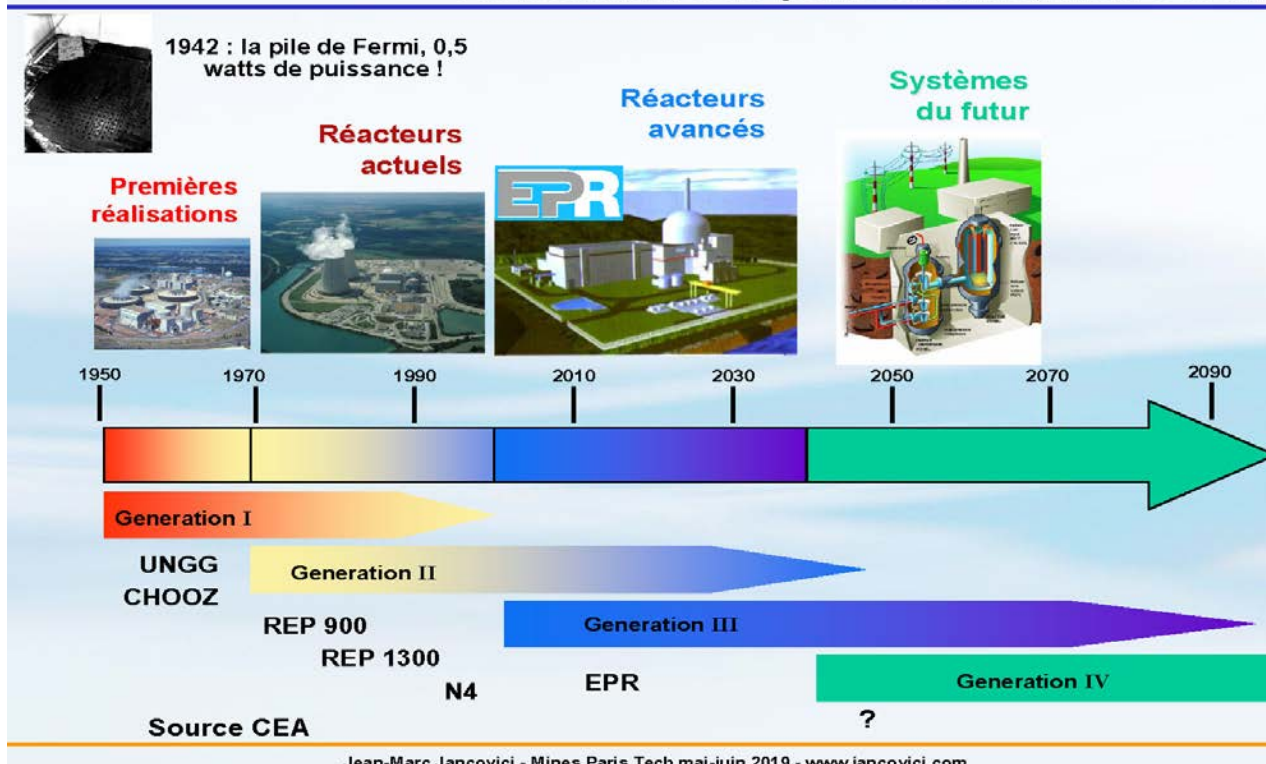
---

Dans les réacteurs actuels :

- une petite partie du Plutonium fissionne
- mais on en retrouve dans le combustible utilisé en sortie de réacteur

Dans les réacteurs imaginés pour la génération 4, les ingénieurs souhaitent exploité le plutonium au fur et à mesure qu'il est généré.

## La bouilloire se perfectionne, bien sûr...



Génération I : réacteur à Uranium naturel graphite - gaz

- ont tous été arrêtés en France
- mise en conformité / sécurisation non rentable,
- donc vague d'arrêt de réacteurs avant terme non pour des motifs politiques mais sur avis de l'autorité de sûreté de l'époque et après calcul de rentabilité

Génération II : en activité aujourd'hui en France, essentiellement des réacteurs à eau pressurisé (existe aussi en version "eau bouillante")

Génération III : EPR, une version améliorée de la précédente, reposant sur le même principe de fonctionnement

Génération IV : à l'état de concepts, avec un cahier des charges consistant

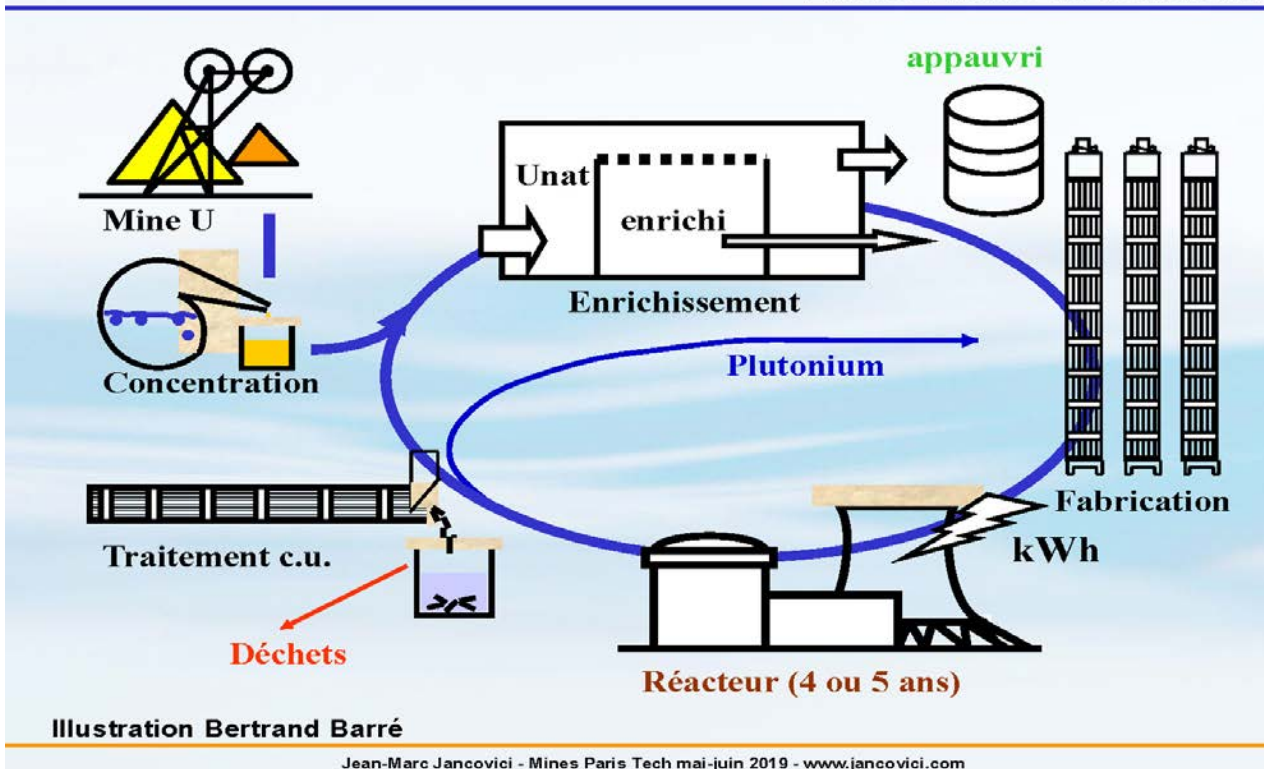
- à exploiter tout l'uranium
- à fermer le cycle (ne pas sortir dans le combustible utilisé une matière pouvant encore être valorisé à des fins énergétique, par exemple le plutonium)
- à minimiser les déchets
- et disposant de réacteurs à sûreté passive



Assemblage d'uranium tel qu'il est utilisé dans les réacteurs français :

- de grands tubes en alliage de zirconium, des "crayons"
- à l'intérieur desquels se trouvent des pastilles d'uranium et où l'eau circule

Manipulation sans risque, aucune protection radiologique nécessaire : aucune toxicité de l'uranium au moment de l'enfourner dans le réacteur. Radioactivité naturelle de l'assemblage sans risque.



Extraction de l'uranium, ressource gratuitement fournie par la Nature : l'uranium provient de la génération précédente d'étoiles.

Phases successives au cours des 14 milliards d'années :

- Big bang
- grande soupe de protons
- première génération d'étoiles
- par fusions successives, création de tous les éléments présents dans le tableau de Mendeleiev
- certaines étoiles créent des super-nove qui expédient tous ces éléments dans l'espace
- tandis que la formation d'étoiles continue, ces poussières se mettent en orbite autour des nouvelles étoiles, se condensent et forment des planètes telluriques (10 milliards d'années après le Big bang)

---

Les mines d'Uranium permettent de le récupérer sous forme d'oxyde mais l'extraction récupère également des éléments "sans intérêt" : il est donc nécessaire de concentrer l'uranium récupéré.

---

3e opération consiste à enrichir l'uranium :

- un mélange compliqué de chimie et de physique
- consistant à extraire dans l'uranium l'isotope 235

Difficulté : les propriétés chimiques des uranium 235 et 238 étant identiques (même nombre de protons, donc d'électrons), il est nécessaire de recourir à une séparation non chimique des 2 isotopes. La purification chimique de l'uranium 235 n'est pas possible, il faut recourir à des centrifugeuses :

- un petit cylindre dans lequel on fait tourner un gaz, l'hexafluorure d'uranium
- équipé de deux écopés pour "attraper" les éléments centrifugés : l'uranium 238 est capturé par l'écope en bord de cylindre (la force centripète évacue en périphérie l'uranium 238, plus lourd) tandis que l'uranium 235 est capturé par l'écope proche de l'axe de rotation (capture très partielle, une fraction / 1000)
- la centrifugeuses tourne jusqu'à obtenir un Uranium enrichi à 3,5% avec l'isotope 235

Pour avoir 1 tonne d'uranium enrichi à 3,5%, il faut 5 tonnes d'uranium à 0,7% :

- soit 1 tonne d'uranium propre à servir de combustible
- et 4 tonnes d'uranium inutilisées (= uranium appauvri). A servi pendant un temps à faire des lests pour des voiliers de course (intérêt d'une très grande masse dans de petits volumes)

Note : la centrifugeuse sert pour le civil mais technologie identique pour le militaire (il faut juste augmenter la concentration à 90%, c'est-à-dire disposer de plus d'uranium).

---

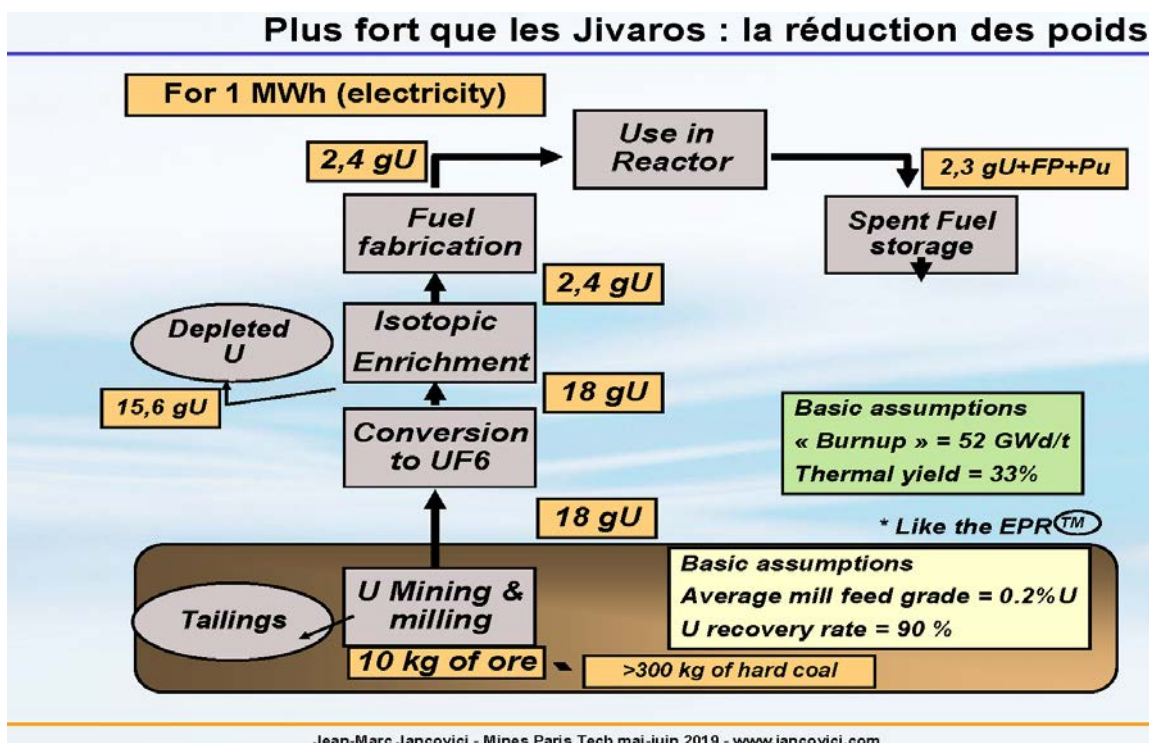
4e transformation : l'uranium enrichi est conditionné en pastilles d'uranium, placées dans des tubes en alliage de zirconium. Les assemblages sont enfin placés dans le réacteur.

---

L'uranium fissionne pendant 4 à 5 ans puis extrait du réacteur.

Deux écoles selon les pays :

- considérer que ce qui sort du réacteur est un déchet bon à stocker (Etats-Unis sous Yucca Mountain, Suède dans des fûts en cuivre placés sous terre, ...)
- considérer qu'une étape de recyclage est nécessaire avant enfouissement : une partie peut être réassemblée et ré-enfournée dans les réacteurs (rôle de l'usine de La Hague)

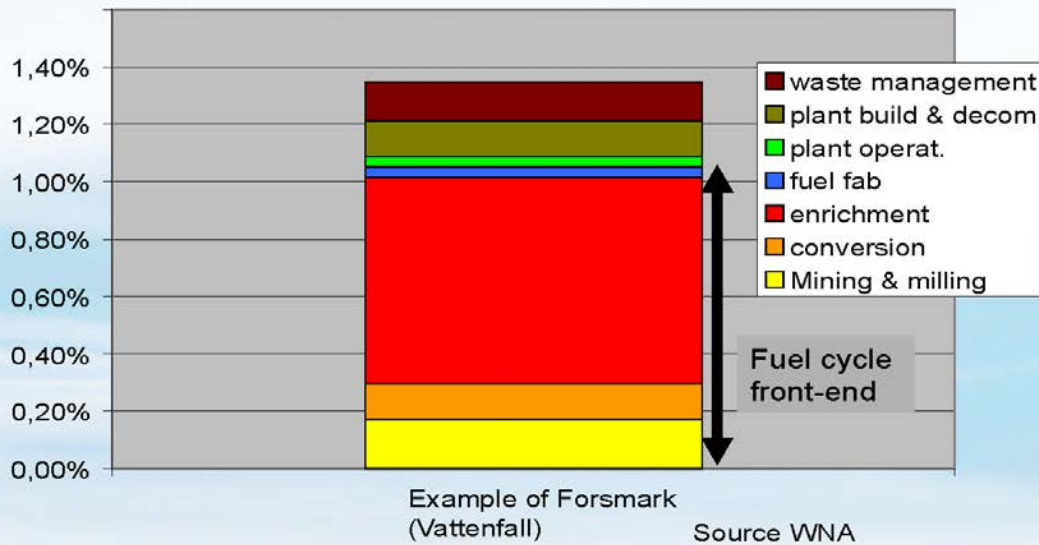


Quelques ordres de grandeur à avoir à l'esprit quant aux masses en présence.

- Pour 1 megaWatt / h électrique : 1 kg de minerai nécessaire, dans lequel se trouve quelques grammes d'uranium
- A partir de 10 kg de minerais, environ 18 g d'uranium (gU). La concentration du minerai est en ordre de grandeur pour 1000, de l'ordre du kilo par tonne, faible concentration donc. A titre de comparaison : l'or a une concentration encore moindre, environ 10 grammes de minerai par tonne.
- Fabrication de l'uranium enrichi / 7 : 2,4 g d'uranium

La caractéristique par excellence du nucléaire : la manipulation de toutes petites quantités de matière pour produire de grandes quantités d'électricité.

## Combien de kWh pour combien de kWh ?



**% de l'énergie finale du réacteur consommée par chaque étape de préparation du combustible. Source Areva**

Jean-Marc Jancovici - Mines Paris Tech mai-juin 2019 - www.jancovici.com

Rendement énergétique ?

Comme pour le pétrole, où une partie de l'énergie extraite sert à pomper le pétrole, le raffiner et le transporter, pour l'uranium une partie de l'énergie fournie est nécessaire pour faire fonctionner la chaîne de production :

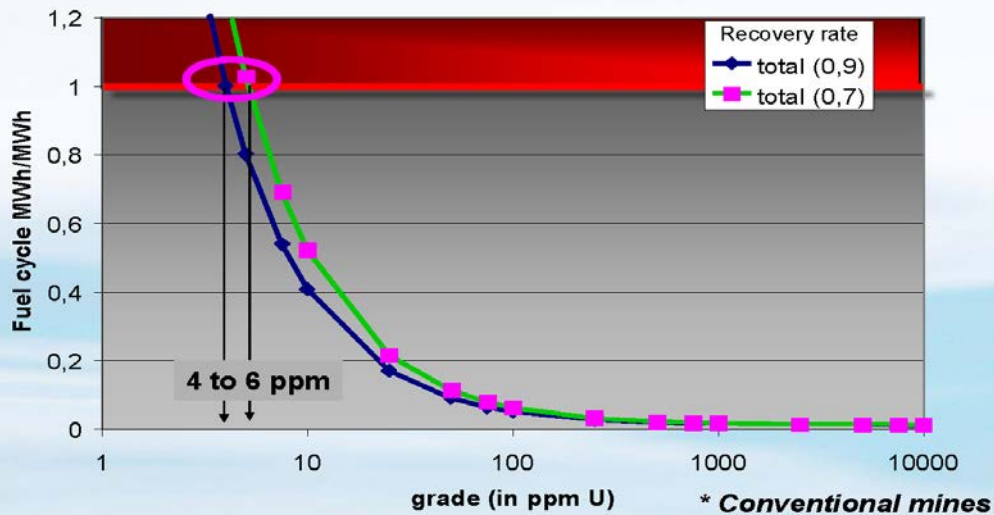
- du diesel dans les engins de mines
- de l'électricité dans l'usine d'enrichissement
- de l'énergie pour la gestion des déchets
- ...

Pour la production nucléaire, une petite partie est utilisée pour la filière : entre 1 à 2 %

Dit autrement la fraction qui est utilisée dans l'ensemble du cycle pour permettre à l'énergie nucléaire d'être produite équivaut à 1 à 2% de l'énergie produite.



## kWh or not kWh : il faut compter...



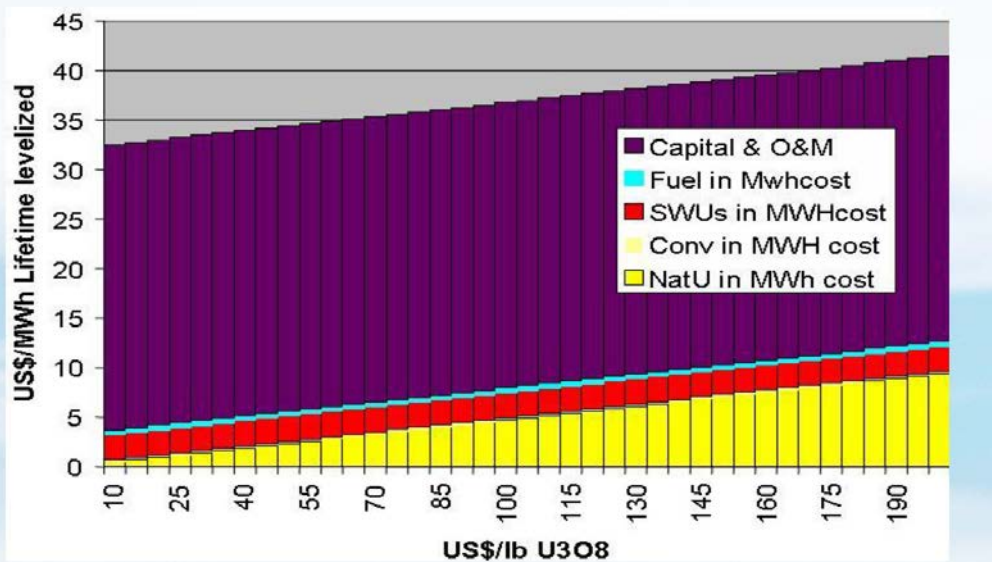
Consommation d'énergie du cycle du combustible en fonction de la teneur du minerai en U. Source Areva.

Jean-Marc Jancovici - Mines Paris Tech mai-juin 2019 - www.jancovici.com

Rentabilité extrêmement dépendante de la teneur en uranium du minerai.

Un minerai pauvre oblige à charrier énormément de terre et à filtrer beaucoup de matière. Avec un minerai 100 fois plus pauvre, la production nucléaire n'est plus rentable.

## Le kWh nucléaire est sensible au prix de l'U, mais pas trop



Sensibilité du kWh nucléaire au prix de l'Uranium (\$ par livre de  $U_3O_8$ )  
Source AREVA

Jean-Marc Jancovici - Mines Paris Tech mai-juin 2019 - www.jancovici.com

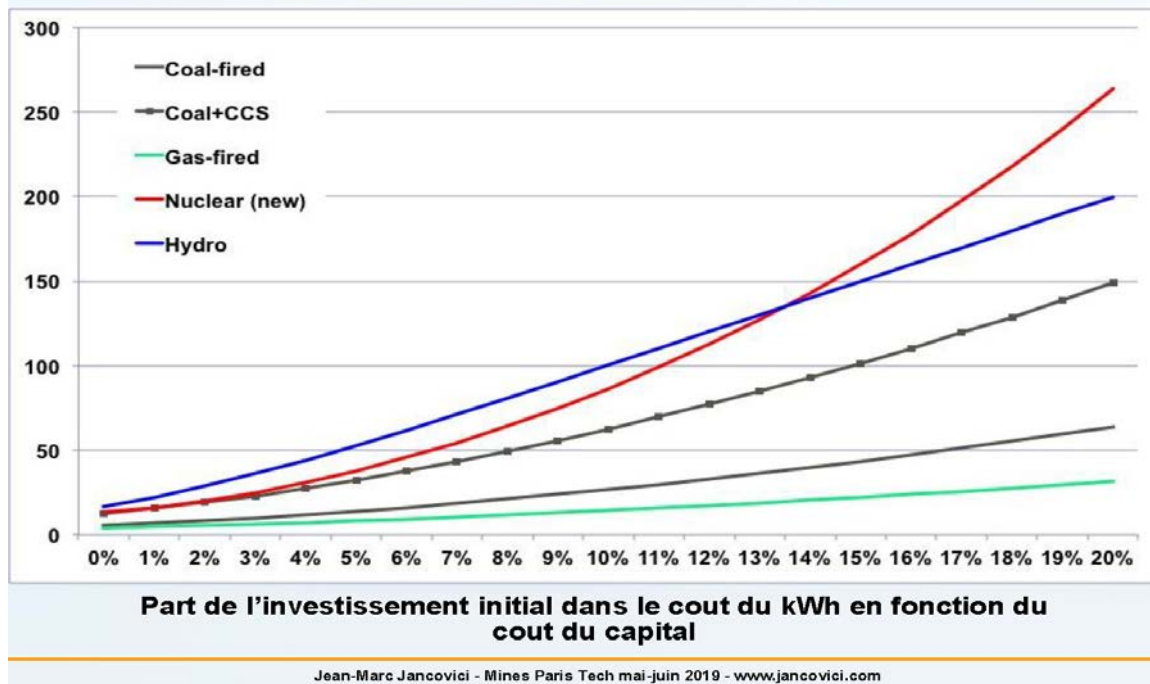
Puisque les quantités de "combustible" sont très faibles pour produire de grandes quantités d'électricité, le nucléaire est une industrie à coût fixe. L'essentiel du coût de la production d'électricité nucléaire se situe

- dans la construction de la centrale
- et dans la constructions des infrastructures amont / aval qui permettent à la filière de fonctionner

Les coûts variables, et notamment le coût des combustibles, représentent des coûts extrêmement faibles dans la chaîne. Dit autrement, une fois que la centrale est construite, qu'elle fonctionne ou qu'elle ne

fonctionne pas, cela ne change pas le prix. C'est le point commun, du point de vue de la structure de coût, avec la chaîne éolienne ou solaire. Coûts de maintenance faibles, l'essentiel du coût se situe dans la mise en place du dispositif initial.

### Bien plus important : le cout de l'argent



Dans un dispositif où l'intégralité de l'investissement précède l'exploitation, les clients et les recettes, le coût du megaWatt / heure dépend de 2 facteurs centraux :

- le coût de construction de la centrale
- mais aussi le coût de l'argent, c'est-à-dire le taux d'intérêt à régler à l'actionnaire / au banquier au titre de l'argent avancé pour construire la centrale.

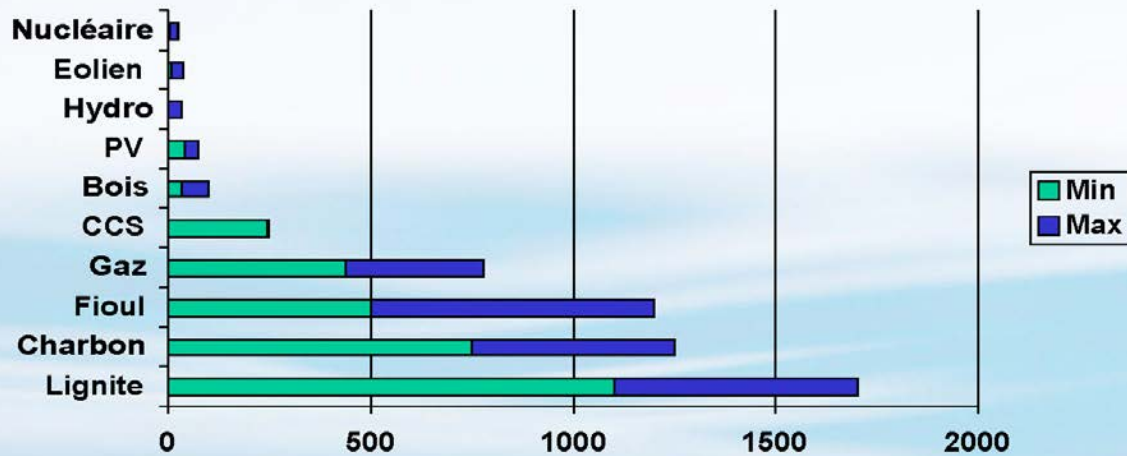
Un très grand écart de prix de l'électricité nucléaire peut être observé en fonction de ce que demandent les actionnaires et les banquiers en taux d'intérêts sur l'argent avancé. Exemple : 10% demandé pour la construction d'Hinkley Point. Impossible dans ces conditions de passer sous les 100 € par mGh alors que sans taux d'intérêt le coût aurait été de 20 € par mGh.

Le nucléaire pas fait pour le privé.

## Chapitre 34 - Les contreparties du nucléaire

Le nucléaire est un manière d'obtenir de grandes quantités d'énergie avec très peu de matière et sans combustion. Cet avantage a ses contreparties.

## CO<sub>2</sub> or not CO<sub>2</sub> : il faut compter...



**Fourchette des évaluations des émissions de CO<sub>2</sub> par kWh électrique selon les modes de production.**

Jean-Marc Jancovici - Mines Paris Tech mai-juin 2019 - [www.jancovici.com](http://www.jancovici.com)

La production d'énergie nucléaire ne nécessite pas de combustion, pas d'oxydation de la source de carbone, par conséquent les émissions de CO<sub>2</sub> par kWh sont faibles. Si on analyse le cycle, le CO<sub>2</sub> est tout de même présent :

- engins de mines au diesel (1 t à extraire pour obtenir 10kg)
- enrichissement
- transport du combustible
- construction de la centrale (cimenteries / aciéries)
- déplacements des salariés
- traitement des déchets
- démantèlement (faible émission CO<sub>2</sub>, pas plus qu'un complexe industriel ... comme pour le coût, qui représente 10 à 15% du prix de construction)

Reste bien plus faible que les modes concurrents de production d'électricité.

## ... mais le public n'en tient pas toujours compte !

**Pour chacune des activités suivantes dites-moi si d'après ce que vous savez elle contribue beaucoup, assez, peu ou pas du tout à l'effet de serre (Réponse « beaucoup » + « assez »)**

!!!

	Les activités industrielles	Les transports	La destruction des forêts	Les bombes aérosols	Le chauffage des bâtiments	Le traitement des déchets	Les centrales de production d'électricité au gaz au charbon ou au fuel	Les centrales nucléaires	L'agriculture et l'élevage	L'activité volcanique
2014	88	85	88	75	75	74	91*	53	66	36
2013	90	88	89	73	72	70	64	61	59	36
2010	90	88	90	70	70	69	64	61	59	42
2007	93	92	89	75	71	69	59	56	50	31
2004	90	88	87	73	58	70	62	63	41	28
2001	89	87	84	67	46	67	52	61	39	33
2000	85	83	79	64	39	57	60	59	33	30

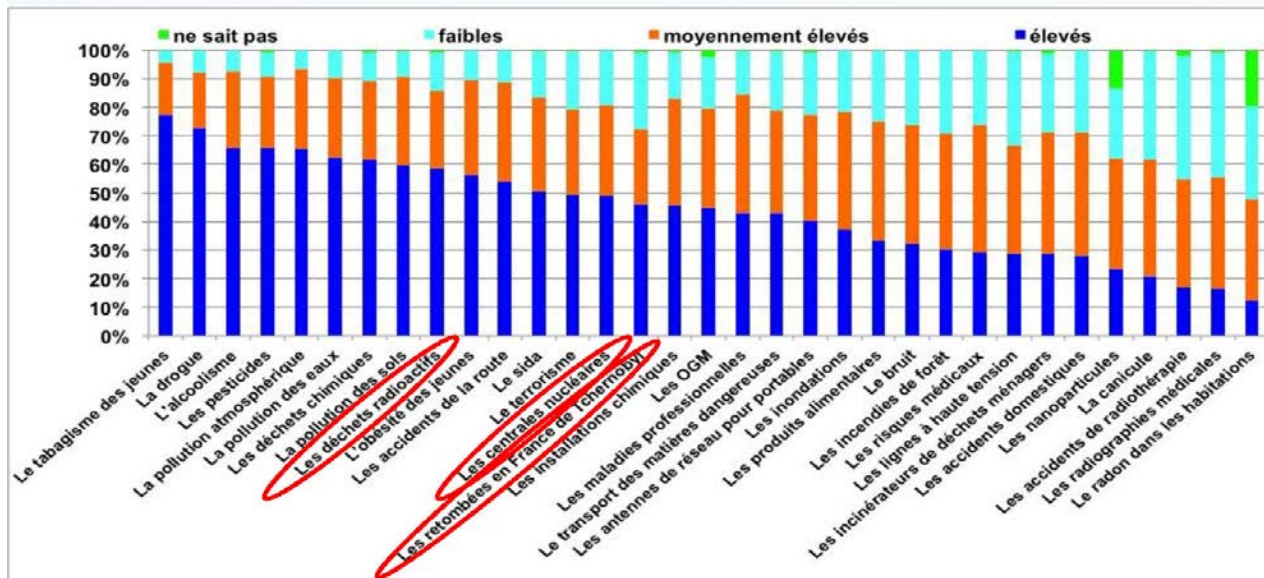
- La formulation de cet item a changé en 2014 : l'Ademe a ajouté « au gaz, au charbon ou au fuel », ce qui a provoqué une augmentation artificielle de cet item

Baromètre Ademe / CSA

Jean-Marc Jancovici - Mines Paris Tech mai-juin 2019 - www.jancovici.com

Non traité

## L'avis qu'on en a



Jean-Marc Jancovici - Mines Paris Tech mai-juin 2019 - www.jancovici.com

Risques perçus et risques réels sont décorrélés (en France) : peur du nucléaire.

Enquêtes de l'IRSN (Institut de radioprotection et de sûreté nucléaire) analyse régulièrement cette perception du risque nucléaire dans des sondages.

La dangerosité des déchets radioactifs perçue comme un des risques les plus élevés : avant l'obésité par exemple.

## Ce que disent les chiffres

### Causes de mortalité en France (rangées dans l'ordre de la perception des risques):

Tabagie  $\approx$  70.000 morts par an

Drogue  $\approx$  1.000 morts par an (y compris accidents de la route)

Alcoolisme  $\approx$  30.000 morts par an

Pollution atmosphérique  $\approx$  10.000 morts par an

**Les déchets nucléaires : 0 mort par an**

Obésité  $\approx$  50.000 morts par an

Accidents de la route  $\approx$  3.000 morts par an

SIDA  $\approx$  300 morts par an

Terrorisme  $\approx$  quelques dizaines de morts par an

**Les centrales nucléaires : 0 mort par an**

**Les retombées en France de Tchernobyl : 0 mort par an**

Maladies professionnelles et accidents du travail  $\approx$  500 morts par an

Accidents domestiques  $\approx$  10.000 morts par an

Le radon  $\approx$  2.000 morts par an

Jean-Marc Jancovici - Mines Paris Tech mai-juin 2019 - [www.jancovici.com](http://www.jancovici.com)

Dangerosité réelle :

- tabagisme 70 000 morts / an
- alcoolisme 30 000 morts / an
- obésité 50 000 morts / an
- accidents domestiques 20 000 / an (2 à 3 000 pour les escaliers)
- pollution atmosphérique 10 000 morts / ans
- accidents de la route 3 000 morts / an (jusqu'à 20 000 dans les années 70)

Pas de mort dans le secteur nucléaire en France. Pas même dans le coeur des centrales où l'exposition des salariés est surveillée / plafonnée (exposition maximale 9 fois moindre que les astronautes)

La hiérarchie des risques perçus n'est pas du tout conforme aux données d'observation.

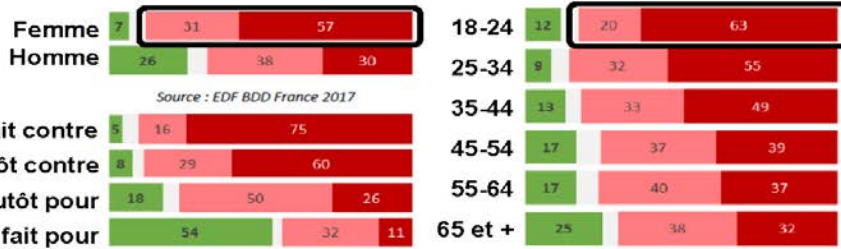
## En démocratie, ce que pense l'électeur, non les faits

Pour chacun des éléments suivants, indiquez si, selon vous, il contribue à l'effet de serre (au réchauffement de l'atmosphère) : - les centrales nucléaires ?



Figure 12 : distribution des réponses selon l'année d'interrogation

Lecture : en 2017, 44% des personnes de 18 ans ou plus vivant en France estiment que les centrales nucléaires contribuent beaucoup à l'effet de serre.



Figures 13a, 13b et 13c : distribution des réponses selon le sexe, la réponse à la question de la Fig. 8 (item 'énergie nucléaire'), et la tranche d'âge

Lecture : en 2017, 75% des personnes de 18 ans ou plus vivant en France et se prononçant tout à fait contre l'utilisation de l'énergie nucléaire en France estiment que les centrales nucléaires contribuent beaucoup à l'effet de serre.

Jean-Marc Jancovici - Mines Paris Tech mai-juin 2019 - www.jancovici.com

Autre asymétrie relative à la perception que les Français ont du risque nucléaire.  
Contribution du nucléaire dans les émissions de GES.

Ce que dit la physique : casser un noyau de métal en 2 n'est pas oxyder un atome de carbone, donc absolument aucune émission de GES.

Explication :

- renvoie à l'image d'Epinal de la Centrale nucléaire et de son panache de fumée. De la vapeur d'eau, totalement insignifiant pour le climat d'une planète à 2/3 recouverte d'océans, comme toutes les émissions de vapeur d'eau émises par l'homme (à une exception près : le gigantesque barrage d'Assouan)
- fait écho aux débats récurrents sur la nécessité de fermer les centrales et à la lutte contre les GES (association d'idée fausse)

## Le nucléaire, parfois sujet préféré des journalistes

Vrais ou faux problèmes, le nucléaire a nourri et continue à nourrir de nombreux débats parfois houleux :

Déchets

Accidents

Maladies

Coût

« opacité »

Pas assez d'uranium...

Jean-Marc Jancovici - Mines Paris Tech mai-juin 2019 - www.jancovici.com

Débats récurrents mélangeant vrais et faux problèmes. Les contreparties du nucléaire :

- déchets
- accidents
- maladies
- coût
- opacité
- raréfaction de l'uranium

## On joue au petit jeu des réserves ?

		CATEGORY of Uranium resources (million tons = Mt)				
		Conventional		Unconventional		
		Identified (deposits)		Undiscovered		
		Reasonably Assured Resources	Inferred Resources ①	Prognosticated Resources ②	Speculative Resources ③	
Cost of recovery \$/kgU						① Based on direct geological evidence ② Based on indirect geological evidence ③ Extrapolated values
\$/lbU308						
<15	< 40	1.95	0.80	1.7	4.6	
15 - 30	40 to 80	0.70	0.36	0.82	2.9	
> 50	> 130	-	-	?	-	
Subtotal		3.30	1.45	2.52	7.5	
General total		4.75		10.0		15 to 25
		General total of conventional resources:		14,750 000 t		
		World demand in 2006:		less than 70,000 t		
				<b>Resources &gt; 200 times 2006 demand</b>		

Équivalent du 1P      ≈ Équivalent du 2P      Phosphates, eau de mer...

**Total haut de fourchette : > 30 à 40 Mt**  
Source AREVA

Jean-Marc Jancovici - Mines Paris Tech mai-juin 2019 - www.jancovici.com

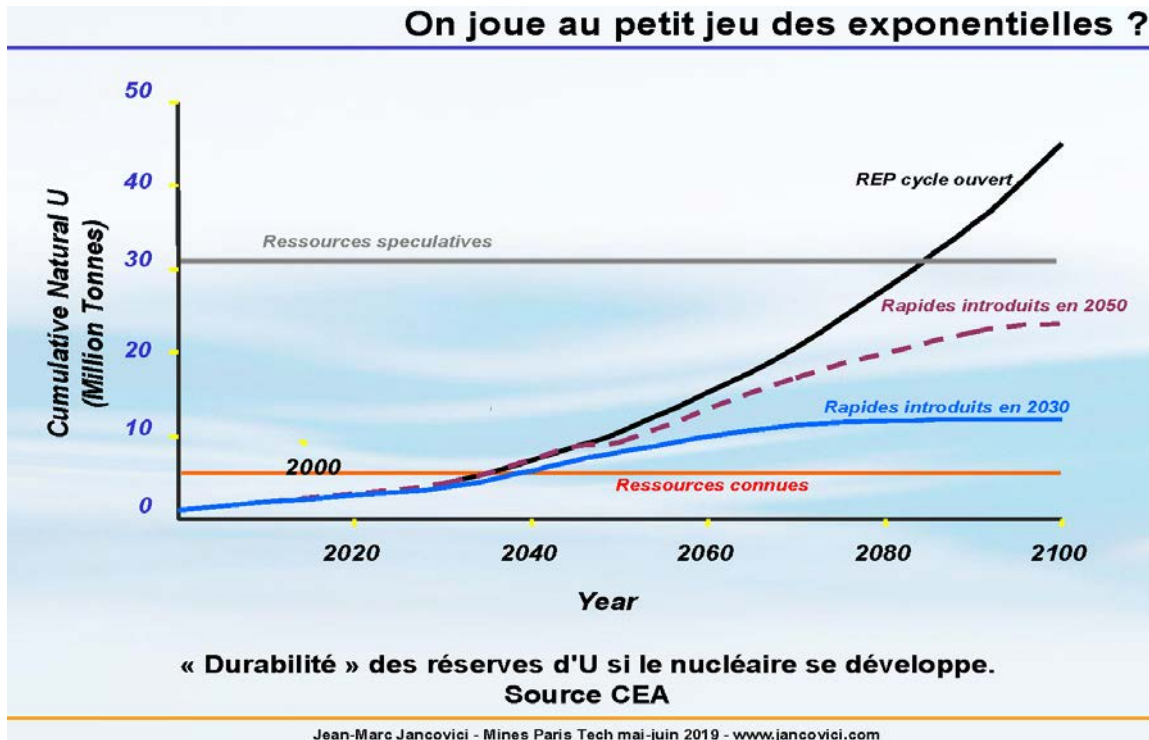
## La raréfaction de l'uranium

Comme pour tout métal, la quantité qui reste disponible dépend de la quantité d'énergie / de ressources économiques que l'on est prêt à consacrer à son extraction.

Les moyens déployés sont fonction du prix payé (comme pour le pétrole, 1 à 3P).

- Plusieurs dizaines de millions de tonnes d'uranium enfoui sous terre. Suppose d'exploiter l'uranium "non conventionnel" présent dans les phosphates ou dans l'eau de mer, sources non exploitées aujourd'hui.
- Aujourd'hui pour l'uranium conventionnel, 4,75 millions de tonnes assurées et 10 millions de tonnes supplémentaires estimées

La consommation annuelle (2006) est de 70 000 tonnes / an.



Est-ce que les stocks disponibles d'uranium sont suffisants pour se débarrasser du charbon et du gaz ?

- non, en cycle ouvert : si on conserve la technologie des réacteurs à uranium 235 et que l'on augmente le parc de 5 à 10% par an (rythme nécessaire pour limiter les GES selon les engagements pris), un problème de ressource survient avant la fin du XXI<sup>e</sup> siècle.
- oui, en introduisant rapidement une nouvelle génération de réacteurs : en partant du parc actuel pour démarrer les réacteurs de la génération IV (passage en cycle fermé), la disponibilité de l'uranium n'est plus un problème majeur

Dit autrement, pour un nucléaire "durable" (= qui contribue significativement à la baisse des GES en remplaçant les combustibles fossiles et qui ne pose plus aucun problème de disponibilité de la ressource) il est impératif de passer à la génération suivante de réacteurs

- qui exploitent l'essentiel de l'uranium
- voire qui exploitent le thorium (4 fois plus abondant que l'uranium)



## Combustible, mais ne se consume pas !

### Combustible neuf

Uranium (4%  $^{235}\text{U}$ ) : 500 kg



### Combustible usé

*\*(et quelques Actinides mineurs)*

Illustration Bertrand Barré

Jean-Marc Jancovici - Mines Paris Tech mai-juin 2019 - www.jancovici.com

Traitement des déchets.

Pas d'usages possibles (hormis pour l'anecdote des flèches antichar et des quilles de bateau en uranium appauvri).

A l'entrée dans la centrale : Uranium 235 à 3,5%

A la sortie au bout de quelques années :

- Uranium 235 à 0,9% (sur 500 kg initiaux, restent 475 kg)
- création de 5 kg Plutonium, dont 1 partie fissile (Pu 239 & Pu241) et 1 partie non fissile (Pu240, voire 242). Note : le Plutonium 239 est celui qui sert à fabriquer les bombes atomiques, toutefois en sortie de centrale au bout de quelques années il est totalement impropre pour cet usage militaire. Il faudrait qu'il soit utilisé seulement quelques mois : cela explique que les centrales "plutonigènes", conçues pour fabriquer des bombes atomiques, sont des centrales dites à "déchargement en continu" dans lesquelles, en cours de fonctionnement, il est possible de charger et de décharger du combustible. Exemple : Tchernobyl, dangerosité accrue par rapport aux centrales purement civiles installées en France.
- création de 20 kg de produits de fission : éléments centrés autour de numéros atomiques 30 et 60 qui n'ont pas déjà disparu dans le coeur du réacteur

## Les déchets, quelques ordres de grandeur

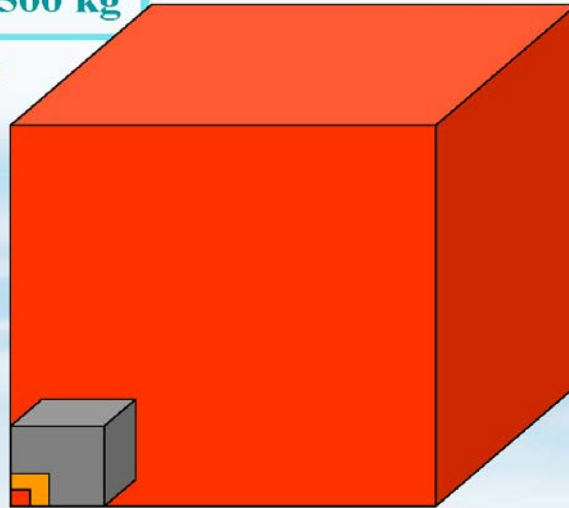
**Déchets industriels : 2 500 kg**

**dont déchets toxiques :  
~100 kg**

**Déchets nucléaires  
moins de 1 kg**

**dont vie longue : 100g**

**dont HA : 10g**



**Production de déchets par Français(e) et par an**

Jean-Marc Jancovici - Mines Paris Tech mai-juin 2019 - www.jancovici.com

Ordre de grandeur des déchets nucléaires :

- par personne, 2,5 tonnes de déchets industriels par an (principalement à l'étranger, en Chine), dont 100 kg de déchets toxiques (filrière spéciale de retraitement requis)
- par personne, 1 kg de déchets nucléaires par an, dont 100 gr ont une vie longue et 10 gr de déchets à Haute Activité et à longue durée de vie nécessitant un stockage particulier (enfouissement)

## Les déchets, quelques ordres de grandeur

Catégorie de déchets	Production totale (part française)
<b>TFA</b> (hors résidus miniers)	1 à 2 000 000 m <sup>3</sup>
<b>FMA – vie courte</b>	1 300 000 m <sup>3</sup> (stockés)
<b>FMA – vie courte - Déchets tritiés</b>	3 500 m <sup>3</sup>
<b>FA – vie longue - Graphites</b>	14 000 m <sup>3</sup>
<b>FA – vie longue - Radifères</b>	> 100 000 m <sup>3</sup>
<b>MA – vie longue</b>	60 000 m <sup>3</sup>
<b>HA - Produits de fission vitrifiés</b>	5 000 m <sup>3</sup>

**Volumes de déchets pour 40 ans d'exploitation du parc actuel.  
Source ANDRA**

Jean-Marc Jancovici - Mines Paris Tech mai-juin 2019 - www.jancovici.com

Dit autrement, les déchets nucléaires à enfouir (= déchets à haute activité et à longue durée de vie) :

- pour 40 ans d'activité du parc nucléaire pour la population française, 5000 m<sup>3</sup>
- par an, l'équivalent du volume d'un appartement 3 pièces ou un amphi de fac, 200 m<sup>3</sup>

## Un exemple de poubelle



**Stockage faible activité à Soulaines**



Jean-Marc Jancovici - Mines Paris Tech mai-juin 2019 - [www.jancovici.com](http://www.jancovici.com)

Le mode de stockage des déchets nucléaires diffère selon leur radiotoxicité.

Les déchets “peu radioactifs” (dits de faible activité) sont empilés dans des fûts puis recouverts de terre. Il s’agit par exemple

- des combinaisons que portent les opérateurs de La Hague
- de résidus de traitement

## Et une poubelle naturelle !



Jean-Marc Jancovici - Mines Paris Tech mai-juin 2019 - [www.jancovici.com](http://www.jancovici.com)

Le gisement d’Oklo au Gabon peut être considéré comme le plus vieux site de stockage au monde : 2 milliards d’années. Présence de manière naturelle de tous les éléments d’une centrale : Uranium enrichi (U235

à 3,5%) et le modérateur (eau par dessus). La réaction de fission se met en route : alternance de création de vapeur d'eau / disparition de l'eau et retour de l'eau / fission.

Ce réacteur pulsé qui a fonctionné pendant des centaines de milliers d'années a produit des déchets / des produits de fission. Restés sur place.

## Le déchet nucléaire ne le reste pas indéfiniment

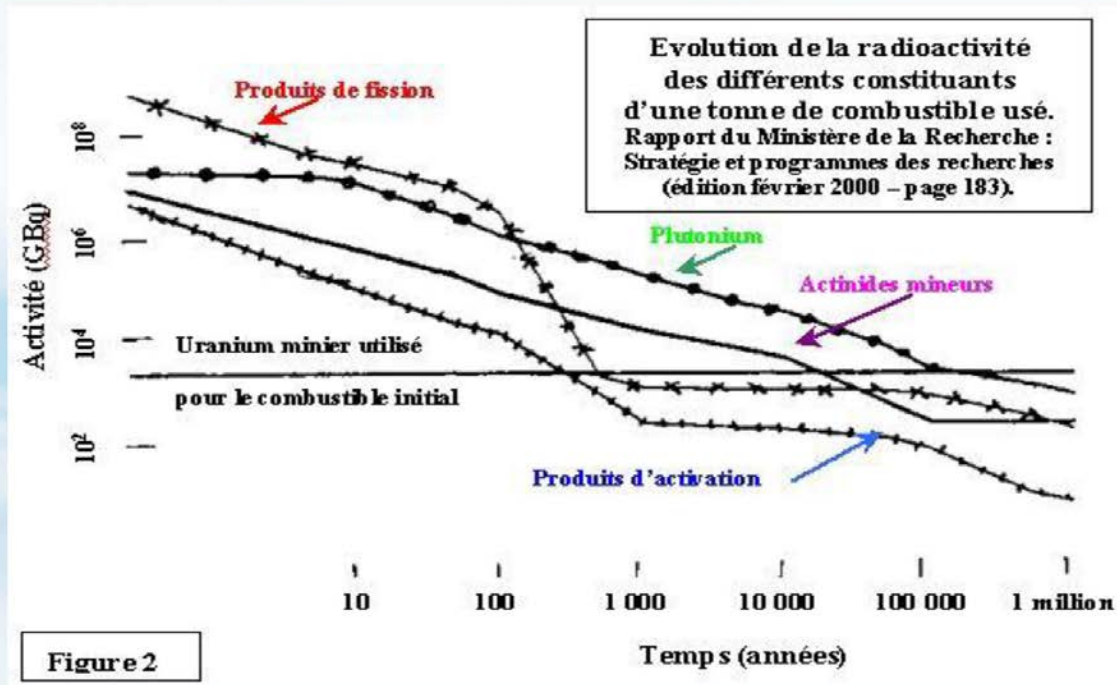


Figure 2

Jean-Marc Jancovici - Mines Paris Tech mai-juin 2019 - www.jancovici.com

Décroissance radioactives des différents types de produits obtenus en sortie de réacteur.

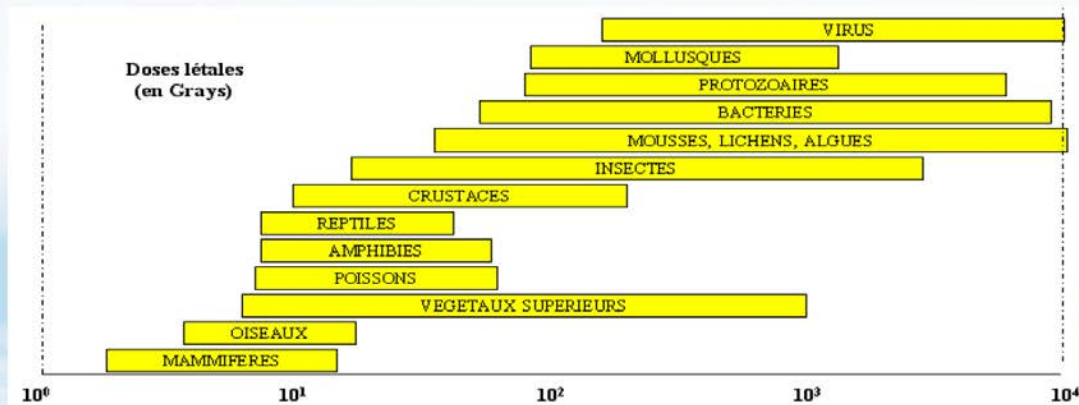
Les déchets de fission constituent les principaux déchets. Ils "crachent" énormément de radioactivité, par conséquent leur demi-vie n'est pas extrêmement élevée : les produits de fission perdent leur radioactivité (= retrouvent la radioactivité de l'uranium minier, qui se manipule à main nue) au bout de quelques siècles.

Les substances qui conservent une radioactivité très longue

- le plutonium (plus de 100 000 ans)
- les actinides mineurs (plus de 10 000 ans)

... l'enjeu serait de les consommer dans les réacteurs de génération IV

## L'égalité n'existe pas plus devant la radioactivité



Doses mortelles pour diverses catégories d'être vivants.  
Source UNSCEAR

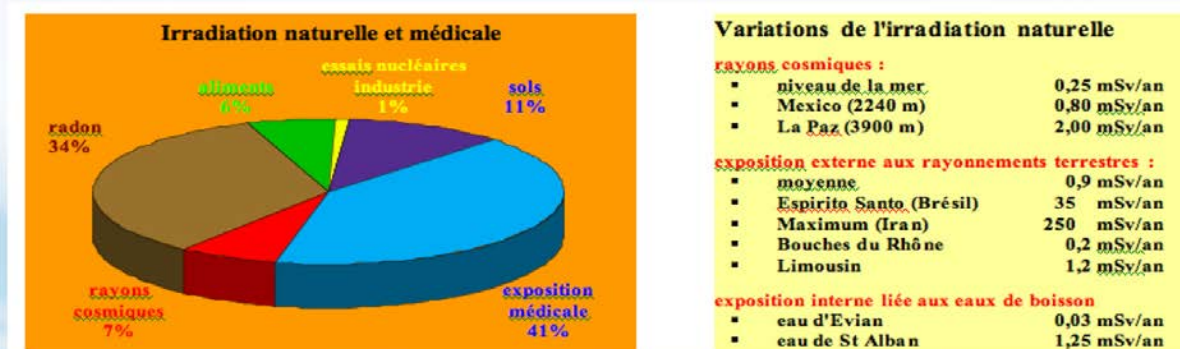
NB : 1 Gray = 1 joule par kg d'énergie transmise par le rayonnement

Jean-Marc Jancovici - Mines Paris Tech mai-juin 2019 - www.jancovici.com

Maladies / exposition aux radiations

Tous les êtres vivants sont exposés à la radioactivité depuis qu'il y a de la vie sur terre. L'ADN sait se défendre jusqu'à un certain stade contre les rayonnements ionisants. Les mammifères les plus sensibles.

## Nous sommes tous irradiés, c'est juste une question de dose



En dessous de 200 mSv par an, pas d'effet documenté sur la santé

Décomposition du rayonnement reçu par Français et par an en mSv  
Source André Aurengo, 2003

Jean-Marc Jancovici - Mines Paris Tech mai-juin 2019 - www.jancovici.com

Les hommes exposés à la radioactivité :

- bombardement naturel du rayonnement cosmique (explique que l'altitude fasse varier l'exposition, et qu'on soit plus irradié à La Paz qu'au niveau de la mer)

- radioactivité naturelle des roches (radon)
- la première source pour les population des pays riches, les exposition médicales (scanners, radio des poumons, ...)

Note : sous les 200 mSv par an, pas d'effet documenté sur la santé.

## Est-ce Tchernobyl ?



**Effet conjugué d'une déficience en vitamine D et d'un empoisonnement chronique au fluor - venant du charbon - sur un enfant chinois. Source : Health Impacts of Coal, Robert B. Finkelman, US Geological Survey, 2003**

Jean-Marc Jancovici - Mines Paris Tech mai-juin 2019 - [www.jancovici.com](http://www.jancovici.com)

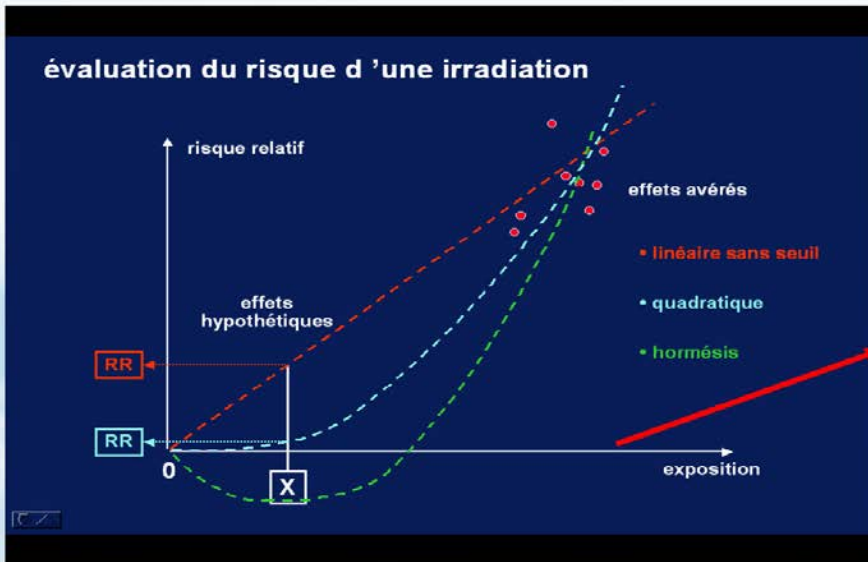
## Retombées de Tchernobyl

Pour connaître l'effet des retombées radioactives de Tchernobyl, il faut étudier de 2 cohortes : population exposée et population non exposée, en prenant soin d'avoir des populations identiques (âges, modes de vie, sexe, ...)

Difficulté avec les comparaisons de cohortes de populations exposées aux radiations, c'est qu'il n'est pas possible de mesurer avec précision le taux / la durée d'exposition. Il faut reconstituer / calculer cette exposition. C'est plus facile pour analyser les effets du tabagisme : il suffit de demander aux fumeurs combien de cigarettes / jour.

Pour mesurer l'impact des effets ionisants, on utilise l'unité de dose reçue le sievert / le millisievert.

## La relation linéaire dose-effet sans seuil, commode mais faux



**Effets sanitaires :**  
**Déterministes > 700 mSv ; effet croît avec dose**  
**Stochastiques adultes > 200 mSv ; proba croît avec dose, pas effet**  
**Stochastiques enfants > 100 mSv**  
**Stochastiques foetus > 20 mSv**

**Décomposition du rayonnement reçu par Français et par an en mSv**  
**Source André Aurengo, 2003**

Jean-Marc Jancovici - Mines Paris Tech mai-juin 2019 - www.jancovici.com

Etudes épidémiologiques nous apprennent :

- sous 100 mSv par an, strictement aucun effet constaté. 10 (personnel navigant des compagnies aériennes) ou 80 mSv, aucune différence
- au-dessus de 200 mSv, on observe des effets qui sont proportionnels à la dose reçue

## Les doses ne se mesurent pas, elles se calculent

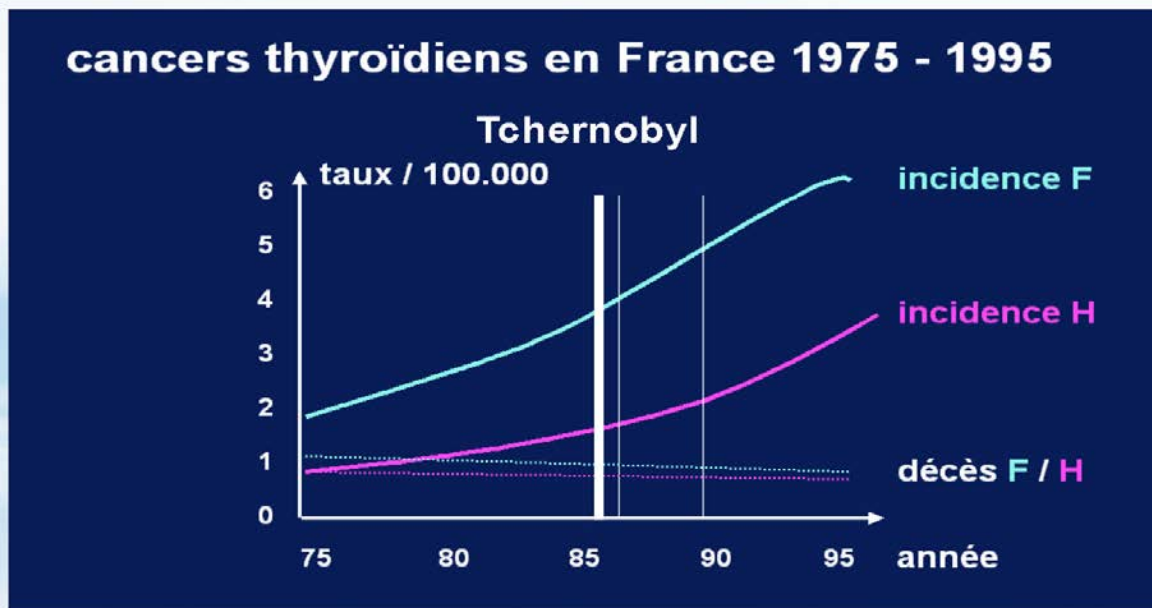


Jean-Marc Jancovici - Mines Paris Tech mai-juin 2019 - www.jancovici.com

Nécessité de reconstituer l'exposition des populations aux rayonnements reçus. Pour cela, les épidémiologistes doivent disposer d'un modèle capable de reconstituer la circulation atmosphérique qui fait suite à

l'accident de Tchernobyl, en prenant en compte la demi-vie des isotopes, etc... Modélisation permet de savoir qui a été exposé à quoi, sachant qu'il demeure nécessairement des approximations sur l'évaluation des trajectoires des panaches de Tchernobyl et que les activités en Cs-137 déposés sur le continent européen sont des estimations.

## Quand les études épidémiologiques existent, quid ?



Source André Aurengo

Jean-Marc Jancovici - Mines Paris Tech mai-juin 2019 - [www.jancovici.com](http://www.jancovici.com)

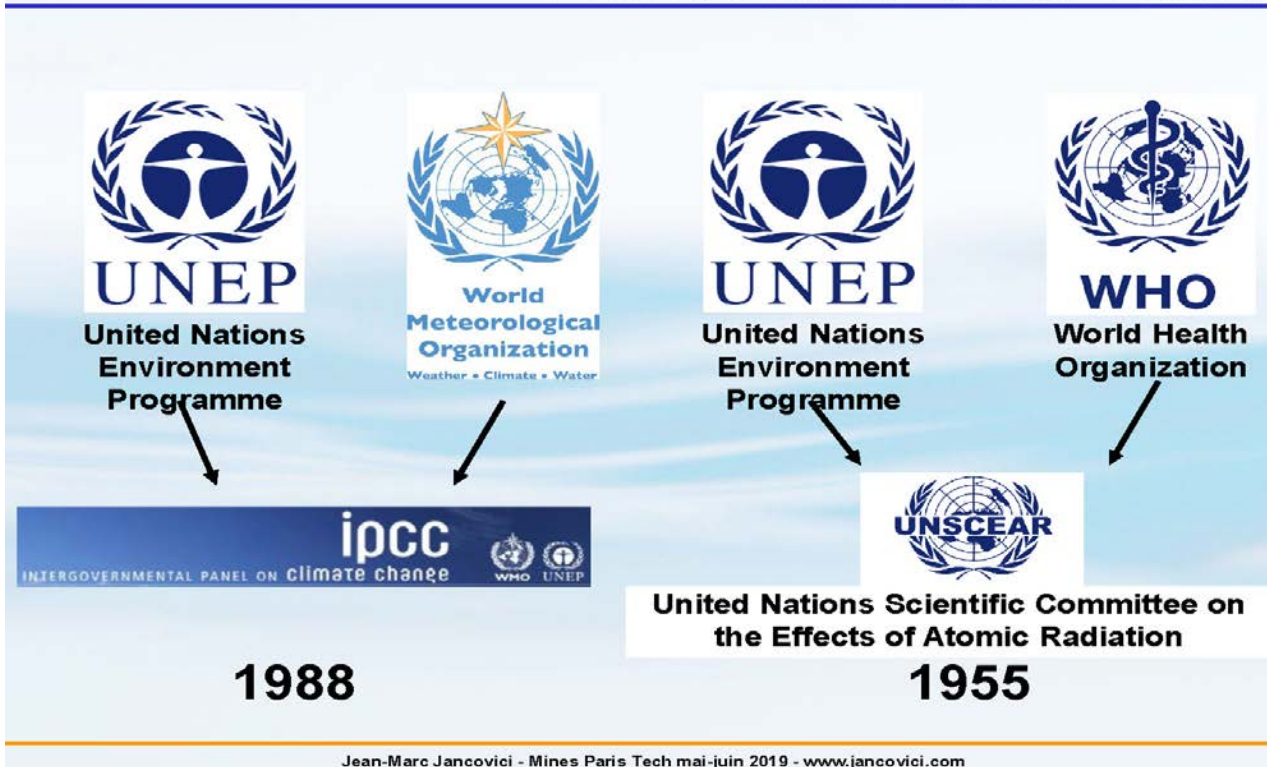
Etude épidémiologique des cancer de la thyroïde dans la population française 10 ans avant et 10 ans après. Effet discernable ? Non :

- augmentation constante
- parce qu'on détecte de mieux en mieux cette pathologie (pathologie mieux connue, plus souvent recherchée et plus facilement détectable grâce aux progrès de l'imagerie)

Augmentation du taux de cancer de la thyroïde à Tchernobyl : chez les enfants (dont la thyroïde se forme, absorbe de l'iode en plus grande quantité) mais pas chez les adultes. Remarque : les pastilles d'iode servent surtout aux enfants, pas aux adultes.



## J'aime les Nations Unies... ou pas !



GIEC / IPCC : une instance onusienne créée en 1988 sous la double tutelle du Programme des Nations Unies pour l'Environnement et de l'organisation météorologique mondiale. Son mandat est de faire une compilation de la littérature scientifique disponible sur l'impact de l'homme sur le climat.

UNSCEAR : instance onusienne créée en 1955 sous la double tutelle du Programme des Nations Unies pour l'Environnement et de l'OMS. Même mandat consistant à compiler la littérature disponible mais appliqué aux impacts des rayonnements ionisants sur les êtres humains.

## Les antinucléaires, en phase avec les Nations Unies ?

United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation

321 pages (personne ne les lit)

SOURCES, EFFECTS AND RISKS OF IONIZING RADIATION  
UNSCEAR 2013 Report

### Volume I

REPORT TO THE GENERAL ASSEMBLY

SCIENTIFIC ANNEX A:

Levels and effects of radiation exposure due to the nuclear accident after the 2011 great east-Japan earthquake and tsunami

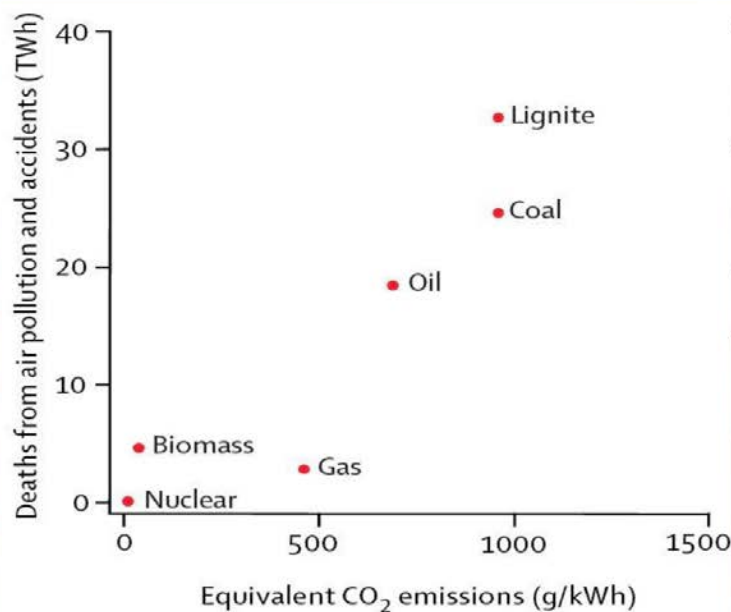
Page 10 : The doses to the general public, both those incurred during the first year and estimated for their lifetimes, are generally low or very low. **No discernible increased incidence of radiation-related health effects are expected** among exposed members of the public or their descendants.

Jean-Marc Jancovici - Mines Paris Tech mai-juin 2019 - www.jancovici.com

Rapport 2013 de l'UNSCEAR à propos de Fukushima : pas de conséquences radiologiques de l'accident de Fukushima sur les hommes. Les conséquences existent mais liées aux évacuations de populations, pas aux retombées.

Tchernobyl selon l'OMS : quelques milliers de décès prématurés en 40 ans. Tabac + alcool + route + malbouffe : 1 million.

## Les médecins sont-ils tous tombés sur la tête ?



**Morts par TWh électrique (et émissions de CO<sub>2</sub> par kWh électrique) pour les divers modes de production électrique en Europe. Surprise !**

Source : Electricity generation and health, Anil Markandya & Paul Wilkinson, The Lancet, 2007

Jean-Marc Jancovici - Mines Paris Tech mai-juin 2019 - www.jancovici.com

Morts par tWh selon les différentes sources de production électrique : le nucléaire est, médicalement, le moins mortel des modes de production d'électricité, accidents compris.

Environ 30 morts par tWh pour le charbon (maladies pulmonaires des mineurs, morts dans les mines, pollutions urbaines, ...)

## Centrales (maintenant) = bombinettes (plus tard) ?



**Il y a indiscutablement des bases scientifiques communes**

**Les filières d'accès aux matières fissiles peuvent être les mêmes, mais pas toujours (ex Pu 239 pas compatible avec l'exploitation commerciale d'un REP, mais oui pour CANDU)**

**Tout pays décidé à le faire peut « proliférer », avec ou sans nucléaire civil, et historiquement cela a plutôt été sans (y compris Israël, Afrique du Sud, Irak...)**

**Développer l'électricité nucléaire fait entrer dans un système international d'engagements, de contrôles, qui rend plus détectables les activités clandestines (Corée du Nord, Iran)**

Jean-Marc Jancovici - Mines Paris Tech mai-juin 2019 - [www.jancovici.com](http://www.jancovici.com)

Danger de la prolifération de la bombe nucléaire.

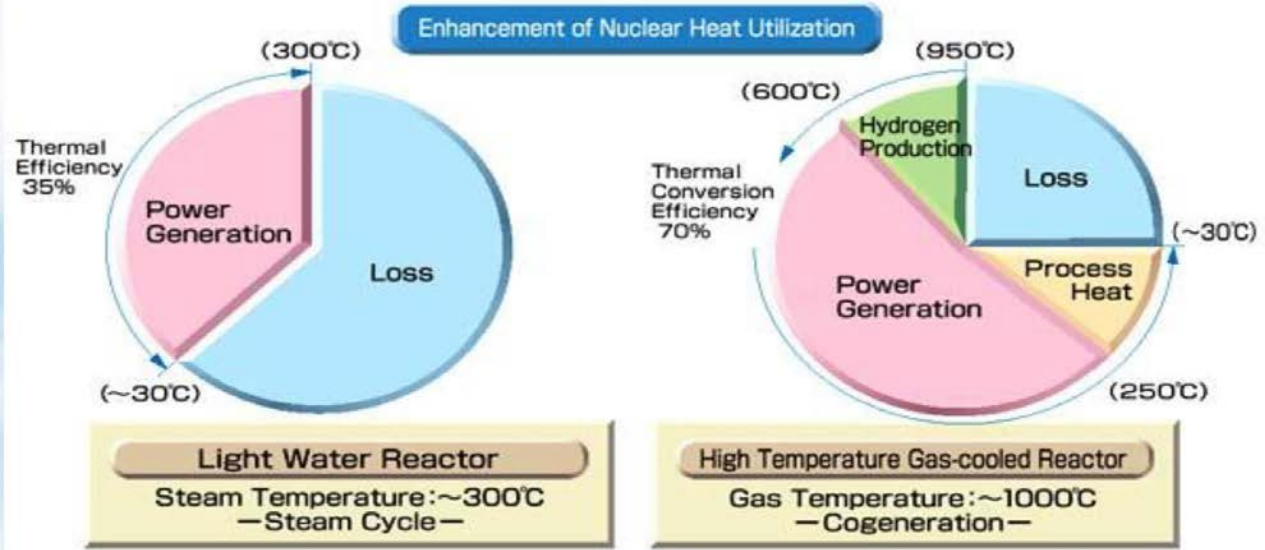
Lorsque le nucléaire civile est en place, le nucléaire militaire est plus facilement accessible :

- 1 corpus commun de compétences (même si les technologies diffèrent)
- la filière d'enrichissement du combustible est potentiellement profilérante puisque la procédure est la même pour alimenter les centrales et fabriquer des bombes

Certains pays ont eu la bombe sans avoir de nucléaire civil : USA, URSS, Israël par exemple.

Démanteler son stock de bombe peut passer par le développement du nucléaire civil : cela permet de se débarrasser de son uranium enrichi et du plutonium.

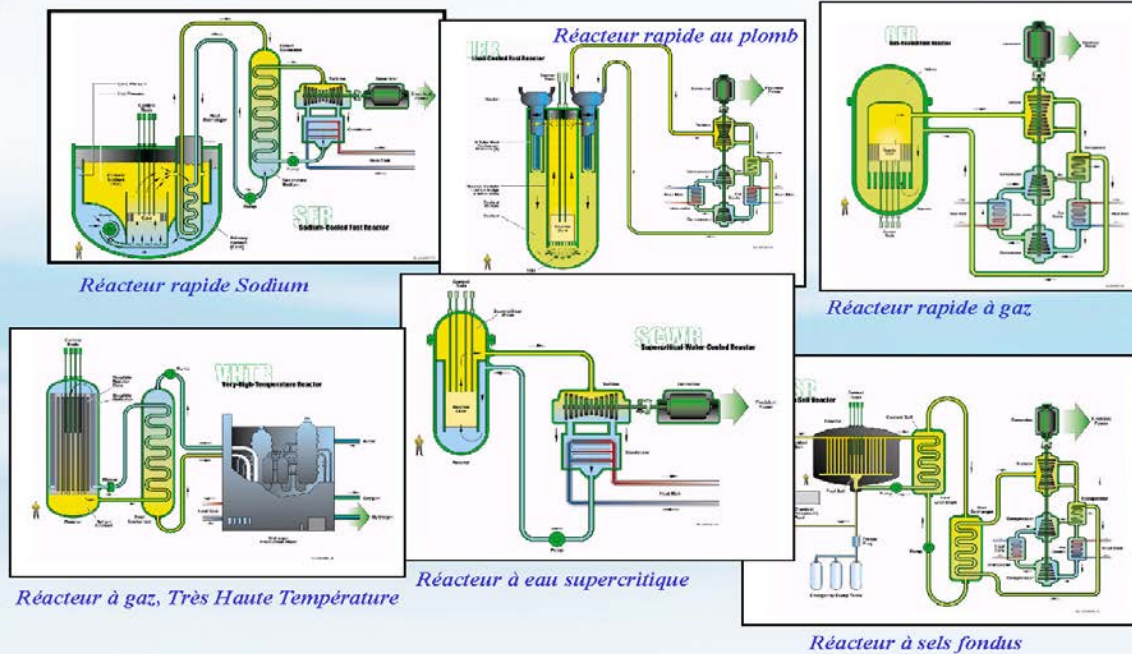
# Peut mieux faire !



Jean-Marc Jancovici - Mines Paris Tech mai-juin 2019 - www.jancovici.com

Non traité

# Les projets dans les cartons

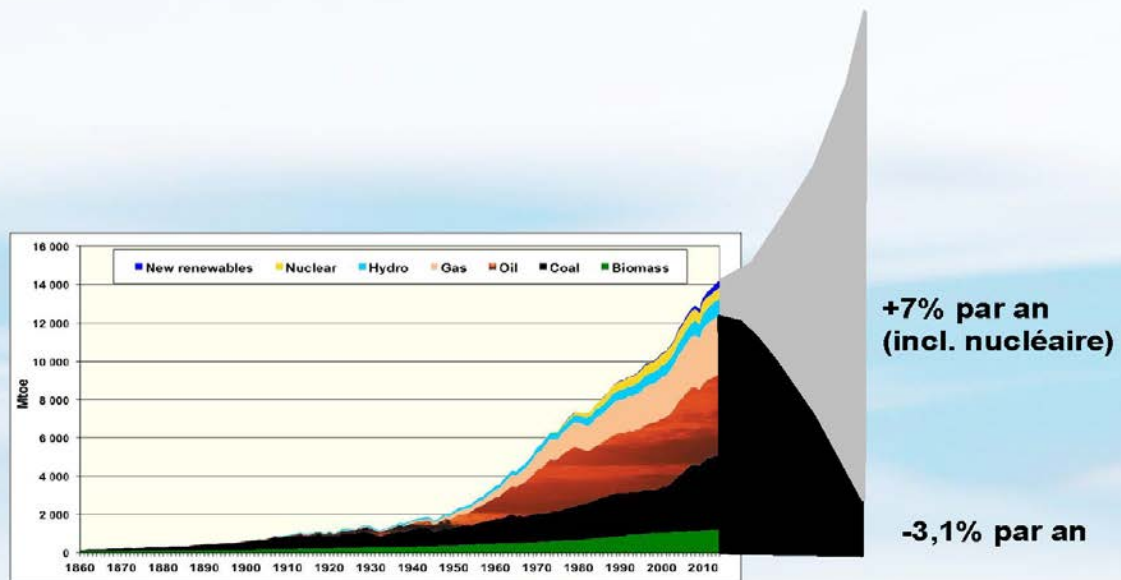


Jean-Marc Jancovici - Mines Paris Tech mai-juin 2019 - www.jancovici.com

Non traité. Génération IV

## Chapitre 35 - Avenir du nucléaire

Rappel : le but du jeu, c'est d'essayer ça



Jean-Marc Jancovici - Mines Paris Tech mai-juin 2019 - [www.jancovici.com](http://www.jancovici.com)

Si on souhaite que le nucléaire soit

- un contributeur très significatif à la décarbonation de la production d'énergie
- pour une civilisation qui ne renonce pas à son confort

... il faudrait que le secteur nucléaire augmente sa production de +5 à +10% par an

## Le nucléaire peut-il faire +5% par an ?

### Quelques éléments de réflexion :

L'accident de Tchernobyl, selon l'OMS, fera au plus quelques milliers de décès prématurés **en 40 ans** (le tabac, l'alcool, la voiture ou la « malbouffe » : environ un million chacun par an),

Les déchets nucléaires sont produits en quantités minimales par rapport à bien d'autres activités

Les réserves d'uranium accessibles si on y met le prix sont importantes (et en U238 ne constituent plus une limite)

**Mais...** 7% de croissance sur 35 ans, c'est **≈ 3000 GW nucléaires en 2050** (≈ 300 aujourd'hui), 6.000 si 50% de pertes après production de l'électricité pour « autre chose » (stockage, conversion en H<sub>2</sub>, etc), **10.000 à 15.000** si peu de contribution des renouvelables.

Y aura-t-il les capitaux ? (5.000 GW ≈ 20.000 G\$, ≈ 30% du PIB mondial 2014)

Y aura-t-il les compétences ?

Y aura-t-il la volonté en démocratie, avec 20 ans de préavis ?

Y aura-t-il les emplacements ? Etc etc

**La contribution du nucléaire à « la » solution : encore et toujours une question d'ordre de grandeur !**

Jean-Marc Jancovici - Mines Paris Tech mai-juin 2019 - [www.jancovici.com](http://www.jancovici.com)

Réaliste de prévoir une augmentation de la production d'électricité nucléaire ?

Fort potentiel du nucléaire plaide pour son développement :

- pas d'émission de GES
- peu létal
- quantité de déchets moindre
- réserves à disposition (et illimitées si capacité à exploiter l'Uranium 238)

Mais :

- capacité en quelques décennies à augmenter le parc nucléaire de 7% par an, à passer des 300 GW actuels à 3000 GW en 2050 ? voire passer à 6000 GW si la production électrique connaît de nouveaux usages (production d'hydrogène, stockage, ...). Passer des 450 réacteurs actuels à quelques milliers ?
- est-on en mesure d'investir le capital nécessaire ?
- a-t-on les compétences ?
- capacité à planifier ?
- décision des emplacements ? A l'emplacement des centrales à charbon ?

Tous les scénarios d'émission du GIEC qui permettent de rester sous la barre de 1,5° sont des scénarios qui voient

- le développement des énergies renouvelables
- les économies d'énergie
- et la production de l'électricité nucléaire multipliée entre 2 et 6 d'ici 2100.

Un monde qui renonce au nucléaire est paradoxalement un monde qui accepte de courir plus de risques qu'un monde qui souhaite davantage recourir à cette source d'énergie. Faire moins d'énergie nucléaire c'est s'exposer à 3 risques :

- augmenter le recours aux modes fossiles qui aggraveront la situation / le dérèglement climatique
- parier sur les nouvelles énergies renouvelables, mais d'avance on sait qu'elles ne suffiront pas
- miser sur la capacité de la société à s'adapter à une contraction rapide de son approvisionnement énergétique

Paradoxe de la baisse de charge du parc nucléaire :

- la fermeture de centrales nucléaires en France régulièrement évoquées mais ne se fera pas rapidement
- le plus probable c'est la baisse de charge (comme en Allemagne) du parc actuel, compensé par les ENR
- avec le risque de le rendre moins rentable et donc moins fiable

Les autorités françaises sont très contradictoires concernant le nucléaire. Contrairement aux gouvernements britannique, russe (30 réacteurs en construction) et chinois (une vingtaine de réacteurs en construction).

Perception du nucléaire en France est assez particulier.

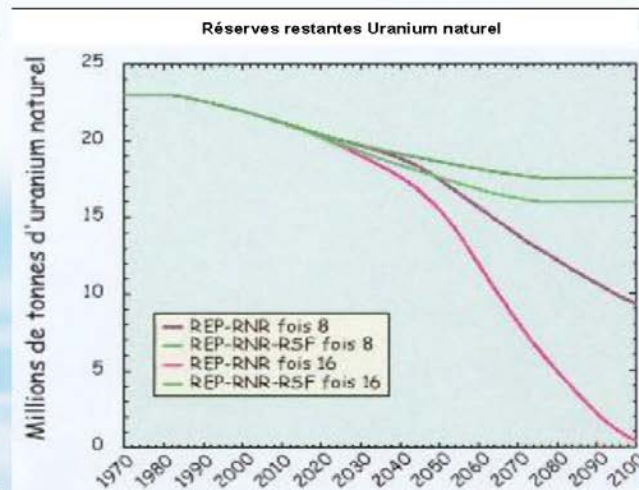
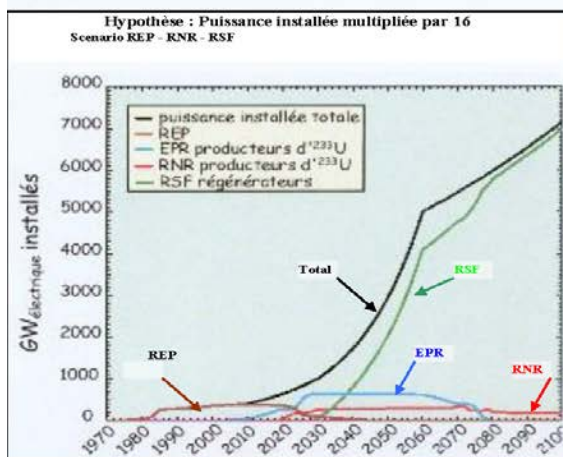
Hypothèse média :

- rôle de la presse qui diffuse un message anxiogène
- et parti anti-étatique (pour les médias du Service public qui entendraient ainsi montrer leur indépendance)

Hypothèse relations internationales :

- couple franco-allemand
- suivisme français

## Et quid de l'uranium ?



Non traité



Fusion nucléaire :

- matière mise sous forme de plasma (quelques millions de degrés)
- la matière ainsi mise en fusion est confinée dans un champ magnétique (seul moyen pour canaliser le plasma) sous forme de Tor
- une réaction de fusion est alors déclenchée dans le plasma

Actuellement EDF construit ITER, un gros tokamak / un engin destiné à vérifier expérimentalement la possibilité de retirer un peu plus d'énergie de fusion que l'énergie utilisée pour mettre le plasma en chauffe. Destiné à produire de la fusion pendant quelques minutes.

Planning

- Le premier plasma est prévu en 2025, le temps d'achever la construction d'ITER.
- Les tests auront lieu pendant 10 ans : 2035 résultats définitifs.
- plans pour construire un prototype capable de fonctionner pendant 5000 heures sans s'arrêter (jusqu'à 24000 heures pour les réacteurs nucléaires Génération III), 2040 début de la construction
- 2060, le prototype démarre
- 2070, fonctionnement concluant
- 2075, construction de la première tête de série dont l'achèvement sera en 2090 / 2100

Technique fonctionnelle mais pas à l'échelle industrielle avant la fin du XXI<sup>e</sup> siècle.

La fusion n'est pas, dans le cadre contraint du dérèglement climatique, une solution pour remplacer la technologie de fission. Les échéances sont trop courtes.

ITER : un gaspillage de 30 milliards d'euros (voire deux fois plus aujourd'hui), l'argent aurait été mieux employé à accélérer le développement du programme des réacteurs de Génération IV



## La fusion, c'est mieux que la fission ?

### Avantages :

Charge de combustible très faible (quelques kg), donc pas d'accident de criticité possible

Toute « panne » entraîne immédiatement la fin du confinement du plasma et l'arrêt de la réaction

Source quasi inépuisable de Deutérium sur Terre

Pas de déchets en direct (alpha n'est pas radioactif, les neutrons non plus)

### Mais...

ITER sera juste un objet de recherche, objectif = NRJ injectée < NRJ de fusion

Construction ITER (10 ans) + expérimentation (10 ans) + construction prototype (10 ans) + expérimentation prototype (10 ans) + construction tête de série (10 ans) = rien avant 50 ans

Le tritium vient de l'activation du lithium, guère plus abondant que l'uranium ; c'est la fusion D-D qui ouvre la voie à l'infini (or ITER c'est D-T)

Il n'y a pas de déchets de la fusion, mais l'activation par les neutrons de la couverture du réacteur produira probablement quelques cochonneries quand même

**L'énergie infinie résout-elle plus de problèmes qu'elle n'en crée ?**

Jean-Marc Jancovici - Mines Paris Tech mai-juin 2019 - [www.jancovici.com](http://www.jancovici.com)

---

Durée de vie d'une centrale nucléaire

Une centrale n'est pas un bloc unique, notion de durée de vie assez relative pour une centrale. Tous les éléments peuvent être remplacés une fois usés, sauf la cuve du réacteur. C'est la cuve du réacteur qui éventuellement a un DLC.

La centrale de Fessenheim était paradoxalement une des plus neuves du parc français : une des plus anciennes constructions mais également une des plus mises à neuf. Tout y a été changé.

Concrètement l'Autorité de Sûreté du Nucléaire passe régulièrement / tous les 10 ans et demande des rénovations / remplacements. Suite à Fukushima, l'ASN a demandé à EDF des normes de sécurité plus élevées : par exemple placer sous le réacteur un radier capable de récupérer le thorium si le cœur fond.

Le grand carénage des centrales consiste pour partie à satisfaire à l'élévation des normes de sûreté demandées par l'ASN. Prolongation de 40 à 50 ou 60 ans des centrales existantes.

Aux Etats-Unis, environ 100 réacteurs en fonctionnement

- soumis à d'autres règles de sûreté (le réacteur doit être conforme aux spécifications de départ, pas d'augmentation des normes de sûreté)
- autorisés pour fonctionner pendant 60 ans