

Éléments de base sur l'énergie au XXI<sup>e</sup> siècle  
Partie 1 – L'énergie



Cours magistraux dispensés à MINES ParisTech  
Année scolaire 2018 – 2019

## AVERTISSEMENT

Ce document a été réalisé par les membres de l'association de loi 1901 THE SHIFTERS au cours du second semestre 2019.

Il contient une transcription écrite d'une des interventions filmées de Jean-Marc JANCOVICI à MINES ParisTech au cours de l'année scolaire 2018-2019.

Cette transcription a été réalisée dans le but d'être la plus fidèle possible aux propos tenus par l'orateur lors de son intervention. Cependant, comme toute transcription écrite de propos tenus oralement, celle-ci est nécessairement imparfaite, et certains éléments du discours original ont été supprimés ou révisés – quoique de façon marginale – afin d'obtenir un texte plus fluide.

L'intervention filmée originale est consultable à l'URL suivante:

<https://www.youtube.com/watch?v=xgy0rW0oaFI>

Ce document est placé sous licence CC-BY-NC-SA. Il est librement distribuable, sauf à des fins commerciales. Dans le cas où ce document servirait à produire des créations dérivées, il convient aux auteurs de ces créations dérivées de faire mention de la provenance du présent document et de placer ces créations dérivées également sous licence CC-BY-NC-SA.

# Table des matières

Introduction . . . . .	1
1 Selon vous, qu'est-ce que l'énergie? . . . . .	3
2 Une facture, vous dis-je! . . . . .	5
3 Si l'énergie n'est qu'une facture (bis)... . . . . .	6
4 Back to basics : qu'est-ce que l'énergie? . . . . .	10
5 500 000 ans de transition énergétique . . . . .	12
6 Oubliez « énergie », pensez « machines »! . . . . .	14
7 Des gestes simples? De l'énergie! . . . . .	18
8 Le grand bazar des unités . . . . .	23
9 Nietzsche voulait des surhommes, le carbone l'a fait . . . . .	25
10 La physique sera toujours plus forte que les slogans . . . . .	28
11 Pourquoi être passé des EnR divines au pétrole diabolique? . . . . .	31
12 Avant pétrole and co : ni moral ni efficace mais très durable . . . . .	42
13 Homme produit avec machine ou machine produit avec Hommes? . . . . .	43
14 Il fut une époque où nous étions renouvelables et durables . . . . .	45
15 Miam-miam kWh . . . . .	54
16 Les voici, nos esclaves des temps modernes! . . . . .	57
17 En kWh, les Hommes sont très primaires... . . . . .	60
18 Un autre changement d'ordre de grandeur : la population . . . . .	62
19 Gaz et électricité à tous les étages : au résultat . . . . .	65
20 Population $\times$ 1000 + énergie $\times$ 10 = croissance attitude . . . . .	67
21 King Coal is back . . . . .	69
22 Gaz et électricité à tous les étages : au résultat (bis) . . . . .	70
23 Quid des énergies renouvelables? . . . . .	71
24 Quid des énergies renouvelables tricolores? . . . . .	72
25 L'énergie plus chère? Allons donc! . . . . .	73
26 Plus chère l'énergie? La bonne blague (bis)! . . . . .	75
27 Plus d'énergie = tout le monde à l'usine, puis au bureau . . . . .	76
28 Plus d'énergie = moins de paysans . . . . .	81
29 Plus d'énergie fossile = moins de paysans . . . . .	82
30 Miam-miam kWh pour de vrai . . . . .	85
31 Plus de pétrole = moins de sous . . . . .	87

32	Transports : plus c'est moderne, plus cela pompe! . . . . .	89
33	Qu'est-ce qu'une voiture exactement? . . . . .	90
34	Et je dirais même plus : plus c'est moderne, plus ça pompe... . . .	92
35	Transports : plus vite, plus loin, moins cher (pour l'instant) . . .	94
36	Plus d'énergie fossile = plus de villes . . . . .	96
37	Si je suis moderne, je m'étale... . . . . .	102
38	Énergie à gogo : la ville à la campagne pour de vrai... . . . . .	104
39	Utiliser des hydrocarbures sans se déplacer, c'est possible! . . . .	108
40	Vous avez dit dématérialisation? . . . . .	109
41	Plus d'énergie fossile = plus de services! . . . . .	110
42	Les kilo-octets n'ont pas tué les kilomètres! . . . . .	113
43	Plus d'énergie = des campagnes vides et des villes étalées . . . .	115
44	Vacances pour tous = du carbone, encore! . . . . .	117
45	Le carbone aéroporté lui-aussi est en solde . . . . .	119
46	Matériaux pour pas cher... et objets qui vont avec . . . . .	120
47	Se passer de pétrole ou vider son logement, c'est pareil . . . . .	121
48	Plus d'électrons pour les Français aussi! . . . . .	123
49	Et encore... . . . . .	124
50	L'économie mondiale en un clin d'œil . . . . .	126
51	Si nous sommes ici, c'est un peu à cause de lui... . . . . .	130
52	L'économie vue par Super Mario (ou Super Manuel) . . . . .	132
53	L'ingénieur avait tout compris à la force des machines . . . . .	133
54	En fait, il vaut mieux avoir de la ressource! . . . . .	135
55	Les promesses électorales étaient plus faciles il y a 1000 ans . . .	137
56	Le meilleur modèle macro-économique du monde : une droite . . .	139
57	Puis-je avoir du PIB sans énergie? . . . . .	140
58	C'est la valse à trois temps... . . . . .	141
59	It's the kWh, stupid? . . . . .	144
60	Sécurité d'approvisionnement? Quelle sécurité? . . . . .	146
61	C'est (à nouveau) la valse à trois temps . . . . .	148
62	Une pédale de frein pour les kWh... . . . . .	150
63	... et donc aussi pour le PIB . . . . .	151
64	Nous ne sommes pas seuls! . . . . .	153
65	Tous les pays « riches » ralentissent . . . . .	154
66	Et une partie de votre carrière se fera dans « l'autre sens » . . . .	155
67	Conclusion – L'ère du feu, croissance à gogo, et 2 questions . . .	156

## Introduction

Je vais vous faire un cours sur deux objets qui vont vous accompagner tout au long de votre vie personnelle et professionnelle à partir de maintenant – et du reste depuis le passé – et qui sont *l'énergie* et *le changement climatique*.

Je ne viens pas du monde académique, mon métier est d'être consultant. Je suis associé dans une société de conseil. J'ai un deuxième métier, président d'une association dans laquelle je fais de la vulgarisation scientifique, c'est ce qui a conduit à ce cours et qui explique pourquoi je fais ce métier plutôt que mon métier principal.

Le cours que je vais vous faire est essentiellement basé sur des données d'observation, des raisonnements relativement simples, j'espère que ce sera accessible. Ce n'est pas très différent, pour être franc, d'un certain nombre de choses que je peux raconter dans d'autres enceintes à des publics qui n'ont pas été soigneusement sélectionnés sur concours. Vous devriez donc normalement arriver à suivre.

Je vais quand même vous rappeler deux ou trois choses en introduction. La première, c'est que vous retiendrez beaucoup plus facilement ce que je raconte si vous prenez des notes, même si ensuite vous les mettez à la poubelle, plutôt que si vous n'en prenez pas. Prendre des notes est un très bon moyen mnémotechnique. La deuxième, c'est que je vais vous inviter à toujours aborder les problèmes en raisonnant par ordres de grandeur et par règle de trois.

Vous êtes entrés dans cette école en ayant été soigneusement sélectionnés : pour votre aptitude supérieure à la moyenne à résoudre des problèmes compliqués posés de manière exacte. On vous a sélectionnés pour entrer dans cette école en vous posant des problèmes qui sont univoques : ils n'ont qu'une seule solution, ils sont peut-être un peu compliqués, mais ils n'ont qu'une seule solution et ils sont bien posés. C'est-à-dire que dans l'énoncé, vous avez toutes les informations pour trouver la solution.

La vie – et ce que je vais vous raconter à partir de maintenant – est essentiellement faite de problèmes mal posés pour lesquels vous n'avez pas toutes les informations. Et quand on aborde un problème qui est mal posé et que l'on n'a pas toutes les informations, il y a quelque chose qui est extrêmement efficace pour aborder ces problèmes – et cela va être particulièrement vrai dans ce que je vais vous raconter –, c'est de raisonner par ordres de grandeur et règle de trois. Et partout dans votre vie, si un modèle sophistiqué n'est pas raccord avec une règle de trois bien posée, c'est que le modèle a tort !

## *0. INTRODUCTION*

Voilà les quelques éléments que je vous donne en préambule sur le cours que nous allons avoir le plaisir de parcourir ensemble.

## 1. Selon vous, qu'est-ce que l'énergie?



Diapositive 2.

Voici un des retraités les plus célèbres de France. Il est retraité parce qu'il aurait dit qu'il allait arrêter de travailler, mais ça ne doit pas être tout à fait vrai parce que, de temps en temps, on le voit faire des trucs moins drôles que ça. Peu importe. On va lui faire reprendre un peu de service.

Quand vous posez une question à « Qui veut gagner des millions? », pour ceux d'entre vous qui ont déjà regardé cet excellent jeu, vous savez que l'on vous donne 4 réponses à l'avance. C'est-à-dire que l'on vous dit : « L'élève qui est assis là au deuxième rang, a-t-il une chemise a) bleue, b) verte, c) jaune, d) noire? » Là, nous allons imaginer qu'il pose une question de manière ouverte, c'est-à-dire qu'il vous demande : « Qu'est-ce que l'énergie? »

Vous savez qu'en France il y a un ministre de l'énergie. Vous pourriez donc lui demander : « Qu'est-ce que l'énergie? » Normalement, il doit le savoir puisqu'il est ministre de l'énergie. Eh bien, vous vous rendriez compte, si vous posiez la question – je vais vous donner un exemple dans pas longtemps – qu'en fait, la première réponse qui vient à l'essentiel de la population – je dis bien à

## 1. SELON VOUS, QU'EST-CE QUE L'ÉNERGIE ?

l'essentiel de la population, je ne parle pas du monde dans lequel vous évoluez au quotidien –, c'est « ma facture d'électricité »

C'est-à-dire que si vous dites « énergie » dans un certain nombre d'enceintes, en particulier dans une enceinte qu'on qualifie de « grand public », la première donnée qui va venir à l'esprit de beaucoup de gens – et c'est normal parce que c'est aussi la première façon de présenter l'énergie dans le monde des économistes – c'est *quelque chose qui s'achète*, une commodité. Donc le sujet principal est de savoir si c'est cher ou pas cher, et si l'on pourrait s'y prendre autrement pour avoir la même chose pour moins cher.

## 2. Une facture, vous dis-je!

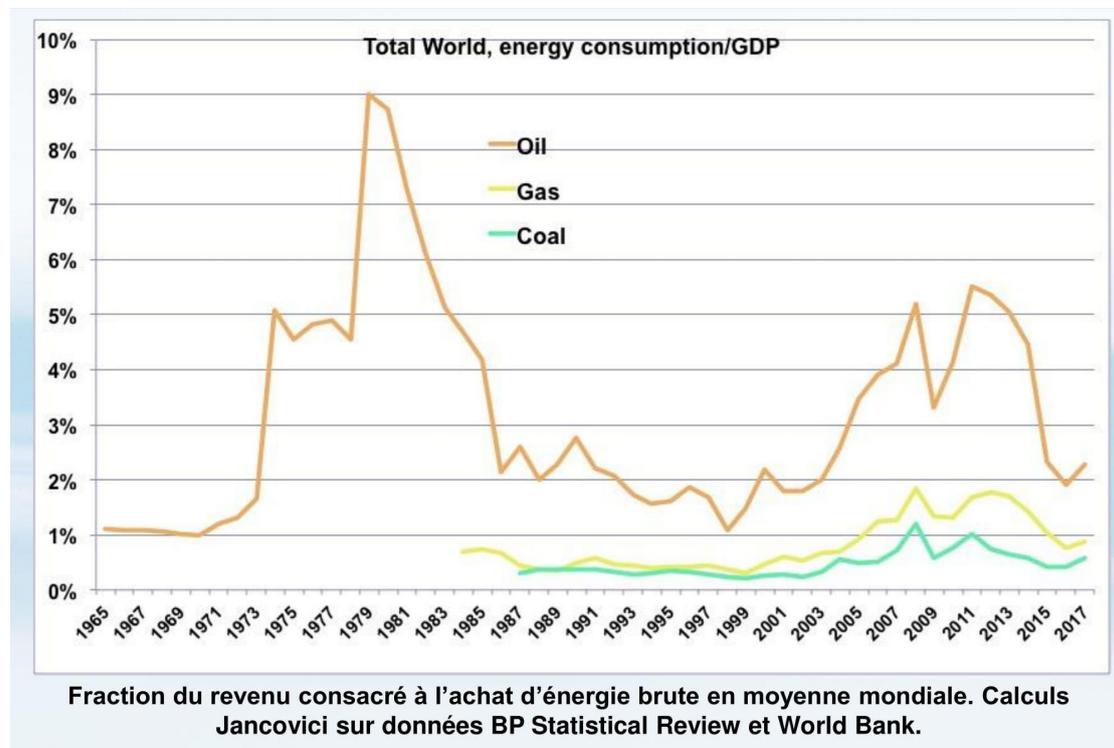


Diapositive 3.

C'est particulièrement vrai dans l'actualité puisque, pour tous ceux d'entre vous qui ont un peu suivi ce type de mouvement, vous savez qu'il a démarré d'une contestation sur le prix des carburants.

Bien évidemment, le prix n'est pas le ressort principal, in fine, mais le mouvement a démarré par cette contestation sur le prix des carburants. Les Gilets Jaunes n'ont jamais dit : « On ne veut pas consommer de carburant parce que ça fait trop de CO2 », ou : « On ne veut pas consommer de carburant parce que ça nous fait dépendre de la Russie, de la Norvège et que l'on n'en a pas envie. » Non. Ils disaient juste : « C'est trop cher. »

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



#### Diapositive 4.

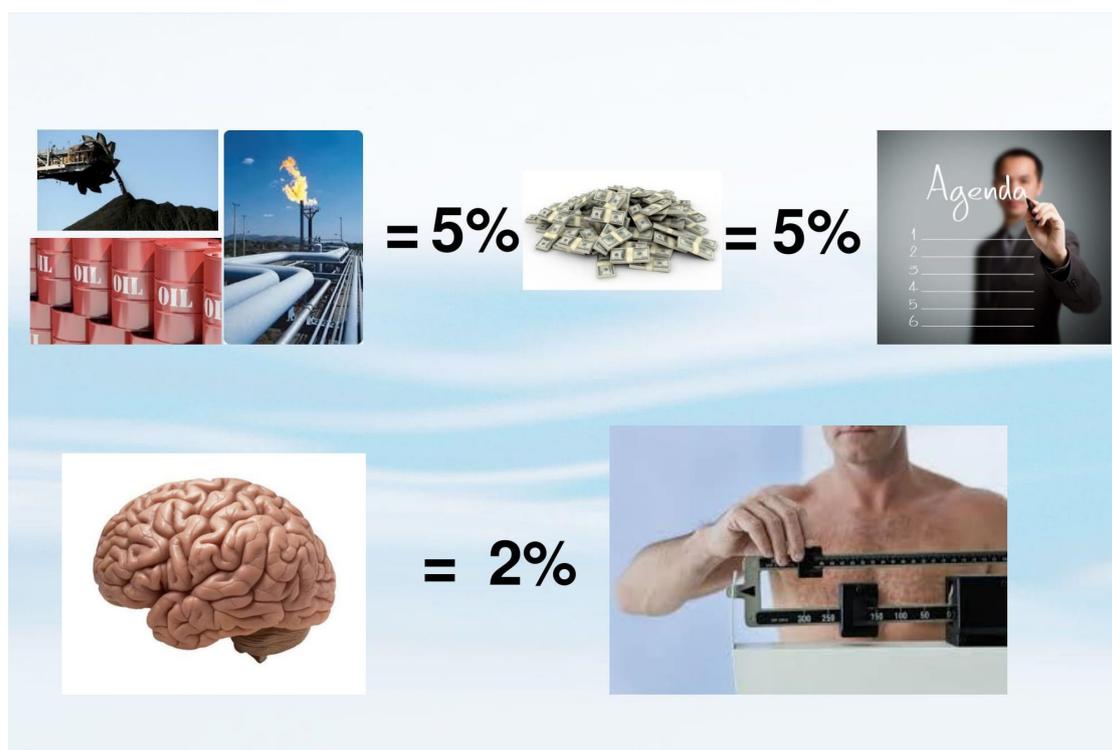
Ce que je vais essayer de vous expliquer pendant une partie du reste de ce cours c'est que, si vous prenez le problème sous cet angle, malheureusement, vous passez à côté de l'essentiel.

Il y a plusieurs raisons pour lesquelles on passe à côté de l'essentiel. La première, c'est de regarder en termes strictement économiques ce que coûte d'acheter de l'énergie rapporté à ce que l'on gagne.

Vous pouvez le représenter de plusieurs manières. Une des manières dont je le représente, c'est de regarder ce que ça coûte à l'ensemble de l'économie d'acheter chaque année le pétrole, le gaz et le charbon qui l'a fait fonctionner. Donc, je regarde l'ensemble du produit économique de l'année et je regarde, rapporté à ce produit économique, ce que coûte d'acheter sur le marché l'ensemble du pétrole que l'on consomme dans l'année, l'ensemble du gaz que l'on consomme dans l'année (je parle pour le monde dans sa totalité) et l'ensemble du charbon que l'on consomme dans l'année. Le résultat auquel j'arrive, c'est que ça coûte quelques % de ce que l'on gagne. *Quelques % de ce que l'on gagne.*

### 3. SI L'ÉNERGIE N'EST QU'UNE FACTURE (BIS)...

Je vous montrerai un graphique dans pas très longtemps sur ce que ça coûte pour les Français d'acheter de l'énergie et je vous assure que payer Free, SFR ou Orange pour dire : « Allô, je suis en retard » ou : « T'es où? », ça coûte globalement le même prix. Ça coûte quelques % de ce que l'on gagne.



Diapositive 5.

Et à partir du moment où, un objet placé dans un débat économique représente quelques % du débat, le réflexe normal va être de dire : « Je vais m'en occuper quelques % du temps. »

Typiquement, ce que vous voyez en ce moment dans les débats politiques, est : Je m'intéresse à l'énergie au moment des élections quelques % du temps puis, le reste du temps, je donne ça à quelqu'un à qui je délègue le problème en lui disant : « Débrouillez-vous dans votre coin pour que ce truc-là soit géré, ce n'est pas vraiment mon problème. Je ne vois pas le lien avec les retraites, avec la diplomatie, avec la politique économique ou avec le nombre d'imprimeurs qu'il y a dans le pays. Il n'y a pas de lien. Donc je vais considérer que c'est un sujet détachable du reste qui ne nécessite que quelques % de mon temps ».

Ce que je vais vous dire à partir de maintenant, c'est que ce raisonnement est aussi pertinent que si je vous disais : « Votre cerveau, c'est 2% de votre poids,

### 3. SI L'ÉNERGIE N'EST QU'UNE FACTURE (BIS)...

donc je peux vous la supprimer, ce n'est pas très grave, vous allez perdre 2% en efficacité. »

Donc les raisonnements « en parts de camembert » – et ça c'est quelque chose qui est plus large que la seule problématique de l'énergie – ne vous disent jamais si les parts de camembert sont asservies les unes aux autres ou pas.

Un autre raisonnement cocasse du même type est de dire : l'agriculture c'est 2% du PIB, donc on s'en fiche, on peut s'en débarrasser, ça n'a pas beaucoup d'importance. Oui, sauf que si vous arrêtez de manger, les 98% restant du PIB, assez rapidement vont être problématiques. Donc les raisonnements « parts de camembert », il faut toujours beaucoup s'en méfier : ils ne représentent pas la dépendance que vous pouvez avoir d'une part de camembert à une autre.

*Et ce que je vais vous montrer maintenant, c'est que les 97% ou 98% ou 95% du PIB qui ne sont pas de l'achat d'énergie, dépendent en fait totalement, dans le monde moderne, des 5% en question.*



Diapositive 6.

*L'énergie n'est pas une facture. Plus exactement, ce n'est pas qu'une facture. Même si c'est comme ça que l'on raisonne dans le monde économique dans lequel nous vivons.*

### 3. SI L'ÉNERGIE N'EST QU'UNE FACTURE (BIS)...

Une autre pensée vient souvent à l'esprit quand on parle d'énergie, ce sont des gens qui vous disent : « Ah, l'énergie, la bonne énergie, c'est celle qu'on économise. » Alors, la deuxième chose que je vais vous montrer pendant ce cours, c'est que si vous êtes en ce moment dans cette salle avec le temps, au choix, de dormir (pour ceux qui font la sieste) ou d'écouter, au lieu d'être en train de ramasser des patates, c'est précisément parce que le monde s'est gobergé d'énergie de façon croissante pendant les deux siècles qui viennent de s'écouler.

Le résultat est que le monde dans lequel nous vivons aujourd'hui est un monde d'*abondance énergétique croissante* et pas du tout un monde d'économies d'énergie croissantes. En fait, la bonne énergie, au sens de celle qui a permis l'émergence de la civilisation industrielle dans laquelle on vit, c'est justement celle que l'on n'a pas économisée.

Troisième sujet très à la mode en ce moment : « Ce n'est pas important de savoir ce qu'est l'énergie, ce qui est important, c'est que ça va devenir 100% renouvelable. »

Vous allez voir qu'en fait, ce n'est pas exactement comme ça que les choses se sont passées. En fait, la bonne manière d'approcher l'énergie pourrait être celle du poète : l'énergie, c'est ce dont vous êtes remplis un matin où vous êtes en forme – ou un après-midi, ça dépend de l'heure à laquelle vous vous levez.

Cette manière de voir les choses, c'est la bonne parce que lorsque l'on considère être plein d'énergie, cela veut dire que l'on considère avoir une grande capacité à maîtriser son destin. J'ai beaucoup d'énergie, je suis très en forme, ça veut dire : « Il n'y a pas grand-chose qui me fait peur, donc, j'ai une grande capacité à maîtriser mon destin. »

Or l'énergie – comme on va le voir à partir de maintenant – c'est qu'en avoir beaucoup, c'est précisément avoir une grande capacité à maîtriser son environnement. C'est ça, par définition.

*Par définition, « avoir beaucoup d'énergie » c'est « avoir une grande capacité à maîtriser son environnement. » Pourquoi ça ?*

#### 4. 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**

Diapositive 7.

Parce que l'énergie, avant d'être une facture ou avant d'être un objet de débat, c'est *une grandeur physique*. Vous le savez bien puisque vous avez fait un tout petit peu de physique pour arriver dans cet amphithéâtre, l'énergie c'est une grandeur physique.

C'est assez rigolo du reste parce qu'en physique, il n'y a pas de définition totalement univoque de l'énergie. Je vais vous en proposer une. Pour moi, *l'énergie c'est ce qui quantifie le changement d'état d'un système*. D'accord? L'énergie, c'est ce qui quantifie, je dis bien quantifie, calcule, le changement d'état d'un système. Dit autrement, plus le monde qui vous entoure change, plus il y a d'énergie qui est entrée en jeu. Plus il y a d'énergie qui entre en jeu, plus le monde autour de vous se transforme. C'est aussi simple que ça.

Alors si je ramène ça à des transformations de la vie courante, ou plus exactement, à des objets qui transforment l'environnement dans la vie courante :

#### 4. BACK TO BASICS : QU'EST-CE QUE L'ÉNERGIE ?

- Voici des objets qui *transforment la température*. Ce sont des objets qui sont destinés à changer une température, ce que je vous montre là. Soit à réchauffer, soit à refroidir. Ces objets utilisent ou éventuellement restituent de l'énergie.
- Voici des objets qui servent à *changer une vitesse*. Une voiture, ça ne sert qu'à ça. Ça sert à changer la vitesse de ce qui est contenu dans la voiture, vous éventuellement et vos valises quand vous partez en vacances. Un changement de vitesse, c'est un changement d'état d'un système.
- Voici des objets qui servent à *changer une forme*. Vous aviez de la terre, la terre est excavée, elle est posée à côté du trou : changement de forme. Vous aviez une tôle, la tôle est emboutie et vous avez une portière de voiture : changement de forme. Ces machines utilisent de l'énergie.
- Vous avez de l'énergie qui intervient quand vous *changez une composition chimique*. Soit dit en passant, la première composition chimique qui change en permanence pour fournir de l'énergie dans votre univers proche, ça s'appelle la digestion des aliments que vous mangez. En fait, ils servent à ça. Ils servent à vous fournir de l'énergie.
- Vous avez de l'énergie qui entre en jeu quand vous avez *des champs magnétiques qui interagissent avec des courants électriques*. Ça peut soit en « consommer », dans un moteur, soit en « fournir », dans un alternateur.
- Vous avez de l'énergie qui entre en jeu quand vous *réarrangez les nucléons* d'un noyau. Et vous savez que le soleil passe son temps à faire ça. C'est une grosse bombe thermonucléaire permanente qui passe son temps à assembler des noyaux d'hydrogène pour faire des noyaux d'hélium.
- Vous avez de l'énergie qui entre en jeu quand vous avez des *interactions matière-rayonnement*. L'interaction matière-rayonnement qui vous intéresse le plus, c'est votre smartphone. Mais enfin, il n'y a pas que celle-là dans les interactions matière-rayonnement, il y en a une qui va nous intéresser tous dans quelques mois : le rayonnement solaire sur la plage.

Donc, d'une manière générale utiliser de l'énergie ça n'est rien d'autre que *transformer* le monde qui nous entoure. Inversement, transformer le monde qui nous entoure suppose nécessairement que de l'énergie soit entrée en jeu.

## 5. 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.

Diapositive 8.

Une fois que je vous ai dit ça, une première petite remarque : l'Homme est en transition. Vous savez que l'on a en ce moment un « ministère de la Transition Énergétique » et pas seulement un « ministère de l'Énergie ». On a un « ministère de la Transition énergétique ». Le ministère de la Transition Énergétique est probablement le plus vieux ministère qui soit dans la communauté des Hommes, puisque ça fait 500 000 ans que les Hommes sont en transition énergétique.

Il y a 500 000 ans, la seule énergie que les Hommes pouvaient utiliser, c'était leur énergie corporelle. Et puis, ils se sont mis à domestiquer le feu, une première *énergie extracorporelle*. Dans l'antiquité, on s'est mis à domestiquer toutes les énergies renouvelables et même, soit dit en passant, quelques énergies fossiles; le pétrole était connu des Sumériens, le charbon était connu des Chinois il y a quelques milliers d'années, évidemment à de petites doses. La révolution industrielle a été la domestication des énergies fossiles, on va y revenir.

## 5. 500 000 ANS DE TRANSITION ÉNERGÉTIQUE

*La transition énergétique, c'est un état permanent des Hommes : à chaque fois qu'ils arrivent à trouver la manière de se servir d'une nouvelle source d'énergie, ils le font. Ce qui caractérise l'ère moderne – et vous allez voir que ça la caractérise de manière extrêmement forte et que c'est ça qui pose problème –, c'est que nous avons radicalement changé d'ordre de grandeur dans tous ces processus en l'espace de très, très peu de temps.*

## 6. 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 »**

Diapositive 9.

L'énergie, je vous l'ai dit, est une *grandeur physique*.

Dire que l'énergie est une grandeur physique veut dire qu'il y a toutes les chances que l'énergie soit gouvernée par des lois que nous ne pouvons pas changer. C'est le charme des lois de la physique : vous pouvez comprendre ce que sont les équations de Maxwell mais une fois que vous avez compris, vous ne pouvez pas les changer. Vous ne pouvez pas dire : « Tiens, ça serait sympa pour le pouvoir d'achat des consommateurs, que l'on change un peu les équations de Maxwell. » Pas la peine d'essayer.

En ce qui concerne l'énergie vous avez quelques lois qui s'appliquent à nous et que nous ne pouvons pas changer – ce n'est pas pour autant que l'on n'essaie pas de les changer de temps en temps, implicitement, par des votes à l'Assemblée Nationale mais, quand même, il vaut mieux les connaître. Je vous l'ai dit, l'énergie est ce qui quantifie la transformation de l'environnement.

## 6. OUBLIEZ « ÉNERGIE », PENSEZ « MACHINES » !

La *première loi cardinale* qui est très simple à garder en mémoire en ce qui concerne l'énergie – et que vous connaissez tous par cœur évidemment –, c'est le premier principe de la thermodynamique ou « *loi de conservation de l'énergie* ».

Or, appliquée aux Hommes, la loi de conservation de l'énergie a une conséquence qui est simplissime : les Hommes ne peuvent rien faire d'autre qu'extraire de l'environnement une énergie qui *existe déjà* et s'en servir à leur profit. C'est tout ce que les Hommes sont capables de faire. Si les Hommes étaient capables de faire apparaître de l'énergie en leur sein sans communiquer avec l'extérieur, on violerait le premier principe de la thermodynamique. Je suis sûr que dans un bon Harry Potter, on arrive à faire ça, mais dans le monde réel c'est plus difficile... Donc toute l'énergie que nous utilisons, nous devons la trouver dans l'environnement. Toute.

Une énergie qui se trouve dans l'environnement s'appelle une *énergie primaire* dans le jargon des énergéticiens. Donc, quand vous voyez passer quelque part dans les statistiques – que je vous demanderai peut-être de regarder – le terme énergie primaire veut dire qu'il s'agit de l'énergie telle qu'on la trouve dans l'environnement.

Il y a un autre terme qui est très fréquent dans l'énergie – on y reviendra dans quelques cours – qui est *l'énergie finale*. L'énergie finale, c'est celle qui passe le compteur du consommateur final. Et le consommateur final, qui est-ce ? C'est vous quand vous êtes chez vous et que vous avez un compteur de gaz ou un compteur d'électricité, ou que vous avez une cuve à fuel – c'est très mal, il ne faut le dire à personne ! – et un compteur sur le camion qui vous livre le fuel, ou bien quand vous êtes un industriel et que vous avez un compteur parce que vous utilisez du gaz dans un four à verre.

Dès que vous êtes un consommateur final, particulier ou industriel, et que vous achetez une énergie qui va vous permettre de faire fonctionner une machine, ça s'appelle de *l'énergie finale*. L'énergie que l'on trouve dans l'environnement, elle, on l'appelle *primaire* et entre les deux, vous avez évidemment le système énergétique.

Historiquement, les seules énergies primaires que les Hommes savent utiliser sont la nourriture et la chaleur du soleil. Historiquement, le seul convertisseur que les Hommes aient à leur disposition c'est eux-mêmes. Parce que, pour utiliser de l'énergie il faut *un convertisseur*. Il faut la faire entrer dans quelque chose qui va la transformer. Donc, les Hommes mangent, ils se chauffent au soleil et de ces énergies qu'ils absorbent ou qu'ils ingèrent, ils ressortent de la chaleur, beaucoup, et du travail, un peu.

## 6. OUBLIEZ « ÉNERGIE », PENSEZ « MACHINES » !

Après, au cours du temps, on a commencé à être capable de domestiquer d'autres convertisseurs. À part le bois, convertisseur très rustique, on s'est mis à domestiquer toutes les énergies renouvelables possibles. Les énergies renouvelables incluent, à l'époque, d'autres organismes vivants, parce qu'ils sont tout-à-fait renouvelables : les animaux de trait, c'est parfaitement renouvelable, ça mange de l'herbe parfaitement renouvelable et donc ça vous fournit de l'énergie parfaitement renouvelable. On a également domestiqué le vent et l'eau au travers des moulins. L'Europe antique était couverte de moulins, à eau puis à vent.

Donc il faut bien voir que les énergies renouvelables ne sont pas l'avenir, mais le passé. Pas au sens où il n'y a rien à en attendre de l'avenir. Ce que je veux dire, c'est que les énergies renouvelables c'était notre quotidien il y a quelques siècles. Un monde 100% énergies renouvelables, je sais très bien à quoi ça ressemble. J'ai au moins un point d'échantillonnage : c'est le monde il y a trois siècles. Celui-ci, il est 100% énergies renouvelables, ça marche très bien. Un monde avec un milliard de personnes sur Terre, trente à quarante ans d'espérance de vie à la naissance, et les deux tiers de la population dans les champs, je sais que ça marche en 100% énergies renouvelables. Il n'y a aucun problème, puisqu'on l'a fait une fois.

Évidemment, le débat aujourd'hui c'est : Est-ce que l'on arrive à faire la civilisation avec les ingénieurs de MinesParisTech et toutes les machines qu'on utilise aujourd'hui avec 100% d'énergies renouvelables? On y reviendra plus tard.

Puis, il y a deux siècles, quelques ingénieurs géniaux et quelques physiciens géniaux ont dit : « On pourrait se servir d'autres convertisseurs, de convertisseurs qui sont, eux, non-renouvelables. » – en l'occurrence ce sont des machines faites de métal – « et on va leur donner à manger une énergie qu'on ne sait pas encore utiliser à large échelle aujourd'hui, qui s'appelle *les combustibles fossiles*. »

Là, je vous résume en une diapositive ce qui a été l'histoire énergétique des Hommes. D'abord le convertisseur, c'est nous. Ensuite ce sont d'autres organismes vivants, les esclaves en font partie. Ensuite, les énergies renouvelables et, *in fine*, des machines en métal avec les combustibles fossiles.

Ce que je suis en train de vous dire, également quelque chose d'absolument essentiel, c'est qu'en fait, on ne consomme pas de l'énergie, à part ce que l'on mange. Quand vous voyez quelque part « consommation d'énergie », c'est un terme *impropre*. Parce que, sauf erreur de ma part, je ne pense pas que vous n'ayez jamais bu du pétrole – s'il y en a un qui a déjà fait ça ici, qu'il me le

## 6. OUBLIEZ « ÉNERGIE », PENSEZ « MACHINES » !

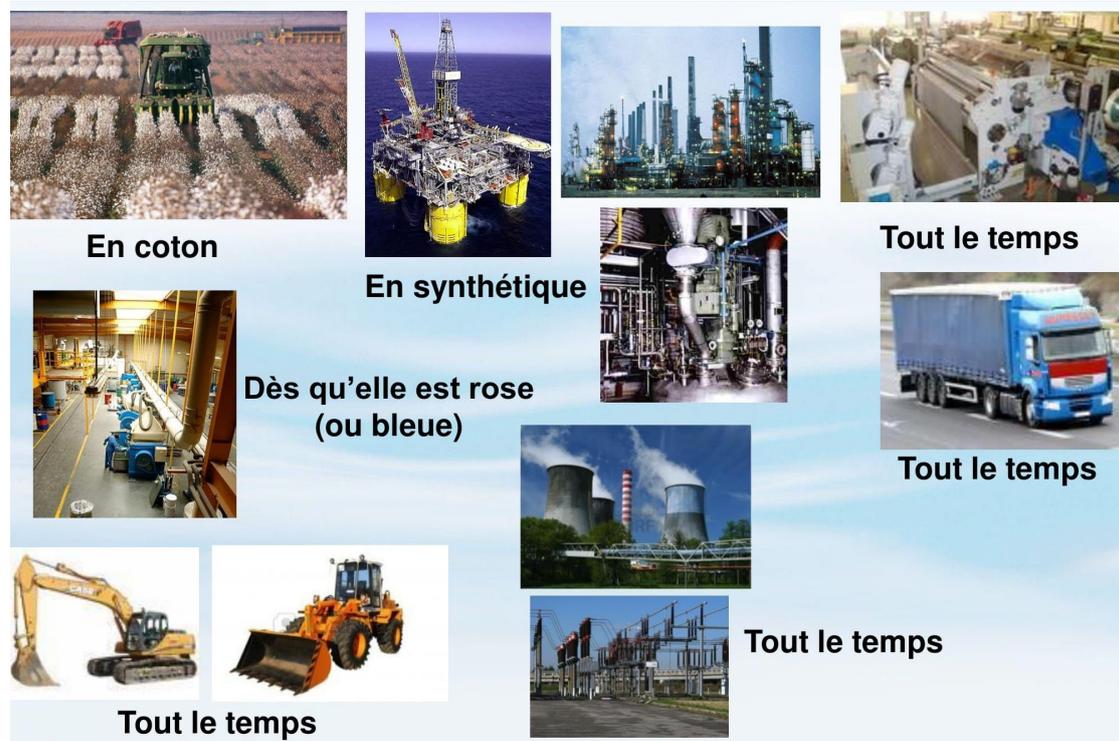
dise, mais normalement non. Je ne pense pas que vous ayez jamais mangé du charbon hormis celui qui sert pour les flatulences. Et vous n'avez pas respiré du gaz, en tout cas pas du méthane, peut-être celui qui donne la voix de Mickey. Nous ne consommons pas l'énergie avec notre propre organisme. En fait, quand on dit que l'on consomme de l'énergie, c'est un terme impropre mais c'est un terme impropre qui induit une illusion d'optique qui est extrêmement forte : « *consommer de l'énergie* », en fait, c'est « *domestiquer une machine.* »

Partout où vous allez voir « consommation d'énergie » – y compris dans mes diapositives parce que de temps en temps, j'utilise ce raccourci même si j'essaie de l'éviter –, vous barrez et vous remplacez par « utilisation de machines ». Et partout où vous voyez « Nous consommons de plus en plus d'énergie », vous barrez et vous remplacez par : « Nous utilisons de plus en plus de machines. » C'est ça qu'il faut comprendre.

En fait, la quantité croissante d'énergie que nous utilisons n'est rien d'autre que la manière d'augmenter à due proportion l'énorme *exosquelette mécanique* que nous avons créé à notre profit. C'est ça l'énergie.

*Et ce monde de machines, c'est le monde dans lequel vous vivez.*

## 7. Des gestes simples? De l'énergie!



Diapositive 10.

Sauf erreur de ma part, la morale et la température font que vous venez dans cette classe habillés. Si vous êtes habillés, c'est que vous avez enfilé un vêtement à un moment ou à un autre. Enfiler un vêtement, ça prend très exactement, même si vous êtes extrêmement maladroit, quelques secondes. Dans le noir, mal réveillé, après l'ingestion de substances que je ne nommerai pas, peut-être quelques dizaines de secondes, mais jamais beaucoup plus. Quelques secondes donc. Eh bien, en quelques secondes vous avez mobilisé à votre profit des milliers de machines, sans vous en être rendu compte.

Vous avez mobilisé à votre profit *des milliers de machines*. Vous avez commencé par mobiliser à votre profit toutes ces machines agricoles si vous avez un vêtement en textile dit naturel : du coton, du lin, etc. Vous avez commencé par mobiliser à votre profit toutes les machines agricoles qui ont semé, récolté, éventuellement traité le coton.

Si vous utilisez une fibre textile synthétique : tout ce qui commence par « poly », le nylon, etc., tout ça vient du pétrole. Si vous enflez un sous-vêtement

## 7. DES GESTES SIMPLES ? DE L'ÉNERGIE !

qui comporte des fibres synthétiques ou un tee-shirt qui comporte des fibres synthétiques, vous avez enfilé un bout de plate-forme pétrolière plus un bout de vapocraqueur plus un bout de raffinerie, ces petites bêtes à cinq milliards pièce que vous voyez sur cette image.

Si vous avez autre chose qu'un tissu écru, il a été teint, il a fallu fabriquer les teintures : de l'industrie chimique a fonctionné en amont. Il a fallu tisser les fibres, donc des machines mécaniques. Il a fallu le teindre, donc de l'industrie chimique. Il a fallu le transporter parce qu'évidemment, ce n'est pas à l'endroit où vous faites pousser le coton que vous le tissez, que vous le teignez, etc. D'autres machines sont intervenues à toutes les étapes intermédiaires de la chaîne qui s'appellent des camions, des trains, des avions.

Il a fallu fabriquer des boîtes dans lesquelles on installe les raffineries, dans lesquelles on installe les usines chimiques, etc. Ces machines-là également sont entrées en action. Il a fallu que des centrales électriques alimentent une partie du processus. Ces machines-là également sont entrées en action.

Bref, un truc totalement anodin que l'on fait comme on respire, qui s'appelle « enfiler un vêtement », vous ne vous en rendez pas compte mais une armée de machines ont travaillé pour vous, rien que pour ce geste tout simple.

Après s'être habillés, ceux qui ont une hygiène correcte vont se laver les dents après le petit-déjeuner. À nouveau, c'est pareil : se laver les dents, c'est quelque chose qui prend trois minutes si vous suivez les conseils du médecin, une minute si vous êtes pressé. Vous avez de nouveau utilisé des quantités considérables de machines simplement pour faire ce geste.

Vous avez ici une photo d'une usine chimique dans le nord de la France, qui appartient au groupe familial Roquette et qui a fabriqué un sucre qu'on trouve dans le dentifrice qui s'appelle du sorbitol. Vous savez que le sucre ça donne des caries et que si l'on met dans le dentifrice du sucre qui donne des caries, c'est quand même un peu bête. Donc le sucre que l'on veut dans le dentifrice pour qu'il ait un goût un peu sympathique est un sucre qui ne donne pas de caries. C'est une molécule qui est différente et, en fait, c'est une des quelques centaines de molécules que vous allez sortir d'une usine qui s'appelle une amidonnerie, dans laquelle vous entrez un train complet de wagons chargés de maïs tous les jours, et vous en ressortez des centaines de produits chimiques différents. Sur site, il y a quelques milliers de personnes qui travaillent dans une usine qui tourne en 3x8, c'est une des plus grosses usines chimiques de France.

Votre tube est en plastique, maintenant il n'y a plus vraiment de tubes en métal. Donc, en plastique ! À nouveau plate-forme pétrolière, raffinerie, vapo-

## 7. DES GESTES SIMPLES? DE L'ÉNERGIE!



Diapositive 11.

craqueur, etc. Et votre tube en plastique n'apparaît pas par l'opération du Saint-Esprit à partir du plastique. Il faut un extrudeur que vous voyez ici.

Vous vous lavez les dents devant une glace, parce que sinon vous faites des taches partout. Donc il a fallu faire la glace. Ici vous avez un train-float qui fait le miroir et, à nouveau, vous avez besoin, des boîtes, des camions, etc.

Vous vous lavez les dents avec de l'eau purifiée, et voilà par exemple un appareil à purifier l'eau. Donc, à nouveau, *une armée de machines* qui ont travaillé pour un geste du quotidien qui s'appelle se laver les dents.

J'en viens à l'objet le plus important de votre vie : votre téléphone. C'est pareil : quand vous passez un appel, vous avez mobilisé à votre profit une armée de machines. Il a fallu fabriquer des plastiques pour le téléphone, fabriquer de l'eau purifiée, etc. Il faut fabriquer de l'acier pour les supports d'antennes. Vous avez quarante métaux différents dans un smartphone. Quarante! Certains présents à des concentrations extrêmement faibles, et il y en a plusieurs dizaines. C'est autant d'activités minières à droite et à gauche, donc autant d'engins de mines etc.

## 7. DES GESTES SIMPLES ? DE L'ÉNERGIE !



Diapositive 12.

Dans un réseau télécom qui permet de faire fonctionner le smartphone – parce que, si vous êtes le seul à avoir un smartphone et que les autres n'en ont pas, ça ne sert pas à grand-chose à part à jouer à la chenille –, il faut pouvoir communiquer avec les autres, il faut un réseau. Voici par exemple un engin à passer des câbles pour faire le réseau, etc., etc.

Donc, passer un coup de fil, c'est aussi quelque chose qui va mobiliser des milliers de machines pour toutes les étapes intermédiaires de construction et de fonctionnement du dispositif.

Je le redis : aujourd'hui, *nous vivons dans un monde de machines* et toutes ces machines sans exception utilisent de l'énergie. Toutes ! Et vous comprenez bien – pour renverser le raisonnement que je vous ai montré tout à l'heure : « C'est 3% du total, donc cela n'a pas d'importance » – que si vous privez instantanément le monde d'énergie, ce n'est pas 3% du PIB que vous allez perdre.

C'est assez simple à comprendre : vous n'avez plus un transport qui fonctionne, vous n'avez plus de banques, plus de réseaux d'eau, plus d'hôpitaux, plus de transports quels qu'ils soient parce que plus d'énergie. Donc, vous mou-

## 7. DES GESTES SIMPLES ? DE L'ÉNERGIE !

rez de faim, vous mourez de froid et vous vous entretuez. En gros, c'est ce qui se passe si demain matin, instantanément, on prive le monde d'énergie.

Donc, *la totalité du monde moderne en dépend*. Et que cela coûte 1% ou 100% de ce que vous gagnez n'est pas tellement le sujet. Enfin, c'est un sujet, mais c'est loin d'être le seul sujet.

## 8. 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 ev  $\approx 1,6 \cdot 10^{-19}$  J**

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

Diapositive 13.

À partir de maintenant, on va entrer dans un certain nombre d'éléments quantitatifs.

Comment compte-t-on l'énergie? Vous savez que, quand on vous donne un exercice pour entrer aux Mines, en général, l'unité qu'on vous autorise à utiliser, et la seule, c'est le Joule. Je vais très peu m'en servir parce que si j'exprimais en Joule les grandeurs qu'on va aborder à partir de maintenant, il y aurait tellement de 0 sur la diapositive que vous prendriez trop de temps à la regarder. Donc souvent, on va utiliser des unités d'énergie un peu différentes des Joule parce que ça permet d'éviter les Giga et les Méga et ça permet d'avoir des choses plus petites.

La première manière de supprimer six zéros aux Joule, c'est de passer aux *kilowattheures* (kWh). Le kilowattheure a un avantage, c'est que c'est lui qui figure sur les factures – même si l'énergie n'est pas qu'une facture. Ça permet également de se rapprocher de choses qui sont plus familières dans les discussions du quotidien.

## 8. LE GRAND BAZAR DES UNITÉS

Un Français utilise aujourd'hui, tous usages confondus, importations comprises (c'est-à-dire y compris l'énergie qui a été utilisée hors de France pour faire fonctionner les machines qui alimentent sa consommation en France, par exemple pour fabriquer votre smartphone « made ailleurs » en totalité), aux alentours de 60 000 kWh par an.

Les énergéticiens, eux, ont une unité qu'ils aiment bien également, qui leur permet encore de gagner quatre zéros : la *tonne-équivalent-pétrole*. La tonne-équivalent-pétrole a une définition très simple : c'est l'équivalent de l'énergie libérée par la combustion d'une tonne de pétrole. Comme une tonne de pétrole n'a pas toujours la même énergie de combustion, ça dépend de la nature du pétrole, on ajoute en général de « qualité moyenne », et ça vaut à peu près 11 600 kWh.

Vous aurez de temps en temps également des unités qui sont amenées par les Anglo-Saxons, notamment par les Américains. Et vous savez que les unités américaines sont assez rarement compatibles avec le système métrique. La tonne-équivalent-pétrole s'inscrit dans ce grand ensemble-là.

J'utiliserai un tout petit peu l'*électron-volt* (pas souvent).

Enfin, j'utiliserai également « l'*équivalent-esclave* », à peu près 100 kWh d'énergie mécanique, je vais vous expliquer tout de suite pourquoi.

## 9. Nietzsche voulait des surhommes, le carbone l'a fait



Diapositive 14.

On va imaginer que, pour quelques raisons qui vous intéressent, vous décidez de faire dans la journée 6,3 fois l'ascension de la Tour Eiffel. Si vous faites 6,3 fois l'ascension de la Tour Eiffel dans la journée, la tour Eiffel faisant un peu plus de 300 m, vous allez faire de l'ordre de 2000 m de dénivelé dans la journée. Ce faisant, vous allez en général utiliser vos jambes, puisqu'utiliser ses bras c'est plus dur...

L'énergie mécanique que vous allez restituer avec un effort de cette nature – qui n'est quand même pas un effort totalement marginal pour n'importe qui – est  $E = mGh$ . C'est la formule que j'utilise. C'est extrêmement simple. Ça donne un ridicule 0,5 kWh sur une journée.

Donc, un homme au travail qui utilise ses jambes pour alimenter un dispositif mécanique quel qu'il soit, comme Charlton HESTON qui pédale dans « Soleil vert », aura été capable, à la fin de la journée, de restituer ou de fournir de l'ordre d'un demi-kilowattheure d'énergie mécanique.

## 9. NIETZSCHE VOULAIT DES SURHOMMES, LE CARBONE L'A FAIT

Si vous imaginez que cet homme au travail fournit cet effort un jour sur deux, ce qui est une autre manière de dire que vous montez 3 fois la Tour Eiffel tous les matins, à la fin de l'année, vos jambes auront fourni une centaine de kilowattheure d'énergie mécanique. Donc, sur une année de travail le corps d'un homme raisonnablement entraîné est capable de fournir de l'ordre d'une centaine de kilowattheure d'énergie mécanique s'il utilise ses jambes.

Si vous utilisez vos bras – et, soit dit en passant, un peu le dos également, et une pelle (c'est plus difficile à mains nues) – et que vous déblayez 6 mètres cubes de terre, c'est-à-dire à peu près 15 tonnes de terre dans une journée, outre des ampoules, vous aurez fourni 0,05 kilowattheure d'énergie mécanique. C'est-à-dire que vous êtes encore dix fois plus ridicule que la personne qui a monté trois fois la tour Eiffel avec ses jambes.

Donc une paire de bras au travail dans la journée c'est 0,05 kilowattheure ; une paire de bras au travail sur l'année, c'est une dizaine de kilowattheure d'énergie mécanique.

Si vous faites brûler un litre d'essence qui coûte le prix scandaleusement élevé de 1,60 euros – ce qui justifie que l'on trouve que c'est trop cher –, vous allez obtenir 10 kWh d'énergie thermique.

Si vous voulez avoir une comparaison stricte, évidemment, il faut faire passer ça dans une machine qui va convertir cette énergie thermique en énergie mécanique. Même avec les meilleurs ingénieurs du monde, pour faire des voitures – qui paraît-il sortent d'ici – vous allez obtenir 2 à 4 kWh d'énergie mécanique, pas plus. L'écart entre 2 et 4 ne dépend pas de l'ingénieur, mais de la manière dont la voiture fonctionne, si elle est proche de son rendement optimal ou pas, donc si elle est à 2 c'est de la faute du conducteur, ce n'est pas de la vôtre. Obtenir 2 à 4 kWh d'énergie mécanique d'un seul litre d'essence – dont on verra dans pas longtemps que les Français consomment encore pas loin de 1000 litres par an – c'est le même contenu en travail, la même capacité à changer d'environnement que dans 10 à 100 jours de travail de force d'un être humain.

Je le redis autrement : quand vous utilisez une machine qui consomme *un litre d'essence*, vous êtes capable de modifier l'environnement, c'est-à-dire de fournir du travail au même niveau que *10 à 100 êtres humains* qui utiliseraient soit leurs jambes, soit leurs bras. Je ne sais pas si vous vous rendez compte du différentiel que vous avez entre l'énergie qu'on utilise via la machine et via notre propre corps.

Si l'on convertit tout ça en argent : une autre façon de dire la même chose c'est dire qu'obtenir 1 kilowattheure d'énergie mécanique en payant un homme

## 9. NIETZSCHE VOULAIT DES SURHOMMES, LE CARBONE L'A FAIT

au travail pour le fournir coûte quelques centaines à quelques milliers d'euros alors qu'en face, la machine au travail fournit le même service pour un coût marginal, (je n'ai pas compté la machine), de l'ordre de *quelques dizaines de centimes*.

Donc, quand je passe de l'homme au travail à la machine au travail, hors coût de la machine, j'ai divisé le coût d'une transformation unitaire de l'environnement par un facteur de *quelques centaines à quelques milliers*.

La raison pour laquelle on mécanise tout ce que l'on peut dans le monde économique, est là. Dès que vous pouvez remplacer un garçon d'étage par un robot, vous le faites. Dès que vous pouvez remplacer un ouvrier-monteur sur une chaîne par un robot, vous le faites. Dès que vous pouvez mécaniser n'importe quoi, un agriculteur par exemple et le remplacer par un tracteur, vous allez toujours, toujours, toujours le faire, à cause de cette différence absolument considérable de prix entre le travail humain et l'énergie. C'est la raison pour laquelle on a toujours cherché, depuis qu'on a des machines efficaces, à remplacer les hommes par des machines.

Cela a même joué pour le remplacement des esclaves. Si vous prenez un esclave – ce qui, en général, n'est pas une vocation de jeunesse –, pour le faire travailler, vous allez devoir aller le chercher contre sa volonté. Il faut payer de l'argent. Je vous rappelle qu'il y a eu une époque, où il y avait une traite des esclaves qui était un business tout à fait immoral au regard des critères actuels, mais en attendant, c'était quand même fait pour des raisons économiques. Il faut l'empêcher de vous trucider, il faut l'empêcher de s'échapper, il faut le nourrir, etc. Quand vous regardez ce que ça coûte d'obtenir le travail d'un esclave, vous vous rendez compte que même ça va vous coûter 10 à 100 fois plus cher que la machine qui n'a rien contre sa condition de machines, qui ne cherche pas à s'échapper, qui ne se met pas en grève et qui travaille 24h/24.

La raison pour laquelle l'esclavagisme a disparu dans les sociétés qui ont eu accès à l'énergie – je vais faire une petite incursion dans le cours auquel vous n'êtes pas allés pour certains d'entre vous –, ce n'est pas parce que notre code génétique a changé. Notre code génétique est très exactement le même que celui qu'avaient nos ancêtres il y a deux ou trois siècles. Simplement, il n'y a plus d'incitation à faire des choses que nous faisons à l'époque parce qu'on a trouvé beaucoup mieux et beaucoup moins enquinquant pour faire la même chose. Ce qui a libéré les esclaves, c'est le pétrole.

## 10. 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 « cout 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 coutera cher à extraire. C'est juste de la physique.**

Diapositive 15.

À ce stade, je vous propose quelques premières conclusions. Je vous rappelle qu'utiliser de l'énergie suppose que l'énergie existe déjà dans l'environnement.

Quand dans un débat, vous voyez des gens qui vous disent : « On pourrait utiliser l'hydrogène. » De l'hydrogène dans l'environnement, il y a un endroit où il y en a beaucoup, ça s'appelle le soleil : pas très commode d'aller le chercher. Pour le reste, il est partout sous forme liée. Dans l'eau, il y en a plein. Vous en avez plein dans la vie, etc. Mais partout, il est sous forme liée, donc il n'est pas disponible en tant que source d'énergie. La molécule est disponible, l'énergie non. Il faut casser les liaisons, par exemple électrolyser de l'eau et pour ça, vous avez besoin de plus d'énergie que l'énergie que vous récupérez dans la combustion d'hydrogène. Donc, l'hydrogène n'est pas une source d'énergie primaire.

Quand on vous dit : « On pourrait utiliser la pile à combustible. » C'est un moteur, la pile à combustible, ce n'est pas une source d'énergie. Ce qu'on

## 10. LA PHYSIQUE SERA TOUJOURS PLUS FORTE QUE LES SLOGANS

doit comparer aux énergies primaires qu'on utilise aujourd'hui, ce sont d'autres énergies primaires, c'est-à-dire des choses qu'on peut trouver dans l'environnement et qui sont utilisables telles quelles dans l'environnement. Le reste n'est pas accessible.

Comme l'énergie quantifie la transformation, vous n'avez pas d'énergie verte, et soit dit en passant pas d'énergie rose, pas plus que d'énergie noire. En fait, choisir une énergie, c'est choisir un type de transformation et c'est choisir des avantages et des contreparties. Toute énergie est sale si vous l'amenez à un niveau suffisant d'utilisation. N'importe laquelle.

Le jour où vous couvrez la totalité de la planète de panneaux photovoltaïques, ça cesse d'être propre. Une « énergie propre », en général, quand vous regardez les chiffres, vous vous rendez compte que *c'est une énergie qui est utilisée en quantité suffisamment minime pour que ses inconvénients le soient également*. En général, c'est ça une *énergie propre*.

Dès que l'énergie commence à être utilisée en quantité massive, quel que soit le mode d'extraction de l'environnement, il y a des inconvénients. Choisir une énergie, c'est arbitrer entre les inconvénients dont on a envie et ceux dont on n'a pas envie. C'est ça le sujet.

Quelque chose qui est absolument essentiel, je vais y revenir plusieurs fois pendant ce premier module de cours, c'est que l'énergie (je ne parle pas de ce qui permet de l'extraire de l'environnement), *l'énergie est gratuite!*

Vous l'avez tous entendu : le vent, c'est gratuit, le soleil, c'est gratuit, il n'y a pas de raison de ne pas s'en servir. De fait, le vent et le soleil sont gratuits ; personne dans cette salle n'a payé le moindre centime pour que le soleil existe, pour que le vent existe. Mais personne dans cette salle non plus n'a payé le moindre centime pour que le pétrole existe ! Le pétrole est gratuit. Ce qui est payant, c'est le consentement à s'en défaire de la personne qui a la chance d'être assise dessus. Ça, c'est payant. Et ce qui est payant, c'est le travail des quelques-uns d'entre vous qui iront chez Total – c'est très mal, ne le dites à personne ! – pour aller faire des trous dans la terre et faire sortir le pétrole. Ça, c'est payant. *Le pétrole est gratuit. C'est gratuit.*

Donc, quand on paie l'énergie, tout ce qu'on paie, c'est du travail humain et des rentes humaines pour accéder à une énergie qui elle, est gratuite. On ne paie que des hommes et du reste, l'argent ne sert à payer que des hommes. Vous n'avez jamais vu la nature envoyer une facture à qui que ce soit. *On ne paie que des hommes.*

## 10. LA PHYSIQUE SERA TOUJOURS PLUS FORTE QUE LES SLOGANS

Comme l'énergie c'est de la physique, et comme ce que vous payez ce n'est pas l'énergie elle-même mais le travail qu'il faut consacrer à son extraction de l'environnement, le prix d'une énergie ne dépend pas de l'abondance de l'énergie. Parce qu'on pourrait se dire : si l'énergie est très abondante, du coup elle est encore « plus gratuite » que les autres, en fait, ce n'est pas ça qui compte.

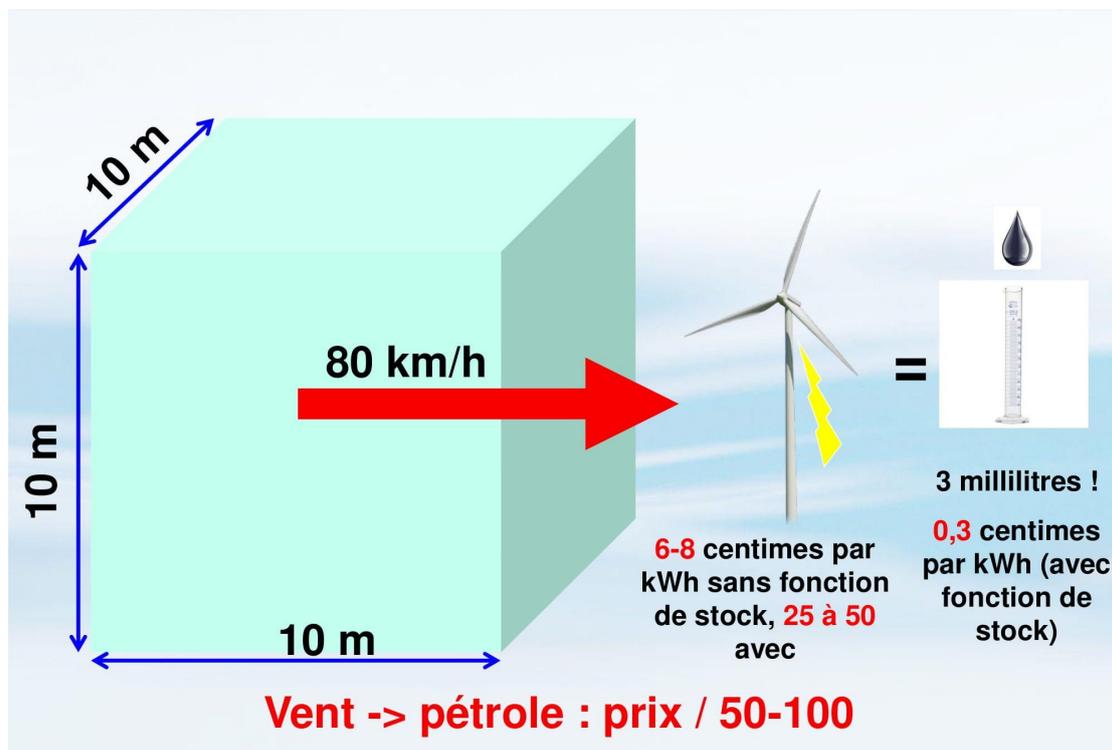
Si une énergie est très abondante, elle peut quand même être très difficile à extraire de l'environnement. Vous savez, il y a une énergie qui est totalement surabondante dans l'univers, c'est le rayonnement à 3 degrés Kelvin dans le vide. Ça, je peux vous dire que vous n'en ferez jamais rien, et pourtant il y en a des quantités absolument considérables.

Le fait qu'il y ait des quantités absolument considérables d'énergie ne nous dit rien sur la facilité à l'extraire pour s'en servir à notre profit. Ce qui va compter pour le coût de l'énergie, c'est-à-dire *la facilité qu'il y a à l'extraire et à l'utiliser* à notre profit, c'est le fait que la source d'énergie préexistante dans l'environnement soit déjà très concentrée et avec peu de barrières nous séparant de l'accès à cette source. *L'archétype* de ce truc-là, c'est le *pétrole*.

Le pétrole c'est hyper-concentré, plus que le reste – à part le nucléaire, mais l'énergie nucléaire est plus compliquée à utiliser. C'est hyper-concentré et les barrières qui nous séparent de son accès ne sont pas très dures à franchir. Historiquement, Monsieur DRAKE est allé faire trois trous à Titusville et le pétrole jaillit. Ça n'a pas été très compliqué historiquement de faire sortir du pétrole.

Plus une énergie est séparée de nous par des grandes barrières, plus elle est diffuse et plus elle coûtera cher à extraire de l'environnement. C'est juste de la physique.

## 11. Pourquoi être passé des EnR divines au pétrole diabolique?



Diapositive 16.

Je vais vous le montrer avec une petite comparaison rapide.

Imaginons que je prenne le volume d'air de cette salle, qui n'est pas très loin, en ordre de grandeur, de représenter un cube de 10 mètres de côté. Imaginons que je le fasse souffler à 80 km/h, ce qui représente au choix pour les méridionaux un bon mistral, ou pour les marins 45 nœuds de vent. Et, je fais passer ça dans une éolienne. Si je fais passer dans une éolienne ce vent, ça va mettre mon éolienne en action et me fournir de l'électricité. Cette électricité est une énergie, je peux la compter.

La quantité d'électricité que je récupère avec 1000 mètres cube d'air à 80 km/h qui passent dans l'éolienne, est la même que la quantité d'énergie que je récupère en faisant brûler 3 millilitres de pétrole. 3. Pas 3 tonnes, pas 3 litres, pas 30 litres. *3 millilitres*. 3 tout petits millilitres.

## 11. POURQUOI ÊTRE PASSÉ DES ENR AU PÉTROLE DIABOLIQUE ?

En ce qui concerne la quantité de travail humain à investir, à votre avis, est-ce plus simple d'aller faire un trou dans le désert saoudien et de faire sortir 3 millilitres de pétrole, ou est-ce plus simple de construire une éolienne, d'attendre que le vent souffle et de récupérer l'électricité qui en sort ?

La réponse est dans les prix, puisque l'argent ne paie que les Hommes. Si vous utilisez une éolienne, vous allez, en Europe, payer votre kilowattheure d'électricité de 6 à 8 centimes en sortie d'éolienne, et à ce prix-là, il y a cours quand il y a du vent. Quand il n'y a pas de vent, le vidéoprojecteur ne fonctionne pas, il n'y a pas de micro, ce n'est pas grave, je peux faire avec les mains et parler un peu plus fort. Par contre, pour tous ceux d'entre vous qui sont venus en métro, il n'y a pas de métro non plus, c'est un peu plus ennuyeux. Il n'y a pas non plus de soirée ce soir si le vent ne souffle pas, ça commence à devenir vraiment, vraiment ennuyeux. Il n'y a pas de réveil demain matin s'il marche à l'électricité. Le réfrigérateur ne peut pas refroidir les bières, etc. Enfin, c'est une catastrophe.

S'il n'y a pas de vent, le système s'arrête. Si vous voulez que le système ne s'arrête pas quand il n'y a pas de vent, vous devez rajouter le coût du stockage. Et alors, à ce moment, vous multipliez en gros par 3, parfois par 6. Donc, l'ordre de grandeur du kilowattheure stocké avec du vent, c'est quelques dizaines de centimes.

En face de ça, l'ordre de grandeur du coût du kilowattheure déjà stocké – puisque quand vous sortez votre pétrole du sol c'est déjà un stock –, vous pouvez déjà vous en servir aujourd'hui, demain, après-demain, la semaine prochaine, ou à 3 h du matin, exactement comme ça vous chante. Eh bien, ce kilowattheure de pétrole déjà stocké sorti du désert saoudien vaut 0,3 centimes.

Donc, entre le coût d'un kilowattheure extrait du vent, source diffuse (ce n'est pas dense, l'air : 1,2 kg par mètre cube, ce n'est vraiment pas dense) et le coût du kilowattheure sorti d'un puits de pétrole saoudien, vous avez *un facteur de l'ordre de 100* sur le coût de mise à disposition d'un kilowattheure stocké.

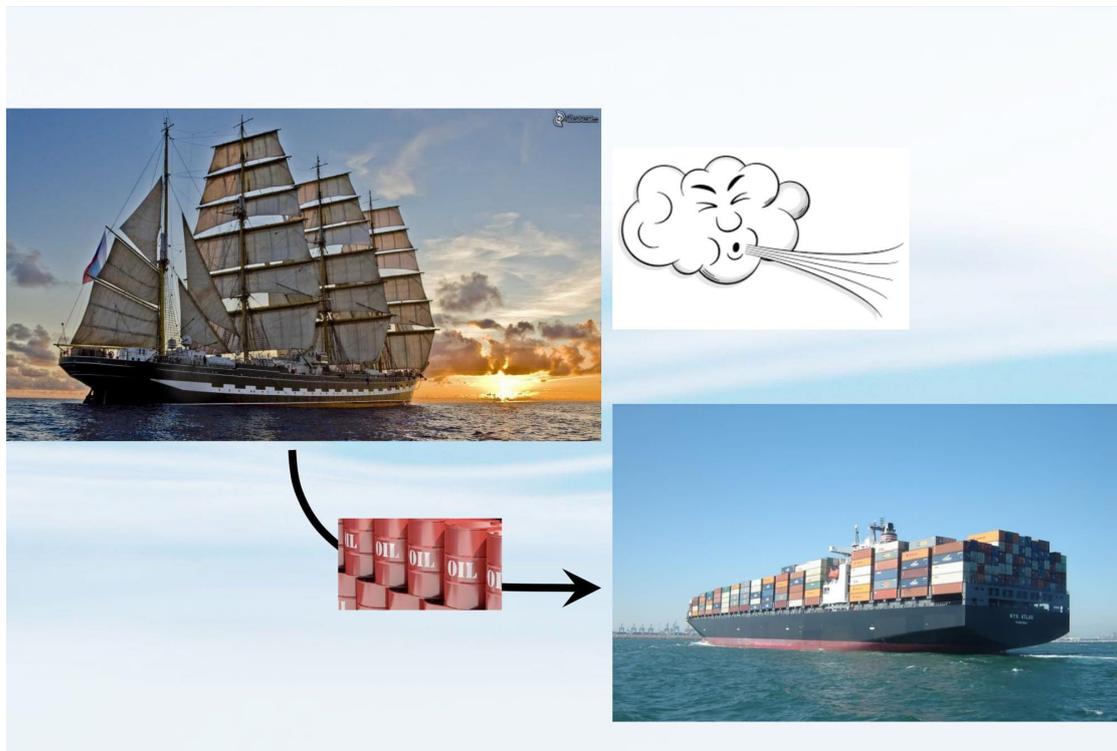
Et encore, l'éolienne, vous l'avez elle-même fabriquée avec du pétrole : le système n'est pas bouclé. C'est-à-dire que pour fabriquer l'éolienne, vous avez bénéficié d'un système industriel très performant qui vous a fait l'extraction du cuivre de la mine, l'extraction de la bauxite de la mine, l'extraction du minerai de fer de la mine, la métallurgie amont, l'assemblage de tout ce bastringue, le transport, le plot en béton pour l'ériger, etc. Tout ça a été fait avec des combustibles fossiles. Si vous deviez faire tout ça avec d'autres éoliennes, ce n'est pas complètement sûr que le prix de l'éolien soit toujours de 6 à 8 centimes le kilowattheure. On peut prendre les paris. Mon pari est que ça vaudrait un peu plus cher.

## *11. POURQUOI ÊTRE PASSÉ DES ENR AU PÉTROLE DIABOLIQUE ?*

Donc, même en faisant l'éolienne avec des combustibles fossiles, vous vous rendez compte que vous avez un facteur de quelques dizaines à une centaine entre un kWh sorti du vent et un kWh sortie d'un puits de pétrole facile. C'est irrémédiable parce que c'est de la physique.

C'est pour cette raison qu'historiquement nous ne sommes pas passés des combustibles fossiles aux énergies renouvelables, mais que nous avons fait l'exact inverse.

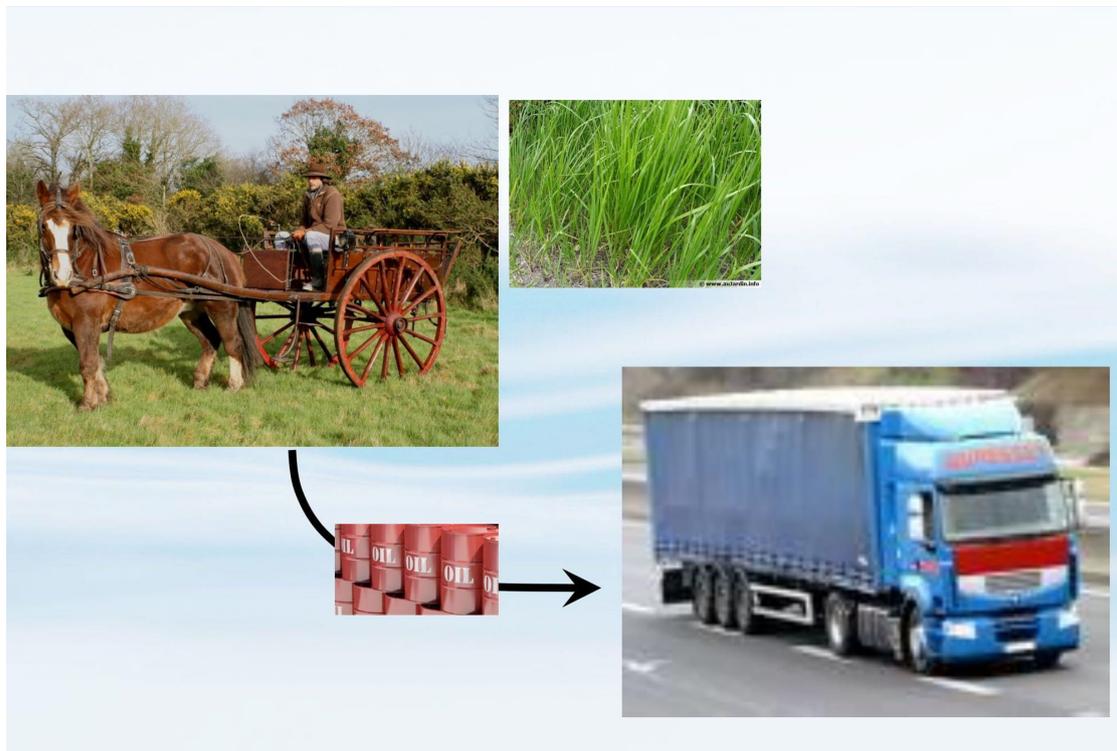
## 11. POURQUOI ÊTRE PASSÉ DES ENR AU PÉTROLE DIABOLIQUE?



Diapositive 17.

Il y a deux siècles, la marine était 100% renouvelable et du reste, comme le vent ne souffle pas toujours, il fallait embarquer des citrons pour être sûr que les marins n'attrapent pas le scorbut. On s'est dit que, quand même, pour vous apporter le T-shirt de chez Zara rapidement, parce que le T-shirt n'est pas fabriqué en France, c'est quand même beaucoup mieux d'avoir une marine 100% énergie fossile. C'est beaucoup plus efficace. Ça va beaucoup plus vite.

## 11. POURQUOI ÊTRE PASSÉ DES ENR AU PÉTROLE DIABOLIQUE?



Diapositive 18.

Il y a quelques siècles, nous avions un système de transport 100% renouvelable et on s'est dit que, quand même, pour alimenter l'École des Mines pour le repas du midi, ce n'est pas terrible, il vaut mieux avoir des transports 100% fossiles, ça marche mieux.

## 11. POURQUOI ÊTRE PASSÉ DES ENR AU PÉTROLE DIABOLIQUE?



Diapositive 19.

On avait une agriculture 100% renouvelable et on s'est dit que, quand même, pour avoir une agriculture très productive et que les enfants des paysans puissent aller faire des études, il vaut mieux avoir une agriculture 100% fossile.

## 11. POURQUOI ÊTRE PASSÉ DES ENR AU PÉTROLE DIABOLIQUE?



Diapositive 20.

On avait des travaux publics 100% renouvelables, c'est avec ça que les Romains ont construit les voies romaines. Ce n'était pas très rapide pour faire un million de kilomètres de routes en France. C'est quand même beaucoup plus rapide d'utiliser des engins comme ça. Ça va beaucoup plus vite.

## 11. POURQUOI ÊTRE PASSÉ DES ENR AU PÉTROLE DIABOLIQUE?



Diapositive 21.

Nous avons une industrie de la construction 100% renouvelable. Un siècle pour faire Notre-Dame. Alors que maintenant, ça va aller un peu plus vite pour refaire la toiture. Et probablement quelques siècles pour faire les Pyramides, ce n'était pas très efficace. Pour faire la tour D2 à la Défense, c'est beaucoup mieux d'utiliser des combustibles fossiles, ça va beaucoup plus vite.

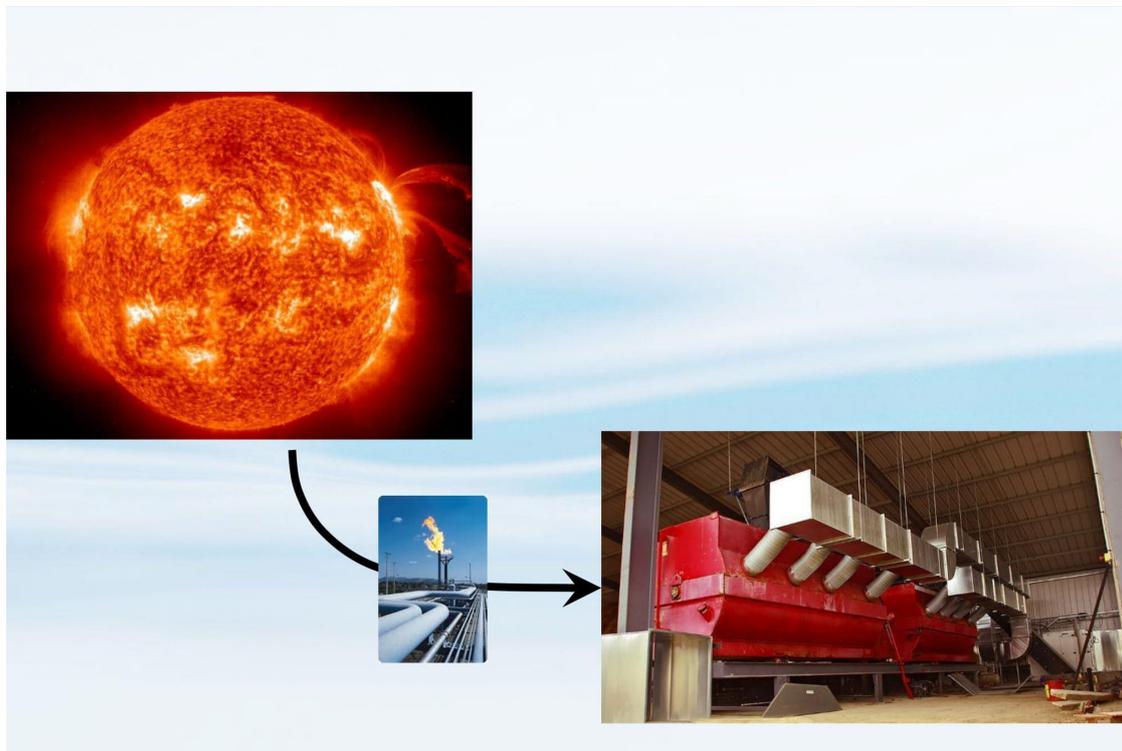
## 11. POURQUOI ÊTRE PASSÉ DES ENR AU PÉTROLE DIABOLIQUE?



Diapositive 22.

Nous avons une industrie 100% renouvelable. À nouveau, ce n'était pas très efficace pour faire tous les objets que vous avez sur vous, à bas coût, ça ne marche pas bien. C'est quand même beaucoup mieux d'avoir une industrie 100% fossile.

## 11. POURQUOI ÊTRE PASSÉ DES ENR AU PÉTROLE DIABOLIQUE?



Diapositive 23.

Nous avons des séchoirs à luzerne 100% renouvelable, c'est-à-dire le soleil, et ce n'est quand même, pas très efficace, il vaut mieux avoir des séchoirs à luzerne qui marchent au gaz, ça va plus vite.

## 11. POURQUOI ÊTRE PASSÉ DES ENR AU PÉTROLE DIABOLIQUE ?

Donc, ça fait deux siècles, précisément parce que les caractéristiques physiques des énergies fossiles sont supérieures aux caractéristiques physiques des énergies renouvelables, que l'Homme, qui est un animal accumulatif, a passé son temps à passer des énergies renouvelables aux énergies fossiles pour être capable d'accumuler plus vite. C'est exactement pour ça qu'on a fait ce chemin-là.

Donc, quand vous voyez ça, vous vous dites que de faire le chemin inverse, simplement parce que la promesse politique c'est qu'on va y arriver sans toucher au niveau de vie des gens, rien qu'en voyant ça, vous vous dites : « Ah ? En est-on totalement sûr ? Est-ce que je signe avec toutes mes économies plus celles de mes parents plus celles à venir de mes grands-parents, sur le fait que ça va marcher ? »

Incidemment, quand vous avez un doute sur quelque chose, c'est une très bonne question à vous poser. C'est-à-dire : « Est-ce que je serais d'accord pour parier la totalité des économies de mes parents sur ce que je suis en train d'affirmer ? » Voilà. Fin de la parenthèse.

Si vous avez un tout petit doute sur le fait que la réponse ne soit pas oui, c'est que, en gros, vous n'êtes pas totalement convaincu par l'argument ou parce qu'on est en train de vous raconter.

Donc les énergies renouvelables, on connaît très, très bien : c'est le monde dont l'Humanité sort. J'insiste, je ne suis pas en train de dire qu'il ne faut pas y retourner. Je suis juste en train de vous préparer à la conclusion qui est que *l'on n'y retournera sûrement pas à consommation constante*. Sûrement pas avec 7 milliards de bonshommes sur Terre.

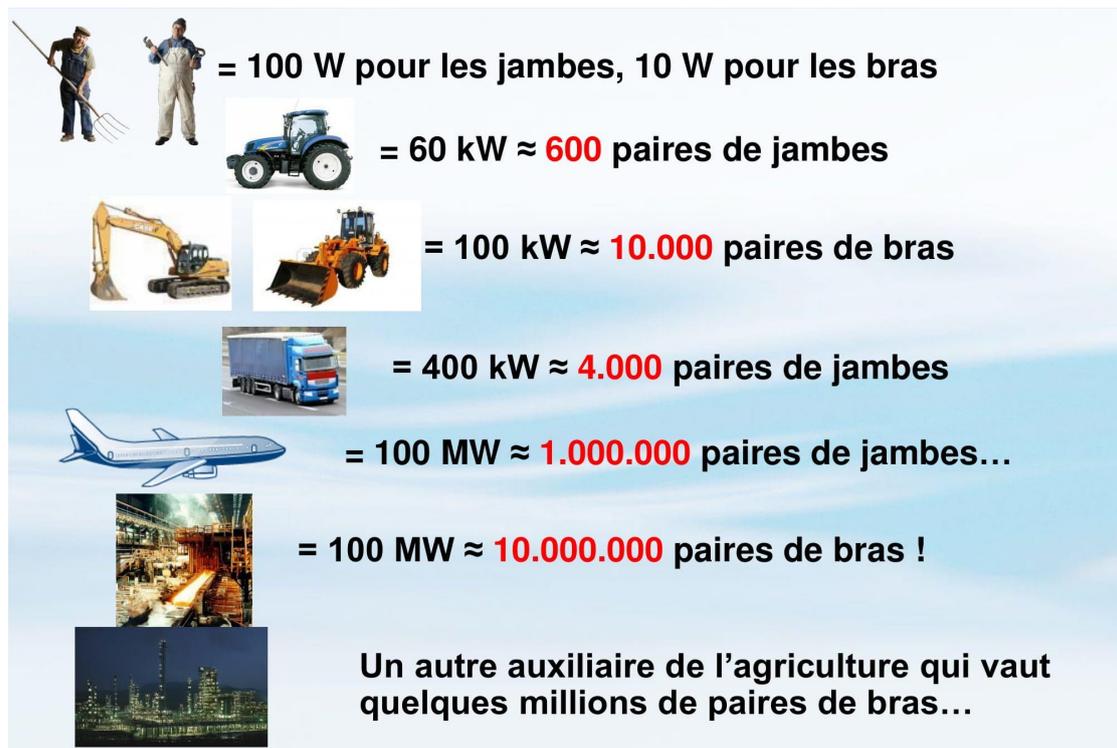
## 12. Avant pétrole and co : ni moral ni efficace mais très durable



Diapositive 24.

Voilà nos convertisseurs des temps anciens, c'était tout à fait immoral et ce n'était pas du tout efficace, pas du tout efficace. Par contre, c'était tout à fait renouvelable.

### 13. L'Homme produit avec machine ou la machine produit avec Hommes ?



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

 = 60 kW ≈ **600** paires de jambes

 = 100 kW ≈ **10.000** paires de bras

 = 400 kW ≈ **4.000** paires de jambes

 = 100 MW ≈ **1.000.000** paires de jambes...

 = 100 MW ≈ **10.000.000** paires de bras !

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

Diapositive 25.

Nous sommes passés maintenant à des convertisseurs des temps modernes qui sont beaucoup plus efficaces, à n'en point douter.

Maintenant, si je ne parle pas énergie mais que je parle puissance : vous voyez, un homme au travail dont je vous parlé tout à l'heure, en une journée de labeur, peut faire entre 0 et 0,5 kilowattheure. Si vous rapportez ça à 5 heures de travail (en fait c'est 10, mais peu importe), vous voyez que ça veut dire que sa puissance moyenne sur cette durée se balade quelque part entre 10 et 100 watts.

Je prends un tracteur. Un tracteur ordinaire, aujourd'hui, a une puissance de quelques dizaines de kilowatts. Un tracteur a la même puissance, soit dit en passant, qu'un engin de chantier, qui fait une centaines de kilowatts. Si, un jour vous êtes un peu curieux, la prochaine fois que vous passez à côté d'un chantier, sur tous les engins de chantier, vous avez une petite plaque qui vous donne la puissance du moteur, qui est cachée quelque part sous la partie pivotante. Allez

### 13. *HOMME PRODUIT AVEC MACHINE, OU L'INVERSE?*

regarder par curiosité. Vous verrez la puissance de l'engin : quelques dizaines de kilowatts jusqu'à 100 kilowatts pour une grosse pelle.

Si vous substituez des jambes, quelques centaines, si vous substituez des bras, quelques milliers. Donc, les deux engins que vous avez là sont capables, pour le tracteur, de se substituer à quelques centaines de paires de jambes ou à quelques dizaines d'animaux de trait. Et, pour l'engin de travaux publics ou l'engin de construction, quelques milliers de paires de bras.

C'est grâce à cela que l'on a pu augmenter la productivité d'un agriculteur par quelques centaines, parce qu'il ne lui a pas poussé des centaines de bras et des centaines de jambes comme à Shiva. L'agriculteur, on l'a simplement doté d'un exosquelette.

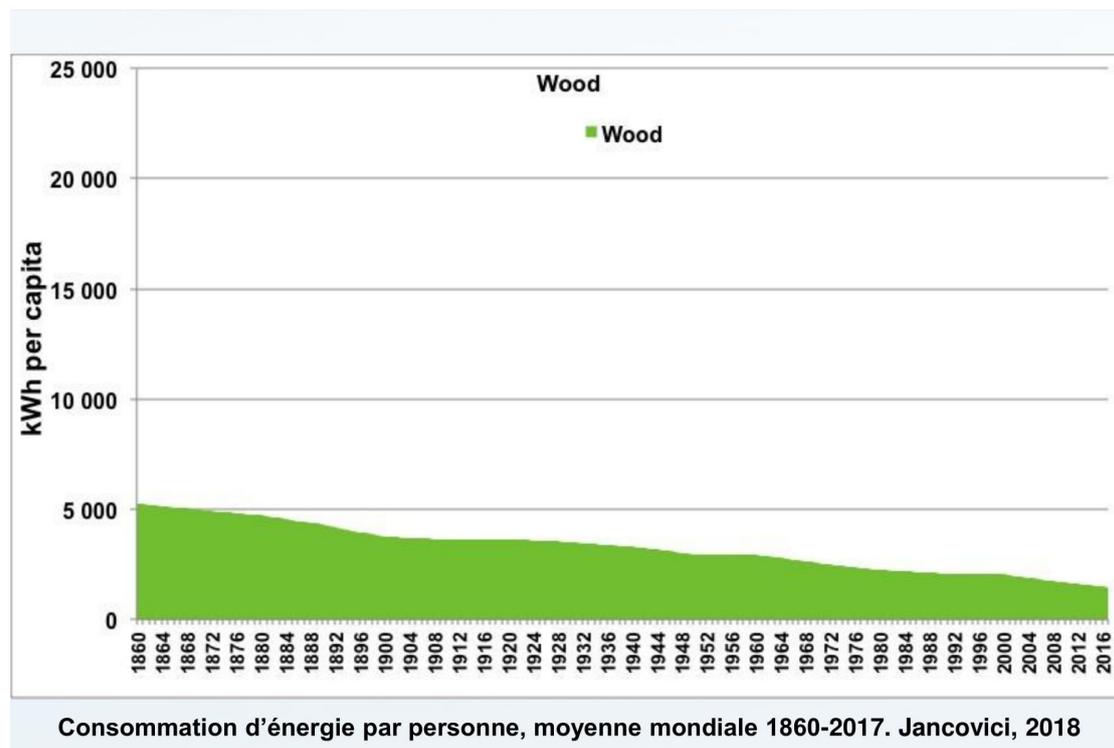
C'est grâce à cela qu'aujourd'hui, on peut construire une maison, ça, plus tout un tas d'autres machines, des cimenteries, des camions, etc. On peut aujourd'hui construire une maison pour le coût de quelques années de salaire, chose qui était totalement impensable pour un habitant des temps anciens. Jusqu'à il y a deux ou trois siècles, c'était juste impensable que quelqu'un se fasse construire sa maison pour quelques années de salaire, ça n'existait pas.

Un camion pédale comme quelques milliers de fois les jambes du conducteur. Un avion, grâce au jeune et beau pilote bien payé, pédale comme un million de fois les jambes du pilote – celui d'Aeroflot n'a pas dû pédaler assez fort.

Un laminoir industriel martèle, écrase l'acier comme toute l'Île-de-France à qui j'aurais donné un marteau. Donc, vous voyez : rien que pour remplacer le laminoir de Fos-sur-Mer, si on n'avait pas d'énergie, vous ne seriez pas en train d'écouter ce cours en ce moment – certains d'entre vous s'en porteraient peut-être mieux –, vous seriez avec un marteau en train de taper sur des tôles. Rien que pour remplacer le laminoir de Fos-sur-Mer ! Toute l'Île-de-France avec un marteau en train de marteler toute la journée !

Voilà un autre auxiliaire de l'agriculture qui a économisé quelques millions de paires de bras, ça s'appelle un vapocraqueur, et c'est quelque chose qui sert à préparer la chimie organique.

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



Diapositive 26.

À ce stade, on est d'accord sur le fait que l'énergie quantifie la transformation. Sur le fait que, pour utiliser de l'énergie, en fait, vous avez besoin d'un convertisseur. Sur le fait que l'essentiel des convertisseurs que nous utilisons aujourd'hui ne sont plus nos propres corps mais sont des machines.

Maintenant, je vais vous quantifier le parc de machines et la manière dont il se décompose par individu. Je vous ai dit : historiquement, ce qu'on utilisait, c'était surtout des énergies renouvelables.

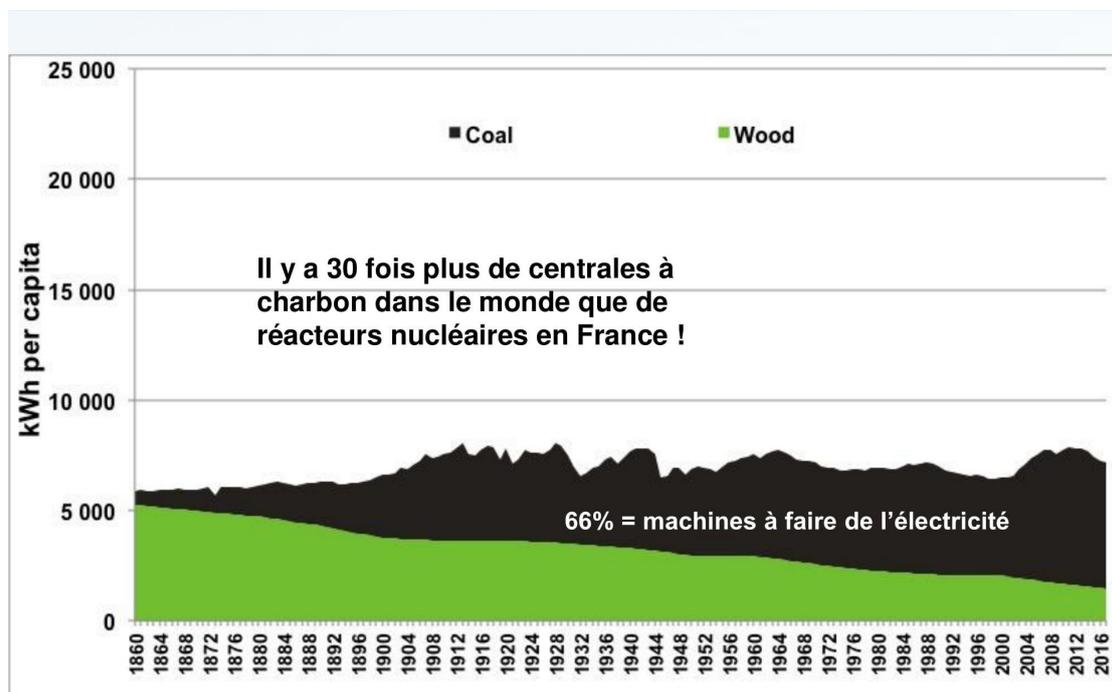
Ici, vous avez un graphique qui démarre en 1860 et qui ne vous quantifie qu'une des énergies renouvelables qu'on a utilisée depuis des temps anciens – parce que pour le vent et l'eau c'est difficile d'avoir des statistiques en séries longues; je suis sûr que quelqu'un arriverait à reconstituer ça mais je n'ai pas trouvé.

#### *14. IL FUT UN TEMPS, NOUS ÉTIONS RENOUVELABLES ET DURABLES*

On va commencer par le bois. Le bois, il y a un siècle et demi, l'humanité en utilise. L'humanité en utilise pour alimenter des poêles, pour se chauffer, pour alimenter des forges. Et, soit dit en passant, le début de la métallurgie a été un facteur massif de déforestation ou un facteur très important de déforestation en Europe, pour faire fonctionner les premières machines à vapeur qui commencent à émerger ici et là.

À cette époque, un habitant du monde, un Terrien consomme en moyenne 5000 kWh de bois par an. Vous voyez que, par personne, depuis cette époque, la quantité de bois utilisée a diminué. Pas au total, mais par personne elle a diminué. C'est la seule énergie qui ait suivi cette évolution.

#### 14. IL FUT UN TEMPS, NOUS ÉTIIONS RENOUVELABLES ET DURABLES



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

Diapositive 27.

Après, les Hommes se sont mis à utiliser du charbon.

Une partie du charbon s'est substituée au bois. Par exemple, en Europe, on a commencé à utiliser du charbon. Avant, on utilisait du charbon de bois et puis on s'est mis à utiliser du charbon dit « de terre » (les deux s'appelaient du charbon), pour faire fonctionner les forges.

Après, on s'est mis à utiliser du charbon pour faire fonctionner les machines à vapeur. Vous voyez que la quantité de charbon utilisée par personne dans le monde, qui était extrêmement faible il y a un siècle et demi, se monte aujourd'hui à peu près à 5000 kWh par personne et par an.

Ce que vous voyez sur ce graphique également, c'est que la quantité de charbon utilisée par personne dans le monde n'a jamais baissé depuis qu'on a commencé à utiliser du charbon. *Jamais, à aucun moment, le charbon n'a été une énergie du passé pour les Hommes. Jamais, à aucun moment.*

En fait, aujourd'hui, vous utilisez sans le savoir énormément de charbon à travers tout ce qui est importé de pays où c'est « made in charbon », à commencer par la Chine. Donc, dès que vous voyez quelque part, « made in China », c'est « made in charbon » et ça alimente directement votre consommation, indirecte évidemment, de charbon.

#### 14. IL FUT UN TEMPS, NOUS ÉTIONS RENOUVELABLES ET DURABLES

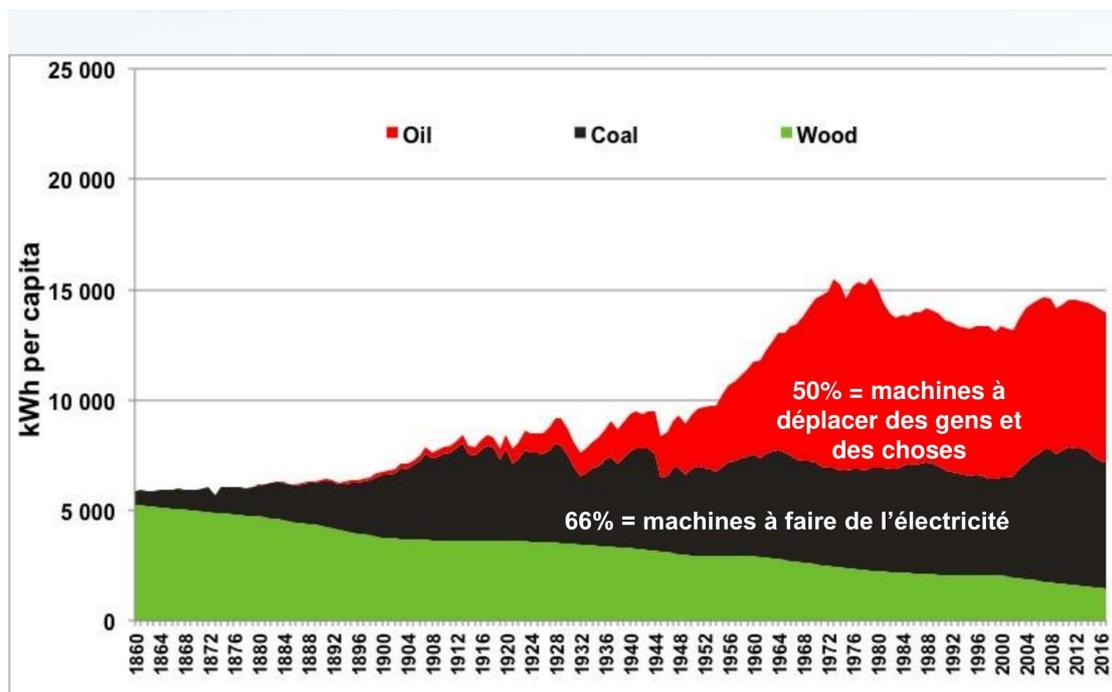
Les deux tiers du charbon qu'on utilise aujourd'hui sur Terre servent en fait à une machine intermédiaire du système énergétique qui s'appelle la centrale électrique. Les deux tiers du charbon extrait sur Terre alimentent une centrale électrique.

Dans le reste, vous avez un 10%, environ, qui alimente la métallurgie. Ce sont des charbons particuliers, très riches en carbone, qu'on appelle des charbons à coke. Le reste sert à faire fonctionner des réseaux de chaleur, des poêles, du chauffage urbain, enfin : du chauffage domestique, etc., mais *les deux tiers, ce sont les centrales électriques*.

Vous savez qu'en France, on a un grand débat sur nos centrales nucléaires. Retenez que, aujourd'hui dans le monde, vous avez entre 30 et 40 fois, entre 30 et 40 fois, la puissance nucléaire installée en France déployée en centrales à charbon. En France, on a 60 gigawatts de nucléaire, ça fait à peu près 2000 gigawatts de centrales à charbon installées dans le monde.

On y reviendra au moment du cours sur le climat, mais l'accord de Paris – ça vous dit un petit quelque chose? –, exactement l'objectif des 2 degrés contenu dans l'accord de Paris suppose par exemple que la totalité de ces centrales à charbon ait disparu d'ici à ce que vous ayez mon âge. D'ici à ce que vous ayez mon âge – pas si loin que ça je vous assure –, il faut que la totalité des centrales à charbon mondiale ait disparu.

#### 14. IL FUT UN TEMPS, NOUS ÉTIIONS RENOUVELABLES ET DURABLES



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

Diapositive 28.

Après, les Hommes ont utilisé du pétrole.

Alors, ce que vous voyez sur ce graphique de manière absolument spectaculaire, c'est que le pétrole n'a jamais remplacé le charbon. Le pétrole n'a pas remplacé le charbon. Vous voyez que l'utilisation du pétrole par personne vient s'ajouter à l'utilisation du charbon par personne.

La raison, c'est que le pétrole ne sert pas du tout à ce à quoi sert le charbon. Le pétrole c'est l'énergie reine de la *mobilité*, parce que le pétrole est l'énergie qui a le meilleur ratio énergie transportée par unité de volume. Dans un litre, un décimètre cube, si vous mettez quelque chose qui vous sert à votre approvisionnement énergétique, il n'y a rien de mieux que le pétrole.

C'est liquide à température ambiante, donc c'est quelque chose qui se stocke et se transporte extrêmement facilement. Et comme c'est le plus dense par unité de volume, dans les modes de transport où vous devez emporter votre énergie avec vous – comme ça vous êtes sûr de pouvoir aller où vous voulez –, c'est le pétrole qui a gagné la manche haut la main parmi les modes de transport. Aujourd'hui, 98% de ce qui roule, vole ou navigue, utilise du pétrole.

#### 14. IL FUT UN TEMPS, NOUS ÉTIONS RENOUVELABLES ET DURABLES

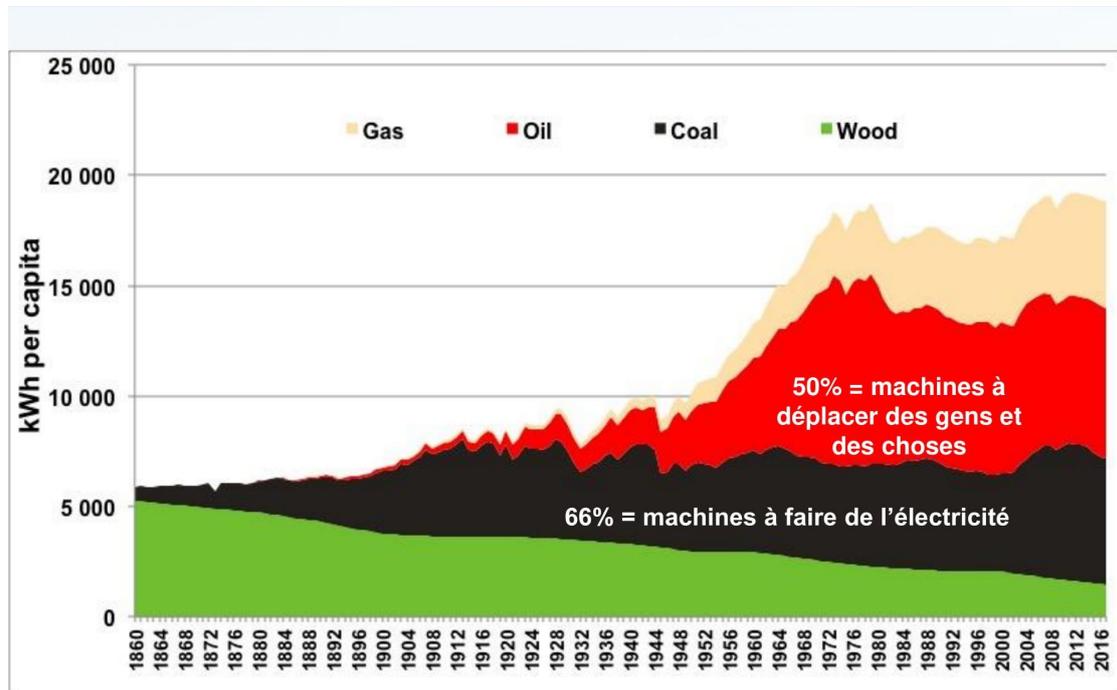
Alors je vous rappelle que la première voiture à avoir dépassé les 100 km/h dans le monde était une voiture électrique. Je vous rappelle également que le rendement du moteur électrique est trois à quatre fois supérieur au rendement du moteur à pétrole. Ce n'est pas parce que le moteur à pétrole est intrinsèquement supérieur qu'il a supplanté le moteur électrique dans la compétition qui a eu lieu il y a un siècle. C'est parce qu'avec l'électricité vous avez beaucoup plus de mal à emporter avec vous l'énergie qui vous permet d'être autonome. C'est ça la raison.

Vous voyez également quelque chose qui s'est produit avant votre naissance ici. L'arrêt soudain, je dis bien soudain, de la quantité de pétrole disponible par personne sur Terre. Cet épisode, il porte un nom un peu particulier dans l'histoire de l'énergie. Ça s'appelle *les chocs pétroliers*. J'y reviendrai longuement. Les chocs pétroliers, tout le monde a gardé en mémoire que c'est un moment où le prix est devenu très élevé puis après il est redevenu très bas, et « sujet suivant s'il vous plaît!, on oublie. »

En fait, on n'oublie pas du tout. C'est le moment où l'approvisionnement pétrolier croissait fortement, où il s'est arrêté de croître fortement alors que l'approvisionnement pétrolier par personne croissait fortement. Non seulement il s'est arrêté de croître mais ensuite il s'est mis à décroître puis à se stabiliser.

Les chocs pétroliers ne correspondent pas juste à un épisode de prix, qui est juste l'écume à la surface de la vague. La caractéristique majeure du choc pétrolier, c'est *l'arrêt d'un monde en expansion rapide*. Voilà ce que sont les chocs pétroliers et on va venir dans pas longtemps à ce que ça signifie en termes économiques.

14. IL FUT UN TEMPS, NOUS ÉTIONS RENOUVELABLES ET DURABLES

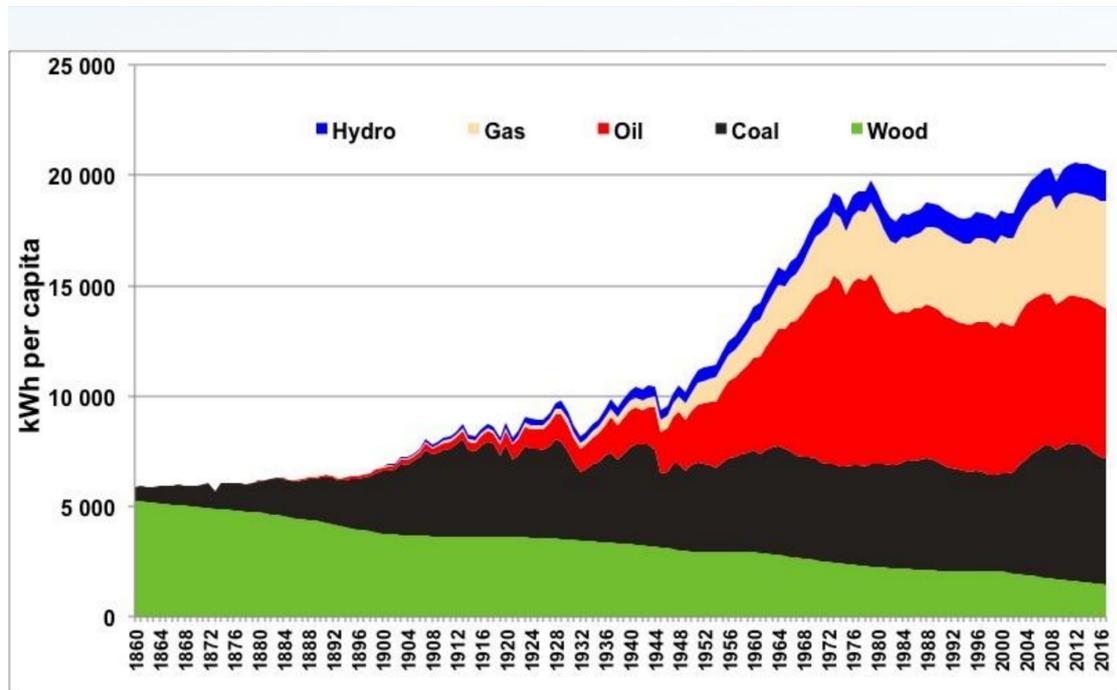


Consommation d'énergie par personne, moyenne mondiale 1860-2017. Jancovici, 2018

Diapositive 29.

Arrive le gaz. Le gaz, bis repetita, n'a pas remplacé le pétrole. Il est venu s'ajouter par-dessus.

14. IL FUT UN TEMPS, NOUS ÉTIONS RENOUVELABLES ET DURABLES

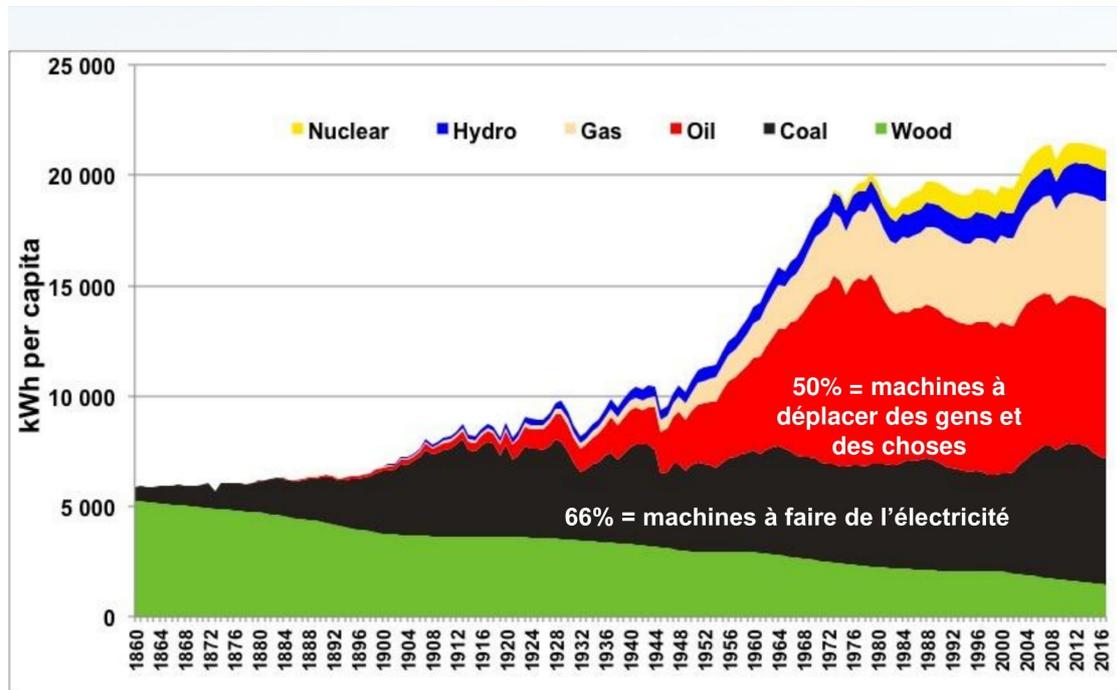


Consommation d'énergie par personne, moyenne mondiale 1860-2017. Jancovici, 2018

Diapositive 30.

Arrive l'hydroélectricité. Pareil, l'hydroélectricité est venue s'ajouter par-dessus.

14. IL FUT UN TEMPS, NOUS ÉTIONS RENOUVELABLES ET DURABLES

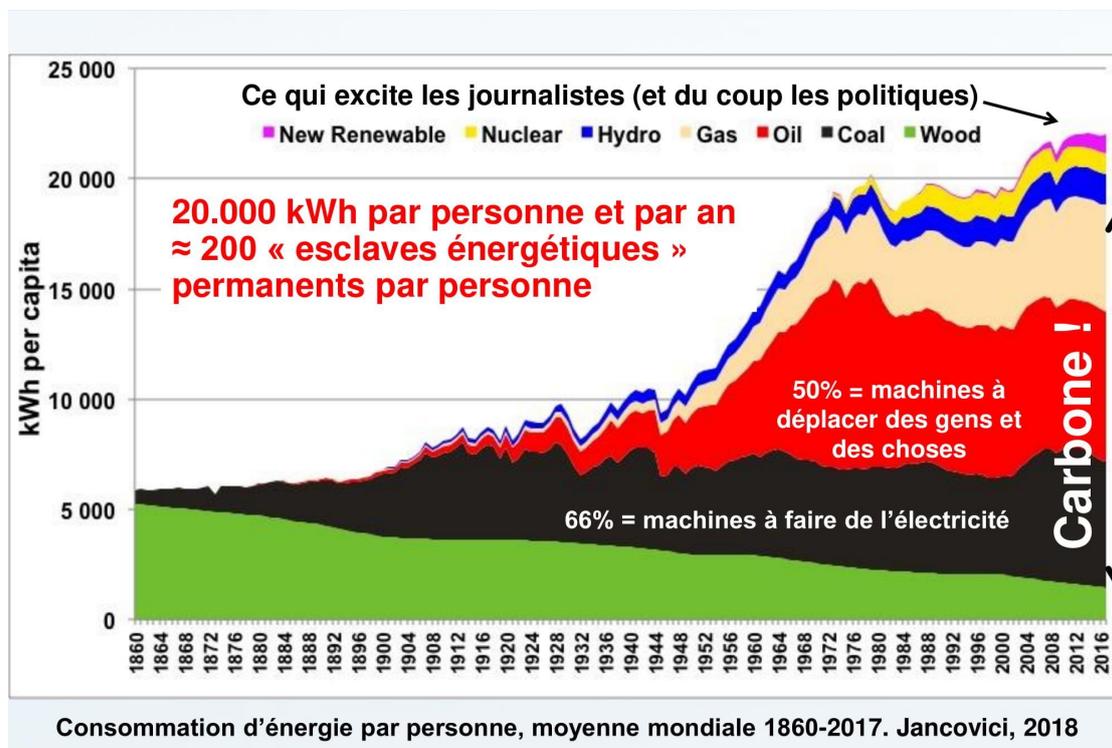


Consommation d'énergie par personne, moyenne mondiale 1860-2017. Jancovici, 2018

Diapositive 31.

Arrive le nucléaire, qui est venu s'ajouter par-dessus.

## 15. Miam-miam kWh



Diapositive 32.

Maintenant arrivent les nouvelles énergies renouvelables que vous voyez là et qui est le truc dont tout le monde parle. On ne parle plus que de ça : les nouvelles énergies renouvelables.

Vous avez ici, rapporté à l'individu, ce que représentent ces nouvelles énergies renouvelables dans le monde. Comme je suis, malgré les apparences, un type sympa, j'ai pris la convention de conversion la plus sympathique possible pour les comptabiliser. Parce que, comme beaucoup de ces énergies sont des énergies purement électriques (le solaire et l'éolien), vous avez deux manières de les comptabiliser.

Vous avez deux manières de comptabiliser l'énergie électrique dans les bilans énergétiques. Comme historiquement l'essentiel de l'électricité a été produite avec des modes thermiques, (les centrales électriques sont des machines de Carnot pour l'essentiel) vous brûlez du charbon, vous brûlez du gaz, vous brûlez du pétrole, vous faites fissionner de l'uranium, ça vous fait de la chaleur et avec cette chaleur, vous actionnez une turbine. Ce sont des machines de Carnot.

## 15. MIAM-MIAM KWH

Dans une machine de Carnot vous avez un rendement maximum  $1 - T_2/T_1$  et souvent, on compte l'électricité en équivalent primaire. C'est-à-dire on compte l'énergie thermique qui aurait été nécessaire pour faire la même quantité d'électricité pour les modes qui sont purement électriques, l'hydroélectricité en tête, le solaire et l'éolien. C'est la convention que j'ai utilisée pour ce graphique.

Il n'empêche qu'aujourd'hui, c'est quelque chose qui a beaucoup plus de place dans la pagination du journal que ça n'en a dans la consommation effective d'énergie dans le monde. Vous allez voir dans pas longtemps que non seulement c'est vrai en valeur absolue mais que, malheureusement, c'est vrai aussi en dynamique.

Par contre, une autre chose qui est capitale quand on regarde ce graphique c'est qu'aujourd'hui, la quantité d'énergie mobilisée par personne et par an (d'énergie extracorporelle, je devrais préciser) est de l'ordre de 20 000 *kilowatt-heure* : un Terrien mobilise en moyenne, au travers de l'énorme exosquelette que constitue le parc de machines, 20 000 kilowatt-heure par personne et par an.

Avec la petite équivalence que je vous ai donnée tout à l'heure – c'est en énergie primaire, en énergie thermique donc en énergie mécanique ça ferait moins évidemment – en remplaçant des jambes et aussi des bras, c'est comme si, en gros, chaque Terrien avait à sa disposition 200 personnes, 200 esclaves qui bossaient pour lui en permanence.

Je vais vous le dire autrement : le parc de machines que nous avons constitué qui travaillent pour nous a la même force mécanique que si notre puissance musculaire était multipliée par 200. Donc vous êtes, je suis, nous sommes, devenus Superman pour de vrai. Ce n'est pas une vue de l'esprit. Sauf, qu'au lieu, comme Popeye de s'engouffrer une boîte d'épinards et devenir surpuissants, nous, on s'engouffre un baril de pétrole et on devient surpuissant. Enfin pas nous, mais notre exosquelette, c'est-à-dire les machines.

Je vais vous le redire encore autrement : la production matérielle de l'humanité aujourd'hui à 7 milliards d'individus est équivalente en volume, à cause des machines, à ce qu'on aurait si nous avions 1400 milliards d'individus et pas de machines. C'est clair ?

Évidemment, on n'a pas les moyens de nourrir 1400 milliards d'individus sur Terre. En fait, grâce à l'énergie et grâce aux machines, nous avons été capables de développer une capacité productive qui est sans commune mesure avec la puissance musculaire de notre organisme et nous passons notre journée à utiliser des prothèses. Le RER qui m'amène ici est une prothèse. C'est un prolongement de mes jambes. La voiture que vous utiliserez peut-être et l'avion

## 15. MIAM-MIAM KWH

encore plus, ce sont des prothèses. Ce sont des prolongements de nos jambes. On passe son temps à utiliser des prothèses.

L'essentiel de cette énergie est « fossile ». Pourquoi fossile ? Tout simplement parce que c'est des restes de vie ancienne. Un fossile, c'est très simple encore une fois, ça a une définition : c'est un reste de vie ancienne. On verra ça au prochain cours, le charbon est un reste de vie végétale, des fougères qui ont poussé à l'ère du charbon, au carbonifère, et le pétrole et le gaz sont des restes de plancton et de micro-algues qui ont vécu n'importe quand entre il y a quelques millions d'années et quelques centaines de millions d'années.

*Donc c'est l'énergie fossile, et de très loin, qui domine l'approvisionnement mondial aujourd'hui.*

## 16. Les voici, nos esclaves des temps modernes!



Diapositive 33.

Et cette énergie a permis de mettre en mouvement un exosquelette croissant qui a fait de chacun d'entre vous et de chacune d'entre vous Ironman pour de vrai. Nous sommes tous devenus Ironman pour de vrai. On n'a pas la petite lumière qui brille au centre et les machins devant les yeux mais c'est exactement ça. Voilà des petits bouts de votre costume d'Ironman et du mien : des machines à laver, des ascenseurs, des aspirateurs, des tracteurs, des tractopelles, des fusées Ariane, des satellites, des épurateurs d'eau, des laminoirs, des tréfileurs, etc. Toutes ces machines sont des petits bouts de votre costume d'Ironman.

Sans ce costume d'Ironman, vous auriez la vie qu'avaient les paysans français il y a quelques siècles avec 30 ans d'espérance de vie à la naissance, aucune augmentation du revenu entre la naissance et la mort. L'idée que le revenu augmente avec l'âge, c'est une idée moderne, ça n'existait pas dans les temps anciens.

Ce qui a littéralement changé la vie de l'humanité c'est l'énergie et le parc de machines qui permet de s'en servir. Voilà pourquoi le fait que ça ne vaille que

## 16. LES VOICI, NOS ESCLAVES DES TEMPS MODERNES!

3% de ce que l'on dépense est une illusion d'optique! *C'est au centre de 100% de ce qui vous arrive.* De 100%!

En fait, avec la petite convention économique que je vous ai montrée tout à l'heure, cela revient à dire que l'énergie aujourd'hui et le parc de machines qu'il actionne est 200 fois la puissance musculaire des Hommes. Si la comptabilité était accordée avec cette réalité physique, dans les comptes des entreprises, l'énergie devrait valoir 200 fois plus cher que les salaires. C'est ce qui devrait se passer. Votre salaire à l'embauche devrait être en gros, divisé par un facteur 1000. C'est à peu près ce qu'on devrait faire si on devait avoir le même rapport comptable sur les coûts que le rapport physique sur la contribution à la transformation du monde.

Je vais vous le dire encore autrement parce que je vais y venir dans pas longtemps : les Hommes aujourd'hui pour la production ne sont nécessaires que pour piloter des machines. Pour le reste, ils ne servent à rien. Pour l'essentiel des boulots qu'on fait aujourd'hui dans le monde, je vous coupe vos deux bras, vos deux jambes, et je vous permets de commander un ordinateur avec votre cervelle, ça marche encore. Ça marche encore!

Cet exosquelette, avec son énergie bien à lui, permet d'avoir une capacité productive démultipliée. En moyenne mondiale c'est 200 le facteur, mais en moyenne française c'est plutôt 600. Donc le Gilet Jaune français, qui ne s'en rend pas compte vit quand même comme un « nabab » – là réside la vérité politique indicible –. Il vit comme un « nabab »! Ce qui l'embête, c'est que Bernard ARNAULT vit encore plus comme un « nabab » que lui – et il a probablement raison de le penser – mais, en attendant, il vit comme un « nabab », déjà lui. À cause de son exosquelette.

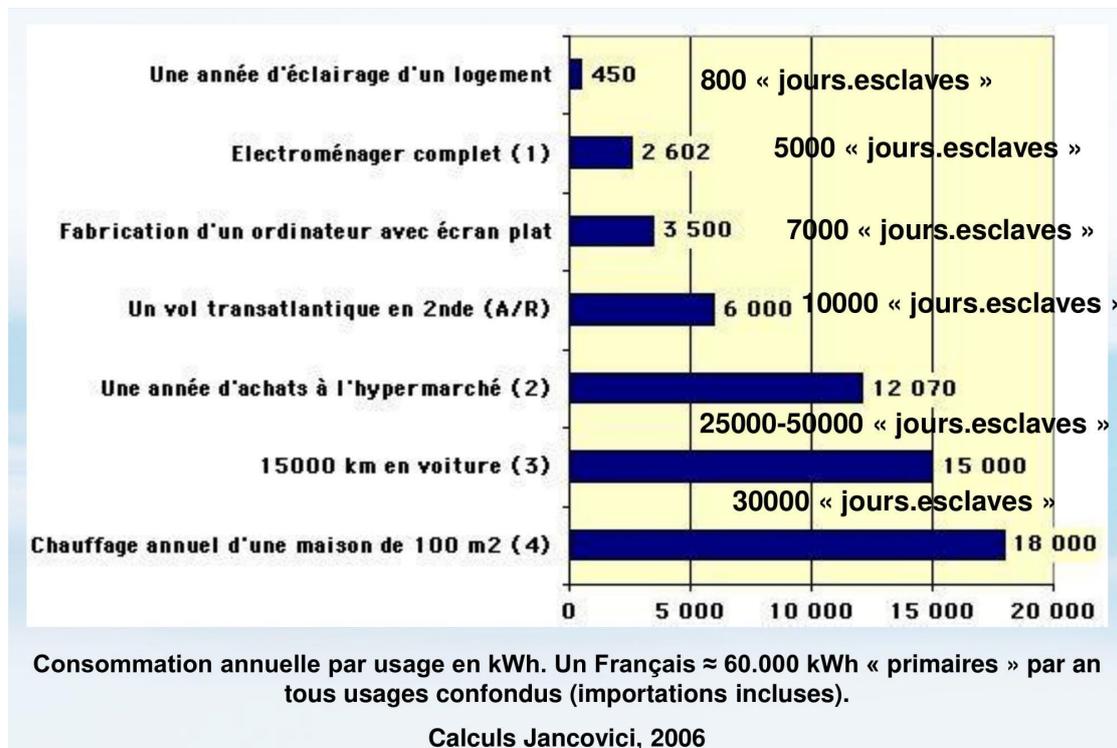
Ces esclaves des temps modernes ont un autre avantage absolument considérable par rapport aux énergies renouvelables des temps anciens, c'est qu'ils nous libèrent toute la surface pour nous. Parce que les esclaves énergétiques des temps anciens, soit les énergies renouvelables, soit les autres organismes vivants dont on avait besoin, mobilisaient du sol. Un animal de trait mobilise du sol. Donc, le sol qui est nécessaire pour nourrir l'animal de trait n'est plus disponible pour nourrir les Hommes ou un animal de transport. À l'époque, on avait besoin, notamment dans l'agriculture, de mobiliser une grande partie des surfaces pour nourrir les animaux de trait et être capable de cultiver le reste des surfaces pour les Hommes avec eux.

Les esclaves des temps modernes, eux, mangent du sous-sol, ils nous laissent la totalité de l'espace disponible pour nous. C'est une des raisons pour lesquelles, quand on parle de revenir aux énergies renouvelables, vous voyez apparaître des conflits d'usage des sols.

## *16. LES VOICI, NOS ESCLAVES DES TEMPS MODERNES!*

Par exemple, faire pousser des cultures à des fins énergétiques vient directement en conflit avec les cultures à usage alimentaire. Ce qui veut dire qu'on est obligé, pour une partie de l'énergie qu'on utilise, de revenir au sol par rapport à l'avantage qu'on avait eu de se contenter de taper dans le sous-sol. On revient à un système en deux dimensions, alors qu'on avait réussi à passer à un système en trois dimensions.

## 17. En kWh, les Hommes sont très primaires...



Diapositive 34.

Quelques ordres de grandeurs d'usage énergétique courant.

Ce truc est très vieux, mais l'ordre de grandeur est toujours valable. Il y a probablement un facteur 2 à la baisse qui s'est baladé pour certains d'entre eux, mais ce n'est pas grave, ça vous fixe des idées.

Tout ce que vous voyez, je peux le traduire en jour d'esclaves, ce que j'ai fait. Retenez surtout, en regardant ce graphique, que l'essentiel de la consommation d'énergie d'un Occidental, donc des machines qu'il mobilise à son profit, ce n'est pas la lumière et ce n'est pas les tasses à café recyclables.

Je vais m'adresser à des ingénieurs qui sont censés manipuler les ordres de grandeur : *ce n'est pas avec des petits gestes qu'on évite des gros problèmes*. On peut avoir des petits gestes pour s'attaquer aux gros problèmes mais ça ne remplace pas le fait de s'attaquer au gros problème.

Je vous le dis parce que dans le monde dans lequel je vis, qui est le monde des entreprises, il est quand même très, très fréquent qu'on fasse une confusion

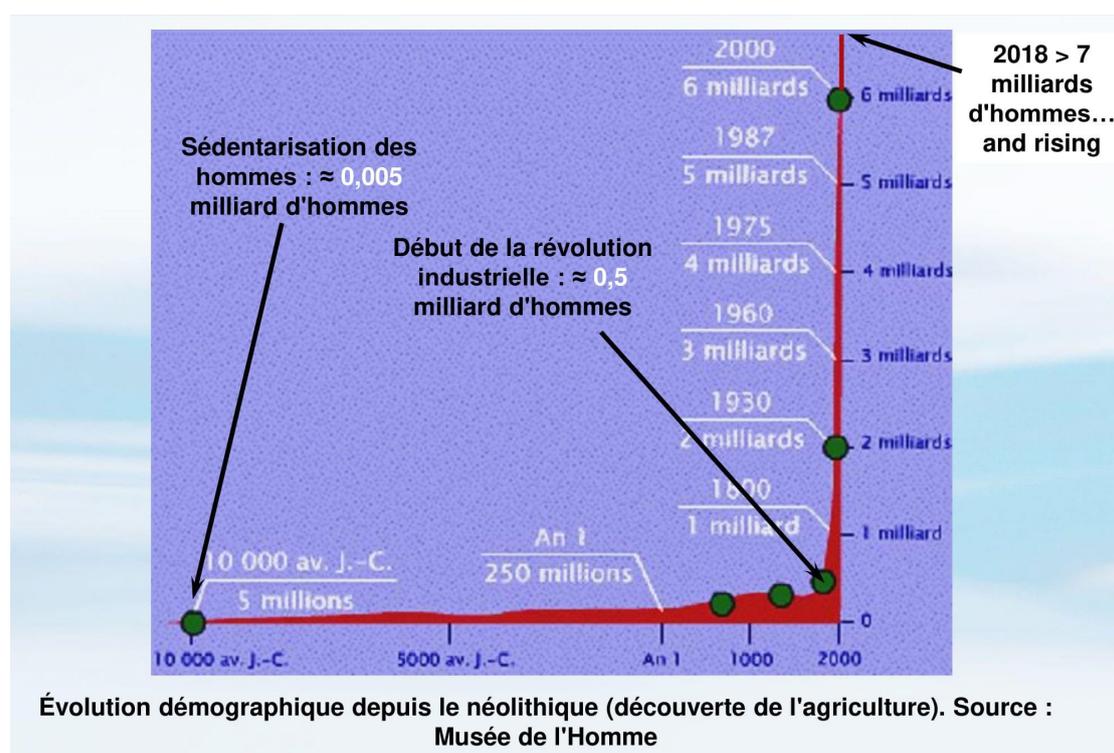
## 17. EN KWH, LES HOMMES SONT TRÈS PRIMAIRES...

sur les ordres de grandeur de façon délibérée! On se cache derrière son petit doigt en disant : « Regardez! C'est fabuleux, j'ai installé une ruche sur le toit, j'ai mis des gobelets recyclables à la cantine, et un jour par an les gens vont venir en vélo, etc. » Non, ça ne marche pas comme ça, évidemment.

Ici vous avez quelques ordres de grandeur sur des consommations énergétiques. Vous voyez que ce qui va peser très, très lourd, c'est *ce que l'on achète et la façon dont on se déplace*. Quand on parlera changement climatique, on verra aussi que la façon dont on mange est quelque chose de significatif et la façon dont on se loge.

Donc, en gros, la taille du logement qu'on occupe, l'énergie qu'on utilise pour l'occuper, la quantité de trucs qu'on achète dans l'année, la façon dont on se déplace et le nombre de kilomètres qu'on fait dans l'année, sont beaucoup plus impactants que le fait d'éteindre la lumière ou pas derrière soi quand on sort d'une pièce. *Ce n'est pas du tout le même ordre de grandeur.*

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



Diapositive 35.

Dans le même temps que, par personne – parce que jusqu'à maintenant je vous ai parlé de quantités « par personne » –, les ordres de grandeur ont fondamentalement changé, *la taille de la population a aussi fondamentalement changé.*

Vous avez ici une reconstitution de la population humaine – approximative évidemment, parce qu'il y a dix mille ans l'INSEE était un peu moins performante qu'aujourd'hui.

Pourquoi ce graphique démarre-t-il y a dix mille ans? C'est la date de la sédentarisation des Hommes. C'est-à-dire qu'il y a dix mille ans – on verra ça au moment du cours sur le changement climatique –, nous sortons, nous terminons la sortie de la dernière ère glaciaire. Nous arrivons au début de l'ère interglaciaire chaude qui est celle qu'on a connue jusqu'au moment où on a commencé à mettre en route le changement climatique d'origine humaine.

## 18. AUTRE CHANGEMENT D'ORDRE DE GRANDEUR : LA POPULATION

C'est une période de stabilité très forte du climat qui permet la sédentarisation des Hommes. À climat stable, la ressource qui vous permet de vous nourrir ne se balade pas un peu partout, parce qu'elle se balade au gré du climat qui change. Elle reste toujours au même endroit, donc vous pouvez commencer à vous sédentariser.

À ce moment-là, les Hommes sont quelques millions sur Terre – je le dis encore une fois, l'INSEE n'est pas extrêmement performante à cette époque-là.

Au début de la révolution industrielle, l'espérance de vie à la naissance des habitants de la planète Terre en 1800 est d'un peu moins de 30 ans. Soit dit en passant, elle était inférieure en ville qu'à la campagne parce qu'à l'époque, la ville était un lieu de concentration des miasmes de toutes sortes, donc dès qu'il y avait une maladie, c'était beaucoup plus facile de l'attraper et d'en mourir que quand vous étiez à la campagne. Vous aviez également la même chose pour la mortalité infantile. En 1800 on est un milliard.

Ce que vous voyez, c'est qu'en l'espace de deux siècles, on a connu une évolution plus proche de l'hyperbole que de l'exponentielle, dans le même temps où la quantité de ressources de toutes sortes consommées par individu a également cru.

Une partie des gens que je connais, moi inclus, se pose la question de savoir si cette évolution démographique aurait pris place si on n'avait pas eu l'énergie abondante. Parce que si on n'avait pas eu l'énergie abondante,

- *ce n'est pas complètement sûr* que les rendements céréaliers seraient passés de 10 à 80 quintaux/hectare en Île-de-France,
- *ce n'est pas complètement sûr* qu'on aurait pu partout transporter de la nourriture de là où elle pousse à là où on en a besoin,
- *ce n'est pas complètement sûr* qu'on aurait su la préserver contre le chaud, le froid et toutes les petites bêtes qui ont envie de la manger à notre place,
- *ce n'est pas complètement sûr* qu'on aurait pu amener l'eau potable et évacuer les miasmes des villes, etc.

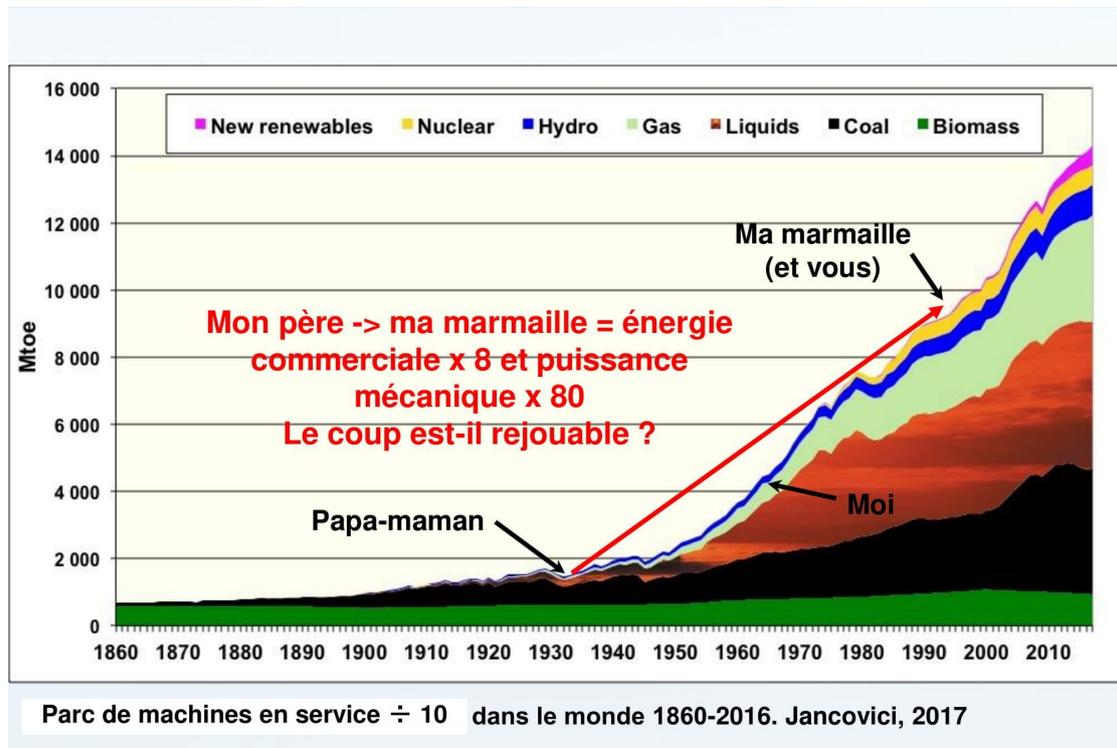
Tout un tas de trucs ne sont *pas complètement sûrs* dans un monde où on n'aurait pas eu l'énergie fossile et donc *ce n'est pas complètement sûr qu'on serait passé à 7 ou 8 milliards d'individus*.

Et si la question se pose de savoir si 7 ou 8 milliards d'individus ce n'est pas une conséquence de l'énergie abondante, à ce moment évidemment, la question corollaire qui se pose est : à partir du moment où l'on entre en décrue

## 18. AUTRE CHANGEMENT D'ORDRE DE GRANDEUR : LA POPULATION

énergétique forte, est-ce que l'on reste à 8 milliards d'individus? *Ce n'est pas complètement sûr non plus.*

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



Diapositive 36.

Si je fais : « population *fois* usage individuel », voilà ce à quoi j'aboutis sur la quantité totale d'énergie utilisée par les Hommes. C'est-à-dire, en gros, l'évolution du parc de machines, sachant que depuis 1930, il faut beaucoup moins d'énergie pour faire fonctionner une machine, parce que vos prédécesseurs et les miens ont été astucieux sur la manière de faire fonctionner les machines, et donc ont gagné en efficacité. Donc, ce que vous voyez là, c'est un minorant du parc de machines en fonctionnement dans le monde. Sur 1860-1930, à mon avis, on est proche du parc de machines, ensuite, c'est plutôt un dixième du parc de machines en fonctionnement dans le monde.

Ce que vous voyez c'est que, entre la génération de mes parents et la génération de mes enfants, la quantité d'énergie utilisée par les Hommes a été multipliée par un petit facteur 10 et, à mon avis, avec le gain d'efficacité énergétique qu'il y a eu dans le même laps de temps, le parc de machines en fonctionnement dans le monde, a été multiplié par un facteur de quelques dizaines.

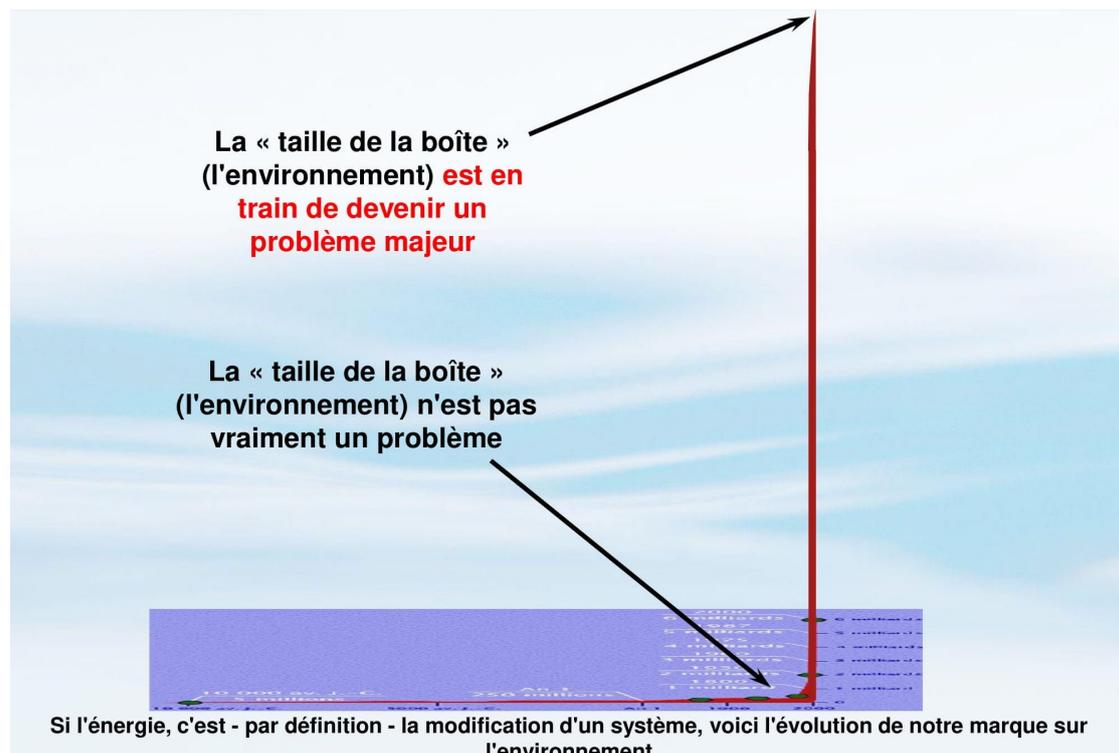
Ce n'est pas complètement certain qu'entre vous et la génération de vos petits-enfants il se passe la même chose. C'est même assez certain qu'il ne va

## *19. GAZ ET ÉLECTRICITÉ À TOUS LES ÉTAGES : AU RÉSULTAT*

pas se passer ça. C'est assez certain que le monde que vous allez connaître, et moi aussi pour les quelques décennies qui me reste à vivre, si tout va bien, ne sera pas un monde de prolongation tendancielle de ce que nous avons eu dans le passé.

Je vous rappelle que les systèmes physiques sont exceptionnellement des systèmes linéaires. En général, ce sont des systèmes non linéaires. Et que, dans les systèmes non linéaires, vous ne pouvez pas raisonner par induction. Il vaut mieux éviter.

## 20. Population × 1000 + énergie × 10 = croissance attitude



Diapositive 37.

Si je regarde la marque de l'Homme sur son environnement, je peux l'approximer par la quantité d'énergie qu'il met en jeu puisque, je le redis, la quantité d'énergie qu'on met en jeu, c'est le flux de transformation que nous opérons, par définition-même de ce qu'est l'énergie.

Pour ça, je prends l'énergie par personne *fois* la population et ça me donne quelque chose qui ressemble à l'évolution de la marque de l'Homme sur son environnement.

Je prends la population, je la multiplie par l'énergie utilisée par personne et voilà, au premier ordre, comment a évolué la marque de l'Homme sur son environnement sur une planète qui faisait 13 000 kilomètres de diamètre à ce moment-là et qui fait toujours 13 000 kilomètres de diamètre à ce moment-là.

Donc, vous comprenez que les problèmes d'environnement qu'on a aujourd'hui ne sont pas nécessairement des problèmes qui se qualifient de façon dif-

## 20. POPULATION × 1000 + ÉNERGIE × 10 = CROISSANCE ATTITUDE

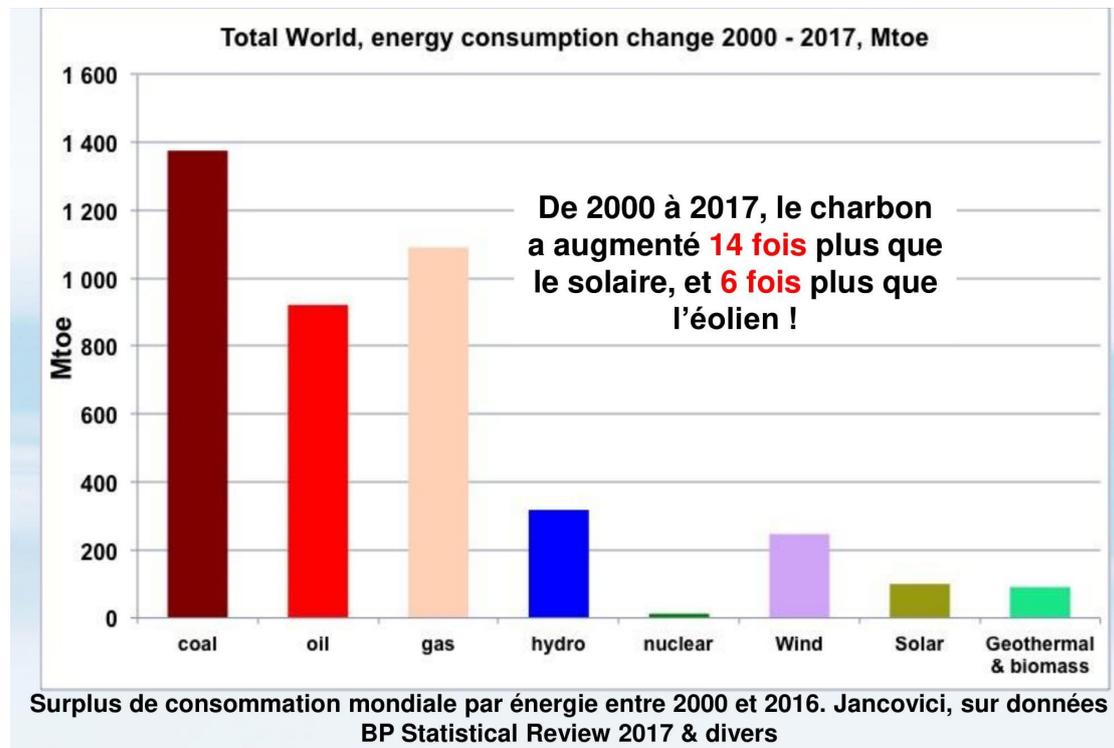
férente par rapport à ce qu'on avait dans le passé. Par contre, ils se *quantifient* de façon différente par rapport à ce qu'on avait dans le passé.

Nous avons aujourd'hui un tout petit *problème d'ordre de grandeur*. Et quand vous voyez ça, vous comprenez aussi qu'on a un tout petit peu mis le système hors d'équilibre et que ce n'est pas complètement sûr qu'il va rester dans cet état pendant extrêmement longtemps.

Là, je suis en train de vous préparer à quelque chose que je vous détaillerai dans d'autres cours qui est le fait qu'il va se passer de toute façon des choses à l'avenir, et de toute façon, à l'avenir, *le monde ne restera pas stable*. De toute façon!

Donc, nous avons, vous avez, j'ai essentiellement le choix entre : « j'attends que l'instabilité arrive comme elle a envie d'arriver et je la subis », et : « je déclenche l'instabilité dans les limites de ce que j'arrive encore à peu près à contrôler ». Mais ce sera l'un ou l'autre.

## 21. King Coal is back



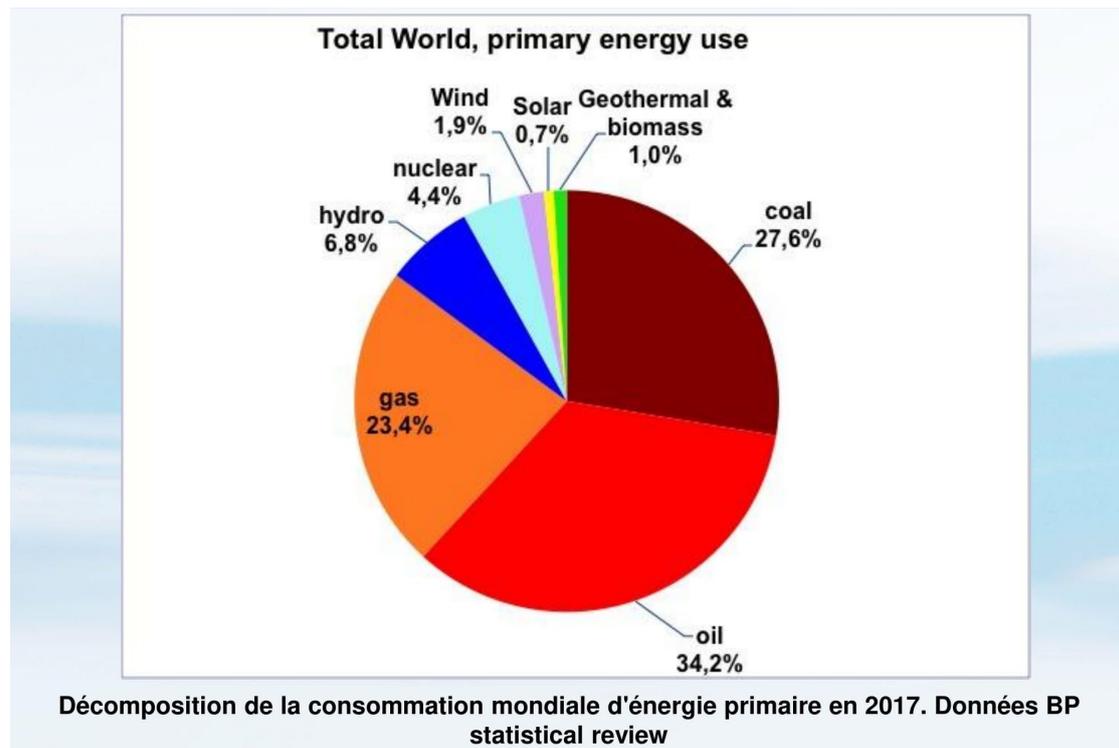
Diapositive 38.

Deux petits compléments sur l'évolution de la quantité d'énergie utilisée dans le monde.

Vous avez ici la variation de la quantité d'énergie utilisée par les Hommes entre 2000 et 2017. Ce que vous voyez, c'est que – nonobstant le discours médiatique sur le fait que c'est vachement bien parce qu'on a de plus en plus de production éolienne et solaire – les trois énergies qui ont le plus augmenté sur la période, et de très loin, sont les trois énergies fossiles et en particulier le charbon. *L'énergie fossile qui a le plus augmenté depuis qu'on a commencé à faire des grands débats sur le climat, c'est le charbon !*

Sur cette période, le charbon a augmenté plus de 10 fois plus que le solaire compté en équivalent primaire et plus de 5 fois plus que l'éolien. Si le journal avait une pagination reflétant les faits, pour un article vous parlant du solaire, il devrait y en avoir 15 vous parlant du charbon.

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

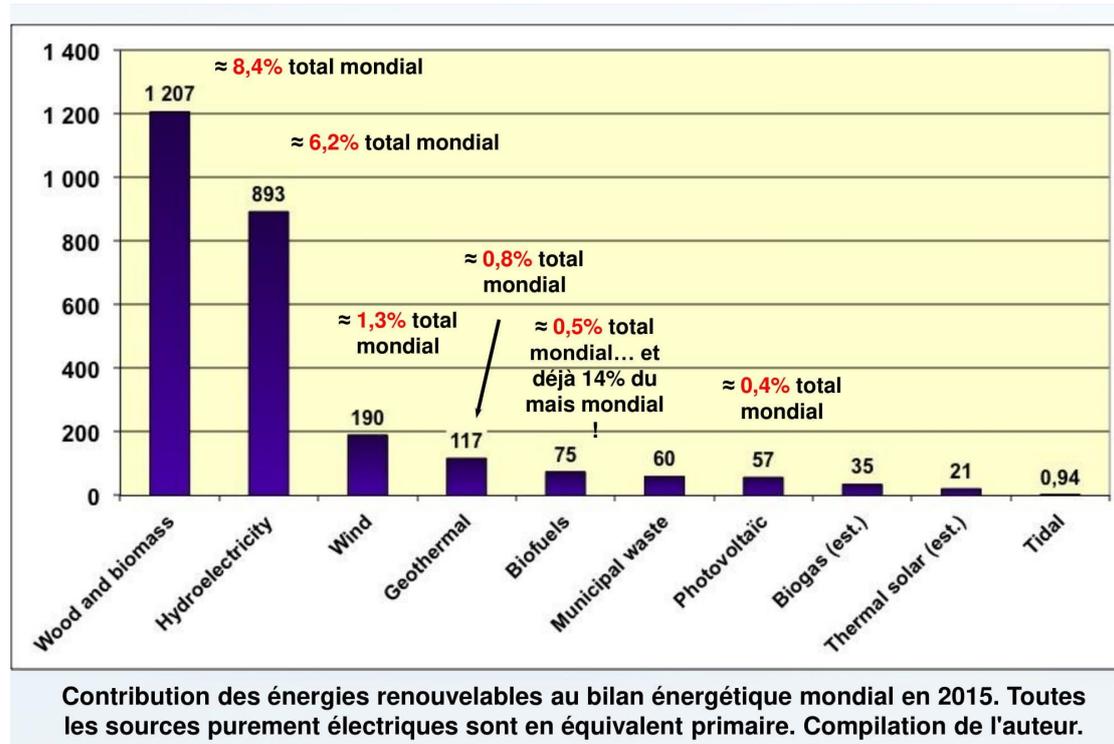


Diapositive 39.

Après avoir vu l'évolution historique, si vous regardez aujourd'hui ce que vous avez comme approvisionnement, vous voyez que ce sont les combustibles fossiles qui dominent l'approvisionnement mondial de la tête et des épaules.

En premier lieu, le pétrole, ensuite le charbon et le gaz.

## 23. Quid des énergies renouvelables ?



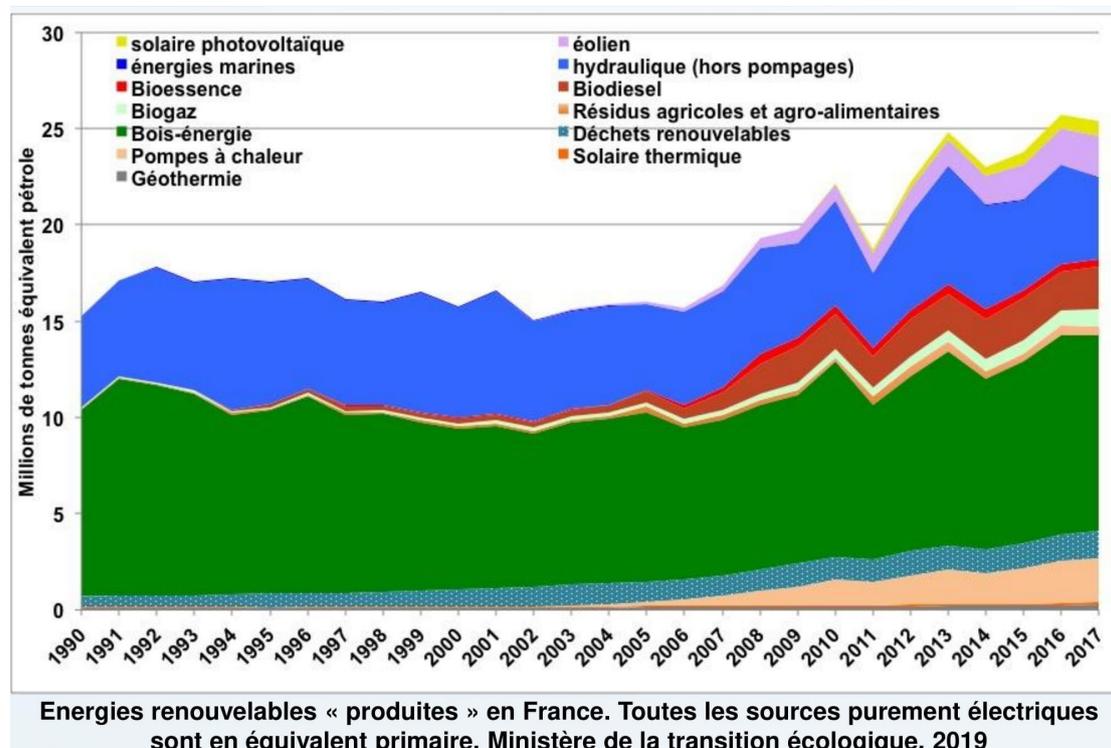
Diapositive 40.

Si vous regardez juste les énergies renouvelables, vous voyez que ce qui arrive en tête c'est le bois, suivi de l'hydroélectricité.

Je vous signale que les deux premiers termes de l'approvisionnement renouvelable de la France, ce sont les deux mêmes : le bois et l'hydroélectricité.

Ce n'est pas parce que le journal, à nouveau, vous parle d'éolien et de solaire, que c'est ce qui compte le plus dans l'approvisionnement renouvelable français, ce sont, de très loin, le bois et l'hydroélectricité, les termes suivants sont beaucoup, beaucoup plus faibles.

## 24. Quid des énergies renouvelables tricolores ?



Diapositive 41.

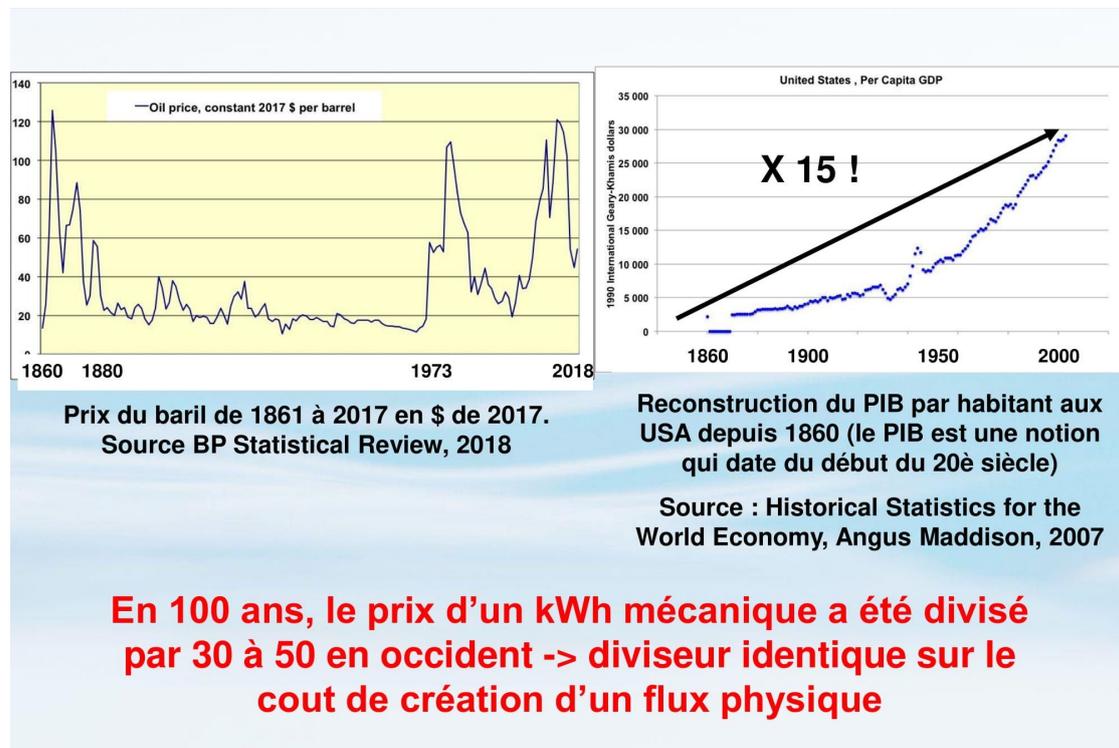
Voilà l’approvisionnement renouvelable français. Petit graphique que j’ai fait pas plus tard qu’hier avec des statistiques qui ont été publiées pas plus tard qu’il y a quinze jours.

Vous voyez que les deux premiers termes, de très loin, de l’approvisionnement renouvelable français, sont *le bois*, qui sert essentiellement au chauffage, et *l’hydroélectricité*, qui sert à faire de l’électricité.

Vous voyez que le solaire est, en fait, un des termes les plus faibles de l’approvisionnement renouvelable français derrière plein d’autres trucs, les pompes à chaleur, les déchets, etc.

Vous voyez ce que représentent les énergies renouvelables dans l’ensemble de la consommation française, qui fait à peu près 250 millions de tonnes-équivalent-pétrole – je vous avais dit que vous parlerais de tonnes-équivalent-pétrole.

## 25. L'énergie plus chère? Allons donc!



Diapositive 42.

Maintenant, je vais revenir un tout petit peu aux prix.

Vous avez probablement, pour certains d'entre vous, entendu dire – j'y reviendrai au prochain cours mais je vais déjà faire un petit aperçu aujourd'hui –, que le prix de l'énergie doit fortement augmenter si l'énergie devient plus rare ; ce qui a comme corollaire qu'une énergie plus abondante devrait voir son prix fortement baisser.

En fait, le prix de toutes les énergies est plus ou moins asservi au prix du pétrole. Ici vous avez le prix du pétrole exprimé en monnaie constante, c'est-à-dire en monnaie corrigée de l'inflation depuis un siècle et demi.

Vous voyez quelque chose d'assez intéressant : le prix du pétrole, sur tendance longue, est rigoureusement stable pendant un siècle, exprimé en monnaie constante, indépendamment de la quantité produite.

Vous voyez qu'au moment du choc pétrolier qui caractérise une forte variation de la dérivée, c'est-à-dire que la production monte rapidement et s'arrête

## 25. L'ÉNERGIE PLUS CHÈRE? ALLONS DONC!

de monter rapidement, le prix augmente fortement puis revient plus ou moins à son niveau d'avant, puis un nouveau choc où le prix augmente fortement et revient à quelque chose qui n'est pas très, très loin de son niveau d'avant.

Donc, l'idée que le prix du pétrole est quelque chose qui suit l'abondance de l'offre n'est pas confirmée par le graphique que vous voyez là. Par contre, le vrai prix des choses, en fait, n'est pas le prix exprimé en monnaie, c'est le prix rapporté à la seule grandeur qui reste incompressible au cours du temps, c'est-à-dire 24 heures dans une journée.

Dit autrement, le vrai prix de n'importe quoi, n'est pas le prix exprimé en argent, *c'est le prix exprimé en minutes de temps de travail*. Si vous voulez exprimer un prix en minutes de temps de travail, vous devez rapporter un prix à ce que les gens gagnent. En l'occurrence, vous devez rapporter le prix du pétrole à ce que les gens gagnent, ce que vous voyez ici : c'est-à-dire le PIB par personne. À ce moment, on retombe sur nos pattes.

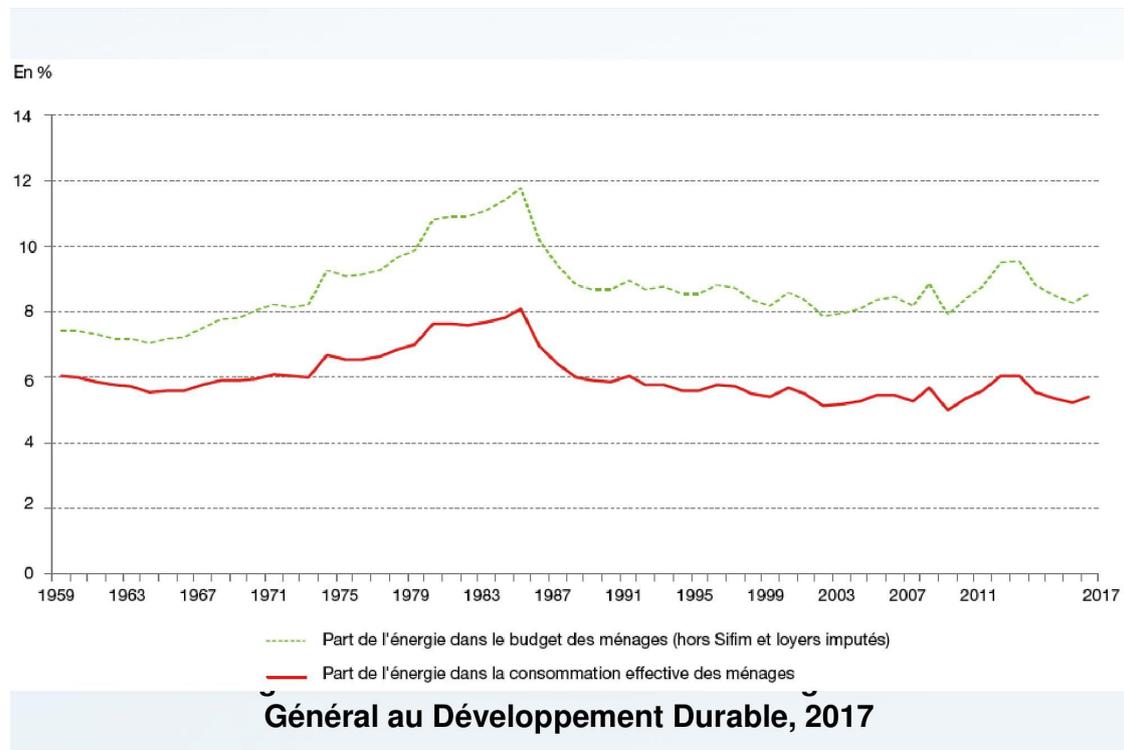
Vous voyez que, sur le siècle ou le siècle et demi qui vient de s'écouler, le prix d'un baril de pétrole a été divisé par, disons, 15 à 20, ce qui veut dire qu'avec l'efficacité des machines qui a augmenté dans le même temps, le prix d'un kilowattheure d'énergie mécanique, lui, a été divisé par 50 à 100.

On retrouve le même facteur diviseur que celui que vous avez quand on compare le prix d'une énergie renouvelable ancienne avec le prix d'une énergie fossile moderne. On va toujours retomber sur ce facteur diviseur ou ce facteur multiplicateur de quelques dizaines à une centaine, qui représente aussi le passage d'un être humain produisant avec ses bras et ses jambes à 200 équivalent-esclave par personne.

En gros, par quelque bout que vous preniez le problème, le passage de la civilisation renouvelable à la civilisation fossile a été l'apparition de Superman ou d'Ironman pour chacun d'entre nous avec une multiplication par un ordre de grandeur de la centaine à plusieurs centaines de la capacité d'action sur l'environnement.

Évidemment, du coup, tous les sous produits indésirables de cette capacité d'action ont aussi été *multipliés par plusieurs centaines*. On a supprimé beaucoup de surface pour les autres êtres vivants, c'est pour ça qu'il y a une perte de biodiversité. On a induit beaucoup de pollutions de toutes natures dans l'environnement. On est venu ajouter dans l'environnement tout un tas de substances indésirables à mesure qu'on augmentait les flux de transformation. C'en est une conséquence parfaitement logique.

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



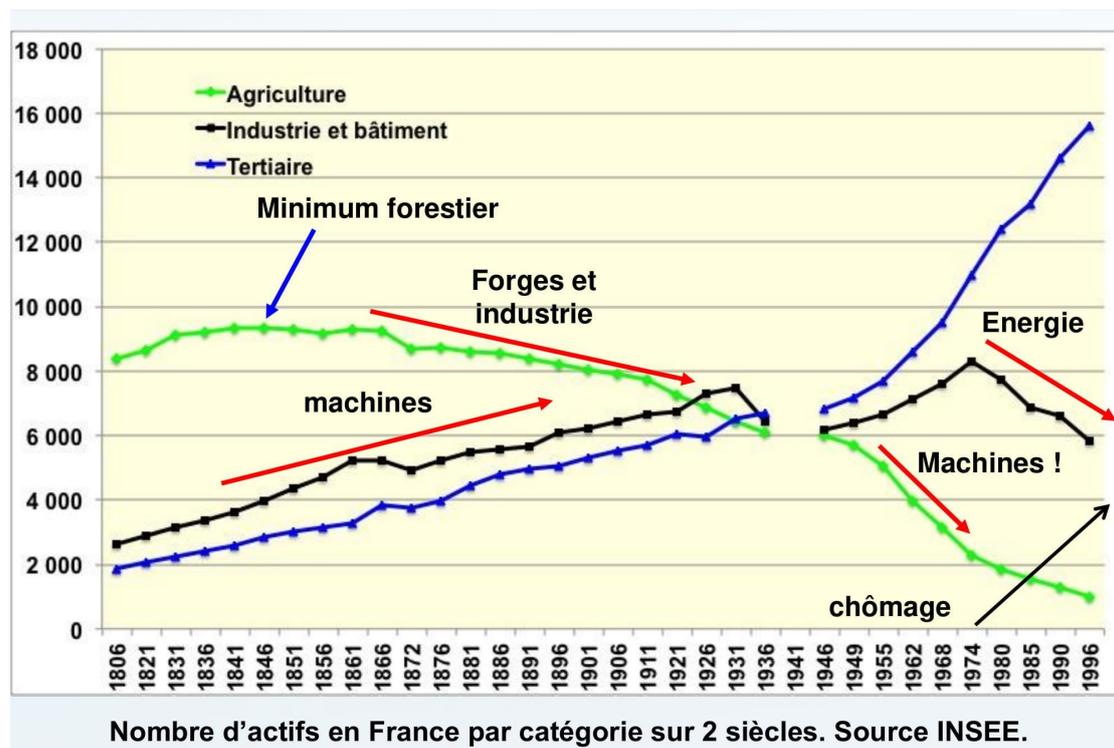
Diapositive 43.

Sur une période plus récente, vous voyez le prix de l'énergie rapporté à ce que les Français gagnent.

Vous voyez que les Gilets Jaunes ont peut-être raison, en tous cas ils ont sûrement raison pour leur cas particulier, mais ils ont tort pour la population dans son ensemble puisque le prix de l'énergie rapporté à ce que les gens gagnent, en première approximation, n'a à peu près jamais été aussi bas qu'aujourd'hui.

Donc, quand on dit : « Ah! Le litre d'essence à 1 euro 50! », c'est d'accord, sauf que l'on oublie que la fiche de paie des gens a augmenté à due proportion, et même un peu plus vite.

## 27. Plus d'énergie = tout le monde à l'usine, puis au bureau



Diapositive 44.

Je l'ai déjà dit de manière implicite, je vais le redire de manière plus explicite : cette énergie abondante vous permet d'être assis aujourd'hui dans cet amphithéâtre et, d'une façon générale, elle a radicalement changé le monde qui nous entoure en ce qui concerne le travail, les métiers.

La quasi-totalité des gens que vous connaissez aujourd'hui travaillent dans *les services*, travaillent *en ville* et travaillent dans *le tertiaire*. Je dis bien la quasi-totalité des gens que vous connaissez. C'est une situation très récente qui est la conséquence de l'augmentation de l'approvisionnement énergétique.

Vous avez ici l'évolution des effectifs salariés en France, décomposés en : agriculteurs en vert, ouvriers en noir, et employés des services en bleu. Ces trois courbes portent sur deux siècles.

J'ouvre une petite parenthèse. Plus vous avez des séries longues quand vous vous intéressez à un processus, mieux vous vous portez. La meilleure manière

## 27. PLUS D'ÉNERGIE = TOUT LE MONDE À L'USINE, PUIS AU BUREAU

de faire un contresens sur l'interprétation d'un processus est d'avoir une série qui est trop courte par rapport aux échelles caractéristiques de temps de variation de ce que vous êtes en train de regarder. Il faut avoir des séries un peu longues si on veut comprendre quelque chose.

Vous voyez qu'il y a deux siècles les deux tiers de la population active travaillent dans l'agriculture. Ce sont des paysans. Vous en déduisez que si les deux tiers de la population active sont dans les champs, c'est que la productivité d'un agriculteur à cette époque-là est suffisante pour se nourrir, lui, plus une demi-personne qui fait autre chose. C'est ce que ça veut dire : un agriculteur sait nourrir 1,5 personne.

Vous voyez qu'ensuite les effectifs dans l'agriculture augmentent doucement, doucement comme le volume de la production agricole, jusqu'en 1850. Que se passe-t-il à cette époque ? Vous n'avez pas, à cette époque, d'augmentation significative de la productivité agricole. En gros, un agriculteur de 1850 est à peu près aussi productif qu'un agriculteur de 1800, un peu plus mais pas beaucoup plus. Par contre, ce qui se passe, c'est que la population augmente, donc on coupe des forêts pour augmenter les surfaces cultivées. On déforeste alors en Europe, exactement comme on a fait ensuite aux États-Unis et en Russie, exactement comme on déforeste actuellement en Amérique Latine ou en Asie du Sud-Est.

À toutes époques, l'augmentation démographique a supposé pour les populations sédentaires que l'on coupe des forêts pour installer des surfaces cultivées à la place. C'est ce qu'ont fait les Européens, dont les Français. On coupe des forêts jusqu'au moment où il n'y en a plus beaucoup à couper.

En 1850, on passe par le minimum forestier : 15% de la France sont couverts de forêts, pas plus. Ces 15% couverts de forêts sont essentiellement des surfaces compliquées à cultiver, les montagnes notamment. (Aujourd'hui c'est 25%.)

Ensuite, l'industrie commence à développer des auxiliaires pour l'agriculture qui rendent l'agriculteur plus productif. On commence à développer des colliers de trait, des charrues, etc. C'est le début des forges et de l'industrie qui permet de multiplier les auxiliaires pour l'agriculteur. La première moissonneuse-batteuse, de mémoire, c'est la fin du XIX<sup>ème</sup> siècle, début du XX<sup>ème</sup> siècle. C'est tiré par des chevaux à l'époque, évidemment.

Donc, on amène aux agriculteurs des auxiliaires qui permettent de diminuer le nombre d'agriculteurs dans les champs pour les remplacer par des machines ou par des animaux de trait. À ce moment, évidemment, ça libère des bras pour qu'une partie des gens aillent faire autre chose et ça alimente – mais pas que – la croissance des effectifs dans les autres secteurs.

## 27. PLUS D'ÉNERGIE = TOUT LE MONDE À L'USINE, PUIS AU BUREAU

Après-guerre, pour le coup, Ironman arrive pour de vrai. Vous savez qu'Ironman est une création américaine, dans les comics de Marvel, ce sont vraiment les Américains qui apportent les tracteurs et les engrais qu'ils avaient commencé à développer chez eux. On remplace les effectifs humains et les animaux de trait par beaucoup plus efficace, c'est-à-dire les tracteurs et les engrais. Moyennant quoi, comme j'ai dit tout à l'heure mais je le répète : le rendement céréalier en Beauce par exemple a été multiplié par 6 à 8 entre 1945 et 1975. 6 à 8 ! Je ne sais pas si vous vous rendez compte.

À ce moment, on peut libérer énormément de paires de bras et de jambes qui sont dans l'agriculture pour les envoyer ailleurs. Où les envoie-t-on ? Dans l'industrie, ou dans l'artisanat, c'est la même chose.

Dans l'industrie et l'artisanat, on va être capable, grâce à l'approvisionnement énergétique croissant, de mettre en route une quantité croissante de machines et à chaque fois que j'ai une machine qui se met en route, j'ai besoin de quelqu'un pour la piloter. J'ai une chaîne de production de voitures, j'ai des ouvriers qui travaillent sur la chaîne. J'ai un marteau-piqueur, j'ai besoin d'un ouvrier pour actionner le marteau-piqueur. J'ai une grue, j'ai besoin de quelqu'un pour actionner la grue.

Donc on va construire de plus en plus de machines et il se trouve que l'approvisionnement énergétique à cette époque-là augmente – nous sommes aux Trente Glorieuses, vous avez vu la vitesse à laquelle le pétrole par personne augmente –, à ce moment-là, l'approvisionnement énergétique augmente plus vite par personne que la taille unitaire de la machine. C'est une course de chevaux.

Donc, malgré le fait que j'ai des machines de plus en plus grosses, je peux créer de plus en plus d'emplois parce que le flux, le parc de machines, en gros, augmente. Le parc de machines augmente parce que la taille unitaire de la machine augmente moins vite que l'approvisionnement énergétique par personne. Je peux donc augmenter le nombre de machines, donc augmenter le nombre d'emplois dans l'industrie.

Après les chocs pétroliers, c'est l'inverse : la taille unitaire de la machine continue d'augmenter alors que l'approvisionnement énergétique par personne s'arrête d'augmenter. À ce moment, j'ai besoin de moins en moins de monde pour piloter des machines, qui sont par ailleurs de plus en plus grosses et qui vont continuer à augmenter la production industrielle. La production industrielle en France a doublé entre 1974 et 2007.

Après les chocs pétroliers, on ne s'est pas désindustrialisé, on a fait une autre industrie : moins de chaussettes et plus d'avions. Par contre, la taille unitaire de

## 27. PLUS D'ÉNERGIE = TOUT LE MONDE À L'USINE, PUIS AU BUREAU

la machine a continué à augmenter alors même que l'approvisionnement énergétique par personne, lui, arrêta d'augmenter. On a donc diminué les effectifs dans l'industrie pour actionner des machines unitairement plus grosses et dont l'ensemble produisait plus. Mais là, je regarde le nombre de gens, pas la puissance productive.

Le nombre de gens baisse et une deuxième catégorie d'emplois augmente : des emplois asservis à l'industrie.

Il est très important d'avoir en tête que *les emplois de service n'existent pas sans flux physiques*. Un emploi de service comme enseignant, par exemple. Si vous n'avez pas des flux physiques pour faire un bâtiment d'enseignement, si vous n'avez pas des flux physiques pour amener les élèves et l'enseignant sur place, donc des moyens de transport, si vous n'avez pas des flux physiques pour faire du matériel pédagogique, des livres dans les temps anciens, des ordinateurs aujourd'hui, vous n'avez pas de système d'enseignement.

Prenez un médecin. Un médecin, si vous n'avez pas de quoi fabriquer des médicaments, du matériel médical, à l'hôpital des appareils d'imagerie, l'hôpital lui-même et les moyens de transport pour faire fonctionner tout ça, vous n'avez pas de médecins.

Si vous n'avez pas de voiture fabriquée, vous n'avez pas de banquier pour faire du crédit automobile, vous n'avez pas d'assureur pour assurer les automobiles, vous n'avez pas de moniteur d'auto-école pour apprendre à conduire et vous n'avez pas d'agent de police pour vérifier que les gens conduisent bien.

Tous ces emplois deviennent inutiles puisque ce sont des emplois de service dans un monde dans lequel vous n'avez pas le flux physique sous-jacent qui est de fabriquer les voitures.

Il faut se sortir de la tête – du reste je vais vous montrer les corrélations dans pas longtemps qui montrent qu'il faut vraiment se le sortir de la tête – l'idée qu'un monde riche en emplois de service est un monde dématérialisé. *C'est l'exact inverse*. Un monde riche en emplois de service est un monde dans lequel il y a énormément de flux à gérer et c'est pour ça que vous avez besoin d'énormément de gens pour vous en occuper.

Les emplois de service augmentent à mesure que la production industrielle augmente parce qu'il faut continuer, il faut gérer, il faut vendre, il faut assurer, il faut enseigner, etc. Vous voyez ensuite une période où les emplois de service continuent d'augmenter parce que la production industrielle continue d'augmenter, alors même que les emplois industriels se mettent à baisser.

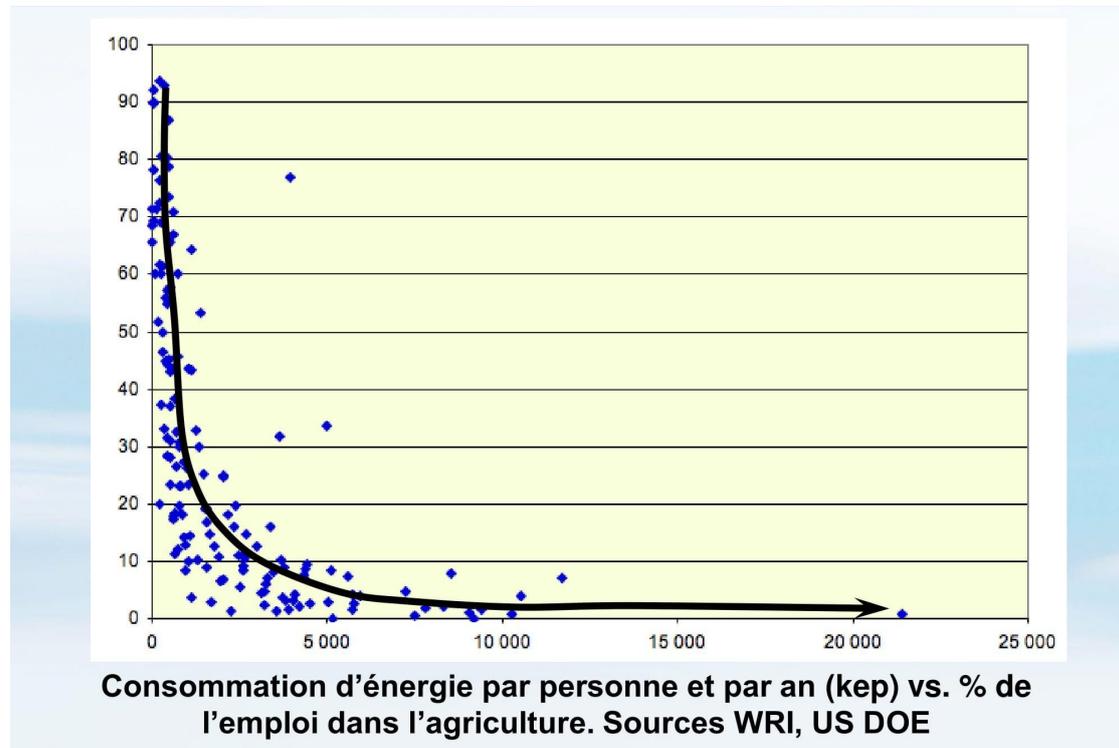
## *27. PLUS D'ÉNERGIE = TOUT LE MONDE À L'USINE, PUIS AU BUREAU*

Par contre, à partir de 2007, moment où la production industrielle arrête d'augmenter en Europe, on commence également à avoir un sujet sur les emplois de service.

Au moment des chocs pétroliers, vous voyez également apparaître une nouvelle catégorie qui n'existait pas avant : les chômeurs. L'approvisionnement énergétique par personne n'augmentant plus, la productivité du travail augmente peu, puisqu'augmenter la productivité du travail c'est adjoindre des machines. La productivité du travail augmente peu et les emplois existants sont trop productifs pour que dans une économie qui a arrêté de croître rapidement, vous puissiez donner un travail à tout le monde. Dit autrement, à partir des chocs pétroliers, on entre dans une époque où la seule manière de donner du travail à tout le monde, c'est de diminuer la productivité des gens au travail.

Et là, l'équation est diverse selon les pays. Certains n'acceptent pas et créent des chômeurs : la France. D'autres acceptent et se mettent à créer des jobs mal payés, mal qualifiés, petits boulots, à temps partiel, etc. Ce sont les systèmes plus libéraux anglais, allemands, américains, etc. Mais un des deux embranchements se met en place.

## 28. Plus d'énergie = moins de paysans

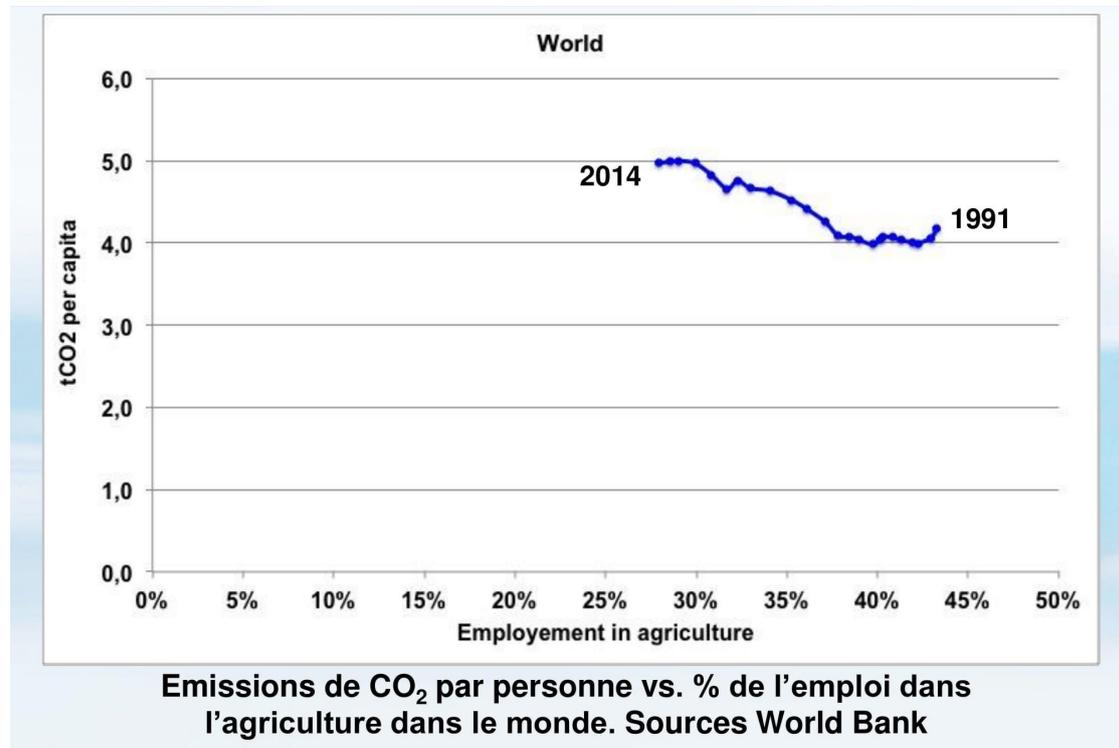


Diapositive 45.

Nous avons vu l'évolution dynamique en France. Je vais maintenant vous montrer quelques évolutions statiques ou dynamiques qui corroborent ce que je viens de dire. Ici vous avez un graphique dans lequel, avec les données de la banque mondiale, chaque point représente un pays. En abscisse, la quantité d'énergie utilisée par personne, c'est-à-dire le parc de machines par personne en moyenne dans le pays. En ordonnée, la fraction de la population active qui travaille dans l'agriculture.

Vous voyez que c'est très simple : « Dis-moi combien il y a d'énergie par personne dans le pays et je te dirai quelle est la fraction de la population active qui travaille dans l'agriculture. »

## 29. Plus d'énergie fossile = moins de paysans

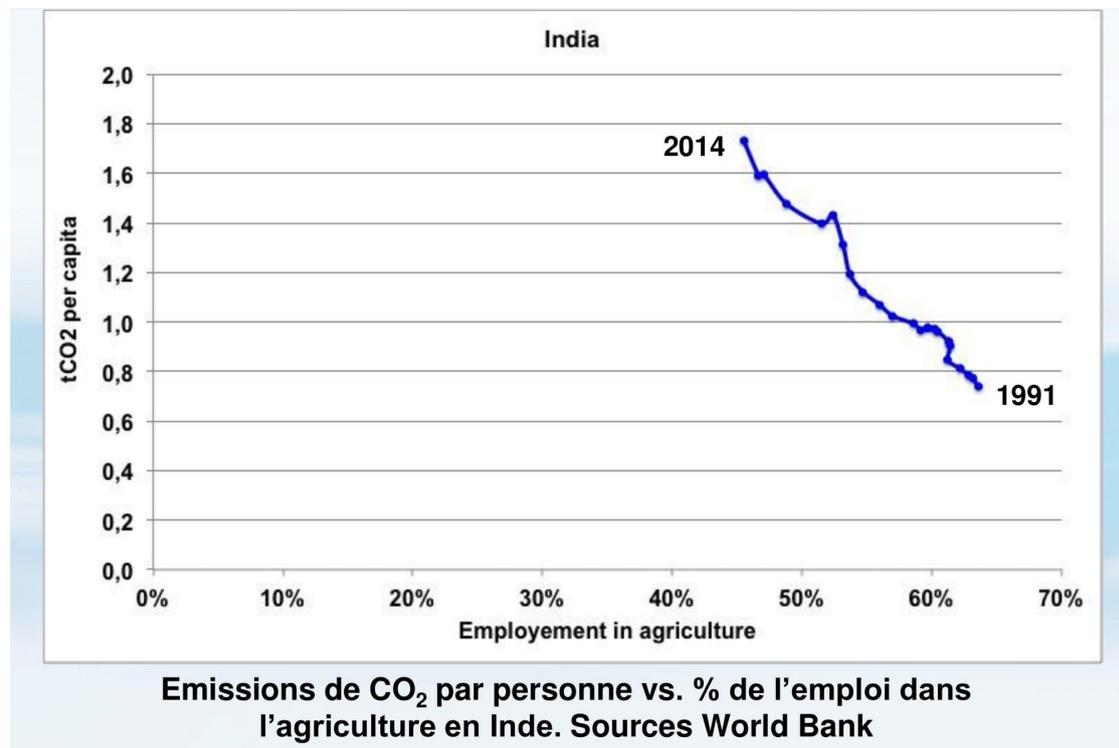


Diapositive 46.

Voilà un autre graphique qui vous dira la même chose. C'est l'évolution de 1991 à 2014 de deux données dans le monde (la moyenne mondiale) : les émissions de CO<sub>2</sub> par personne et la fraction de la population active dans l'agriculture.

Vous voyez que plus les émissions de CO<sub>2</sub> augmentent (ce qui est le cas quand vous suivez l'ordre chronologique), plus vous avez d'énergie fossile par personne, et moins vous avez d'agriculteurs dans la population active.

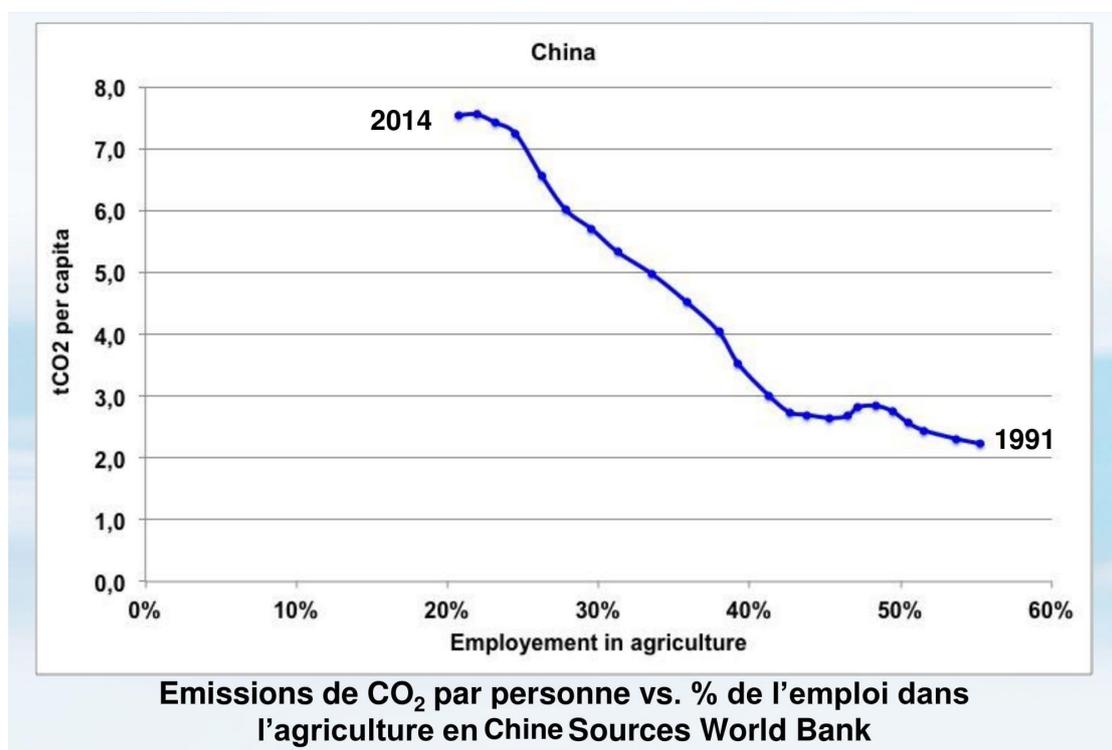
29. PLUS D'ÉNERGIE FOSSILE = MOINS DE PAYSANS



Diapositive 47.

C'est vrai pour le monde, c'est vrai par exemple pour l'Inde.

## 29. PLUS D'ÉNERGIE FOSSILE = MOINS DE PAYSANS

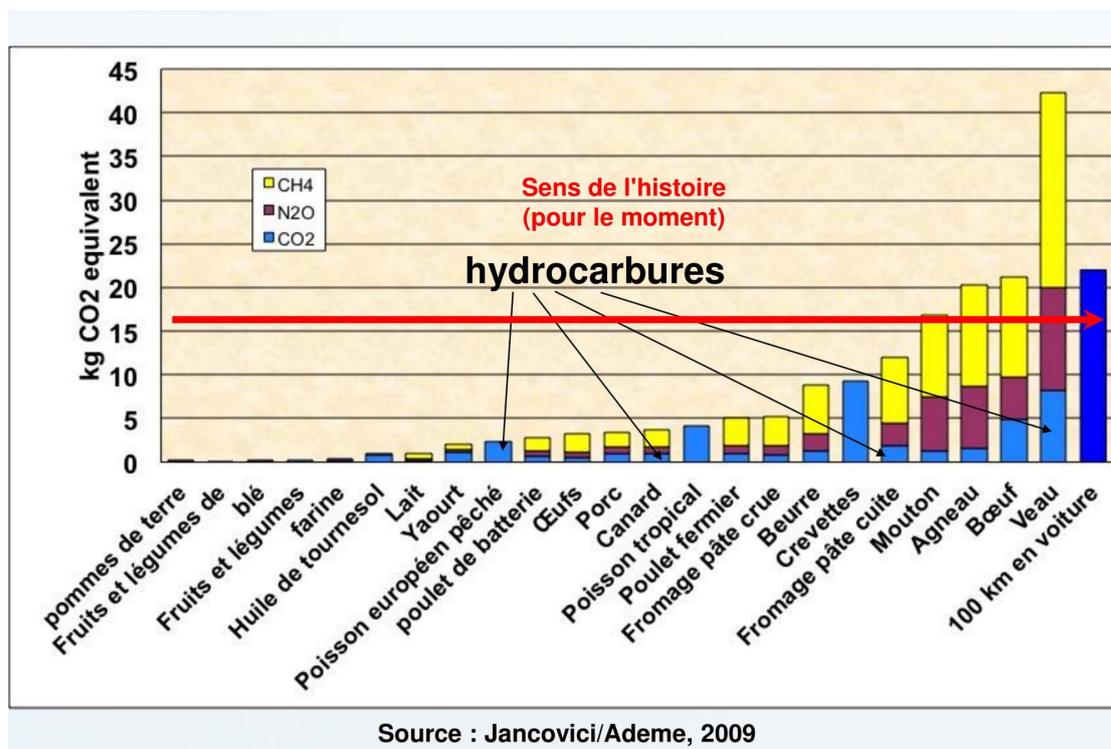


Diapositive 48.

C'est vrai par exemple pour la Chine.

Et c'est vrai pour le Brésil. Enfin j'ai 250 pays dans la base de données, je ne vous les sors pas tous. C'est quelque chose que vous constatez à peu près partout : vous mettez de l'énergie dans un pays, ce qui veut dire que vous mettez des machines dans le pays et que vous sortez des paysans de l'agriculture. Donc vous créez *un exode rural*. Partout pareil.

### 30. Miam-miam kWh pour de vrai



Diapositive 49.

Par ailleurs, l’augmentation de la productivité agricole nous a permis d’augmenter la quantité d’animaux que l’on mange, puisqu’il faut plus de surface ou des surfaces plus productives pour manger des animaux qui auront eux-mêmes besoin de manger ce qui pousse. 80% de ce qui pousse en France sert à nourrir des animaux.

C’est vrai pour les prairies, c’est vrai pour la totalité du maïs, sauf les quelques grains des marques que je ne nommerai pas. C’est vrai pour la moitié du blé. C’est vrai pour la quasi-totalité du soja que l’on cultive dans le monde, qui est une des quatre grandes céréales qu’on cultive. Etc.

En gros, 80%, dans les pays occidentaux, des surfaces cultivées servent à nourrir des animaux que vous allez manger derrière.

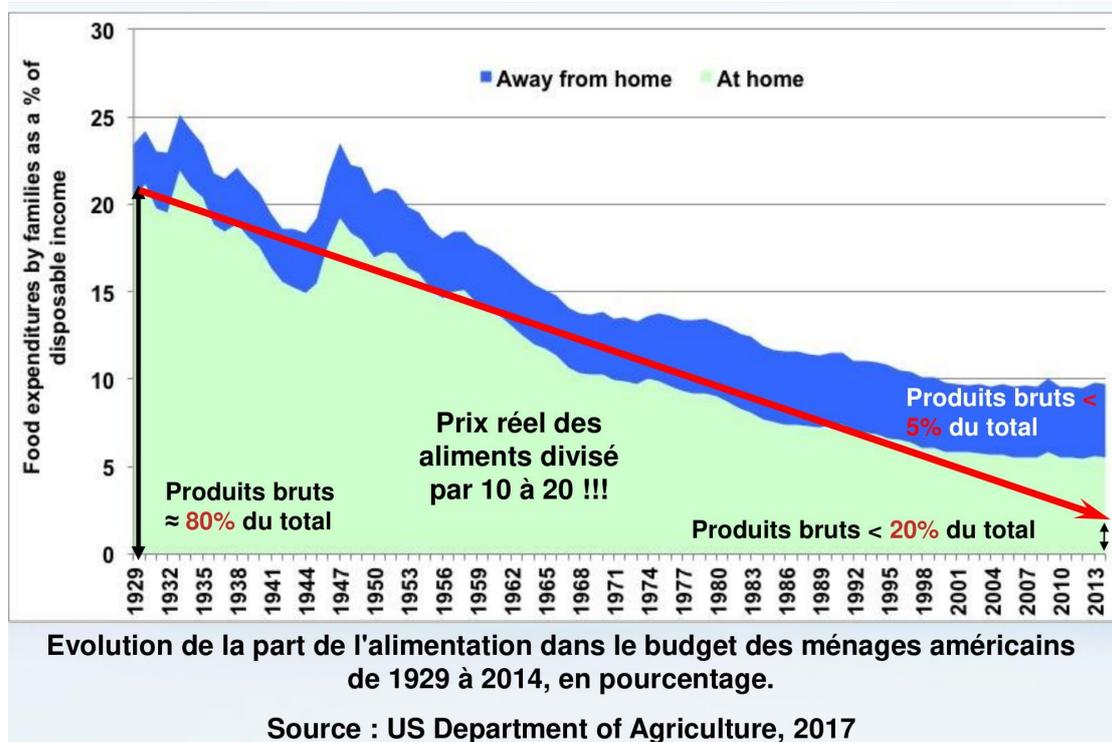
Ici je ne vous ai pas mis l’énergie, mais les gaz à effet de serre, peu importe. Vous voyez que dans les émissions de gaz à effet de serre liées à l’alimentation, là où il y a de la viande ou du poisson, la partie liée aux hydrocarbures est plus élevée.

### 30. MIAM-MIAM KWH POUR DE VRAI

Vous voyez que le sens de l'Histoire, à cause de l'approvisionnement énergétique croissant, est d'aller de la gauche vers la droite. Historiquement, on a mangé des céréales et des oignons, c'est pour ça que les paysans avant pouaient du bec. Puis on s'est mis à manger des petits animaux. D'abord le produit des petits animaux, les œufs, puis le petit animal lui-même. Rappelez-vous Henri IV : il faut que les gens puissent manger de petits animaux, la poule au pot. Mais la poule au pot était déjà du déchet, parce qu'elle avait pondu toute sa vie, un déchet en fin de vie. Ensuite, on s'est mis à manger des poulets de chair, puis on s'est mis à manger des cochons, puis on s'est mis à manger des vaches.

Le fait de pouvoir élever des vaches rien que pour les manger, c'est quelque chose qui est la marque d'un pays sous perfusion énergétique. L'archétype c'est les États-Unis, ça ne marche pas dans un pays à faible approvisionnement énergétique.

## 31. Plus de pétrole = moins de sous



Diapositive 50.

À cause de la productivité amenée par les machines, cette alimentation de plus en plus carnée nous coûte de moins en moins cher.

Vous avez ici la part de l'alimentation dans le budget des ménages aux États-Unis. C'est une série longue. J'ai pris les États-Unis parce que c'est facile de trouver des séries longues sur les sites américains. Malgré le génie des ingénieurs français, trouver des séries longues de cette nature en trois clics de souris sur un site français est quelque chose de très difficile. Je ne sais pas pourquoi, en tout cas, ça marche très bien aux États-Unis.

Vous voyez qu'aux États-Unis il y a un petit siècle, le budget alimentaire des ménages est un quart de ce qu'ils gagnent, et à l'époque c'est essentiellement de la restauration à domicile. Madame Michu – pardon de ce propos sexiste, mais c'est la réalité – achète des produits bruts au paysan du coin, ou à la place du marché du coin et fait le frichti pour Monsieur Michu et elle-même à partir de poireaux, de patates, d'œufs et de poulets.

### 31. PLUS DE PÉTROLE = MOINS DE SOUS

Aujourd'hui, quand, vous allez acheter de la nourriture, en fait, l'essentiel de ce que vous achetez passe par la grande distribution, comme 80% des achats alimentaires des Français.

*L'essentiel de ce que vous achetez n'est pas de la nourriture.* Le ticket de caisse en sortie d'un magasin de la grande distribution, c'est du salaire de caissières ou du salaire d'ingénieurs de la boîte qui a fait les terminaux de paiement automatique, peu importe, c'est de la location d'espaces, c'est du salaire de magasinier, c'est du salaire de transporteur, c'est du chiffre d'affaires de Volvo Trucks, c'est du chiffre d'affaires de Publicis, etc. C'est tout sauf de la bouffe.

Quand vous regardez le produit brut dans ce que vous achetez, dans les bons cas de figure c'est un tiers de la facture, dans les mauvais c'est 3%.

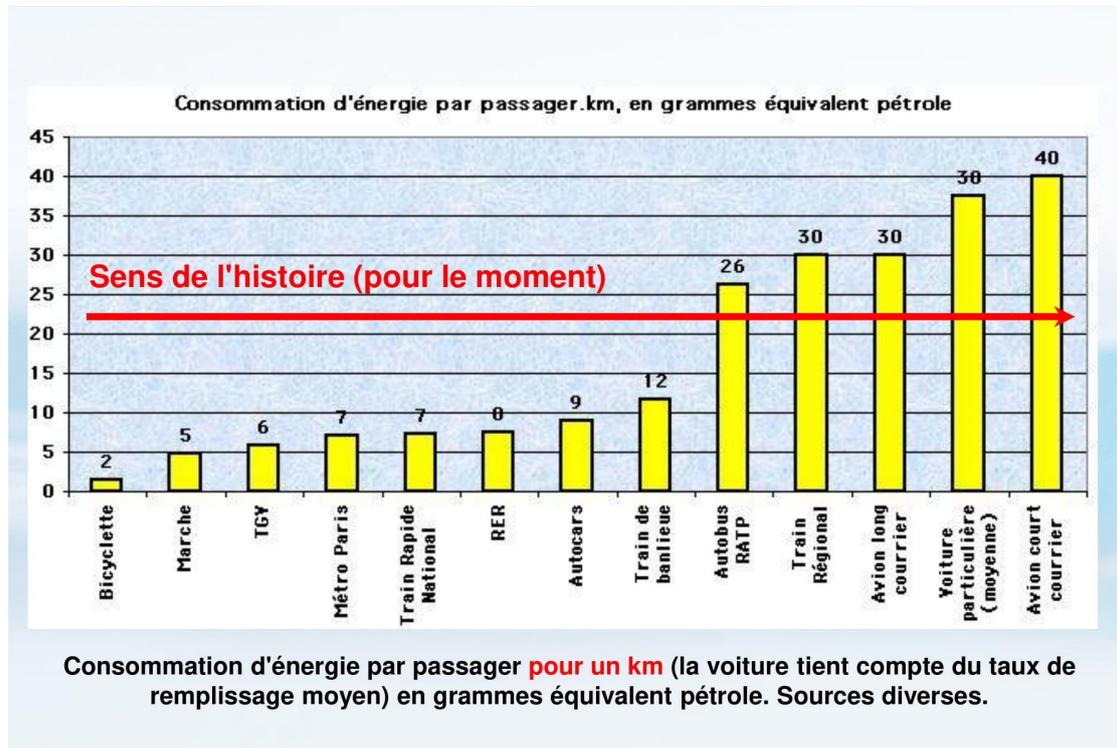
Prenons l'exemple d'une boîte d'œufs. Combien coûte une boîte d'œufs en grande surface? Pas les œufs bio qui coûtent 3 euros, les mauvais, les pas bio : 1,5 euros, en gros. 1,5 euros pour 6 œufs, comme vous êtes plus fort que moi en calcul mental, ça met l'œuf à 25 centimes. Savez-vous à combien le même œuf est acheté en sortie de ferme? 6-7 centimes. Vous voyez que, rien que sur une boîte d'œufs – zéro transformation – vous avez un facteur 4 entre la sortie de ferme et ce que vous payez en sortie de caisse.

J'insiste, le ticket de caisse aujourd'hui, c'est tout sauf de la bouffe. Ce qui veut dire que, dans une série sur durée longue vous avez en fait une inhomogénéité massive entre ce que vous regardez au début de la série et ce que vous regardez à la fin de la série. Parce qu'au début de la série, c'est vraiment l'œuf tel qu'il sort de chez le fermier acheté au marché par Madame Michu.

Aujourd'hui ce n'est pas du tout ça. Dans le hors domicile c'est encore pire : l'omelette au café du coin, ce n'est pas 1,5 euros que vous allez la payer, mais 5 ou 6 euros pour 3 œufs, pour 75 centimes d'œufs. Vous ajoutez un facteur 10. En fait, le vrai prix de la nourriture aujourd'hui a, en gros, été divisé par un facteur 20 sur cette échelle de temps, le reste c'est du service.

On retombe à nouveau sur le facteur diviseur de quelques dizaines – ça varie selon les produits – grâce à l'abondance énergétique.

## 32. Transports : plus c'est moderne, plus cela pompe!



Diapositive 51.

Cette abondance énergétique nous a également amené les moyens de transport.

Retenez, sans entrer dans les détails, que *plus un moyen de transport est moderne et plus sa consommation par kilomètre est élevée*. On avait du vélo, on avait la marche à pied, on a eu du bus, on a eu du train etc. Aujourd'hui, on a l'avion qui est le mode de transport le plus énergivore par personne de tout ceux qu'on peut imaginer.

Une fois qu'on a eu ces moyens de transport extrêmement performants, on en a profité aussi pour en faire autre chose.

### 33. 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)**



Diapositive 52.

Juste une petite incise : dans les inhomogénéités, dans les séries longues, vous avez un autre truc qu'il faut voir, c'est qu'avec le temps certains objets peuvent ne plus être affectés uniquement à leur fonction initiale.

Parce que, une voiture aujourd'hui, ce n'est pas qu'un moyen de transport. C'est aussi un salon sur roulettes, c'est votre espace à vous que vous transportez jusqu'à la porte du bureau. Et ça, c'est également quelque chose qui a une valeur, et c'est également un objet de statut.

Je fais là aussi une petite parenthèse sur l'inhomogénéité des séries. Une voiture, quand vous la comparez à autre chose, parfois c'est difficile de savoir à quoi. Voici le dernier avatar de la voiture : ça, c'est la voiture autonome « by IKEA ».

Est-ce une voiture ? Est-ce un salon sur roulettes ? Est-ce un ordinateur sur roulettes qui accessoirement vous transporte ? C'est quoi ce truc-là ? La voiture autonome connectée ?

### 33. QU'EST-CE QU'UNE VOITURE EXACTEMENT?

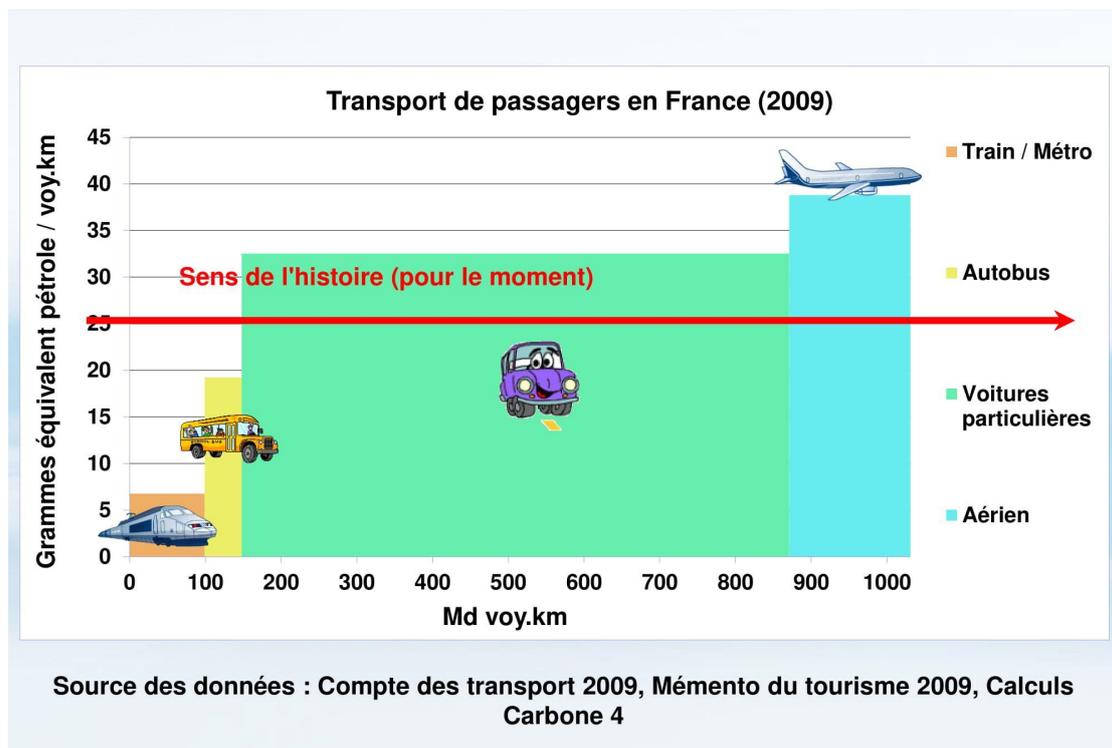


**Est-ce : une voiture, accessoirement autonome ? Un salon, accessoirement mobile ? Un poste de travail, accessoirement mobile ? Un ordinateur sur roues, qui accessoirement transporte du monde ? Un truc inutile mais qui sert à afficher son statut ?**

Diapositive 53.

Donc, vous avez aussi de temps en temps des inhomogénéités auxquelles il faut faire attention.

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



Diapositive 54.

Pour en revenir à l'objet premier qui est de se déplacer.

\*\*\* Question auditoire \*\*\*

« La voiture consomme plus aujourd'hui au kilomètre ? »

Non, les moyens, plus ils sont modernes, plus ils consomment par kilomètre. Ce que je dis c'est que la voiture consomme moins que l'avion qui est un moyen plus moderne. Et, la voiture consomme plus que le train qui est un truc plus ancien. Et plus que le bus aussi qui est plus ancien, le bus lui-même plus que le vélo qui est plus ancien, etc.

En gros, *plus un moyen est moderne, plus sa consommation par kilomètre est élevée* et en fait c'est ce que je représente ici. Ce que vous avez ici, c'est un graphique qui vous donne la quantité d'énergie utilisée en gramme-équivalent-pétrole. Pour bus, voiture et avion, c'est vraiment du pétrole par passager-kilomètre.

### 34. *ET JE DIRAIS MÊME PLUS : PLUS C'EST MODERNE, PLUS ÇA POMPE...*

Vous voyez qu'avec le temps, ça monte. C'est-à-dire-que, c'est plus faible pour le train que pour le bus, plus faible pour le bus que pour la voiture, plus faible pour la voiture que pour l'avion.

Vous avez en abscisse la quantité de voyageurs-kilomètres effectués dans l'année. La surface vous donne la quantité d'énergie affectée à chaque mode de transport. Vous comprenez que c'est la route qui domine aujourd'hui les transports qu'on effectue.

Je le redis, le sens de l'Histoire c'est aller de moyens économes vers des moyens moins économes parce qu'il y a de plus en plus d'énergie disponible par personne.

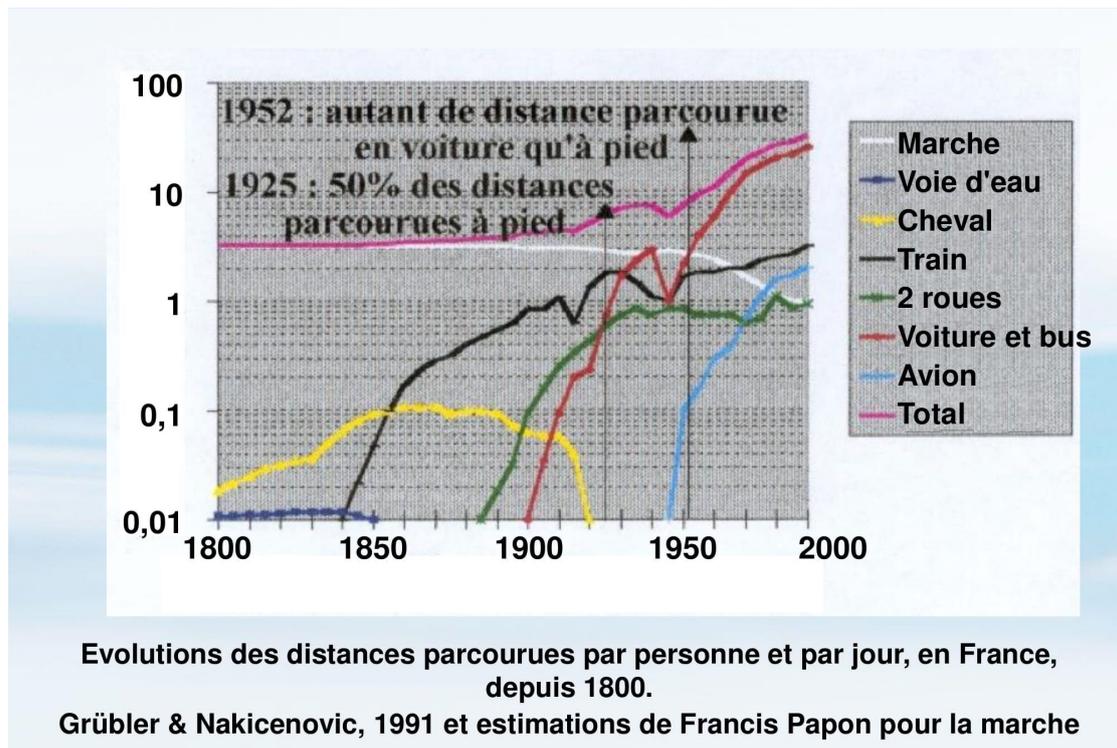
Qui dans cette salle n'a jamais pris l'avion? 2. J'aurais posé la même question en 1950 il aurait fallu que je la pose dans l'autre sens. C'est-à-dire : « Qui dans cette salle a déjà pris l'avion? » Et j'aurais probablement eu 2 mains qui se seraient levées.

L'avion, aujourd'hui, dans votre catégorie socio-professionnelle et dans votre pays, est un truc qu'on utilise comme on respire. C'est extrêmement récent et, soit dit en passant, quand vous aurez mon âge, ce n'est pas complètement sûr que ce soit toujours le cas.

C'est extrêmement récent parce que c'est quelque chose qui demande de très, très grandes quantités d'énergie. Retenez qu'un aller-retour Paris-New York c'est une très, très grande baignoire de pétrole. C'est 400 à 500 litres de pétrole par personne pour 1 voyage, c'est-à-dire à peu près la même chose que la consommation annuelle de quelqu'un qui utilise sa voiture. Pour 1 voyage. Ça fait beaucoup, n'est-ce pas?

Donc l'ouverture sur l'étranger de l'école des Mines – excusez-moi : MINES ParisTech, il faut que je vive avec mon temps – en 2060... ce n'est pas complètement exclu que ça ressemble plus aux trains de nuit pour aller en Suède qu'à l'avion pour aller à Kuala Lumpur ou en Chine. Ou alors vous reviendrez au bateau à moitié à voile pour aller en Chine, ça vous prendra un mois, ça vous fera des souvenirs.

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



Diapositive 55.

Vous voyez ici la façon dont les gens se déplacent sur deux siècles. Vous avez en échelle logarithmique le nombre de kilomètres effectués par personne et par jour, selon les différents moyens de transport.

Vous voyez que le cheval était ce qui donnait le plus de personne-kilomètres par jour après la marche, en blanc. Il y a deux siècles. Il y a deux siècles, en gros, le trajet quotidien d'un être humain c'était 3 km à pied – ça use, ça use.

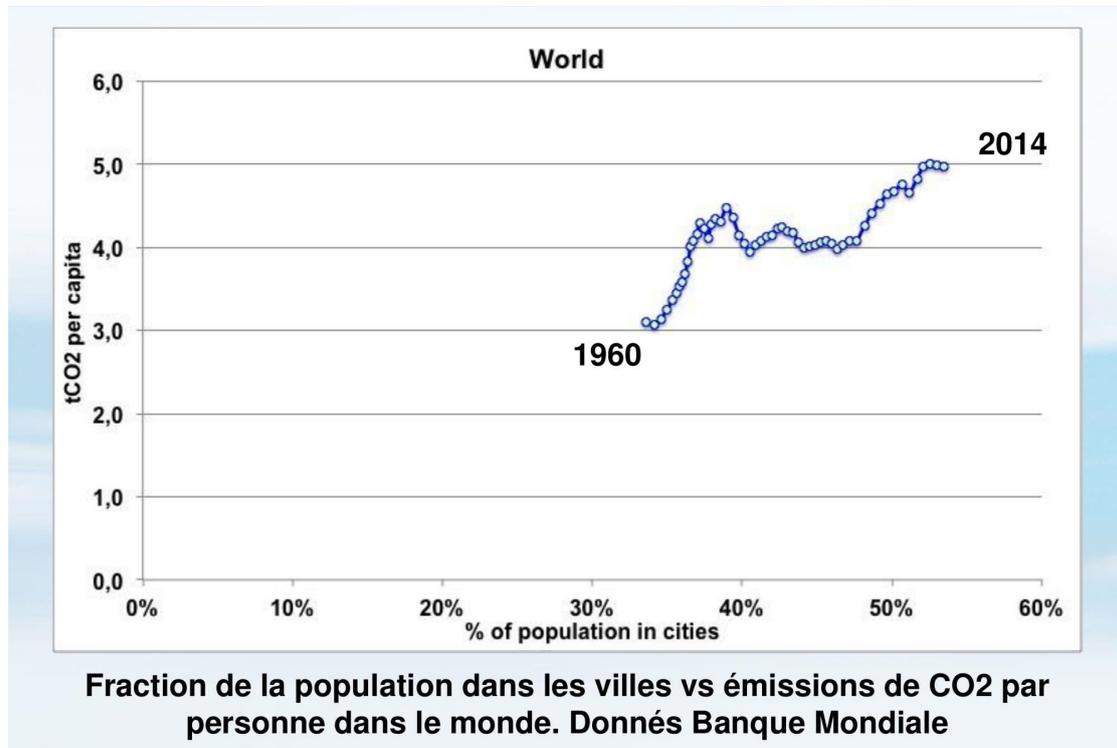
Parce qu'il y a deux siècles, comme vous l'avez vu tout à l'heure, l'être humain ordinaire était un paysan, il faisait l'aller-retour entre la ferme et les divers endroits où il avait besoin de se promener pour faire son boulot : ses champs, ses vergers, ses prairies, etc. Voilà ce qu'il faisait dans la journée : 3 km. Et puis, du reste, il vivait toute sa vie durant sans aller à quelques centaines de kilomètres de là.

### 35. TRANSPORTS : PLUS VITE, PLUS LOIN, MOINS CHER

Après, vous voyez le cheval. Ensuite, l'essor du train. Et surtout *l'essor de la voiture, qui est devenue le mode dominant de déplacement aujourd'hui*. Mais les années où la voiture a supplanté la marche comme mode de transport dominant en termes de passager-kilomètres par jour, ce sont les années 50.

Moi je n'étais pas né, mais tout juste. Mes parents étaient nés et bien nés. Donc, mes parents, qui étaient déjà nés à cette époque-là, sont nés dans un monde dans lequel le mode dominant de transport pour la population dans son ensemble, était la marche à pied. Rendez-vous compte aussi de ce que ça signifie par rapport au monde dans lequel vous vivez, vous.

## 36. Plus d'énergie fossile = plus de villes



Diapositive 56.

On a diminué le nombre de paysans et, comme je le disais tout à l'heure, on a mis ces paysans quelque part. Où fait-on commodément de l'industrie puis des emplois tertiaires ? Dans les villes.

Historiquement, qu'est-ce qu'une ville ? C'est un lieu d'échanges. Quand vous regardez les villes qui ont été construites il y a longtemps, elles sont toutes organisées autour de lieux d'échanges qui sont : la place du marché (j'échange des biens), le lieu de culte (j'échange des croyances et des règles morales) – donc l'église, pour parler de la France, est toujours au centre –, la mairie ou l'équivalent (j'échange des règles de vie en commun), l'école (j'échange des savoirs).

Les lieux d'échanges sont au centre et géométriquement, le truc le plus efficace est un disque avec tout le monde autour, c'est la forme la plus compacte. La ville est autour des lieux d'échanges qui sont tous placés au centre.

Une fois que vous développez des moyens abondants de produire et de transporter, il va se produire deux phénomènes :

### 36. PLUS D'ÉNERGIE FOSSILE = PLUS DE VILLES

1. Vous allez vider les campagnes.
2. Vous allez mettre les gens là où c'est le plus efficace premièrement de produire, deuxièmement d'échanger la production.

Où est-il le plus efficace de produire et d'échanger la production ? Dans les villes. Donc, vous allez mettre les gens dans les villes, et en augmentant l'énergie – c'est là que je veux en venir – vous augmentez la part de la population qui habite en ville.

Voilà comment ça se passe pour le monde dans son ensemble. En 1960 vous avez un peu plus de 30% de la population qui habite en ville avec trois tonnes de CO2 par personne, ce qui représente l'énergie fossile qu'on utilise, c'est-à-dire l'énergie tout court en première approximation. Vous voyez qu'aujourd'hui, nous sommes à 5 tonnes, donc on a augmenté l'énergie. Ça a permis de mettre quasiment *les deux tiers de la population dans les villes*.

\*\*\* Question auditoire \*\*\*

« Pourquoi y aurait-il un rapport de causalité ? »

Parce que *vous déformez la structure de l'emploi*. Parce qu'un système dans lequel vous auriez laissé tous les artisans, chacun dans leur coin avec des transports intermédiaires, est beaucoup moins efficace qu'un système dans lequel vous mettez 100 artisans ensemble – ça s'appelle des ouvriers – dans un seul lieu que vous allez spécialiser pour une production et ça va devenir très efficace.

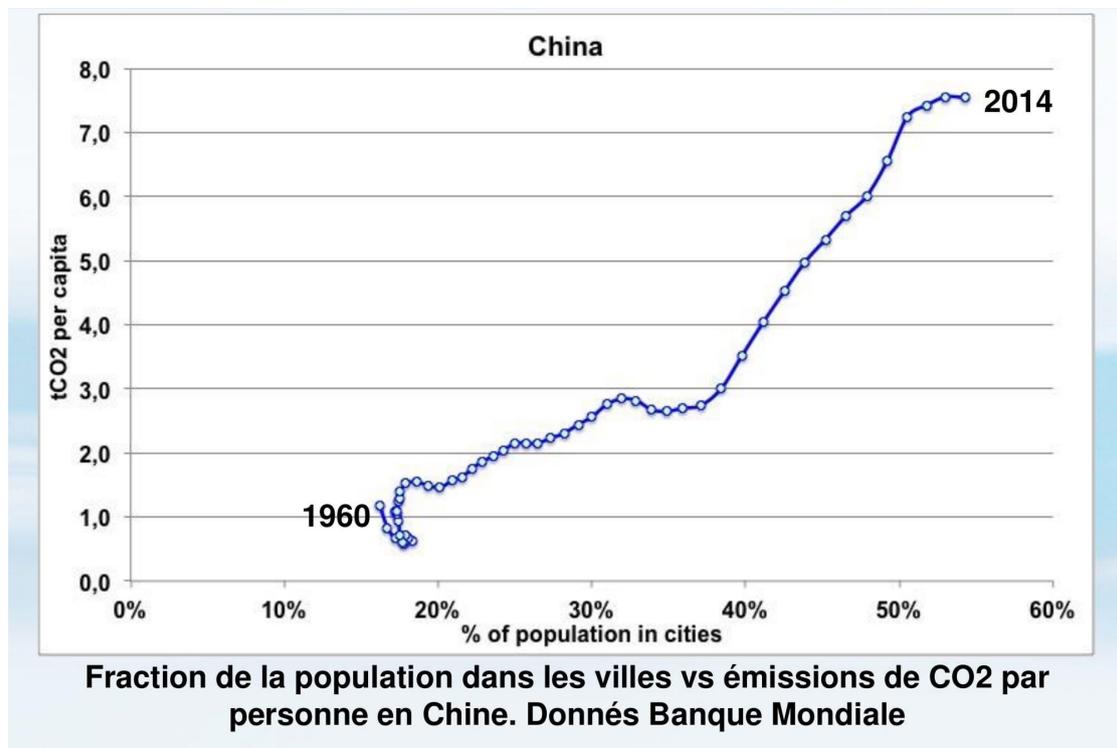
Je vais vous le dire autrement. Pour fabriquer des voitures, si vous avez le boulon de 12 qui est fait à Brives, puis la mise dans la portière qui est faite à Aurillac, puis le bout de portière qui est fait à Bordeaux, vous ne vous en sortez pas.

Il est beaucoup plus facile de tout rassembler au même endroit et d'avoir des opérations qui sont assemblées au même endroit. Après, quand les transports deviennent de plus en plus accessibles, vous pouvez aller encore plus loin et hyperspécialiser certaines opérations sur certains sites, puisque transporter ne vous coûte rien. Et après, vous les amenez à d'autres endroits où, en masse, vous hyperspécialisez sur autre chose.

C'est pour ça par exemple, qu'un constructeur assemble ses cabines de camion à un autre endroit que là où il les peint. Et entre les deux, vous transportez des cabines de camion pas peintes.

Alors, cette évolution, vous la voyez à vitesse accélérée dans les pays qui ont eu accès à vitesse accélérée à l'énergie.

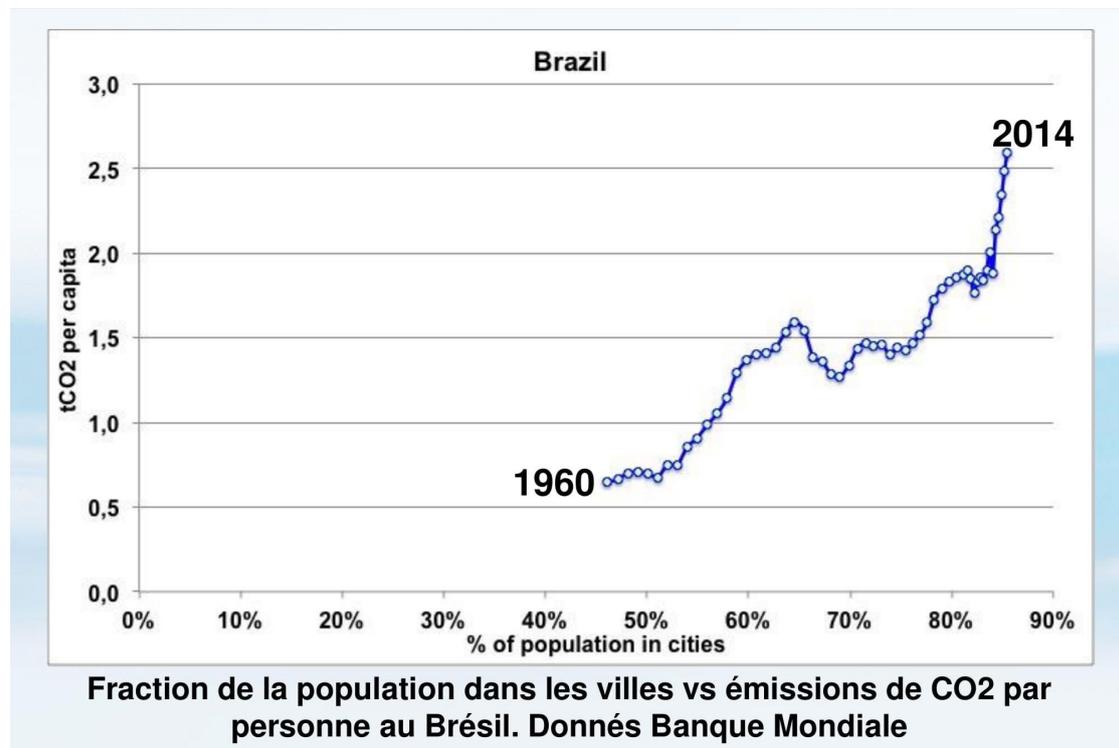
36. PLUS D'ÉNERGIE FOSSILE = PLUS DE VILLES



Diapositive 57.

Vous pouvez constater exactement la même évolution pour la Chine.

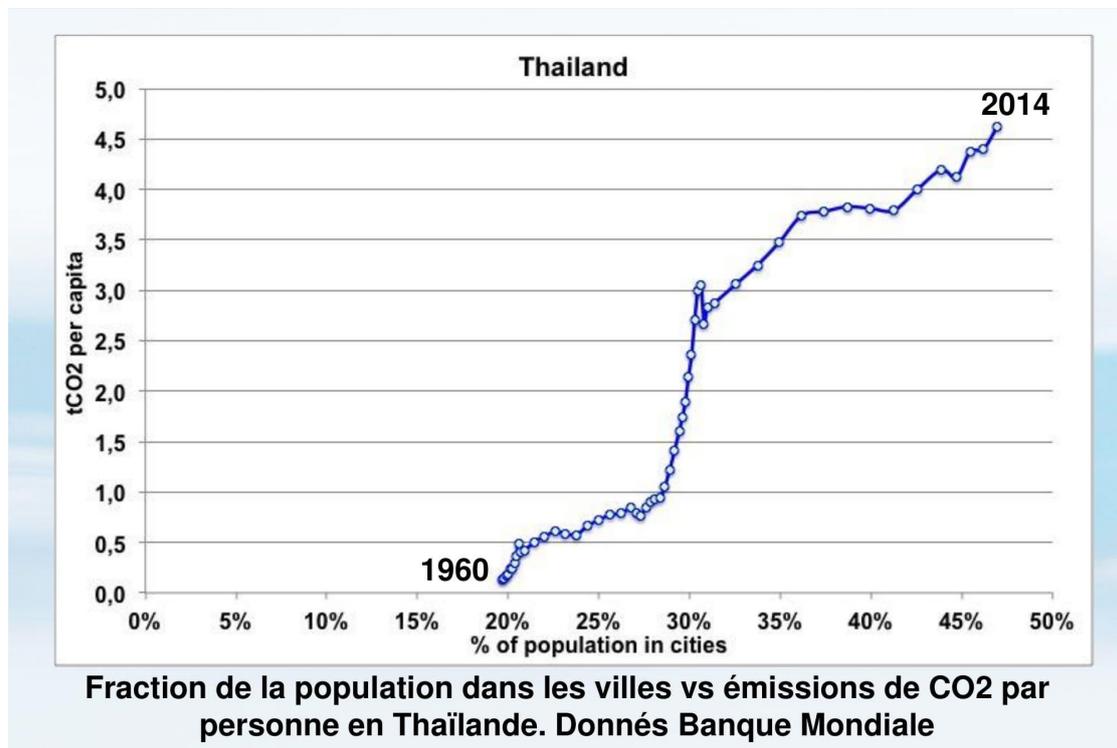
36. PLUS D'ÉNERGIE FOSSILE = PLUS DE VILLES



Diapositive 58.

La même pour le Brésil.

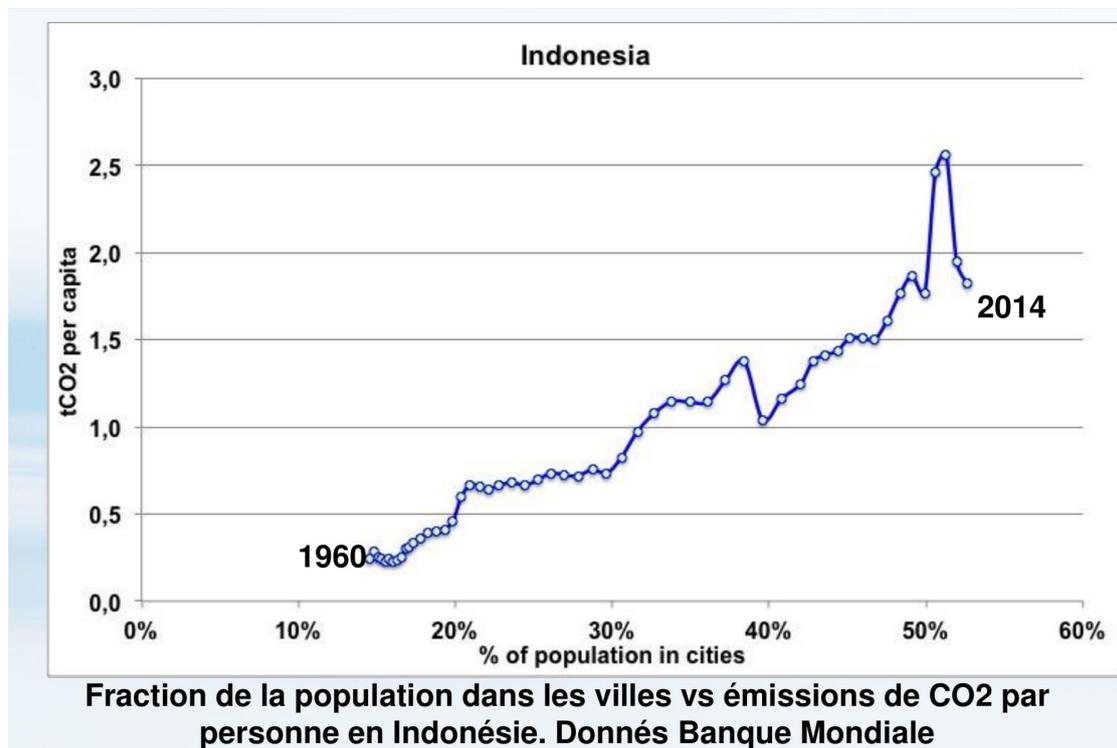
36. PLUS D'ÉNERGIE FOSSILE = PLUS DE VILLES



Diapositive 59.

La même pour la Thaïlande.

36. PLUS D'ÉNERGIE FOSSILE = PLUS DE VILLES

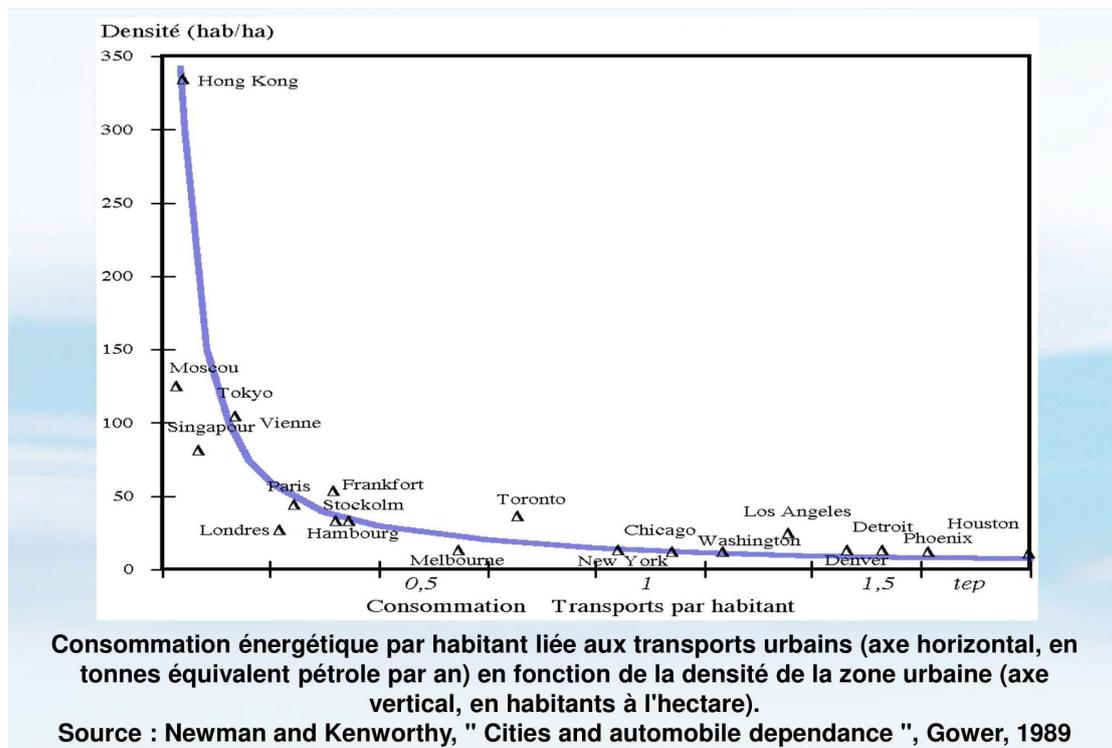


Diapositive 60.

La même pour l'Indonésie, etc.

*Plus d'énergie, je le redis, ça déforme la structure de l'emploi de la manière que je vous ai évoquée tout à l'heure, et les emplois qui apparaissent sont les plus efficaces si vous augmentez la taille des villes.*

### 37. Si je suis moderne, je m'étale...



Diapositive 61.

Vous pouvez *augmenter la taille des villes tout en les étalant*, et c'est exactement ce qui se passe quand vous avez accès à l'énergie abondante. Parce que, à ce moment, se déplacer en mode mécanisé devient facile et donc vous essayez d'avoir le meilleur des deux mondes. C'est-à-dire, un peu d'espace autour de chacun, tout en ayant des flux d'échanges extrêmement importants.

Ça, vous n'y arrivez que si vous avez plein d'énergie. Donc, dans la ville sobre en énergie, le truc le plus compact qui soit, c'est l'haussmannien.

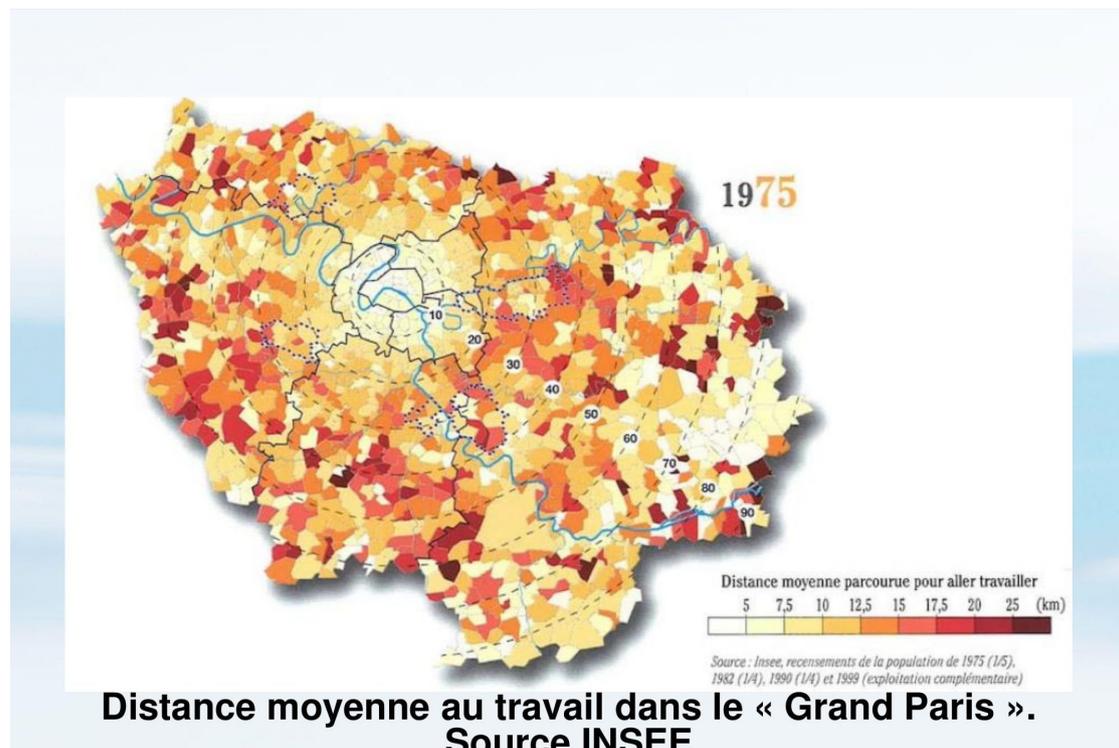
Paris est une des villes les plus denses au monde malgré l'absence de tours très hautes. Parce que, quand, vous avez des tours très hautes, il faut commencer à laisser un peu d'espace autour des tours. C'est compliqué de serrer les tours très hautes comme vous serrez les immeubles haussmanniens, qui sont collés les uns aux autres. Vous n'avez pas d'espace entre les immeubles, ils donnent tous sur la rue et sont tous collés les uns aux autres. Avec les tours de 10 étages ou de 30 étages, c'est plus difficile de faire ça. Par ailleurs, c'est le mode le plus

*37. SI JE SUIS MODERNE, JE M'ÉTALE...*

efficace quand vous n'avez pas une énergie très abondante pour vous déplacer. Parce que vous pouvez tout faire à pied ou à la rigueur en charrette à cheval.

Quand vous donnez une voiture à tout le monde, vous faites Los Angeles. C'est-à-dire que vous conservez les mêmes fonctions urbaines d'échange en étant capable de mettre la ville dans 100 ou 150 km de diamètre avec chacun une voiture. Vous gardez les mêmes distances parcourues en une heure dans un urbanisme considérablement plus étalé.

### 38. Énergie à gogo : la ville à la campagne pour de vrai...

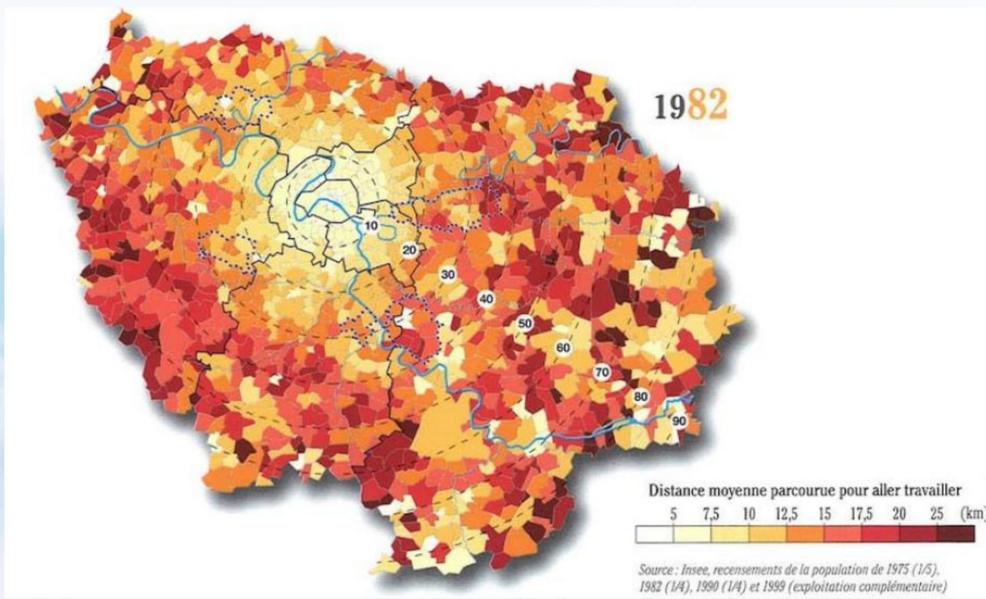


Diapositive 62.

Quand vous regardez par exemple l'Île-de-France, voilà à quoi ressemble la distance domicile-travail représentative des échanges du quotidien en 1975.

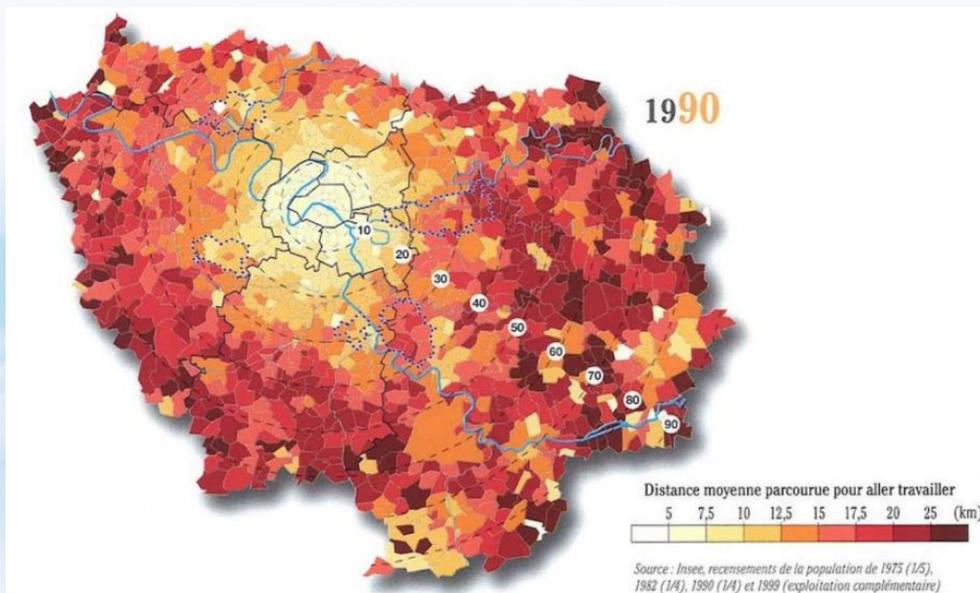
Là où c'est blanc, on ne parcourt pas grand chose. En 1975, dans la ville dense, les gens marchent pour aller au boulot. À la campagne à 80 km, les gens marchent pour aller dans leurs champs.

Voilà comment ça évolue au cours du temps.



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

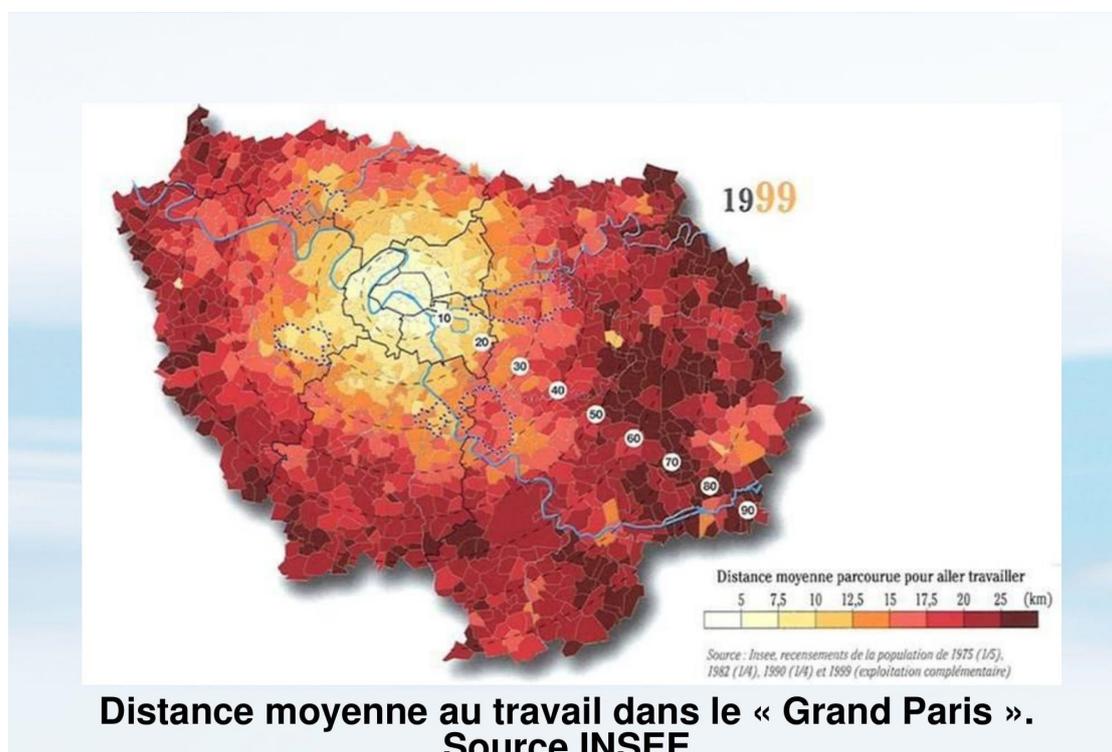
Diapositive 63.



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

Diapositive 64.

### 38. ÉNERGIE À GOGO : LA VILLE À LA CAMPAGNE POUR DE VRAI...



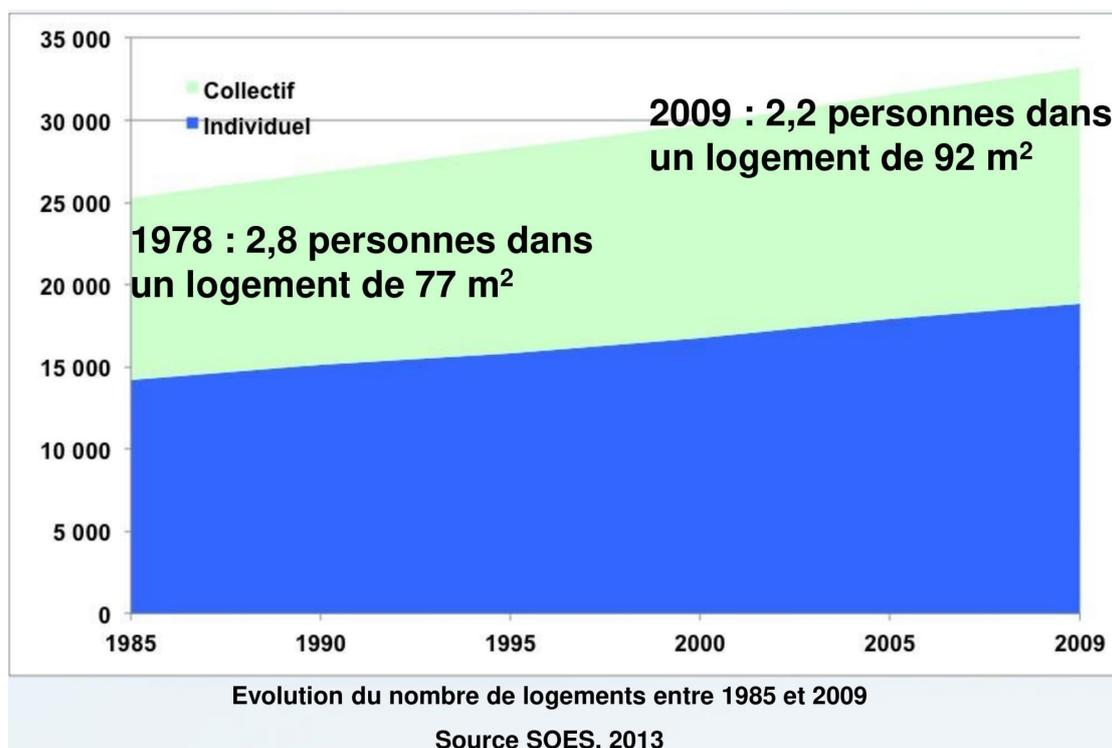
Diapositive 65.

Et voilà où nous sommes au début des années 2000.

Tous ces gens-là sont devenus des urbains, des péri-urbains, dont le métier est devenu un métier de type urbain. Ils ne sont plus agriculteurs. Ils sont employés de l'industrie, employés des services. Ils sont entrés dans le système de déplacement qui est nécessaire à l'industrie et aux services et ils utilisent leur voiture parce qu'il n'y a pas de transports en commun et il n'y en aura jamais. Vous vous mettez à avoir des *distances domicile-travail extrêmement fortes*.

Soit dit en passant, on va mettre le métro du Grand-Paris dans un rayon de 20 km. Ça ne va absolument pas régler le problème de ceux qui habitent plus loin.

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



Diapositive 66.

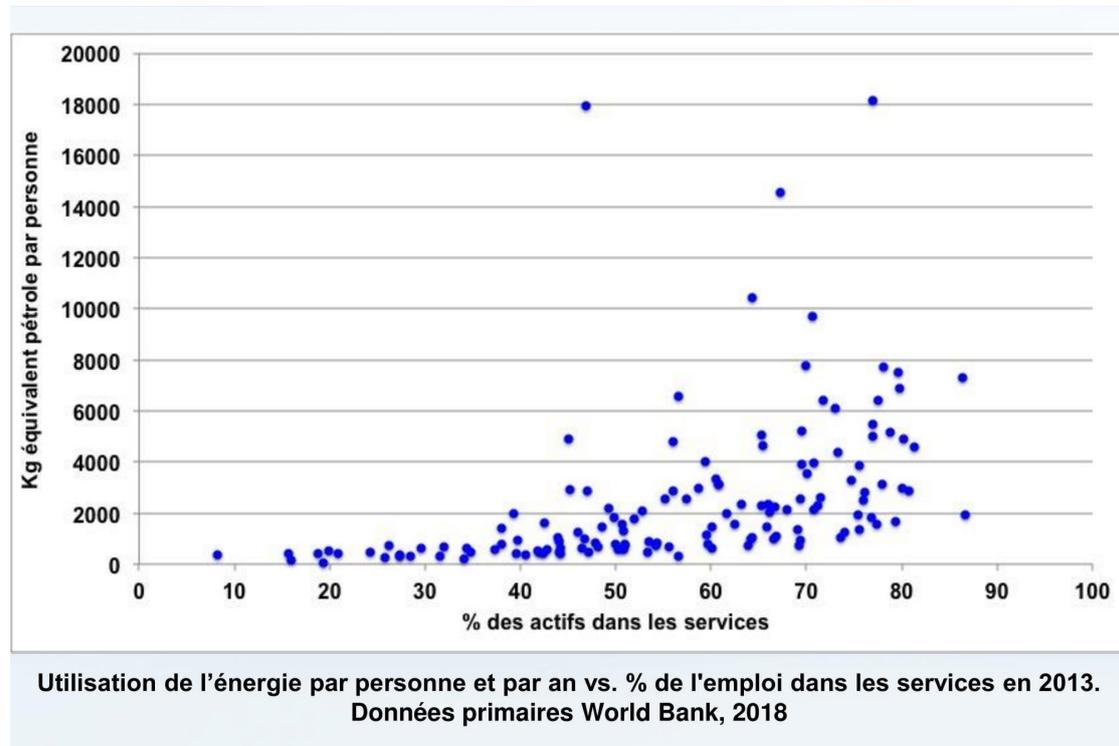
Cette énergie abondante a également permis d'augmenter le parc de logements, et elle a permis de l'augmenter plus vite que la population.

En 1978, allez, on va dire au moment des chocs pétroliers, le logement moyen en France faisait 77 m<sup>2</sup> et vous aviez un peu moins de trois personnes dedans. Aujourd'hui, vous avez un peu plus de deux personnes par logement, le logement lui-même étant devenu plus grand.

Évidemment, c'est l'énergie qui a permis de faire ça, donc l'énergie a permis notamment les divorces. Parce que, pour divorcer, il faut avoir deux logements là où vous n'en n'aviez qu'un. Sinon ça ne s'appelle pas un divorce. Ça s'appelle des scènes de ménage, mais ça ne s'appelle pas un divorce. Le divorce est une séparation physique, il faut avoir de quoi loger les gens.

Soit dit en passant, aujourd'hui, un des facteurs de pression à la hausse sur les besoins en logements en France ce sont les divorces. C'est probablement le premier facteur de pression à la hausse.

## 40. Vous avez dit dématérialisation ?

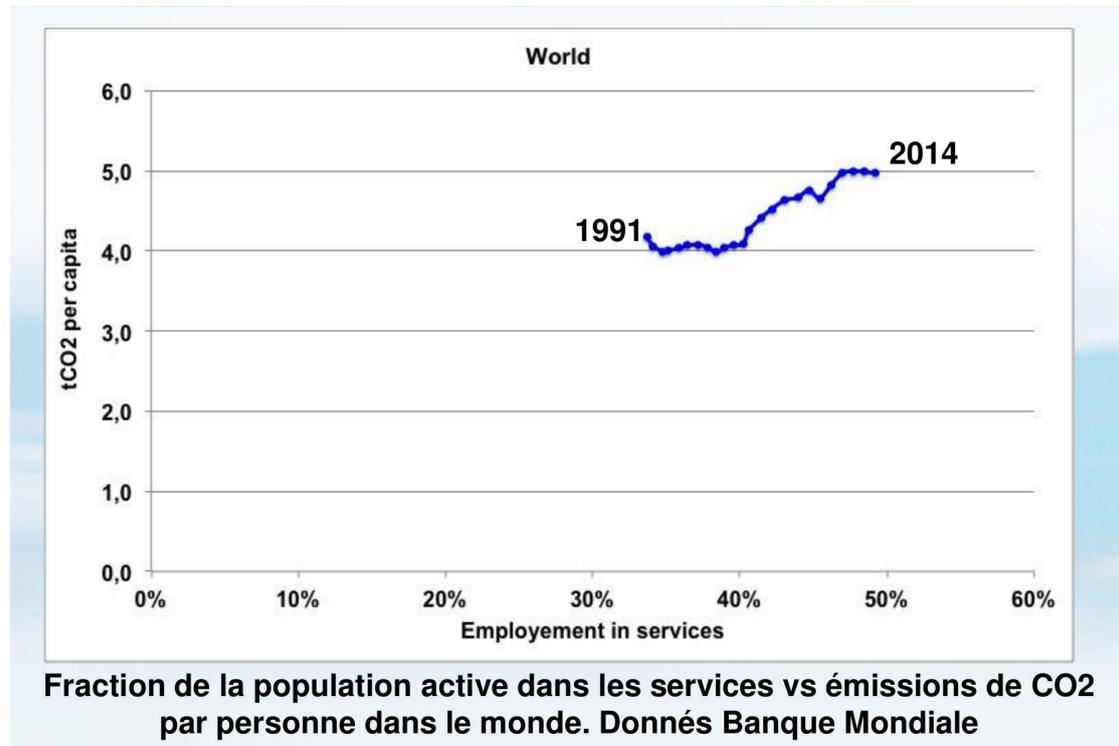


Diapositive 67.

Vous retrouvez ce que je viens de vous raconter dans ce petit graphique qui vous donne, pour une année donnée, les émissions de CO<sub>2</sub> par personne en fonction de la part de l'emploi dans les services.

Vous voyez que ce graphique dit tout, sauf le fait que quand vous augmentez les emplois dans les services, en proportion, les émissions diminuent. Il vous dit tout sauf ça. C'est la seule chose que ne pouvez pas voir dans ce graphique.

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

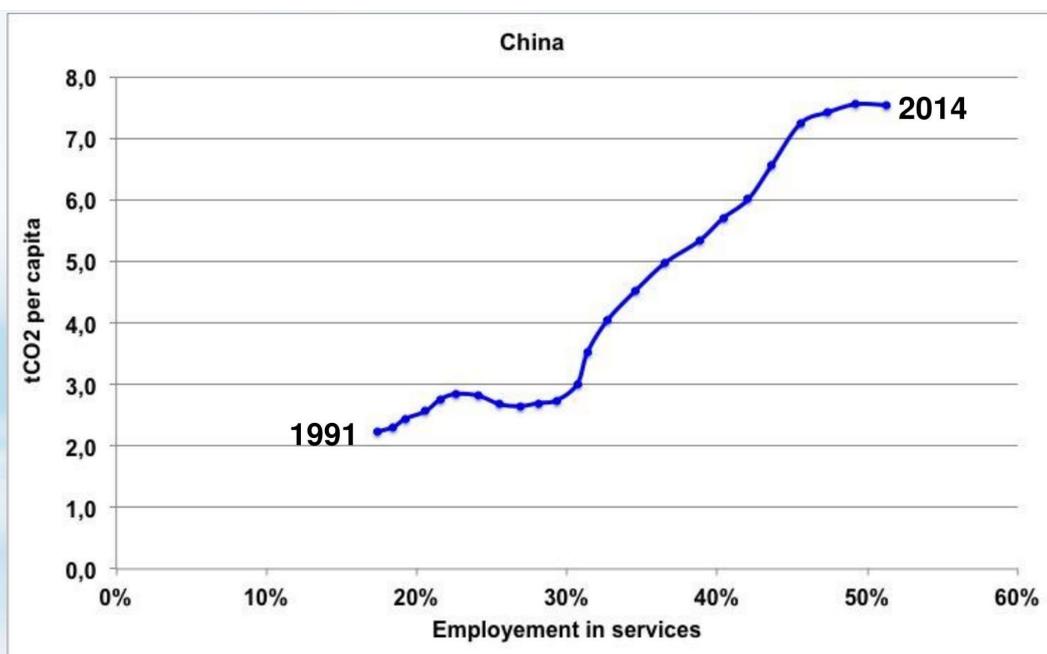


Diapositive 68.

Voilà une autre manière de voir, cette fois-ci en dynamique, pour le monde dans son ensemble.

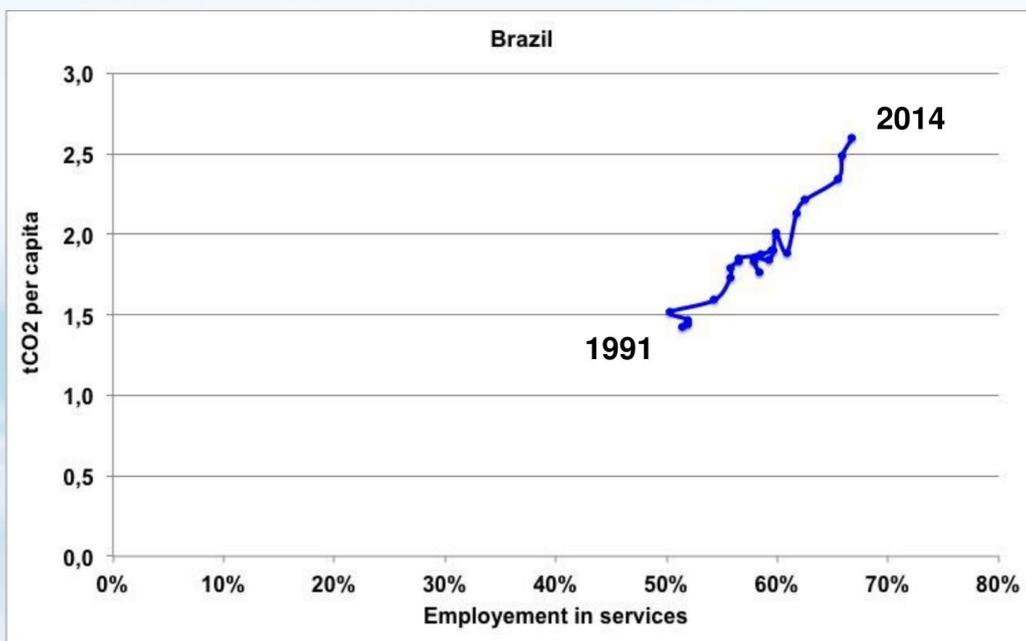
À nouveau, vous avez la part des emplois dans les services en 1991 et en 2014 avec les émissions de CO2 par personne. Vous voyez que les deux marchent de concert.

Et ça marche de nouveau de concert quand vous regardez des pays pris un par un. Ça marche très bien.



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

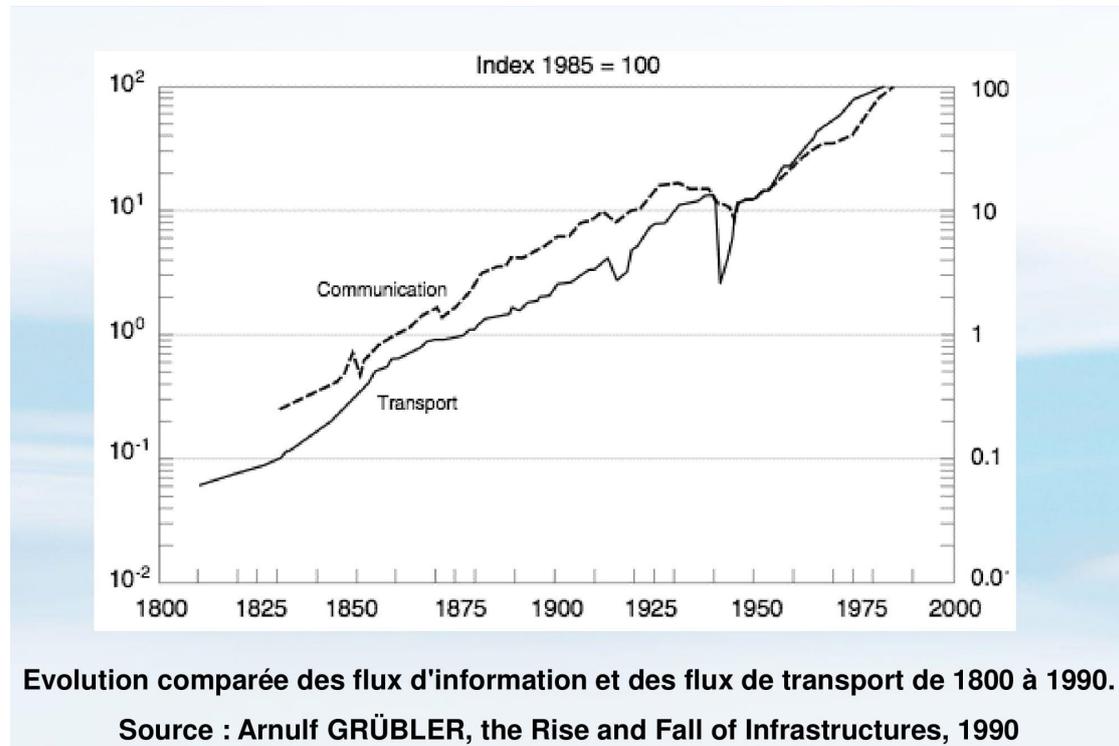
Diapositive 69.



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

Diapositive 70.

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



Diapositive 71.

Autre évolution que l'énergie abondante a permise : *l'augmentation du flux de marchandises*, puisqu'elle s'est également appliquée aux camions.

Il y a là aussi quelque chose qu'il faut se sortir de la cervelle, qui est que l'on pourrait dématérialiser les transports en les remplaçant par des flux d'information. Manifestement, ce n'est pas vrai. Quand vous regardez l'évolution concomitante des flux d'information et des flux de transport, que ce soit des marchandises ou des personnes, vous arrivez exactement au même résultat. *Les deux évoluent de concert.*

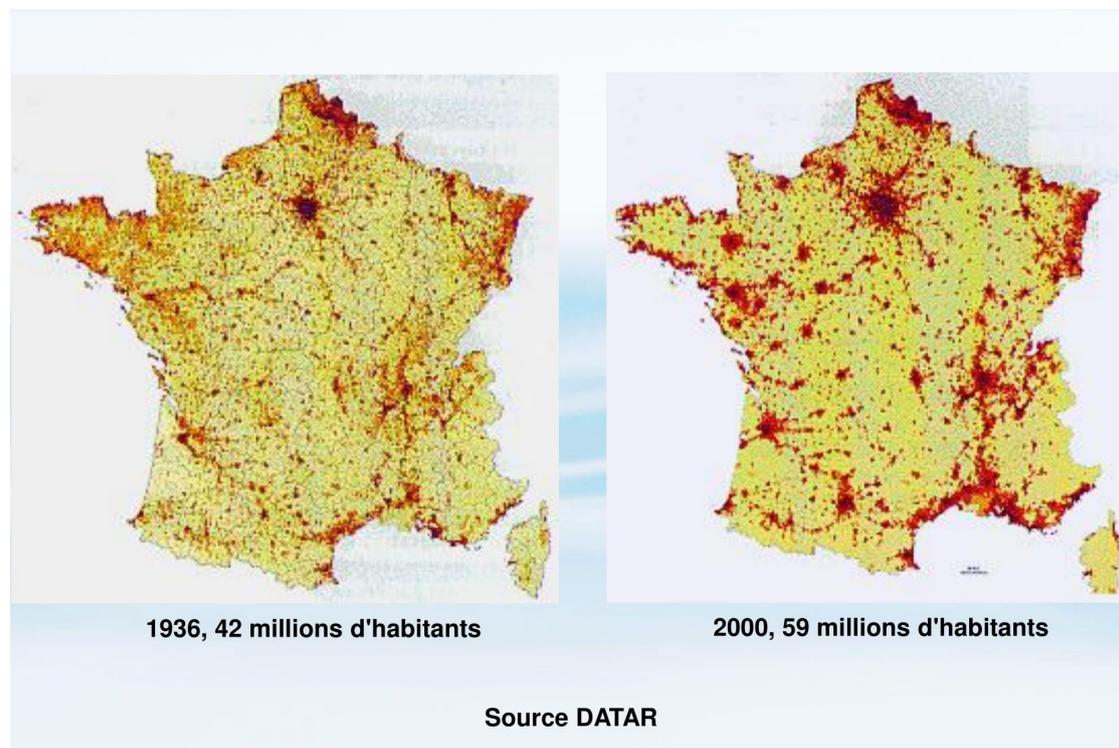
Aujourd'hui, à l'échelle macroscopique, dire que de faire circuler plus d'informations nous permettrait de faire circuler moins de personnes ou moins de marchandises, c'est faux. Ce n'est pas comme ça que ça marche.

Après, on peut se poser la question de savoir pourquoi ça ne marche pas comme ça, mais le résultat brut c'est qu'il ne suffit pas d'augmenter la quantité d'informations qui circulent pour se dire : « Ah ben là, *paf!*, le résultat que je

*42. LES KILO-OCTETS N'ONT PAS TUÉ LES KILOMÈTRES!*

vais obtenir, c'est qu'il y a moins de gens qui se déplacent ou moins de marchandises qui se déplacent. »

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



Diapositive 72.

*L'énergie a donc restructuré le pays.*

Ce que je vous présente pour la France s'est appliqué dans tous les pays qui ont eu accès à l'énergie, tous. Vous aviez des campagnes peuplées et des villes pas trop grosses. Vous êtes passés à des villes beaucoup plus grosses et des campagnes vides, et les villes se sont étalées.

Tous les pays ont suivi la même évolution. Les seuls pays qui ne l'ont pas suivie sont ceux qui ont eu des obstacles géographiques qui se sont opposés à cette évolution.

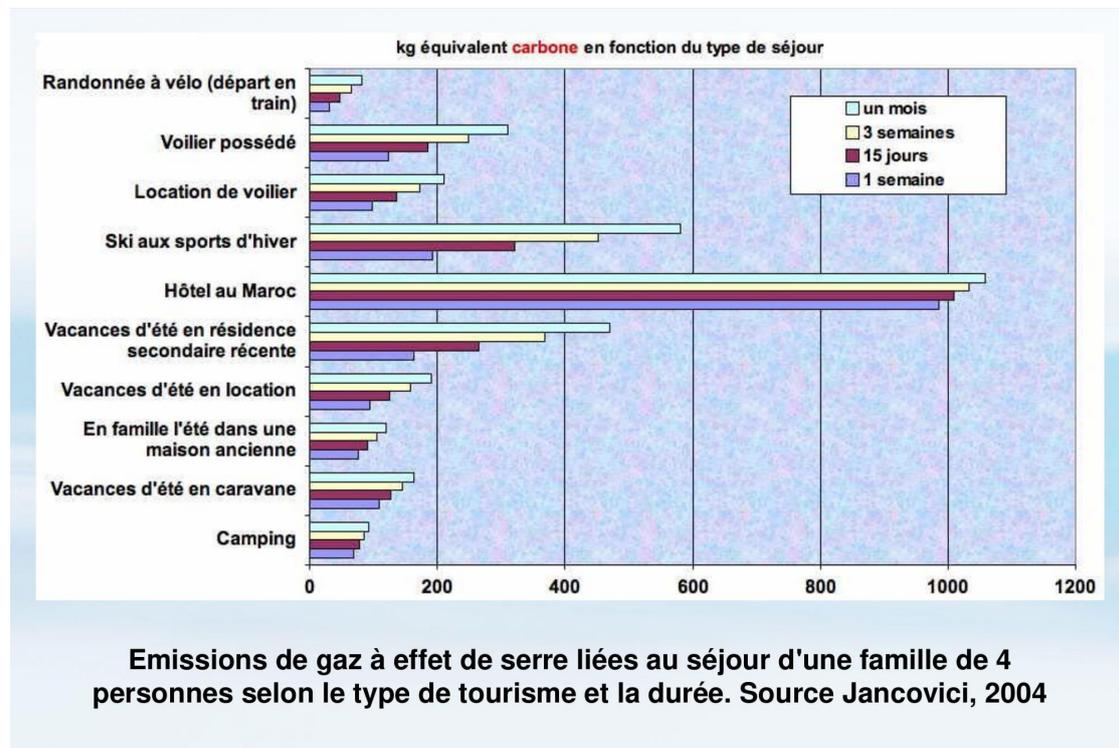
Je vais vous donner un exemple : la Suisse a effectivement fait grossir ses villes. Elle ne les a pas beaucoup étalées. Pourquoi ? Parce que, quand vous avez une ville qui est à fond de vallée, étaler la ville, ça veut dire grimper sur les flancs et c'est compliqué. Ils l'ont fait un peu, en mettant des chalets un peu partout, mais ils ne l'ont pas fait de manière massive. En particulier, ils n'ont pas

#### *43. PLUS D'ÉNERGIE = DES CAMPAGNES VIDES ET DES VILLES ÉTALÉES*

fait des hypermarchés en périphérie de ville, parce que mettre l'hypermarché en terrasse en haut de la ville c'est plus compliqué que de le mettre en périphérie des villes.

Encore une fois, les pays qui n'ont pas suivi cette évolution, c'est parce qu'ils ont eu une barrière physique qui les a empêchés de la suivre.

## 44. Vacances pour tous = du carbone, encore !



Diapositive 73.

Cette énergie abondante s'est également appliquée *aux loisirs*.

Les loisirs ont augmenté parce que, comme les machines produisent à notre place, ça nous libère du temps.

Ça nous libère du temps pour les études. À l'époque où il n'y avait pas de machines, il n'y avait pas d'études longues. Ça nous libère du temps pour la retraite. À l'époque où il n'y avait pas d'énergie abondante, il n'y avait pas de retraite. Ça nous libère du temps pour les vacances. Ça nous libère du temps pour ne rien faire le weekend et ça nous libère du temps pour ne travailler que 35 heures par semaine.

Tout ce temps libre que nous avons gagné, nous le devons à l'énergie abondante. Là-aussi, reprenez quelque chose qui va s'appliquer non seulement à vous mais aux gens avec qui vous allez travailler et vivre pour le restant de vos jours : dans un monde à l'énergie contrainte, ce n'est pas l'augmentation du temps libre bien géré qui va s'appliquer.

#### 44. VACANCES POUR TOUS = DU CARBONE, ENCORE!

Ce que vous voyez ici, c'est une des occupations du temps libre qui s'appelle le tourisme. J'ai fait un petit calcul, il y a quelques années ; je n'ai pas refait le calcul mais l'ordre de grandeur est toujours le même. Ça vous donne les émissions de gaz à effet de serre – donc, à nouveau, la consommation d'énergies fossiles – liée à la façon dont on passe ses vacances.

J'ai compté le déplacement initial, le fait d'aller sur le lieu de vacances, en train, en voiture, en avion. J'ai compté la fabrication éventuelle de l'objet dans lequel vous habitez pendant vos vacances : la tente, la caravane. La résidence secondaire, j'ai considéré que si on la faisait construire, je comptais quelque chose, si c'était la vieille belle-mère qu'il faut se farcir, on ne comptait rien parce qu'elle avait déjà sa maison qui était construite depuis longtemps. J'ai également pris en compte les déplacements locaux s'il y en a, etc. Si ce sont les vacances au ski, j'ai pris en compte le chauffage de l'appartement, puisqu'en général, le ski c'est compliqué quand il fait très chaud ; c'est plutôt un peu froid et donc les appartements sont chauffés, préférentiellement au fuel.

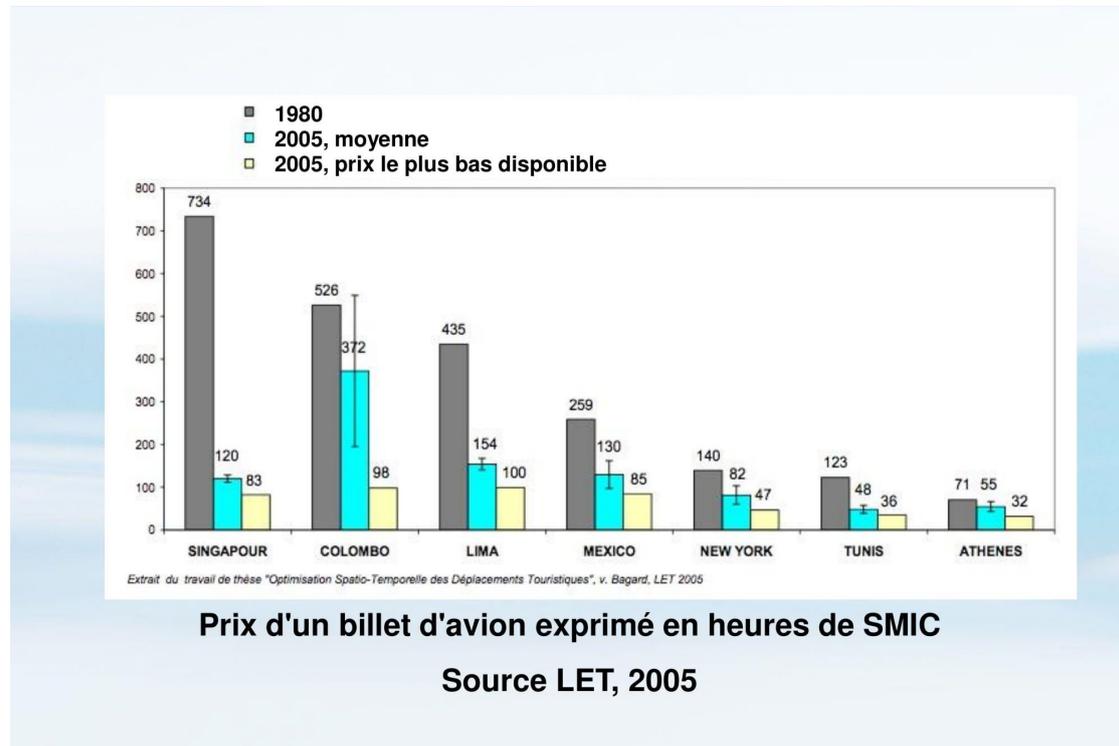
J'ai pris en compte tous ces trucs là, et vous constatez que la forme de tourisme la plus moderne : je vais me balader trois jours à l'hôtel en prenant l'avion, est également celle qui suppose la plus grande quantité d'énergie consommée pour s'offrir une semaine de vacances.

Regardez inversement les formes de loisirs apparues avec les congés payés : la randonnée à vélo et le camping – les gens prenaient leur vélo pour aller faire du camping ou ils prenaient le train pour aller faire du camping, comme ils ont fait au début – sont les formes les plus sobres en énergie fossile, donc en énergie tout court, pour être exercées.

Vous voyez à nouveau que *l'abondance énergétique a déformé nos modes de vie*. On doit de pouvoir bénéficier de cette offre de loisirs au fait que nous sommes sous perfusion énergétique, tous autant que nous sommes.

C'est pour ça que se développe actuellement en Suède par exemple, depuis quelques années – on en parle dans les médias depuis quelques semaines, mais en fait quand vous regardez les statistiques, ça date d'il y a quelques années – un début de diminution de la quantité d'avions pris par les Suédois. Il est maintenant qualifié par les médias de « honte » de prendre l'avion, parce que les Scandinaves ont une sensibilité environnementale plutôt plus développée que le reste des Européens, ce qui peut s'expliquer par des raisons historiques et géographiques.

## 45. Le carbone aéroporté lui-aussi est en solde



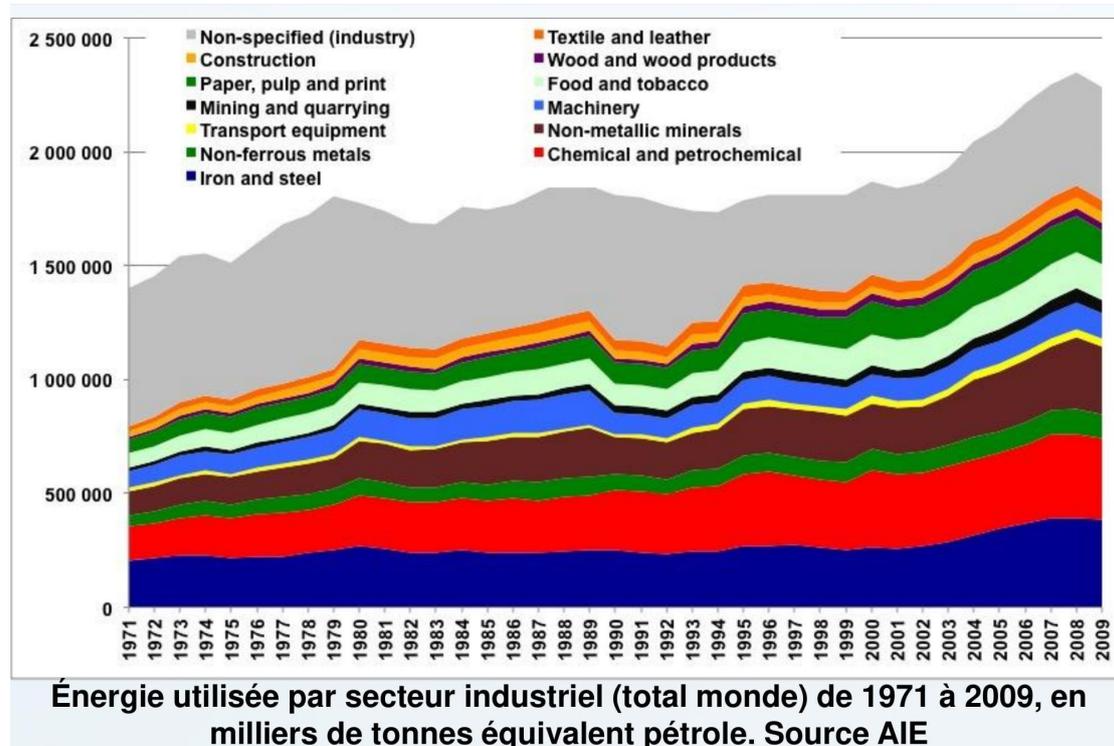
Diapositive 74.

On va retrouver ça sur le plan économique avec ce que prendre l'avion coûte, exprimé en heures de temps de travail. Je vous le redis, *le vrai prix des choses, ce sont les heures de temps de travail.*

Ce que vous constatez, c'est que le prix exprimé en heures de temps de travail pour prendre l'avion a été divisé par un facteur extrêmement important en l'espace de quelques décennies.

C'est une autre façon de dire que l'énergie est devenue plus abondante. C'est-à-dire que c'est plus facile de s'en payer plein avec une heure de temps de travail.

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



Diapositive 75.

L'énergie actionne également des machines industrielles, et les machines industrielles vont vous servir à fabriquer tous les objets qui vous entourent aujourd'hui : les tables sur lesquelles vous êtes accoudés pour certains, les chaises sur lesquelles vous êtes assis tous, les vêtements que vous portez, les lunettes pour certains, les chaussures, etc. Tout ça a été fabriqué par des machines industrielles.

L'énergie actionne les machines industrielles. C'est l'exosquelette qui permet de faire tout, y compris les ciseaux, les produits de beauté et les films de Netflix.

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



Diapositive 76.

Mais ça sert également comme matière première.

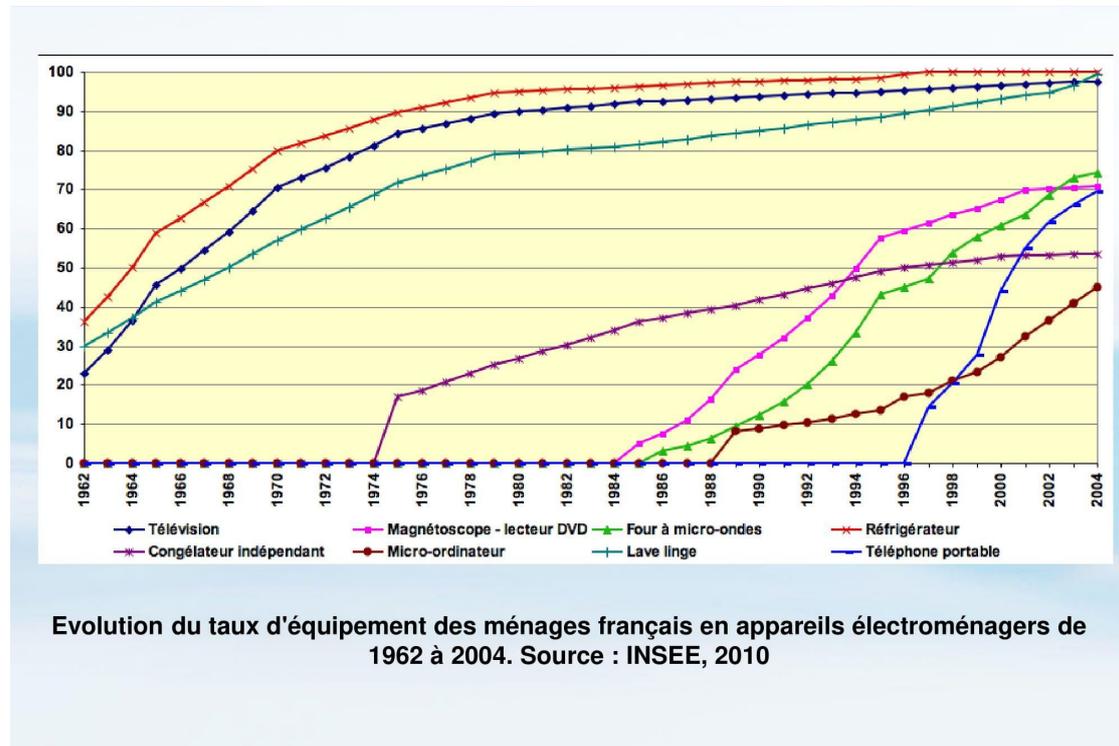
Vous avez dans l'énergie une composante qu'on appelle parfois non-énergétique. Vous me direz, le non-énergétique dans l'énergie, c'est quand même un peu compliqué. En fait, quand vous voyez des usages non-énergétiques de l'énergie, notamment du pétrole et du gaz, c'est que ça sert de matière première pour la *chimie organique*. Toute la chimie organique est basée sur des dérivés du gaz et du pétrole.

Des Américains ont fait un petit test rigolo. Ils ont sorti d'une maison tous les produits qui contiennent des dérivés du pétrole. *In fine*, il ne reste rien. Ils auraient dû arracher les parquets parce qu'il y a du vernis sur les parquets. Ils auraient dû arracher les rideaux. Ils auraient dû arracher la tringle à rideaux. Ils auraient dû enlever la peinture. Ils auraient dû tout enlever, quoi.

#### 47. SE PASSER DE PÉTROLE OU VIDER SON LOGEMENT, C'EST PAREIL

Le pétrole aujourd'hui n'est pas seulement quelque chose qui actionne une machine, c'est également la base de *la chimie organique pour fabriquer la totalité des produits qui nous entourent*. Parce que vous n'avez, à peu de choses près, pas un produit qui vous entoure dans lequel vous n'avez pas des dérivés du pétrole.

## 48. Plus d'électrons pour les Français aussi!



Diapositive 77.

Ces objets qui nous entourent, il faut les fabriquer. Derrière, certains d'entre eux vont également utiliser de l'énergie. Ici, vous avez par exemple l'évolution du taux en équipements électroménagers.

Je n'ai pas trouvé de série plus récente, les taux d'équipement ont considérablement augmenté partout. Mais, vous n'avez aujourd'hui pas un ménage dans lequel vous n'avez pas un frigo, un lave-linge, etc. Vous avez tout un tas de trucs qui utilisent de l'énergie.

L'industrie fabrique des objets et ça demande de l'énergie. Ensuite, on va se servir de certains de ces objets ces objets, jusqu'à la tondeuse à gazon, et ça va également utiliser de l'énergie. Et vous voyez que les taux d'équipement augmentent en gros partout et tout le temps.

## 49. 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 !**

Diapositive 78.

Je vous l'ai déjà dit, divorcer c'est énergivore.

Parce que quand on divorce, il faut doubler les logements, du coup vous doublez la consommation énergétique des logements. Plus exactement, vous l'augmentez à proportion de la nouvelle surface occupée. Vous avez besoin de fabriquer plus de logements, ça utilise de l'énergie, et vous avez besoin de meubler deux fois plus de logements.

Il y a des trucs que vous ne doublez pas vraiment, mais il y a des trucs que vous doublez. Par exemple, vous avez 2 fois plus de lits. Chacun dort dans un lit. Vous avez deux fois plus de lavabos, deux fois plus de plaques de cuisson, deux fois plus, etc. Tout ça, il faut le fabriquer. Quand il y a des enfants – ce n'est pas toujours le cas –, quand il y a des enfants, il faut les amener d'un foyer à l'autre. Cela demande des déplacements supplémentaires, parfois assez longs.

Comme je vous l'ai dit tout à l'heure, un certain nombre de choses qui aujourd'hui sont considérées comme normales, je redis : la retraite, les études, etc, c'est de l'énergie.

#### 49. ET ENCORE...

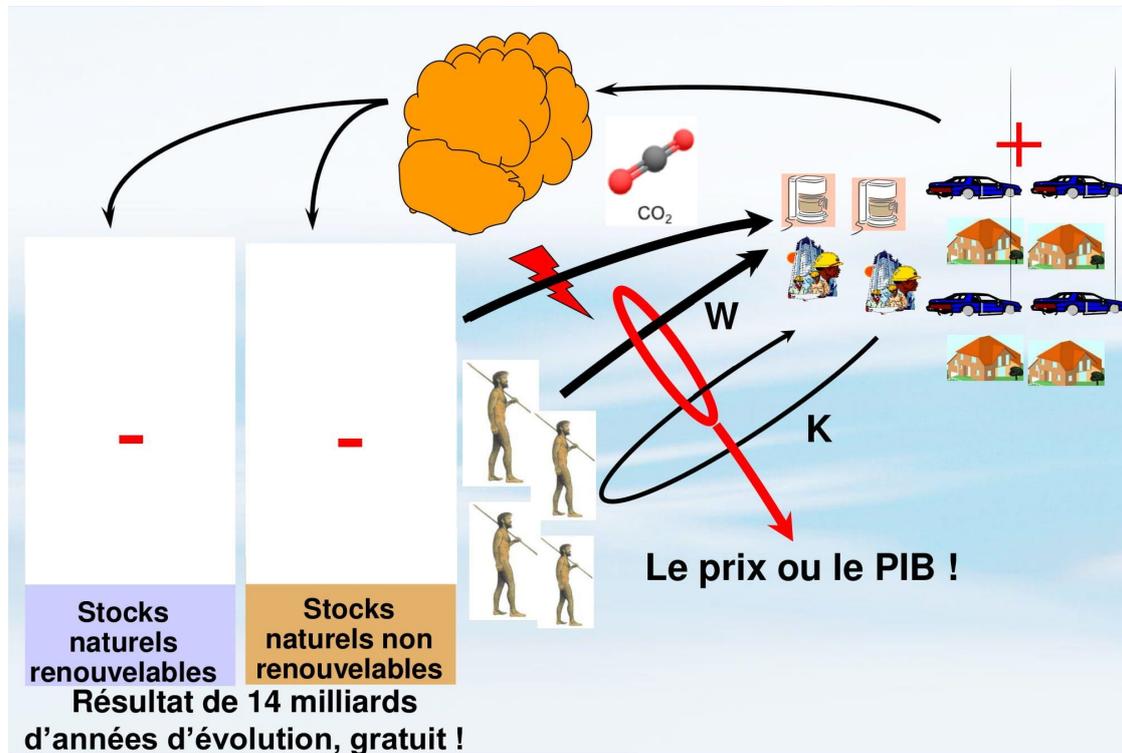
Quand Mitterrand, en 1981, a dit : « Tout le monde doit aller à l'université », ce qui était la promesse implicite derrière de : « Tout le monde aura un emploi de bureau », c'était une autre façon de dire : « Je vous promets la société de l'énergie abondante infinie » puisque je vous ai montré tout à l'heure que *tout le monde dans un bureau, c'est une société extrêmement énergivore*.

À l'époque où Mitterrand a dit : « Il faut que tout le monde aille à l'université », en réalité il a fait la promesse implicite qu'on allait pouvoir vivre dans *un monde de machines pour l'éternité*. C'est ça la promesse implicite qu'il a faite. Vous voyez que l'énergie, ce n'est pas du tout détachable de tout un tas de trucs, même et y compris de la façon dont on envisage l'accès à la compétence.

L'hôpital, c'est très énergivore également. En France, l'hôpital c'est à peu près 5% de l'empreinte carbone du pays. Comme l'a dit un humoriste célèbre : « Si c'est les vieux qui utilisent le plus de services de santé, il n'y a qu'à supprimer la dernière année de vie. » En attendant, ça pose quand même la question de savoir combien de temps, dans un monde à l'énergie contrainte, on pourra continuer à arbitrer en faveur des gens qui demandent un appareillage très lourd alors qu'ils sont déjà très vieux et du coup en défaveur de tous les autres, y compris les jeunes.

*Voilà, donc l'énergie est partout.*

## 50. L'économie mondiale en un clin d'œil



Diapositive 79.

Une fois que je vous ai dit ça, on va faire un tout petit peu d'économie.

Voilà la planète Terre... La planète Terre, comme disait Coluche, est carée avec les yeux dans les coins. Non... La planète Terre est constituée de ressources dans une vision anthropocentrique. Je vais me placer du point de vue des Hommes. Du point de vue des Hommes, la planète Terre, c'est des ressources. D'accord? C'est notre maison, c'est là où nous vivons, ce sont des ressources auxquelles on a accès.

Ces ressources, je vais les ranger en deux catégories : d'une part les ressources qui se renouvellent sur des échelles de temps courtes, je les appelle *renouvelables*, d'autre part des ressources qui ne se renouvellent pas sur des échelles de temps courtes, que j'appelle *non renouvelables*.

Le minerai de cuivre est définitivement non-renouvelable. Il n'y a pas de transmutation à large échelle sur Terre qui réalimente le stock de minerai de cuivre. Les combustibles fossiles, c'est renouvelable si vous attendez quelques

## 50. L'ÉCONOMIE MONDIALE EN UN CLIN D'ŒIL

dizaines de millions d'années. Ce n'est quand même pas une échelle de temps courte, donc je les colle dans « non renouvelables. »

Par contre, l'herbe où le rayonnement solaire, c'est raisonnablement renouvelable sur des échelles de temps courtes.

Ces ressources sont toutes gratuites et elles sont le résultat de tout ce qui s'est passé depuis le big bang, l'ensemble étant gratuit. Depuis le big bang, soupe de protons puis tout le reste, tout un tas de processus ont pris place. Aujourd'hui, nous avons gratuitement le tableau de Mendeleïev et toutes les combinaisons qu'il nous offre à la surface de la planète. Tout ça a été fait *gratuitement*.

Là-dessus, on arrive et on décide d'avoir une activité productive. Qu'est-ce que c'est que l'activité productive pour les Hommes? C'est se servir dans cette grande corne d'abondance de ressources et transformer les ressources pour en faire autre chose qui est plus intéressant que la ressource initiale.

Par exemple, j'ai des silex bruts, c'est plus intéressant d'avoir des silex taillés pour courir derrière mes proies. Par exemple, j'ai des cerfs, c'est plus intéressant d'avoir des bois de cerf taillés pour en faire un certain nombre de choses, etc.

L'activité productive des Hommes, c'est juste : je me sers dans les ressources existantes, je les transforme (transformation - énergie), j'utilise de l'énergie – à l'époque, évidemment, juste celle de mes bras, de mes jambes et du feu – et j'en fais autre chose.

Avec le temps, on va augmenter l'énergie qu'on va chercher à avoir à notre disposition – je redis : 500 000 ans de transition énergétique – ce qui va permettre d'augmenter la capacité productive de tout un chacun. On extrait plus vite des ressources et on les transforme plus vite.

Dès qu'on extrait de l'environnement des ressources non renouvelables pour les transformer en autre chose, le stock de ressources non renouvelables baisse. Au début, il ne baisse pas vite, encore qu'il semblerait par exemple que sur les silex, il y ait pu y avoir des pénuries locales au paléolithique. On a pu avoir, de temps en temps, des pénuries locales de ressources. Ne rigolez pas parce qu'à l'époque, ils en crevaient.

Avec le temps, on a également compris qu'il y avait une partie de ce qu'on transformait qu'on pouvait garder pour accélérer la transformation future. Ça s'appelle *le capital*. Le capital, c'est la partie de la production qui ne se consomme pas tout de suite et qui est réutilisable pour augmenter la production future.

## 50. L'ÉCONOMIE MONDIALE EN UN CLIN D'ŒIL

Tout ça est vachement bien. Nous croissons et multiplions. On produit de plus en plus, donc on vide de plus en plus vite les stocks non renouvelables. Et à un moment, on devient tellement productif et tellement nombreux qu'on se met également à commencer à *vider les stocks renouvelables*.

Aujourd'hui, on a commencé à vider les stocks d'espèces qui étaient renouvelables. On a commencé à vider les stocks de forêts, qui étaient renouvelables. On a commencé à vider les stocks de poissons, qui étaient renouvelables, etc. On commence même à vider les stocks de sols, qui se renouvellent lentement. On a commencé à vider un certain nombre de stocks qui étaient renouvelables.

J'ai dit transformation, j'ai donc dit énergie. Mais j'ai dit transformation, donc j'ai aussi dit sous-produits indésirables de la transformation. Quand vous transformez, il y a toujours un moment où vous avez *un sous-produit indésirable* de la transformation. Ces sous-produits indésirables de la transformation, on leur a donné un nom en français, ça s'appelle *la pollution*.

La pollution, c'est tous les sous-produits indésirables de la transformation, c'est-à-dire ceux qui vont avoir un effet que nous ne recherchons pas. Et, non seulement on ne le recherche pas mais il nous ennuie plutôt. En gros, la pollution c'est tous les emmerdements.

Dit en termes plus orthodoxes, ce sont tous les produits qu'on va introduire dans l'environnement et qui vont avoir pour effet de dégrader la qualité des actifs restants. C'est ça la pollution. Vous pouvez faire entrer dans cette définition le changement climatique, l'érosion de la biodiversité, la surpêche, etc.

Dans cette affaire, l'économie que nous avons mise sur pied – et que je vais détailler dans pas longtemps – consiste à compter ce flux annuel-là et à considérer qu'il n'y a que ça qui compte – je vais vous expliquer pourquoi.

En gros, on compte le moment où on transforme, puisque la transformation c'est l'action de l'Homme et que l'argent ne paie que des hommes. Dans cette affaire-là, on a décidé que le seul marqueur de ce flux physique, du système que je vous présente là, est la contrepartie monétaire du flux de transformation annuel. Ce flux de transformation annuel, dans le jargon des économistes, s'appelle *le PIB*, c'est la contrepartie monétaire.

On aurait tout aussi bien pu avoir une comptabilité qui dirait : « Je compte en plus ce que je fais, en moins ce que je détruis ». Puis, le jour où la valeur marginale de la dernière voiture que j'ai construite est inférieure à la valeur marginale des derniers bouts de minerai de fer, de minerai de cuivre, de minerai de lithium, de vanadium, de chrome et de combustibles fossiles que j'ai utilisés pour faire cette voiture, je m'arrête de faire des voitures et je vis « happily ever after » avec les voitures existantes.

## 50. L'ÉCONOMIE MONDIALE EN UN CLIN D'ŒIL

Vous voyez bien que ce n'est pas ça qu'on fait. En fait, le système économique est un système sans limite absolue. Rien dans le système économique ne vous dit : quand le PIB atteindra quatre-vingt mille milliards de dollars sur Terre, ça s'arrête.

*On a fait un système qui est potentiellement infini, c'est pour ça qu'il est si séduisant.*

## 51. 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)

Diapositive 80.

Alors pourquoi a-t-on fait ça ?

Parce qu'il y a deux siècles, quand on commence à théoriser l'économie, un certain nombre de gens font l'observation suivante, ils disent que l'économie c'est la gestion de ce qui est rare. Ce qui est rare il y a deux siècles, c'est le facteur humain. Vous avez plein d'espèces, plein d'espace, un vaste monde. Les États-Unis sont à peine au début de leur colonisation, la Russie est immense, on ne sait pas jusqu'où va l'océan, etc. Pas de problèmes de ressources. *Ce qui est rare il y a deux siècles, c'est le facteur humain.*

Les économistes, il y a deux siècles, à l'image de Monsieur Say – qui a écrit très exactement ce qui est écrit ici –, se disent : « Au premier ordre, je vais me contenter de regarder la limitation venant des Hommes, le reste je ne compte pas. Et si je considère que les ressources sont infinies, toute variation du stock est nulle ( $\Delta S$  sur l'infini, ça fait toujours zéro). Donc, je vais compter pour nuls les facteurs qui ne viennent pas des Hommes. » Approximation au premier ordre qui est toujours celle de l'économie aujourd'hui.

51. *SI NOUS SOMMES ICI, C'EST UN PEU À CAUSE DE LUI...*

Je vais dire quelque chose qui va faire beaucoup de peine à votre Directeur des Études qui vient d'entrer dans la salle : *toute l'économie qu'on vous apprend à l'école est fausse quand il s'agit d'approcher le système humain dans sa globalité.*

Quand il s'agit d'approcher des arbitrages au sein du système humain, ça marche. Quand il s'agit d'approcher la totalité des Hommes dans leur environnement, ça ne dit que des bêtises : ce n'est pas fait pour ça.

## 52. L'économie vue par Super Mario (ou Super Manuel)



Diapositive 81.

Dit autrement, l'économie que j'ai apprise à l'école et qu'on apprend toujours aujourd'hui, c'est que le système productif est alimenté par deux facteurs de production qui sont le capital humain et le travail humain, et ça suffit à remplir le supermarché.

Ça ne tient pas compte des machines, ça ne tient pas compte des ressources.

## 53. 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>

Diapositive 82.

Il se trouve qu'à l'époque, on aurait pu gagner la bataille d'une autre manière. Il se trouve qu'il y a deux siècles, Monsieur Charles Dupin, polytechnicien – donc quelqu'un de très bien –, baron de son état, fait un premier calcul de conversion en équivalent-esclaves.

À l'époque, il n'appelle pas ça des équivalent-esclaves, il appelle ça des équivalent-travailleurs. Monsieur Dupin dit : « Je vais regarder en France et en Grande-Bretagne les moyens productifs dont on dispose en plus des Hommes – donc lui, il avait tout compris à la physique – et je vais les convertir en équivalent-travailleurs humains. »

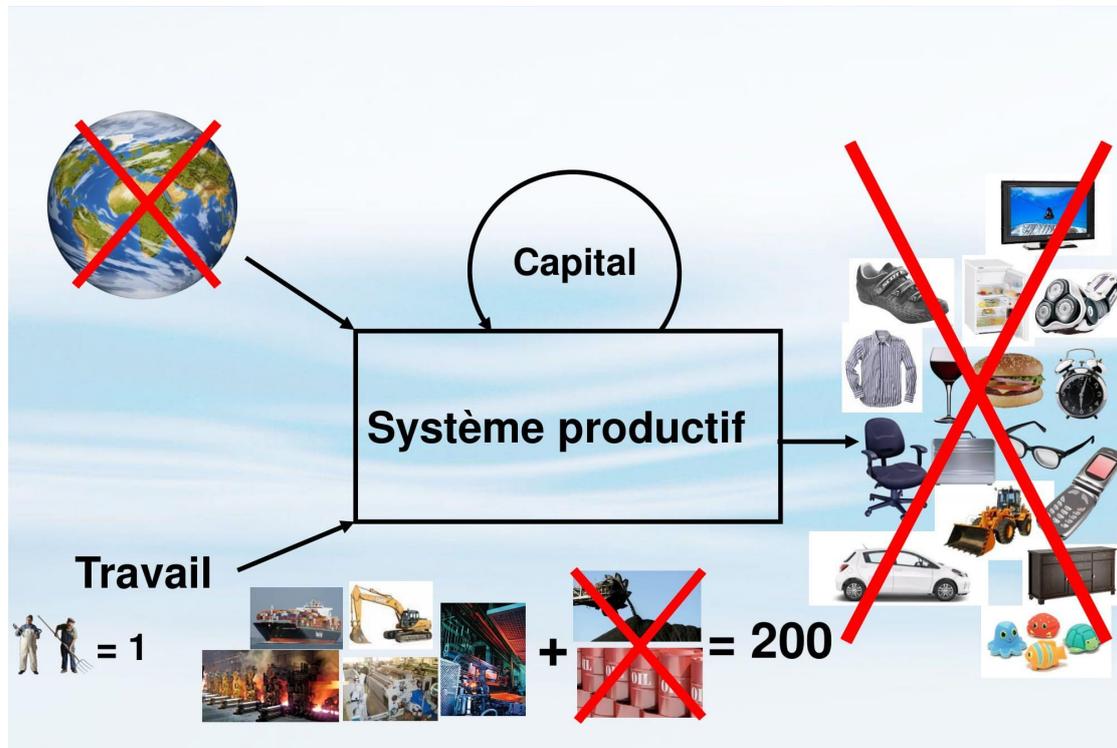
Il prend la population, il en fait des travailleurs humains – soit dit en passant, il comptait les enfants pour un quart et les femmes pour un demi et on se demande si ce n'est pas de là que vient l'expression « ma moitié » quand on parle de son conjoint. Toujours est-il qu'il prend la population et il prend également les auxiliaires que sont à l'époque les bateaux, les moulins, etc.

### 53. L'INGÉNIEUR AVAIT TOUT COMPRIS À LA FORCE DES MACHINES

Après, Monsieur Dupin dit : « Si je prends la population ET les auxiliaires, alors il devient normal que la Grande-Bretagne, qui a une population à peu près de la même taille que celle de la France, ait déjà une production industrielle trois fois supérieure. » C'est normal parce qu'il n'y a pas que les Hommes qui travaillent : il y a aussi les moulins, les animaux de trait et les bateaux.

Si, à l'époque, on avait écouté Monsieur Dupin et pas Monsieur Say, ce n'est pas complètement sûr qu'on aurait construit l'économie de la même manière. Ce n'est pas complètement sûr.

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



Diapositive 83.

Le physicien dit : « Ce que j'ai à droite, ce sont mes 92 éléments du tableau de Mendeleïev arrangés d'une autre manière que ce que j'avais dans les ressources initiales. » C'est juste ça. Il n'y a rien d'autre que les 92 éléments du tableau de Mendeleïev dans tous les objets de la vie courante. Sauf qu'on ne les a pas trouvés sous cette forme dans l'environnement.

Je les ai trouvés sous une forme, et je les ai transformés. Pour ça il me faut trouver mes 92 éléments du tableau de Mendeleïev – ça s'appelle les ressources – et les transformer.

Ma capacité de transformation – ce sont les calculs d'ordre de grandeur que je vous ai montrés tout à l'heure – vient pour 1 des muscles des Hommes et pour 200 d'Ironman, c'est-à-dire du parc de machines que nous avons construit. C'est mon rapport de 1 à 200 que je vous ai développé tout à l'heure.

Le capital dans cette histoire, c'est fait comme le reste. C'est-à-dire que cet immeuble, qui est un élément de capital, a été fait comme le reste en transformant des ressources naturelles. Cet immeuble est, comme le reste, fait en

#### 54. EN FAIT, IL VAUT MIEUX AVOIR DE LA RESSOURCE!

transformant du minerai de fer, c'est-à-dire du fer et de l'oxygène arrangé d'une certaine manière, c'est-à-dire des pierres, des ressources naturelles, c'est-à-dire de la peinture, ressource naturelle transformée, etc. C'est fait exactement de la même manière, juste ça ne se détruit pas quand on s'en sert. C'est-à-dire que, pendant que l'on est dans cette salle, ça ne s'effondre pas.

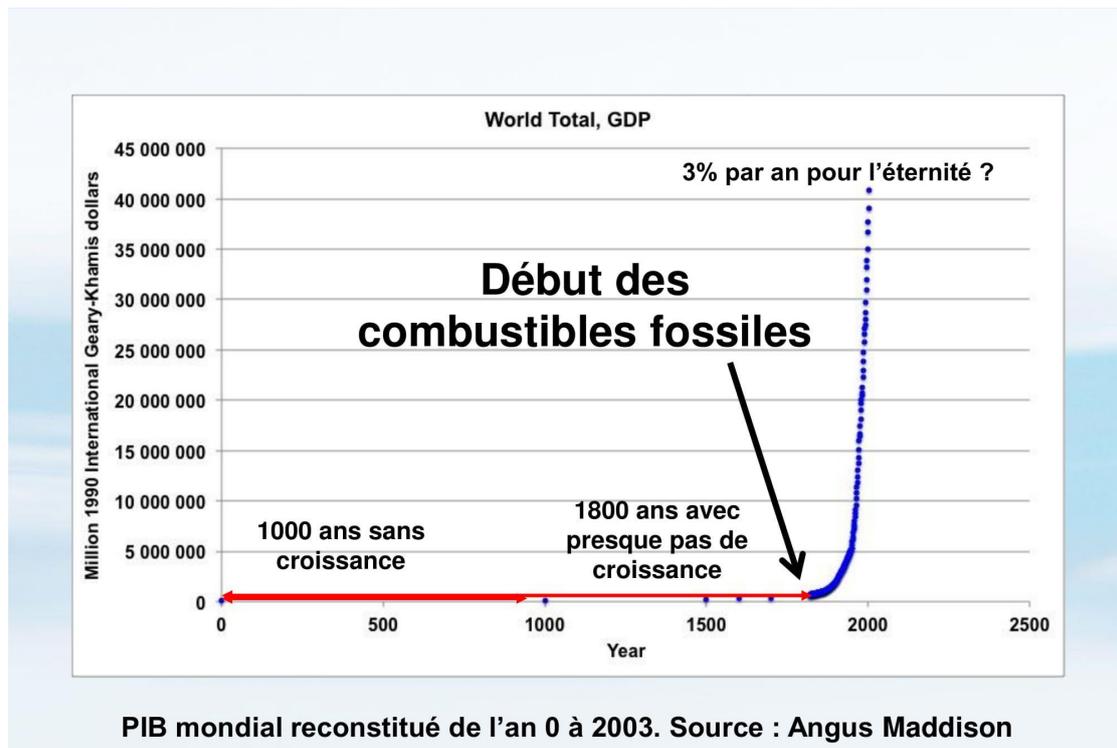
Vous comprenez là qu'il n'y a pas que les Hommes qui sont un facteur limitant du système. *Dans le monde moderne, l'énergie est un facteur limitant du système.*

Dit autrement, si je privais d'énergie mon parc de machines, je priverais mon système productif de sa capacité de production, même si les banquiers sont très sympathiques et même si les chômeurs sont prêts à aller bosser. Ça ne suffit pas dans le monde dans lequel nous vivons.

Si je prive le système de ressources, par exemple j'ai pas de poissons à pêcher, le PIB de la pêche est nul, sans moules pour ses moules-frites le PIB de Léon de Bruxelles est nul. Il faut qu'ils passent des moules-frites au steak-frites, mais sinon c'est nul, etc.

*Si vous n'avez pas les ressources et l'énergie, vous n'aurez pas la production même si vous avez des travailleurs très motivés et même si vous avez des banquiers très sympathiques.*

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



Diapositive 84.

Historiquement, jusqu'à maintenant, tout ça n'a pas été un facteur limitant. Le facteur limitant est effectivement les Hommes.

Vous avez ici la reconstitution du PIB depuis l'an zéro. c'est-à-dire depuis la naissance de Monsieur Jésus-Christ. Vous voyez que, tant qu'on n'a pas d'auxiliaires mécaniques en quantités significatives, il n'y a pas de croissance. La population est raisonnablement stable. À cette époque là, comme un homme est productif comme son système musculaire et pas plus, le pays le plus peuplé du monde a le premier PIB de la planète et c'est la Chine, absolument.

La Chine aujourd'hui dit une chose dans le concert des nations : « Écoutez, ne nous faites pas rire. Pendant deux millénaires, on a été la puissance économique dominante de la planète. Ce n'est pas parce qu'un siècle de pétrole a mis les États-Unis à notre place que ça va changer notre vision du monde. Donc d'abord on va retrouver notre place et ensuite on discute ». C'est à peu près comme ça que les choses se présentent.

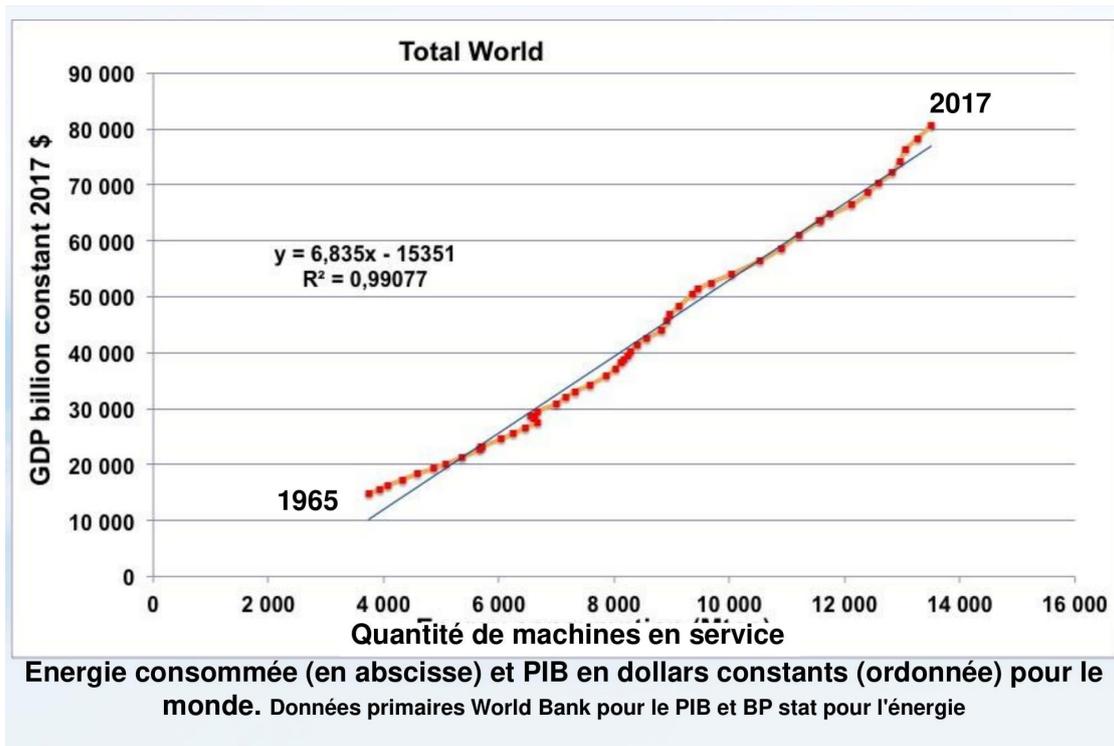
## 55. LES PROMESSES ÉLECTORALES : PLUS FACILES IL Y A 1000 ANS

Très peu d'auxiliaires mécaniques, très peu de croissance. Arrivée en masse des auxiliaires mécaniques et des combustibles fossiles, et crac!, les modèles économiques disent que nous allons avoir trois pour cent de croissance pour l'éternité.

Ne rigolez pas. Il se trouve que je fais partie d'une instance qui s'appelle le Haut Conseil pour le Climat. On nous a présenté il y a trois semaines la Stratégie Nationale Bas Carbone élaborée par certains de vos anciens à qui on a obligé à dire que de diminuer fortement, de diviser par 6 à 7 la quantité d'énergie fossile qu'on entrerait en France permettrait d'augmenter le PIB français.

C'est dans le texte parce que les modèles économiques vous le disent. Parce que les modèles économiques peuvent vous dire que l'on augmente le PIB en divisant l'énergie par 10 puisque l'énergie n'est pas un input. Il n'y a aucun problème.

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



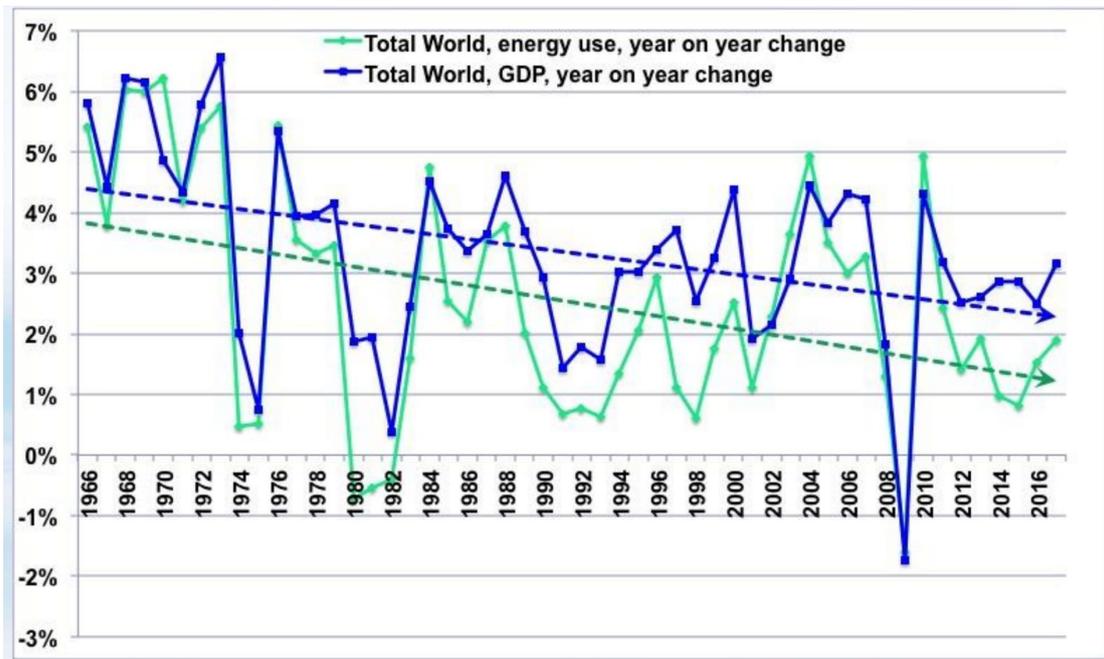
Diapositive 85.

*En attendant, ce n'est pas ce qui se passe. Je vous présente le meilleur modèle macro-économique du monde qui s'appelle une droite.*

Vous avez ici en abscisse la quantité d'énergie utilisée par les Hommes, c'est-à-dire, je le répète, le parc des machines en service.

En ordonnée, la valeur économique de la production, qui suit de façon à peu près linéaire. Très simple.

## 57. 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

Diapositive 86.

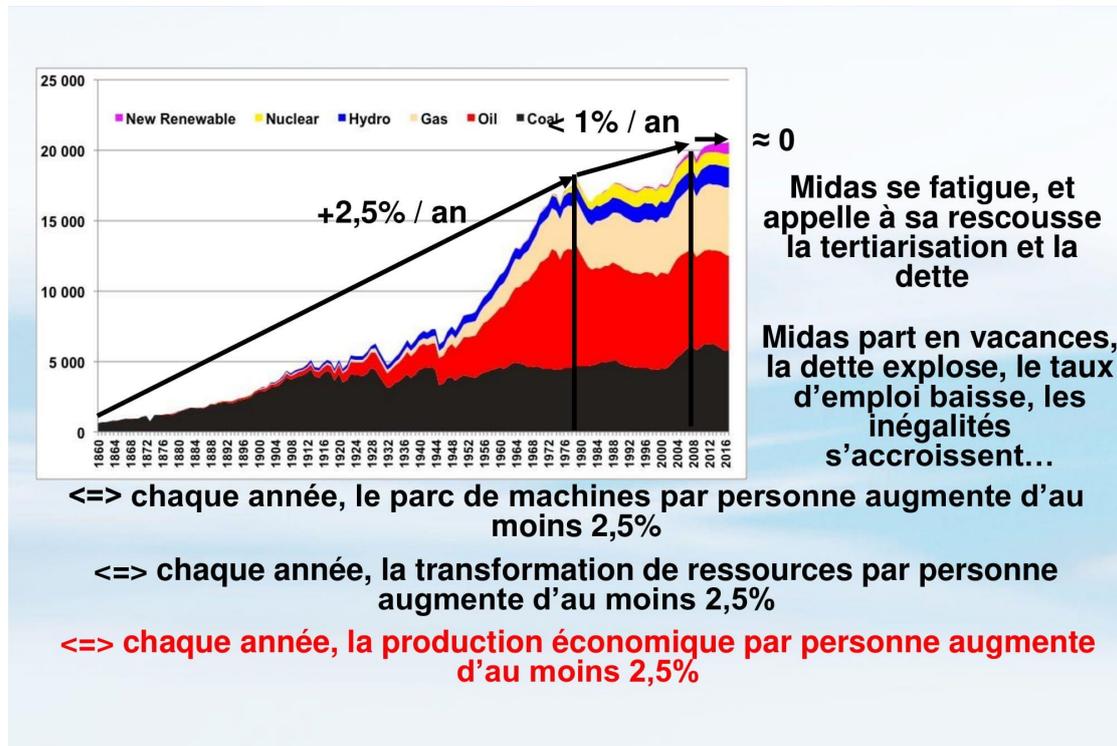
C'est valable en valeur absolue, c'est également valable en variation.

Vous avez en vert la variation annuelle de la quantité d'énergie utilisée sur Terre, c'est-à-dire la variation annuelle du parc des machines en service et en bleu la variation annuelle de la production économique humaine.

Vous voyez que : « Donne m'en l'un, je te donne l'autre et donne moi l'autre, je te donne l'un. »

Je vais vous le dire autrement : les euros ne font que mesurer monétairement un flux que les kilowattheure mesurent physiquement. Ces deux unités de compte regardent la même chose, c'est-à-dire un *flux de transformation*.

## 58. C'est la valse à trois temps...



Diapositive 87.

Je reviens à ma courbe que je vous ai montrée tout à l'heure de l'approvisionnement énergétique par personne, et cette fois je vais en faire un autre commentaire.

Vous voyez que sur l'époque qui va jusqu'au choc pétrolier, l'approvisionnement énergétique augmente de 2,5% par an par personne. Ça veut dire que le parc de machines par personne augmente d'au moins 2,5% par an. Vous avez un peu d'efficacité énergétique qui s'ajoute.

Ça veut dire que tant que vous n'avez pas de facteurs limitants sur les ressources à transformer, la production physique par personne augmente d'au moins 2,5% par an. Donc, la contrepartie monétaire de cette production augmente d'au moins 2,5% par an. En fait, vous allez voir, c'est un peu plus.

Après les chocs pétroliers, vous voyez que le rythme se tasse. En fait, il se tasse totalement pour les pays de l'OCDE – ce qu'on appelle les pays riches, les pays occidentaux – et le surplus que vous avez là, c'est l'essor de la Chine, puis plus tard des autres pays émergents.

## 58. C'EST LA VALSE À TROIS TEMPS...

Ça se traduit par l'essor de la quantité de charbon par personne qui est un effet de moyenne. En fait, dans les pays occidentaux, la quantité de charbon utilisée n'augmente pas, baisse même un peu. Par contre, ça explose en Chine, et aujourd'hui la Chine utilise la moitié du charbon consommé dans le monde.

À ce moment, le système commence à ralentir un peu. C'est-à-dire qu'on continue à avoir une hausse de la production physique par personne beaucoup plus faible, et beaucoup plus faible que le rythme de redistribution auquel on s'était habitué pendant cette époque là.

C'est-à-dire qu'on a organisé dans tous les états occidentaux du monde, un État-providence, plus ou moins. Moins providence aux États-Unis, plus providence chez les Scandinaves. Mais, dans tous les pays du monde, on organise un État-providence qui redistribue une partie de ce qui est produit et le rythme de croissance de la redistribution est calé sur le rythme de croissance de la production, c'est-à-dire quelques pour cent par an.

Et on ne met pas dans le système de capacité à le corriger rapidement si la croissance s'essouffle. On ne dit pas aux fonctionnaires : « On vous prévient, si la croissance s'essouffle, les augmentations à l'ancienneté, ça s'arrête. » On ne dit pas aux retraités : « On vous prévient, si le rythme de croissance s'essouffle, automatiquement vous partirez à la retraite plus tard et moins bien payés. », etc.

On ne dit pas toutes ces choses-là, non. On dit : « Si la croissance s'essouffle, on continue à vous payer la même chose et à vous augmenter à l'ancienneté de la même manière. » À ce moment, il faut trouver l'argent quelque part et on s'endette.

Dans tous les pays occidentaux, la dette publique était inexistante avant les chocs pétroliers, enfin très faible. Elle apparaît et se développe partout. Ce n'est pas seulement que les politiques français soient des incapables. La dette publique apparaît et se développe partout dans tous les pays occidentaux après les chocs pétroliers exactement parce que 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 – je vous dirai au cours prochain pourquoi – l'approvisionnement énergétique par personne se met à devenir à peu près constant à nouveau dans le monde. En fait, il décline dans la zone OCDE, je vais vous montrer juste après.

Là, le système part en vrille : crise financière massive de Lehman Brothers, qui est une conséquence de ce que je suis en train de vous dire – je vais vous

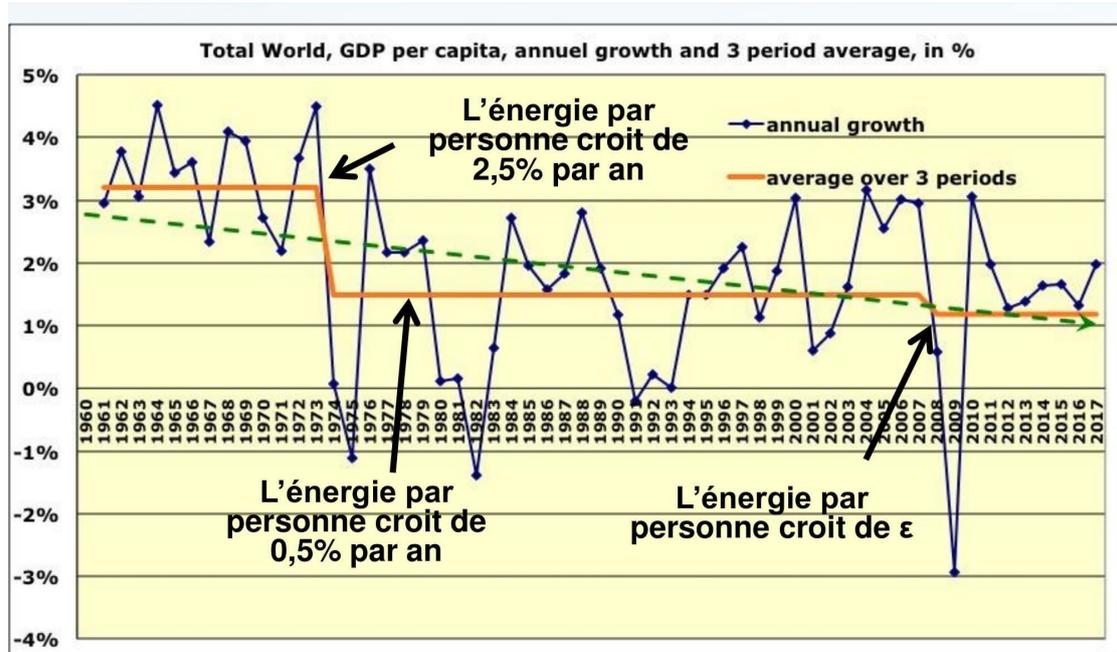
## 58. C'EST LA VALSE À TROIS TEMPS...

montrer dans pas longtemps chronologiquement – et non une cause. L'endettement se met à exploser.

On arrive dans un truc qui est inconnu depuis très longtemps qui s'appelle les taux d'intérêts négatifs, etc. C'est la réponse du système au fait que l'on a bâti quelque chose qui dépendait de l'abondance énergétique et que cette abondance énergétique commence, à petite vitesse aujourd'hui, à s'effiloche.

D'ici à ce que vous ayez mon âge, on va passer la surmultipliée dans ce domaine-là. C'est pour ça que votre avenir ne sera pas la prolongation tendancielle du passé.

## 59. It's the kWh, stupid?



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

Diapositive 88.

Quelques courbes pour finir.

Voici la variation du PIB par personne dans le monde, donc de la production économique par personne dans le monde depuis 1960, ici en variation annuelle.

Je vous ai mis en orange des moyennes sur trois périodes qui sont : jusqu'au choc pétrolier, entre le choc pétrolier de 79 et le choc pétrolier de 2007-2008 et depuis le choc de 2007-2008.

Je ne vais pas vous parler aujourd'hui d'un petit artefact parce que c'est trop long, mais l'endettement est quelque chose qui permet de faire du PIB sans production. C'est un peu compliqué, mais ici vous commencez à avoir un effet de bord.

Vous voyez qu'à l'époque des Trente Glorieuses, l'énergie croît fortement par personne et la production par personne croît encore plus fortement puisqu'il y a le gain d'efficacité énergétique entre les deux. Les ingénieurs savent faire une voiture plus efficace, la même voiture qui avance avec moins de pétrole, ou

### 59. *IT'S THE KWH, STUPID?*

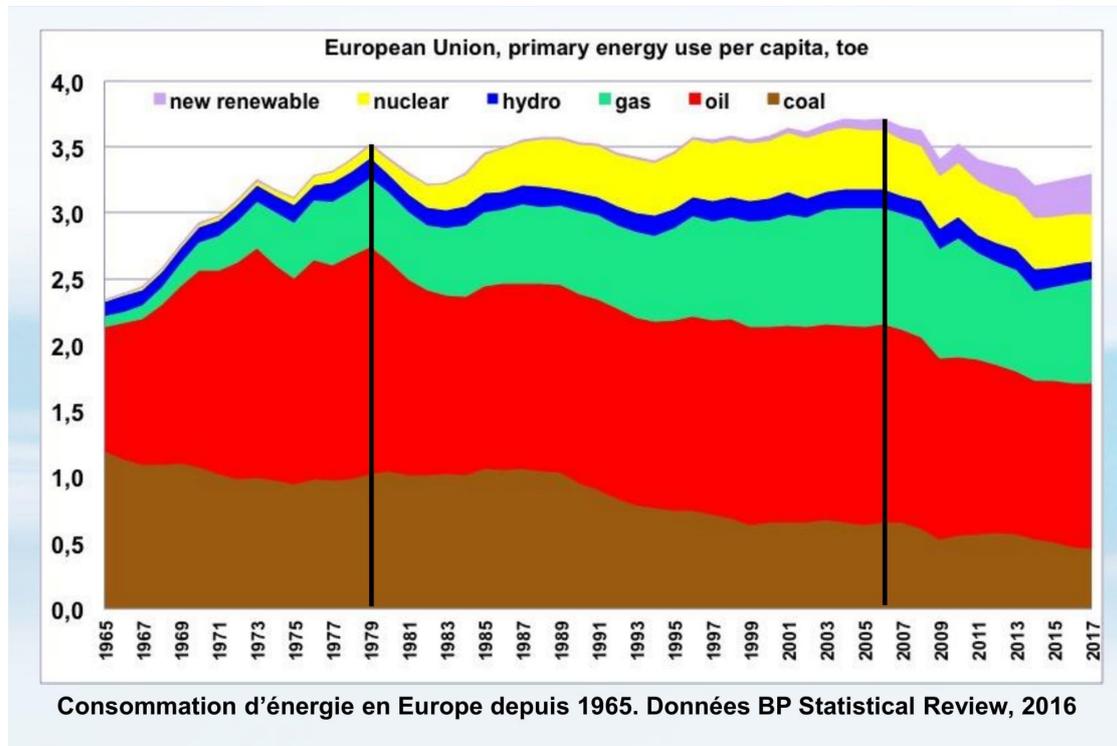
une voiture plus grosse vendue plus cher qui avance avec la même quantité de pétrole.

Après, vous voyez que l'énergie par personne augmente moins vite, c'est plutôt 1%, en fait seulement 0,5%, et le PIB par personne se met à croître moins vite.

C'est très contrasté là. Vous voyez aussi qu'il y a un grand épisode de volatilité. Vous voyez que ça baisse. En fait, vous avez deux régions dans le monde qui évoluent de manière très discriminées à partir de ce moment-là, l'OCDE et le reste.

Je vais vous montrer là où nous vivons, c'est-à-dire l'OCDE.

## 60. Sécurité d'approvisionnement? Quelle sécurité?



Diapositive 89.

Voici comment évolue un premier morceau de l'OCDE, c'est-à-dire l'Union Européenne dans laquelle nous vivons.

Jusqu'aux chocs pétroliers, l'approvisionnement énergétique par personne augmente fortement. Entre les chocs pétroliers et 2006 très peu. Le maximum est en 2006 deux ans avant Lehman Brothers : ce n'est pas Lehman Brothers qui a provoqué la crise économique qui a fait baisser la quantité d'énergie utilisée. C'est la contraction de l'approvisionnement énergétique disponible qui a ralenti le PIB.

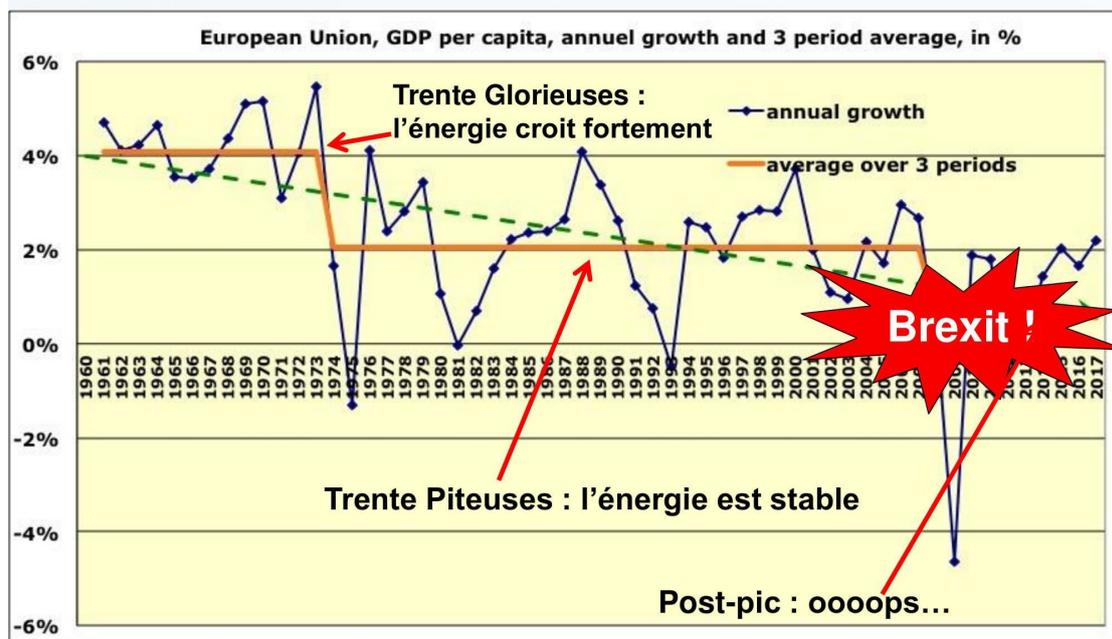
A partir de 2006, la contraction de l'approvisionnement énergétique disponible a rendu incapables les emprunteurs de rembourser la dette qu'ils avaient commencé à contracter au moment où l'économie a ralenti une première fois quand l'approvisionnement énergétique a commencé à ralentir (1979). C'est un fusil à 2 détente.

## 60. SÉCURITÉ D'APPROVISIONNEMENT? QUELLE SÉCURITÉ?

Quand l'approvisionnement énergétique a commencé à ralentir (1979), *on commence à s'endetter* pour compenser le fait que l'énergie s'arrête d'augmenter. Au moment où l'énergie commence à baisser (2006) on n'a même plus la capacité à se réendetter à la bonne vitesse pour rembourser la pyramide de Ponzi qu'on avait commencé à créer.

Sur les dernières années, vous voyez un effet de ce dont je vous parlerai la prochaine fois, qui est la réalimentation du marché mondial de l'énergie à partir des pétroles et gaz de roche-mère aux États-Unis, enfin du pétrole surtout.

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



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

Diapositive 90.

Vous voyez qu'en Europe jusqu'au choc pétrolier le PIB par personne augmente fortement au moment des Trente Glorieuses. Ensuite l'énergie par personne s'arrête de croître mais le PIB par personne continue d'augmenter. Et depuis 2006, l'augmentation est quasi nulle.

Soit dit en passant, la production industrielle de l'Europe aujourd'hui est toujours inférieure à ce qu'elle était en 2007. Les tonne-kilomètres en camion aujourd'hui en Europe sont inférieures à ce qu'elles étaient en 2007. L'indice de la construction aujourd'hui en Europe est inférieur à ce qu'il était en 2007.

Une partie de l'augmentation du PIB qu'on a eu depuis 2007, c'est du faux PIB, c'est un artefact de comptabilité qui, en gros, est une mauvaise correction de l'inflation, si je le dis autrement.

À ce moment vous demandez aux Grands-Bretons : « Est-ce que vous êtes contents ? » Les Grands Bretons vous disent : « Non. »

## 61. C'EST (À NOUVEAU) LA VALSE À TROIS TEMPS

Je vous rappelle qu'à un référendum, en général, vous répondez à celui qui pose la question, vous ne répondez pas à la question. De Gaulle l'a appris à ses dépens, du reste le premier référendum qui a eu en France sur la Constitution Européenne, vous vous rappelez du résultat, on a donc reposé la question d'une autre manière. Le référendum, historiquement, c'est un très bon moyen de répondre à celui qui pose la question et non pas à la question. Donc les Anglais disent à celui qui pose la question : « On n'est pas content de la façon dont les choses se passent. »

Soit dit en passant, à partir du moment où le PIB par personne n'augmente plus et où vous créez un espace de libre circulation dans une zone où vous avez une différence de 1 à 5 entre ce que gagnent les gens à l'Est et ce que gagnent les gens à l'Ouest, qu'est-ce que vous pensez qu'il se passe ? Ça s'équilibre.

Quand vous êtes dans un univers en expansion ce n'est pas grave parce que vous pouvez augmenter les revenus des gens d'un côté pendant que vous continuez à augmenter, ou au moins vous ne diminuez pas les revenus des gens de l'autre côté. Quand l'Espagne et le Portugal entrent dans l'Union Européenne à une époque de forte croissance, le pouvoir d'achat des Français peut continuer à augmenter en même temps que le pouvoir d'achat des Espagnols augmente fortement.

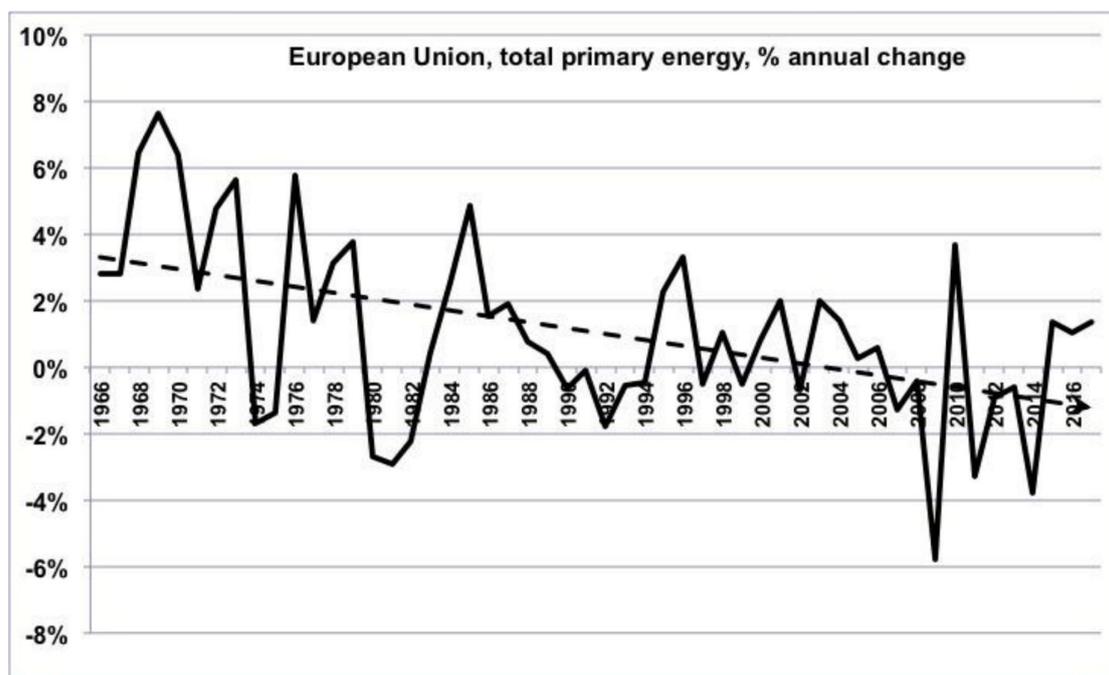
Mais quand vous faites entrer en 2005, c'est-à-dire deux ans ou un an avant le maximum énergétique européen, les pays de l'Est en leur disant : « Venez dans la danse, votre PIB va augmenter en même temps que le nôtre va continuer à augmenter. » Et là, crac!, l'énergie par personne se met à baisser. À ce moment le PIB de la zone n'augmente plus, votre effet de vases communicants s'applique et tout ce que les pays de l'Est vont prendre, les pays de l'Ouest vont le perdre. C'est mécanique.

Il y a deux manières de le perdre. Le plombier polonais vient à Londres et ça vous donne ce résultat-là. La deuxième manière de le perdre c'est Renault qui investit en Roumanie et à ce moment les ouvriers français gueulent. Ce sont les deux manières avec lesquelles le processus de rééquilibrage s'applique.

Ce n'est que le début. Tant qu'on restera dans un espace dans lequel chacun circule et paie comme il veut, alors que vous avez des différences de potentiel initial que vous ne pouvez pas homogénéiser par le haut, vous allez avoir des rééquilibrages avec la perte pour un certain nombre de gens. Donc, la tentation du Frexit, de l'Italixit, de l'Espaxit et de la Suèdexit vont augmenter.

Toutes ces pressions vont augmenter à cause de ça. Et, à l'origine vous trouvez l'énergie.

## 62. 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.

Diapositive 91.

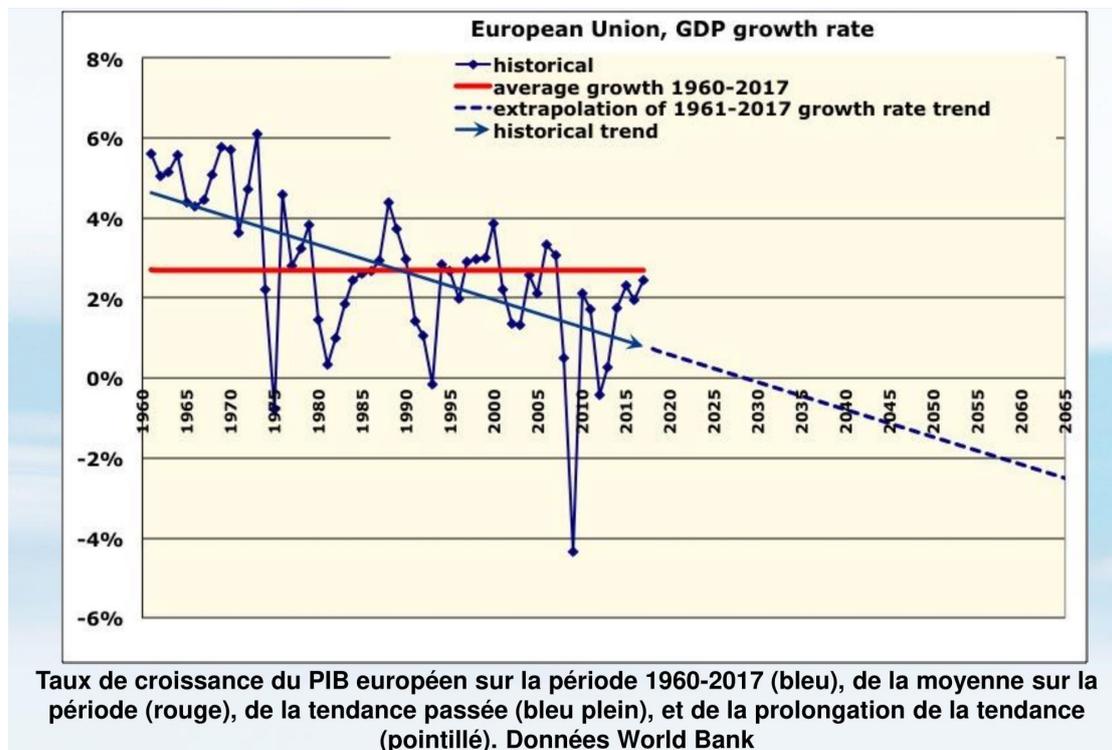
Quand vous faites une analyse de tendance, vous constatez, soit dit en passant, que cette variation de l'approvisionnement énergétique par personne est héritière d'une tendance très lourde – et je vais revenir dessus au prochain cours – qui s'exprime depuis des décennies.

Ici vous avez une courbe qui vous donne la variation de l'approvisionnement énergétique de l'Union Européenne. Ce n'est pas son approvisionnement, c'est sa variation depuis 50 ans.

Vous voyez que la variation, avec des grands écarts, suit une tendance où elle est forte, un peu moins forte, un peu moins forte, un peu moins forte, un peu moins forte, et puis il y a un moment où on entre en territoire négatif et, soit dit en passant, à ce moment là, on se met à avoir quelque chose qui est raisonnablement volatil.

Si on se dit que cette dérivée seconde a de bonnes raisons d'être représentative de la dynamique interne du processus, à ce moment vous vous dites...

## 63. ... et donc aussi pour le PIB



Diapositive 92.

... que la suite de l'histoire, c'est que l'approvisionnement énergétique va continuer à baisser, donc que le taux de croissance du PIB, qui était de plus en plus faible sur la même période, va continuer à baisser et passer en territoire durablement négatif.

Donc la vie qui nous attend, vous et moi, pour les quelques décennies – si tout se passe bien, *virgule*, également –, a toutes les chances de ne ressembler en rien à ce que j'ai connu depuis que je suis né.

C'est-à-dire que *ce ne sera pas un monde d'expansion, ce sera un monde de contraction*. On va avoir besoin de votre génie créatif parce que je vous assure que gérer un monde en contraction est autrement plus redoutable comme exercice d'optimisation sous contraintes que gérer un monde en expansion. On va vraiment avoir besoin de vous.

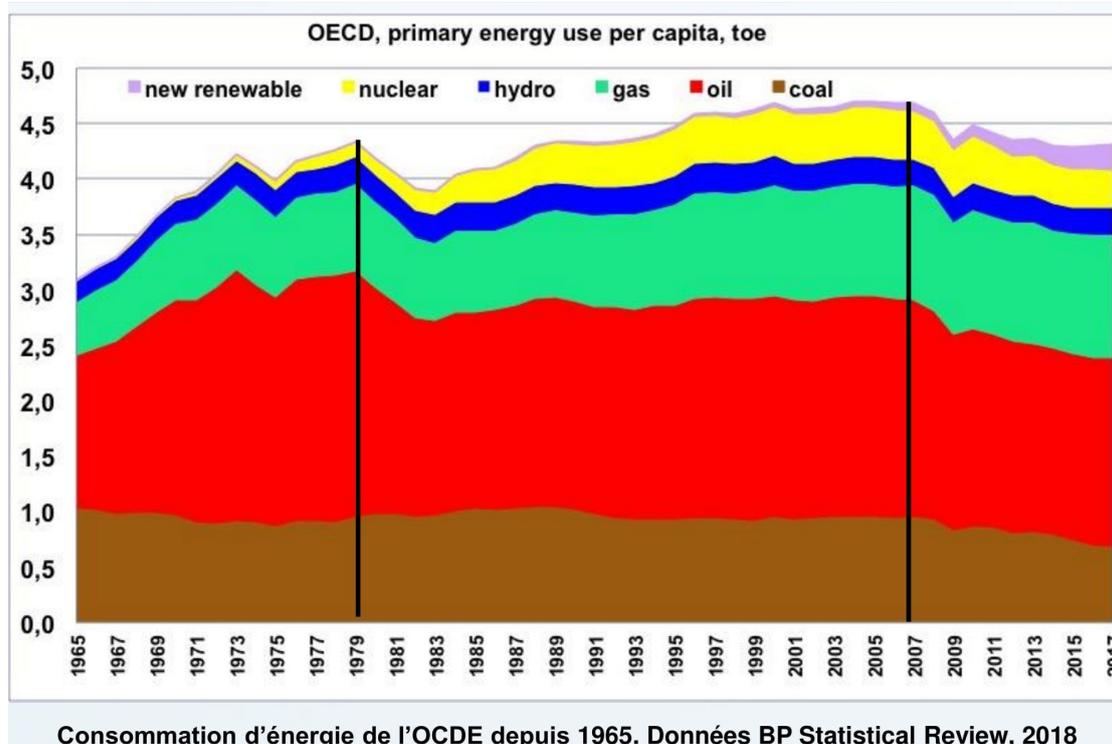
On a aussi besoin de moi, mais on va vraiment avoir besoin de vous au sens où on va vraiment avoir besoin des cervelles le mieux sélectionnées du pays

63. ... *ET DONC AUSSI POUR LE PIB*

pour s'attaquer à un des problèmes les plus durs qu'on va avoir à résoudre qui est de garder un système à peu près stable dans un contexte de contraction des ressources disponibles.

Je peux vous assurer que ce que vous avez vu à l'écrit et à l'oral du concours, c'est de la petite bière à côté de ça.

## 64. Nous ne sommes pas seuls!

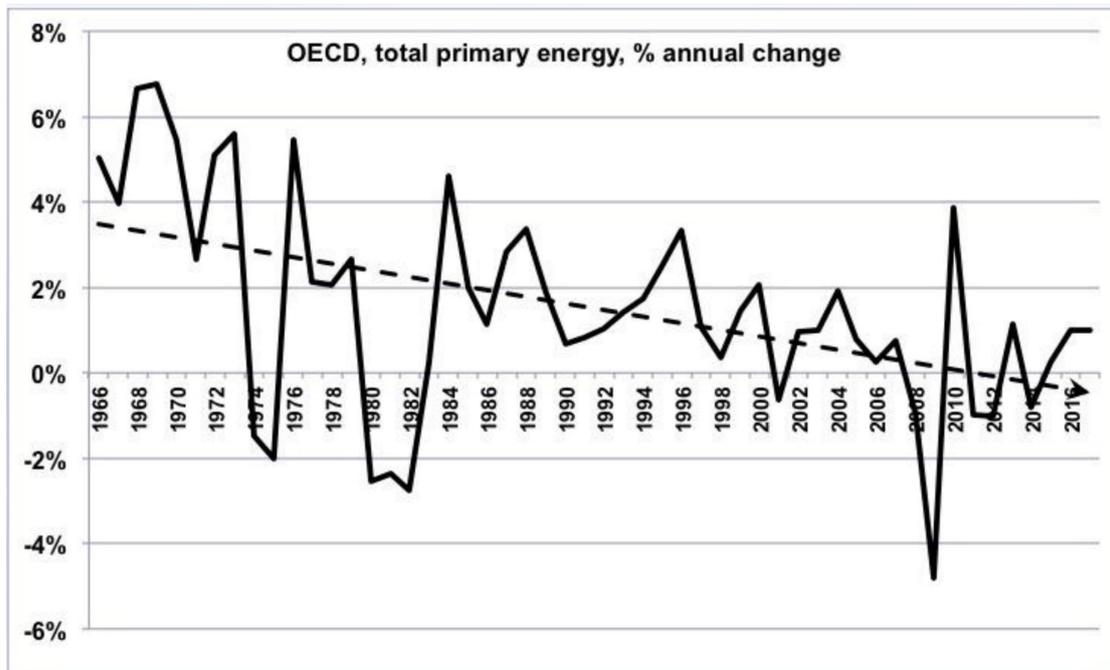


Diapositive 93.

Je prends la zone OCDE dans son ensemble et je vais finir par ça : même motif, même punition.

L'approvisionnement par personne augmente jusqu'en 79, passe par un maximum en 2006. C'est aussi vrai aux États-Unis : aux États-Unis, l'approvisionnement énergétique par personne est passé par un maximum deux ans *avant* Lehman Brothers, j'insiste.

## 65. Tous les pays « riches » ralentissent

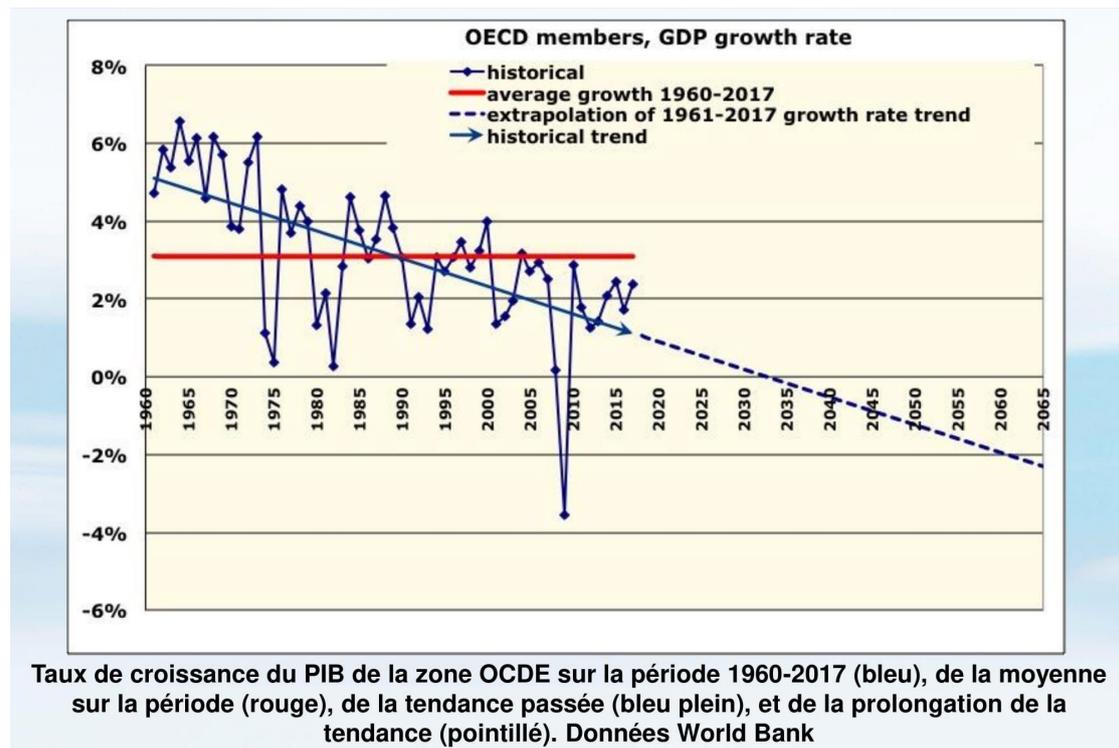


Variation de la consommation d'énergie dans la zone OCDE depuis 1966. Données BP Statistical Review 2018, traitement par l'auteur.

Diapositive 94.

Vous avez également cette évolution qui, en fait, reflète une évolution en tendance qui a pris place depuis très longtemps.

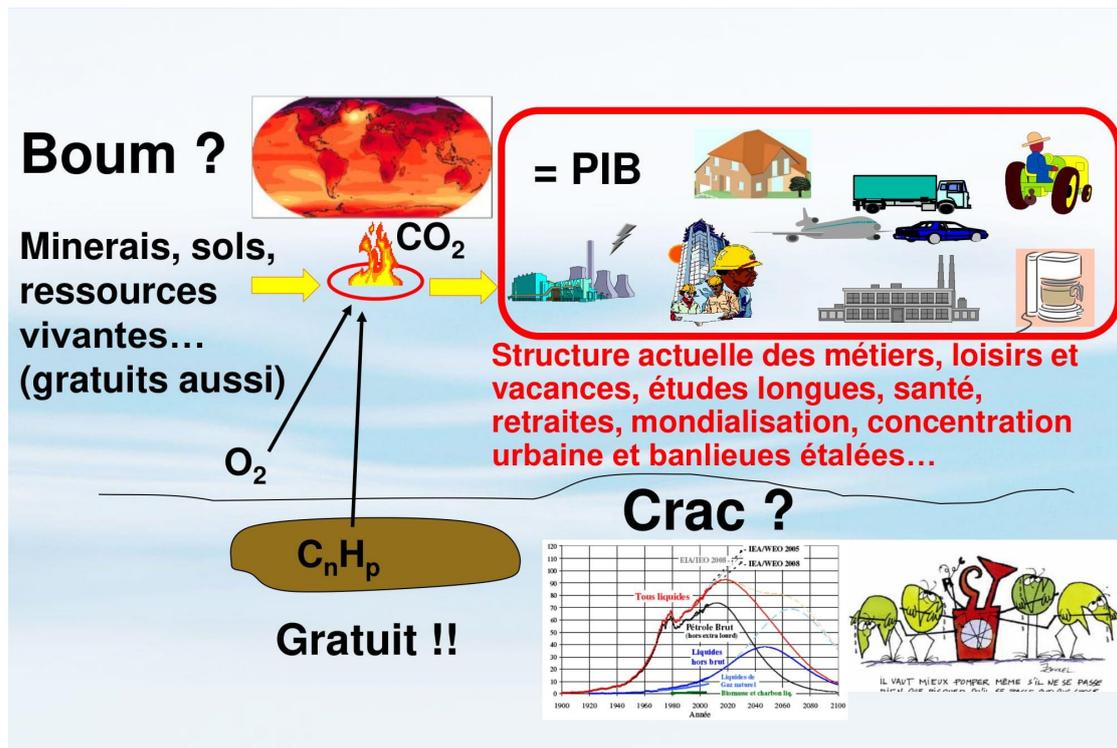
## 66. Et une partie de votre carrière se fera dans « l'autre sens »



Diapositive 95.

Il va vraisemblablement se passer à peu près la même chose dans cette zone-là, puis dans le monde dans son ensemble.

## 67. Conclusion – L'ère du feu, croissance à gogo, et 2 questions



Diapositive 96.

Ce que je vous ai raconté au cours de ce premier module c'est que le monde dans lequel nous vivons a notamment été permis – pas que, mais a notamment été permis – par le fait que nous avons trouvé gratuitement sous nos pieds des poches de soleil – comme le dit très joliment Yann ARTHUS-BERTRAND –, c'est-à-dire de l'énergie fossile, gratuite, avec un très fort pouvoir calorifique, donc une très grande capacité exothermique qui nous a permis de transformer à vitesse accélérée la totalité des autres sources tout aussi gratuites que nous avons trouvées sur Terre.

Ça nous a permis de construire le système socio-économique dans lequel vous avez grandi, c'est-à-dire l'essentiel des gens en ville, l'essentiel des gens dans des activités de services, tout le monde mangeant du steak à tous les repas, les gens ayant énormément de temps libre et les revendications du MEDEF et de la CGT auxquelles on peut faire droit sans problème. Et, soit dit en passant, le

## 67. L'ÈRE DU FEU, CROISSANCE À GOGO, ET 2 QUESTIONS

programme d'échanges internationaux de MINES ParisTech puisqu'il faut des avions pour ça.

C'est le monde dans lequel nous avons grandi.

La manière dont je comptabilise le flux de transformation est une manière que j'ai construite, par construction, sans limite, puisque le seul truc qui était vraiment embêtant dans l'affaire, c'est-à-dire le fait que la Terre fait 13 000 kilomètres de diamètre et pas 14 000 et pas 15 000, je l'ai passé sous silence, j'ai mis ça sous le tapis.

Sur la base de cet axiome, qui n'est qu'une approximation au premier ordre, j'ai raffiné mes visions depuis deux siècles mais sans remettre en cause un axiome fondamental qui est que la Nature est gratuite. Évidemment, je ne vois pas cette limite puisqu'elle n'est pas dans le système.

Au prochain cours, on regardera le goulet d'étranglement qui peut éventuellement s'appliquer en amont du système et qui s'appelle l'approvisionnement en énergies fossiles.

On ne regardera pas ce qui est un des premiers facteurs limitants du système, c'est-à-dire la pollution, dont la pollution bien particulière qui s'appelle le changement climatique. Le changement climatique n'est que la conséquence aval de ce flux de transformation.

On pourrait, évidemment, si on avait le temps, regarder l'approvisionnement en métaux, qui est un autre facteur limitant possible du système, l'approvisionnement en espèces, qui est un autre facteur limitant possible du système, etc. Mais on va regarder, on va disserter sur l'approvisionnement amont en combustibles fossiles c'est-à-dire en capacité de transformation.

Voilà le tableau dans lequel on va se situer pour le prochain cours auquel je vous donne rendez-vous. Bonne soirée.

*Fin.*



## **THE SHIFTERS: association de bénévoles en soutien au SHIFT PROJECT**

THE SHIFTERS est un réseau de bénévoles aux profils, expériences et compétences très variés (mais qui se rejoignent par leur intérêt) pour la transition carbone de l'économie, qu'ils soient déjà actifs dans ce domaine ou non.

### **Les Shifters se consacrent à trois missions:**

- *Appuyer* THE SHIFT PROJECT dans ses travaux, en mettant ponctuellement à disposition de l'équipe du SHIFT leur force de travail et/ou leurs compétences.
- *S'informer*, débattre et se former sur la décarbonation de l'économie (sous ses aspects aussi bien scientifiques que techniques et politiques, au sens large, et en termes d'enjeux, d'acteurs, de solutions et d'actualité).
- *Diffuser* les idées et travaux du SHIFT dans leurs propres réseaux et développer de nouveaux réseaux dans la décarbonation de l'économie. Ils s'appuient pour ce faire sur les cinq valeurs fondamentales que sont l'exigence scientifique et technique, l'ouverture, l'impartialité, le professionnalisme et la convivialité.

### **Rejoindre les Shifters**

Que vous soyez traducteur, professeur, en recherche d'emploi, père au foyer, artiste, ingénieur ou écrivain, médecin ou jardinier, antiquaire ou maraîchère, tous les talents sont les bienvenus pour relever ensemble les défis du changement climatique et de la transition énergétique!

- *Si vous voulez nous rejoindre*, rendez-vous sur l'onglet *Nos bénévoles* « Shifters » à l'URL suivante: <https://theshiftproject.org/equipe/>
- *Pour toute autre question*, vous pouvez envoyer un mail à: [contact-shifters@theshiftproject.org](mailto:contact-shifters@theshiftproject.org).