

Éléments de base sur l'énergie au XXI<sup>e</sup> siècle  
Partie 7 – Les renouvelables



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=Z4teA8ciuRU>

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

## 1. Qu'est-ce qu'une énergie renouvelable ?

**Une énergie renouvelable est tout simplement... une source d'énergie qui se renouvelle plus vite, ou aussi vite, que son utilisation par notre espèce :**

**La biomasse, et tous ses dérivés (agro-carburants, biogaz, etc), dans la limite de ce qui a poussé dans l'année**

**L'hydroélectricité, le cycle de l'eau se chargeant de remonter en altitude (précipitations & ruissellement) l'eau qui a été turbinée**

**Le rayonnement solaire, certes épuisable en 5 milliards d'années !**

**Le vent**

**Ces énergies ne sont équivalentes ni en potentiel, ni en rendement, ni en coût, ni en usages...**

Diapositive 2.

Aujourd'hui, nous allons parler des énergies renouvelables. En France, on aime beaucoup les définitions et commencer par les concepts, c'est exactement ce qu'on va faire. Donc, une énergie renouvelable est tout simplement une énergie dont le stock se renouvelle au moins aussi vite que la vitesse à laquelle on tape dedans. C'est ça la définition d'une énergie renouvelable. Vous remarquerez que c'est une définition anthropo-centrée. Donc, c'est renouvelable du point de vue des échelles de temps qui sont pertinentes en ce qui concerne l'espèce humaine. Sinon, la formation des étoiles dans l'univers est renouvelable.

Alors, si on regarde en pratique, ça recouvre tout ce qui dérive de la photosynthèse : la biomasse et ses dérivés directs (le pétrole ne rentre pas dedans), c'est-à-dire tout ce qui dérive de l'action directe ou indirecte du Soleil sur les éléments. Dans l'action du Soleil sur les éléments vous avez : la mise en mouvement de l'atmosphère (le vent), la mise en mouvement de l'eau par le cycle de l'eau évaporation / condensation, le fait que du rayonnement électromagnétique nous arrive en direct, etc.

## 1. QU'EST-CE QU'UNE ÉNERGIE RENOUVELABLE ?

Évidemment, vous ne trouvez pas dedans ce qui ne correspond pas à cette définition, donc les énergies fossiles, puisque le temps caractéristique de reconstitution est hors de proportion avec les échelles de temps qui intéressent les Hommes. Vous ne trouvez pas non plus le nucléaire, qui n'est pas une énergie fossile mais qui est quand même une énergie qui dépend de l'existence d'un métal qui ne se renouvelle pas sur Terre. Il arrive parfois qu'on trouve dans la presse que le nucléaire est une énergie fossile : non ce n'est pas une énergie renouvelable mais ce n'est évidemment pas une énergie fossile.

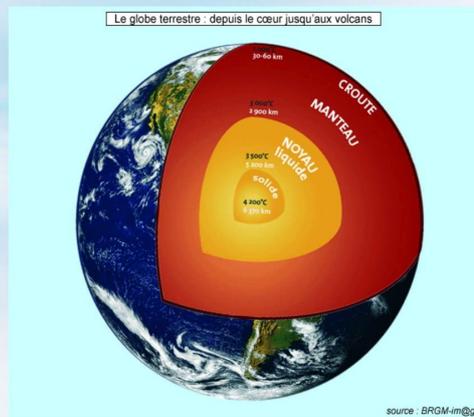
On va voir aujourd'hui que les énergies renouvelables... En fait, cet article défini est de trop parce que les énergies renouvelables ne sont absolument pas équivalentes les unes avec les autres, ni en termes de potentiel, ni en termes de facilité d'utilisation. En fait, on a affaire à des choses qui sont extrêmement variées et pas du tout homogènes. Et par ailleurs, on peut avoir quelque chose sur lequel je reviendrai à plusieurs reprises qui est que l'énergie peut très bien être renouvelable et son dispositif de capture non. Et donc, quand vous avez une énergie renouvelable avec un dispositif de capture qui est féroce non renouvelable, on va voir que l'on s'en rapproche pour certaines d'entre elles. À ce moment, ça se discute de savoir quel est le terme dominant dans ce cas, quel est le gène dominant dans cette histoire. Est-ce que le gène dominant c'est que c'est renouvelable, ou est-ce que le gène dominant c'est que ce n'est pas renouvelable parce qu'on utilise un dispositif de capture qui ne l'est pas ?

## 2. Qu'est-ce qu'une énergie renouvelable (bis)

Il arrive que l'on mette dans les énergies renouvelables des « fausses renouvelables » :

L'exploitation thermique des déchets (mais le déchet est-il renouvelable ?)

La géothermie, qui porte surtout sur l'exploitation du stock de chaleur accumulée (gigantesque) et non sur le flux annuel (très faible)



Diapositive 3.

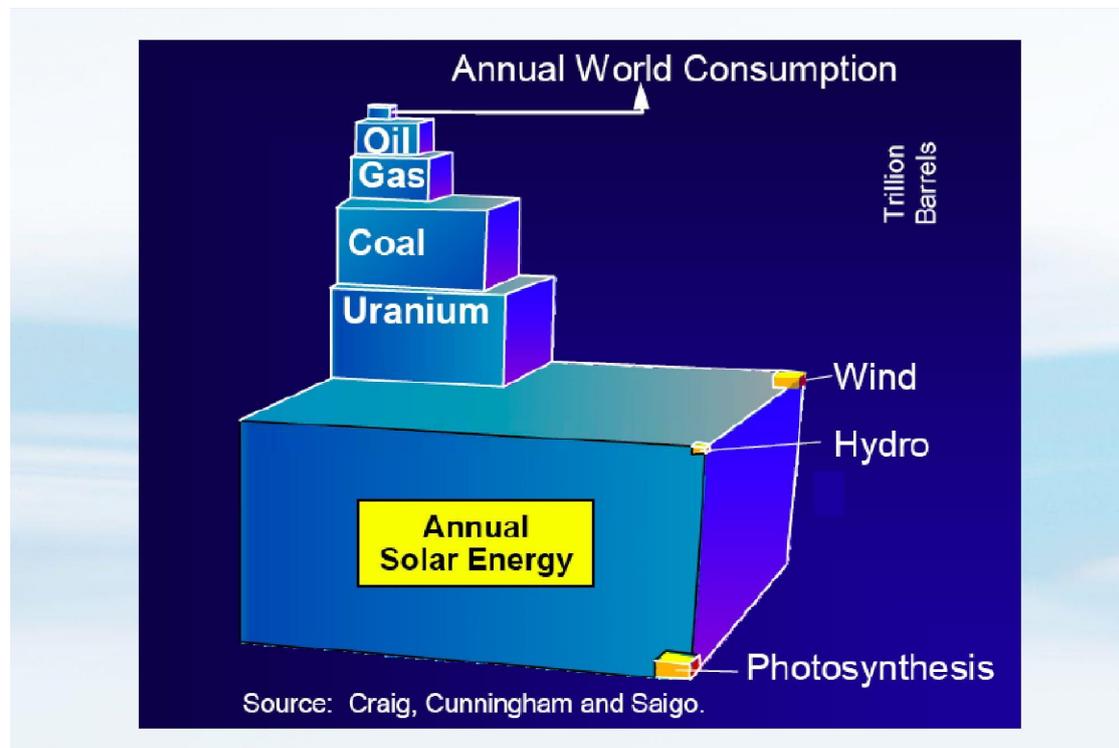
Il arrive aussi qu'on mette dans les renouvelables des choses qui sont non totalement renouvelables. Il arrive qu'on mette dedans l'exploitation thermique des déchets. En fait, la fraction des déchets qui est issue de la biomasse – à la fois les déchets organiques divers et le papier – est considérée comme renouvelable quand on la brûle (en France) dans un incinérateur et que l'on comptabilise sa contribution à la chaleur produite par l'incinérateur qui est valorisée ensuite. Ça, ça rentre parfois dans l'énergie. Normalement, la chaleur de combustion des plastiques, non.

Enfin, il y a une deuxième énergie qu'on met parfois dedans à tort : l'énergie géothermique profonde. On verra qu'il y a deux types d'énergie géothermique : une de surface et une profonde. La géothermie profonde consiste essentiellement à refroidir la Terre. Mais les ordres de grandeur sont tels que vous serez tous morts et moi aussi, même si on avait de la géothermie profonde partout, avant qu'on ait significativement refroidi la Terre en utilisant la géothermie profonde pour nos besoins. Donc le stock initial est extrêmement important.

## *2. QU'EST-CE QU'UNE ÉNERGIE RENOUVELABLE (BIS)*

Il n'empêche que ce n'est pas tout à fait une énergie renouvelable. La fraction qui est purement renouvelable dans la géothermie, c'est l'incrément de chaleur qui arrive tous les ans par la désintégration radioactive des quelques éléments radioactifs à l'intérieur de la Terre. Ça c'est renouvelable. Enfin, c'est renouvelable tant qu'il y a de la décroissance radioactive.

### 3. Le verre à moitié plein : quelle abondance !



Diapositive 4.

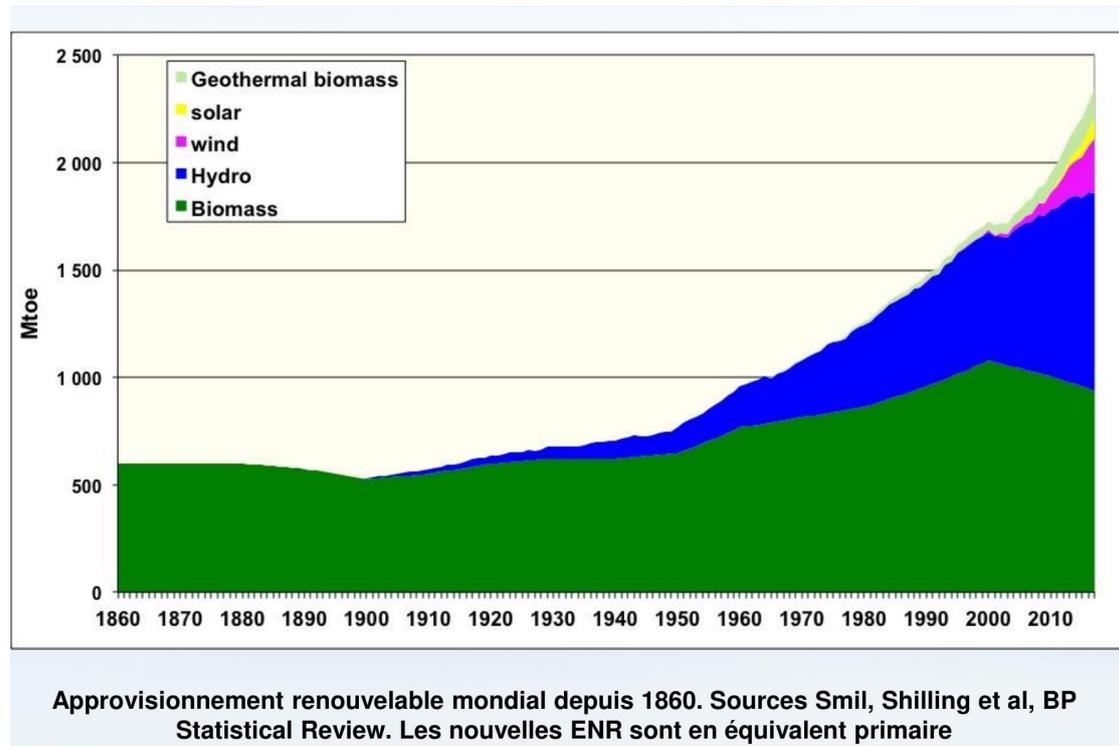
Alors, les énergies renouvelables, depuis que l'on sait qu'on a un problème avec les énergies fossiles, sont des énergies qui font beaucoup rêver pour une raison assez simple : quand on regarde le potentiel d'énergies renouvelables, la quantité d'énergie renouvelable disponible sur Terre, on a affaire à des ordres de grandeur qui sont extrêmement importants et considérablement supérieurs à la quantité d'énergie utilisée par les Hommes. En particulier, un des ordres de grandeur qu'il est assez facile de calculer, c'est que l'énergie solaire qui arrive au sommet de l'atmosphère tous les ans, avant réflexion par les nuages, les déserts, etc. c'est 10 000 fois la quantité d'énergie consommée par les Hommes avec le gaz, pétrole, charbon, etc. Donc ce facteur 10 000 fait rêver énormément de gens : « 10 000 fois, rendez-vous compte ! » Donc ça va être très facile de remplacer les énergies fossiles par des énergies renouvelables, et en particulier par du soleil.

En fait, ce n'est pas si simple que ça, parce que les énergies renouvelables abondantes sont aussi souvent des énergies renouvelables diffuses et rappelez-

### *3. LE VERRE À MOITIÉ PLEIN : QUELLE ABONDANCE !*

vous ce que je vous ai dit lors du premier cours : exploiter de l'énergie pour les Hommes, c'est l'extraire de l'environnement là où elle se trouve déjà, et la mettre dans un convertisseur. Or, pour extraire de l'environnement une énergie qui est très diffuse et de « basse qualité », c'est extrêmement difficile. Il y a une énergie qui n'est pas renouvelable mais qui est également disponible en quantité quasi illimitée, c'est le rayonnement à 3 Kelvin de l'univers. C'est la source d'énergie la plus considérable que vous puissiez regarder et c'est celle dont on ne fera jamais rien. Donc le fait que vous ayez une très grande quantité d'énergie disponible en théorie est quelque chose qui ne vous donne pas nécessairement la facilité qu'il va y avoir à s'en servir en grande quantité pour remplacer les énergies fossiles qui sont, elles, particulièrement denses et commodes d'emploi.

## 4. De plus en plus d'énergie renouvelable



Diapositive 5.

Vous vous rappelez ce graphique que je vous avais montré sur la quantité d'énergie utilisée par les Hommes depuis un siècle et demi.

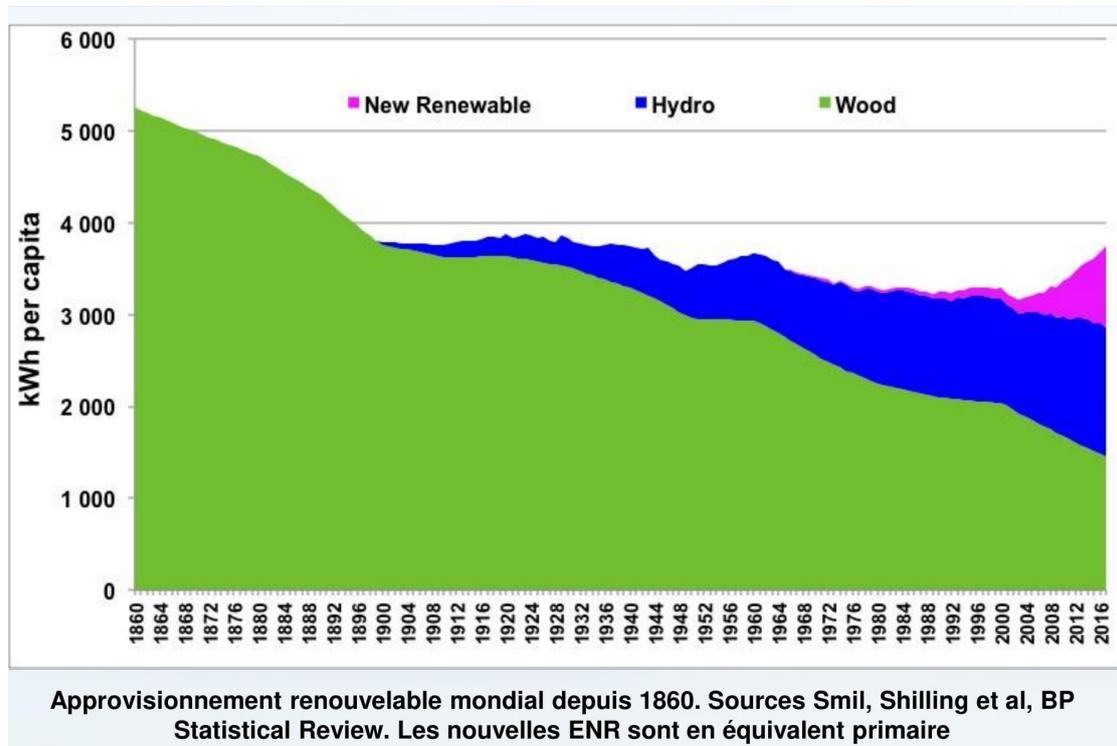
Alors, cette fois-ci, j'en ai extrait juste la partie renouvelable. Donc ça, c'est la partie énergie renouvelable dans le graphique avec la quantité totale d'énergie utilisée par les Hommes. Ce que vous voyez c'est que, en quantité totale, les Hommes utilisent depuis longtemps de la biomasse, qui reste aujourd'hui encore la première énergie « renouvelable » (c'est une appellation qui se discute pour la biomasse). Et puis se sont rajoutés quatre types d'énergies renouvelables qui sont purement électriques : l'hydroélectricité qui constitue aujourd'hui le gros de l'énergie d'origine renouvelable non biomasse, et puis plus récemment l'éolien, le solaire et le biogaz et la géothermie. Biogaz et géothermie sont dans une même catégorie dans les statistiques.

Tout à l'heure, je vous montrerai une tentative de discrimination des deux en ordre de grandeur. Ce que vous voyez, c'est que c'est très récent et même à l'échelle des énergies renouvelables, ce n'est pas encore très important. Donc,

#### *4. DE PLUS EN PLUS D'ÉNERGIE RENOUVELABLE*

quand vous voyez les énergies renouvelables, l'image d'Epinal qu'on devrait vous coller au-dessus, ce n'est pas du tout une éolienne ou un panneau solaire mais une forêt ou un barrage. Si on était cohérent entre la réalité d'aujourd'hui et les illustrations qu'on en fait. Alors, ça, c'est à l'échelle des Hommes dans leur ensemble.

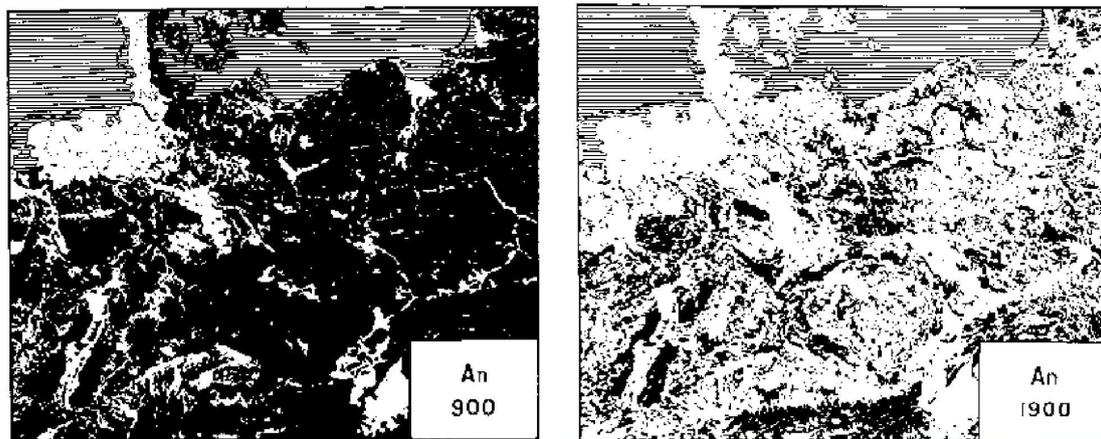
## 5. Mais de moins en moins par personne...



Diapositive 6.

Si je regarde à l'échelle d'un individu, donc pas de l'humanité, ce que vous voyez c'est que la quantité d'énergie renouvelable utilisée par personne sur Terre, elle a plutôt eu tendance à baisser un peu depuis un siècle et demi. La biomasse a beaucoup baissé. Par contre, les deux autres évidemment ont augmenté. Là, je n'ai pas discriminé les nouvelles énergies renouvelables que vous voyez ici. La biomasse, je vous disais, elle est comptée comme énergie renouvelable alors que ça se discute parce qu'une partie de la biomasse correspond à ce type de processus.

## 6. Une énergie renouvelable peut ne pas se renouveler



Couverture forestière de l'Europe à différentes époques

### Diapositive 7.

Vous avez ici, même si c'est un peu difficile à distinguer, le Nord de l'Europe. Là, vous avez la péninsule danoise. Là, la Baltique. Là, le Nord de l'Allemagne, les Pays-Bas, etc. Et vous voyez, dans cette partie Nord de l'Europe, à quoi ressemblait la couverture forestière en gros, il y a mille ans et ce à quoi elle ressemble aujourd'hui. Vous constatez qu'il y a eu une déforestation extrêmement importante. En fait, il y a mille ans 80% de l'Europe du Nord était recouverte de forêts. À l'époque d'Astérix, vous savez très bien que le petit village était entouré de forêts. Et avec la croissance de la population, les Hommes ont défriché une quantité croissante de forêts et le bois en général, quand il est coupé, il est brûlé. Il peut être soit brûlé et laissé sur place (c'est les fameux brûlis), soit emporté ailleurs pour servir de bois de feu au moment où il est coupé. Et s'il est emporté ailleurs pour servir de bois de feu, un certain nombre de gens ont envie de mettre ça dans la catégorie énergie renouvelable. Sauf que si c'est du bois qui correspond à de la déforestation, normalement, ça ne doit pas rentrer dans la

## 6. UNE ÉNERGIE RENOUVELABLE PEUT NE PAS SE RENOUVELER

catégorie énergie renouvelable : ça doit rentrer dans la catégorie déforestation. La déforestation n'est pas tellement renouvelable. Et dans les courbes que je vous ai montrées juste avant (diapositives ?? et ??), il n'est pas fait de distinction entre la biomasse renouvelable et la biomasse pas renouvelable.

Vous verrez un peu plus tard les statistiques pour la France. Aujourd'hui, la superficie forestière française est plutôt stable ou en légère croissance. Donc, en France, le bois qu'on utilise peut être considéré comme renouvelable mais même là, ce n'est pas simple d'avoir des chiffres parce que le bois, dans toutes les énergies que nous utilisons, est la seule qui soit massivement non commerciale.

Le pétrole est massivement une énergie commerciale, c'est-à-dire que des gens qui ont dans le fond de leur jardin un puits de pétrole où ils vont chercher leur pétrole comme on va chercher de l'eau, qu'ensuite, ils distillent dans leur propre alambic dans leur cave pour alimenter leur voiture, il n'y en a quand même pas beaucoup. Des gens qui ont leur propre mine de charbon dans le fond de leur jardin pour alimenter ensuite leur poêle, il n'y en a pas beaucoup non plus, il y en a déjà un peu plus. Une bonne partie des mines de charbon, par exemple en Chine, sont des mines artisanales, et en Chine, vous avez une partie significative du chauffage qui est fait dans des poêles à charbon.

Mais globalement, les énergies fossiles, le nucléaire et l'électricité, d'une façon générale, sont des énergies commerciales. Ça veut dire qu'il y a un vendeur, donc un sale capitaliste, parfois un sale communiste, qui n'a aucunement l'intention de vous servir gratuitement et donc qui met des compteurs partout pour vérifier que vous n'allez pas consommer plus que ce qu'il vous vend. Du reste, il a très envie de savoir combien il vous vend. Donc, vous avez des statistiques qui sont à peu près fiables. Donc, dans toutes les énergies commerciales, on arrive à suivre les quantités utilisées parce qu'il y a quelqu'un à qui profite le crime : le vendeur et l'État. Parce que toutes les énergies commerciales font l'objet d'une fiscalité, et à partir du moment où vous avez une fiscalité, vous regarder l'assiette de très près. Par exemple en France, on sait très bien combien on consomme de carburant parce que vous avez une taxe sur les carburants et donc vous avez le corps des instruments de mesure qui vérifie que toutes les pompes à essence sont exactes, etc.

Le bois est essentiellement une énergie d'autoconsommation. Alors, à part quelques urbains qui installent des poêles à bois et qui achètent du bois à d'autres – et qui ne le déclarent pas toujours soit dit en passant – le bois est globalement une énergie d'autoconsommation. Vous allez vraiment dans le fond de votre parcelle de bois ramasser quelques stères que vous allez utiliser ensuite pour vous chauffer. C'est une énergie de circuit court par excellence. Aux

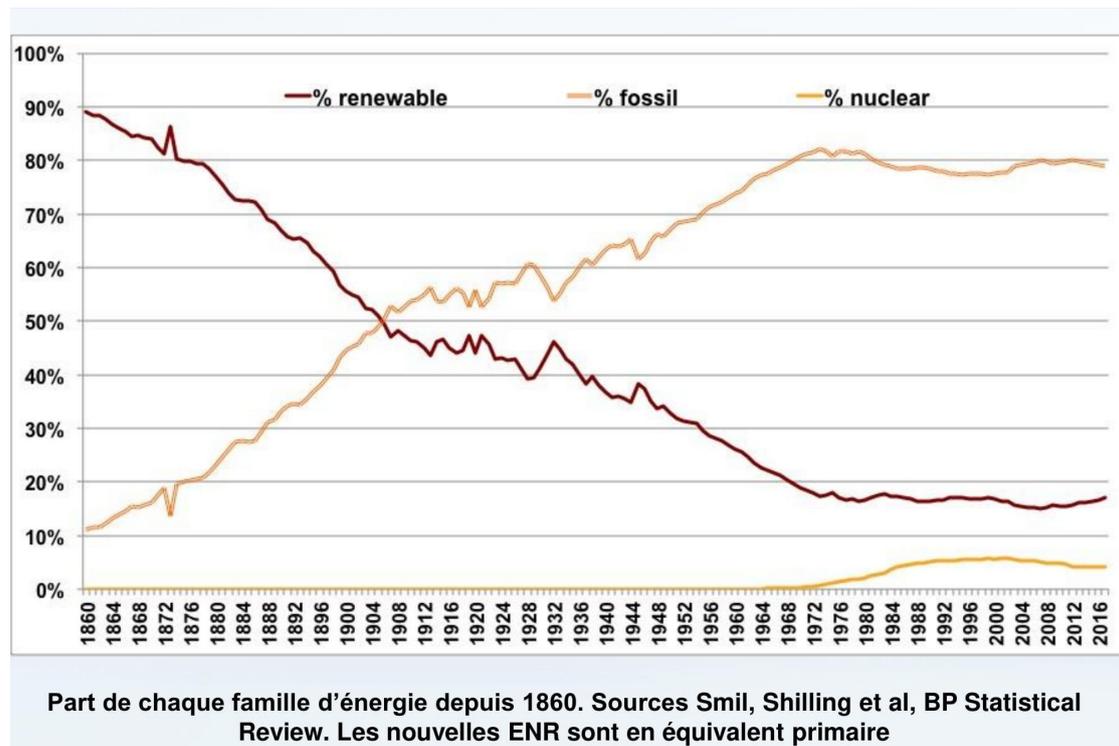
## 6. UNE ÉNERGIE RENOUVELABLE PEUT NE PAS SE RENOUVELER

tropiques, c'est également une énergie qui est très importante pour le bois de feu, donc pour faire la cuisine, avec une efficacité déplorable, c'est un des problèmes. Là c'est pareil, vous avez ou bien de l'économie informelle, ou bien de l'autoconsommation et, dans les deux cas de figure, beaucoup de difficultés à avoir des statistiques fiables.

Alors, vous pourriez me dire : « Oui mais on peut éventuellement mesurer la quantité de bois qu'on utilise d'une autre façon. Par exemple avec des photos satellites. On regarde quelle est la surface couverte par les forêts. » Alors même ça, ce n'est pas simple parce que, quand vous avez des arbres qui sont coupés dans la forêt et que ça se passe sur une échelle qui est sous la résolution du pixel, vous ne le voyez pas. Donc, si vous coupez un arbre sur 100 dans une forêt, ou un arbre sur 50, vous ne le voyez pas sur les images satellites. Donc, la consommation de bois, j'insiste, est quelque chose qui est estimée. Donc, ce que je vous montre là, à la fois sur slide ?? et slide ??, parce que ce sont les mêmes avec la population qui intervient, ce sont des estimations. C'est beaucoup moins fiable, – on à l'ordre de grandeur –, mais c'est beaucoup moins fiable, c'est à quelques dizaines de « pour cent » près seulement.

Voilà, donc une partie du bois qu'on utilise, j'insiste là-dessus, c'est de la déforestation et la limite à l'utilisation du bois, c'est tout simplement la photosynthèse. C'est-à-dire que vous ne pouvez pas, en mode renouvelable, utiliser chaque année plus de bois que ce que la photosynthèse vous a fourni. Donc, le seuil de renouvellement d'une forêt, c'est l'accroissement annuel (ce qu'on appelle dans le jargon forestier, *l'accrue annuelle*), c'est l'accroissement annuel de la biomasse résultant de la photosynthèse. Donc, tant que vous utilisez ça ou moins, vous êtes en mode renouvelable. Si vous utilisez plus que ça, vous êtes en mode pas renouvelable. Et j'insiste, comme il y a beaucoup de circuits qui sont des circuits non commerciaux ou informels, c'est difficile de savoir exactement combien est-ce que les gens vont piocher dans une forêt dans laquelle ils vont piocher.

## 7. Le verre à moitié vide : 16% de l'énergie primaire seulement



Diapositive 8.

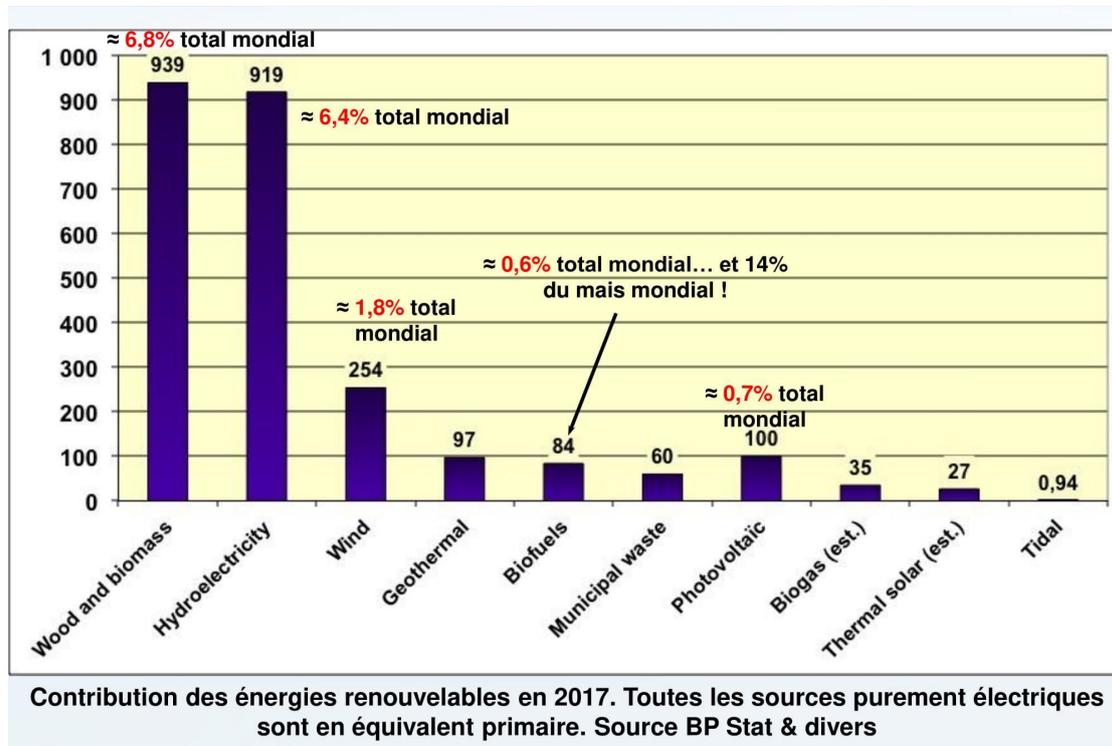
Alors, je rappelle également une autre chose avec une courbe que je vous avais déjà montrée. Celle-là y ressemble. Vous avez ici les trois familles d'énergie que nous utilisons sur Terre aujourd'hui : les énergies renouvelables, les énergies fossiles et l'énergie nucléaire (ou les énergies nucléaires plus exactement). Et, ce que vous voyez, c'est que l'énergie renouvelable qui représentait la quasi-totalité du fonctionnement de l'humanité il y a deux siècles (et même la totalité il y a trois siècles). Eh bien, sa part n'a pas cessé de diminuer au cours de l'essor industriel, pour tomber à des valeurs très basses qui sont raisonnablement stables depuis.

Donc, une blague qu'il m'arrive souvent de faire est de dire qu'un monde 100% renouvelable, je sais très bien à quoi ça correspond. J'ai au moins un point d'échantillonnage où je vois très bien à quoi ça correspond : c'est le monde, il y a trois siècles. Et le monde d'il y a trois siècles, c'est 700 millions d'habitants sur Terre avec une espérance de vie à la naissance légèrement inférieure à 30 ans et

## *7. LE VERRE À MOITIÉ VIDE : 16% DE L'ÉNERGIE PRIMAIRE SEULEMENT*

l'essentiel des gens agriculteurs. Donc 100% renouvelable, il y a au moins une situation dans laquelle je sais que ça marche. Maintenant la question évidemment c'est : « Est-ce qu'on a le moindre espoir que ça marche aussi avec une Humanité de 8 milliards d'individus qui ont envie d'avoir des baskets pour pas cher livrées par Amazon et de pouvoir aller au cinéma quand ça leur chante et de pas se casser le dos toute la journée? » Et ça, vous allez voir que la réponse est une réponse de Normand, « p'têt' ben que oui p'têt' ben que non », avec probablement un « p'têt ben que non » qui est un peu plus fort que l'autre.

## 8. Le verre à moitié vide : 16% de l'énergie primaire



### Diapositive 9.

Alors, aujourd'hui, les énergies renouvelables, ça représente donc 16% de la quantité d'énergie primaire que nous utilisons, donc celle qu'on extrait de l'environnement. Les chiffres que vous avez là-dessous, je vous rappelle encore une fois qu'il y a primaire et finale pour l'énergie et que pour l'électricité qui est faite avec de la chaleur, il y a une énorme différence entre les deux. Pour l'électricité qui n'est pas faite avec de la chaleur, typiquement le vent ou l'hydroélectricité, il y a toujours un éternel débat de savoir si ça doit être compté en équivalent finale ou en équivalent primaire. Là, c'est compté en équivalent primaire. C'est donc la version la plus favorable possible aux énergies renouvelables purement électriques. Alors, ce que vous voyez aujourd'hui c'est que le bois – aux dernières nouvelles parce que l'année dernière, je pensais que c'était 10. Maintenant, cette année, j'ai d'autres chiffres qui me disent que c'est 7. Bon... c'est ce que je vous disais : c'est à 30% près – en ordre de grandeur, c'est un petit 10 % de la quantité d'énergie qu'on utilise dans le monde. Mais la fraction renouvelable n'est sûrement pas de 10%. Elle est inférieure.

## 8. LE VERRE À MOITIÉ VIDE : 16% DE L'ÉNERGIE PRIMAIRE

L'hydroélectricité est donc la première des énergies renouvelables hors biomasse que nous consommons et vous voyez que, en équivalent primaire, ça fait à peu près pareil que le bois. En équivalent finale évidemment, ce serait trois fois moins. Enfin, 2,58 fois moins. Ensuite arrive le vent. Alors, le vent a significativement augmenté ces dernières années mais vous voyez que ça ne représente encore, avec la convention la plus favorable, qu'un gros 1% de l'énergie primaire. Et par ailleurs, si vous vous rappelez bien de ce que je vous avais montré au premier cours, pendant que le vent augmentait, le charbon a augmenté cinq fois plus vite. Donc là, je reste dans les énergies renouvelables évidemment.

Après, vous avez les agrocarburants ici, qui vous représentent une fraction de pourcent. Et pourtant les agrocarburants consomment déjà 40% du maïs cultivé aux États-Unis – 40% pour faire de l'éthanol. Sachant que les États-Unis sont le premier producteur de maïs au monde avec à peu près un tiers de la production mondiale. Donc si vous faites un tiers de 40% ça vous fait à peu près 13% et quelque chose, et je vous ai mis 14 parce qu'il y a un peu de maïs qui est utilisé pour faire des agrocarburants ailleurs, y compris en France. En France, vous avez également des agrocarburants qui sont faits avec du maïs, du blé et des betteraves. C'est ce qu'on a coutume d'appeler les agrocarburants de première génération.

Et enfin, ici, vous avez le solaire photo-voltaïque qui représente aussi une fraction de pourcent. Alors, même si ça augmente rapidement, ça part de très, très bas, et c'est une fraction de pourcent de l'énergie mondiale aujourd'hui. Et la question qu'on peut se poser évidemment c'est : « Est-ce que ça va continuer d'augmenter aussi vite qu'aujourd'hui ou pas, ou est ce qu'il y a des facteurs limitants qui font que ce n'est pas sûr que ça continue d'augmenter à cette vitesse? » Oui?

\*\*\* Question auditoire sur les biocarburants \*\*\*

Les biocarburants, j'en parlerai plus tard, vous verrez. Ça alimente des engins de transport essentiellement donc, en fait, c'est mélangé à l'essence ou au diesel. C'est incorporé à l'essence ou au diesel et servi avec l'essence et le diesel. Par exemple en France, vous avez une obligation d'incorporation de biocarburants à hauteur de quelques pourcents. Je ne me rappelle plus du chiffre exact, 6-7, dans les carburants pétroliers. Aujourd'hui quand vous achetez un carburant pétrolier, en fait, il y a quelques pourcents de biocarburant. Il y avait une autre question?

\*\*\* Question auditoire sur l'unité employée \*\*\*

Ça c'est en Mtep. Ce n'est pas marqué? Je suis désolé, c'est des millions de tonnes équivalent pétrole. Oui?

## 8. LE VERRE À MOITIÉ VIDE : 16% DE L'ÉNERGIE PRIMAIRE

\*\*\* Question auditoire sur le biogaz \*\*\*

Le biogaz, c'est un gaz qui est fait avec de la fermentation de matière végétale ou de résidus animaux, typiquement des déjections, la graisse dont on ne veut pas après abattage des animaux. Et une fois traité, ça a plusieurs utilisations. La principale d'entre elles aujourd'hui, en France, et encore plus en Allemagne, c'est de faire de l'électricité. Donc, en fait, c'est une petite centrale à gaz sauf que le gaz est d'origine végétale. Vous pouvez également vous en servir pour le liquéfier et faire avancer des engins de transport qui roulent au gaz naturel liquéfié (GNL), et ce gaz naturel vous pouvez le remplacer par du biogaz. Vous pouvez également l'injecter dans le réseau gaz, et à ce moment, vous l'utilisez comme du gaz pour du chauffage. Oui?

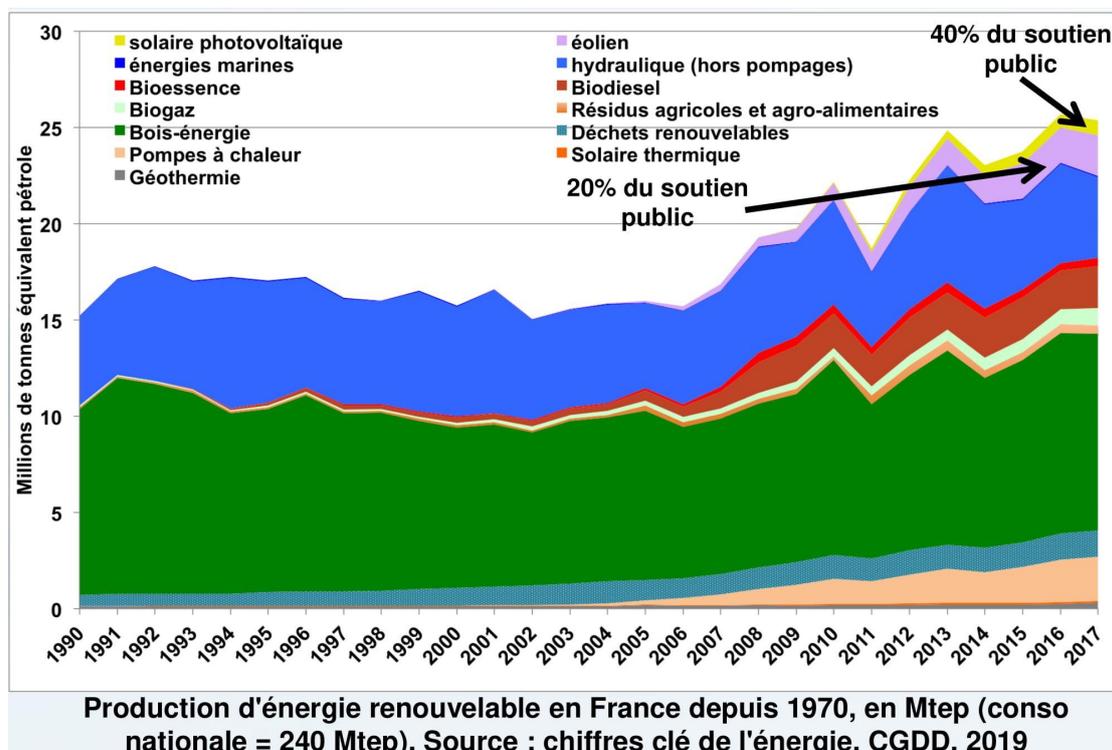
\*\*\* Question auditoire sur le biogaz \*\*\*

Ha ha! bonne question! On verra ça dans le bilan carbone des biocarburants tout à l'heure. Bien sûr ça compte. Si vous avez un biocarburant qui est issu de surfaces qui ont été soit déforestées pour l'occasion, soit qui étaient anciennement consacrées à des cultures alimentaires mais du coup avec une pression qui se reporte sur de la déforestation, c'est pire que si vous utilisez du pétrole.

\*\*\* Question auditoire concernant l'énergie marée-motrice \*\*\*

Oui, non pardon, « tiddle », c'est l'énergie des vagues. C'est « wave and tiddle ». Je pense maintenant que c'est l'énergie des marées. Concernant l'énergie des marées, je crois que vous avez trois centrales marée-motrices au monde. On en a une dans la Rance, il y en a une au Canada, dans la baie d'Hudson si ma mémoire est bonne et puis je me demande s'il n'y en a pas une troisième quelque part dans le monde et ça doit s'arrêter là. Non, c'est vraiment les marées. Les vagues, ça n'existe même pas dans ce tableau. C'est bon?

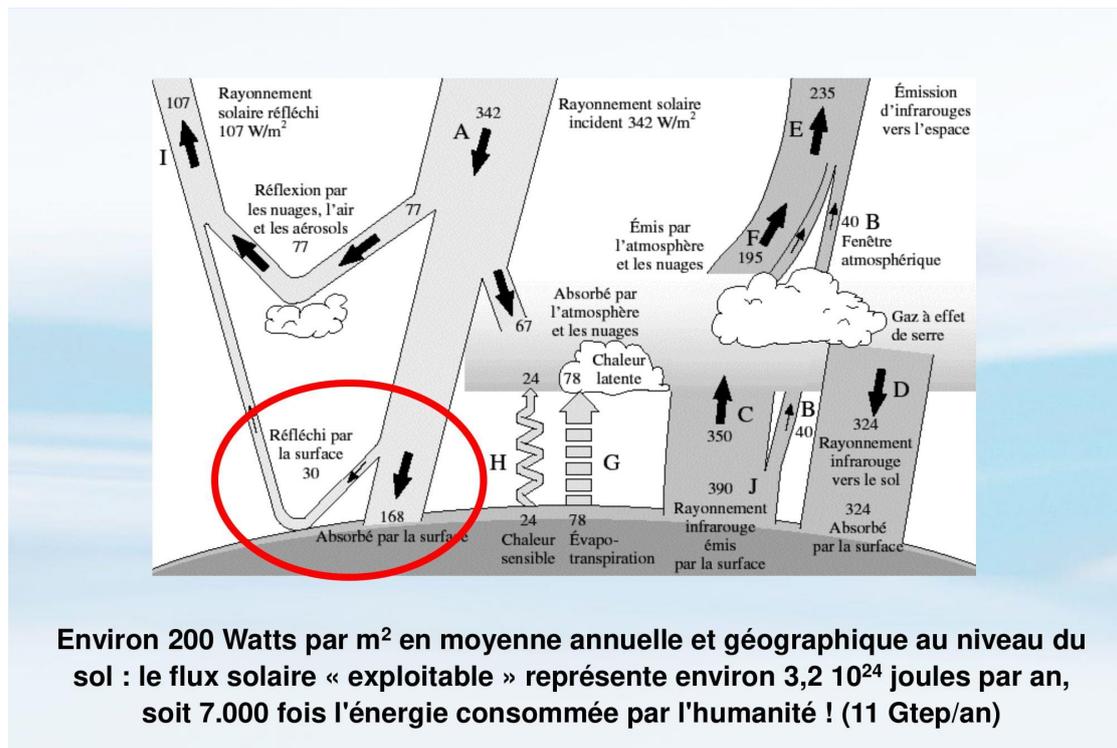
## 9. Quid de notre chauvinisme renouvelable ?



Diapositive 10.

Alors, si on regarde maintenant la France, on constate qu'en France, la hiérarchie de l'utilisation des énergies renouvelables est exactement la même que celle que nous avons dans le monde. En gros. C'est-à-dire que ce qui arrive en premier, c'est le bois, essentiellement pour le chauffage. Ce qui arrive en second c'est l'hydro-électricité. Si vous regardez attentivement, vous verrez qu'il y en a un peu moins aujourd'hui qu'il y a quelques décennies, la raison étant que le régime pluviométrique a tendance à diminuer légèrement. Et enfin, vous avez ici éolien et photovoltaïque, qui sont secondaires au sein des énergies renouvelables. On a une grosse exception en Europe qui est l'Allemagne. Ce que vous voyez, c'est que vous avez des termes-là qui ne sont pas complètement négligeables, qui sont ici les agrocarburants, bio-essence et biodiesel, et puis ici les pompes à chaleur.

## 10. Le soleil en direct : un flux considérable... et très faible



Diapositive 11.

Alors, maintenant, on va rentrer dans l'inventaire – l'énumération on va dire – de toutes ces énergies renouvelables. La première dont on va parler, c'est l'exploitation solaire. Oui ?

\*\*\* Question auditoire concernant l'hydraulique \*\*\*

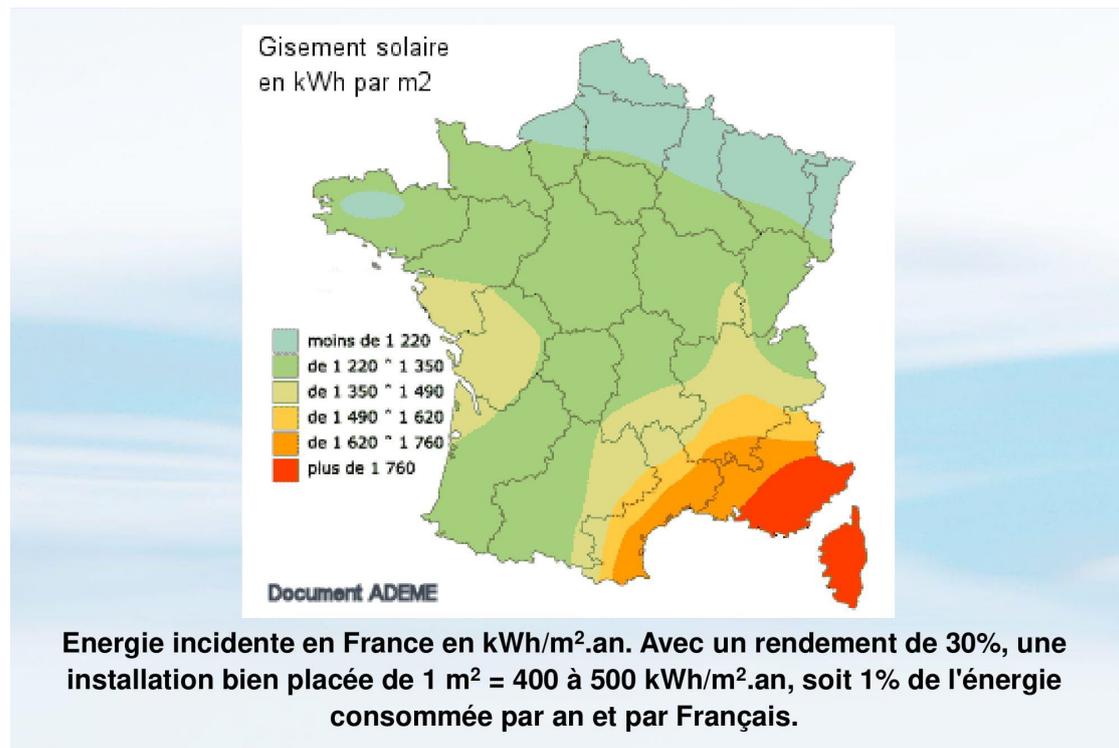
J'y viens après. La réponse, c'est qu'il est à peu près totalement exploité. La première énergie qu'on va regarder, c'est l'exploitation directe du flux solaire. Alors, c'est l'exploitation de la partie qui arrive à terre évidemment. Ce n'est pas la partie qui arrive au sommet de l'atmosphère, parce que celle-là, elle est réfléchi par les nuages et donc elle est un peu loin en ce qui nous concerne. Et ce que vous voyez, c'est que la partie qui arrive là représente un peu plus de 200 watts par mètre carré en moyenne annuelle.

Alors, c'est une moyenne géographique et temporelle. Ça inclut à la fois ce qui arrive près des pôles – où il en arrive pas beaucoup – et ce qui arrive aux

## *10. LE SOLEIL EN DIRECT : UN FLUX CONSIDÉRABLE... ET TRÈS FAIBLE*

tropiques. Et ce qui arrive en été et ce qui arrive en hiver quand vous êtes aux moyennes latitudes, sachant bien évidemment qu'il n'arrive pas la même chose. Et ce qui arrive le jour et ce qui arrive la nuit, sachant que la nuit, par définition, il n'arrive rien. Donc c'est une moyenne, encore une fois, géographique et temporelle.

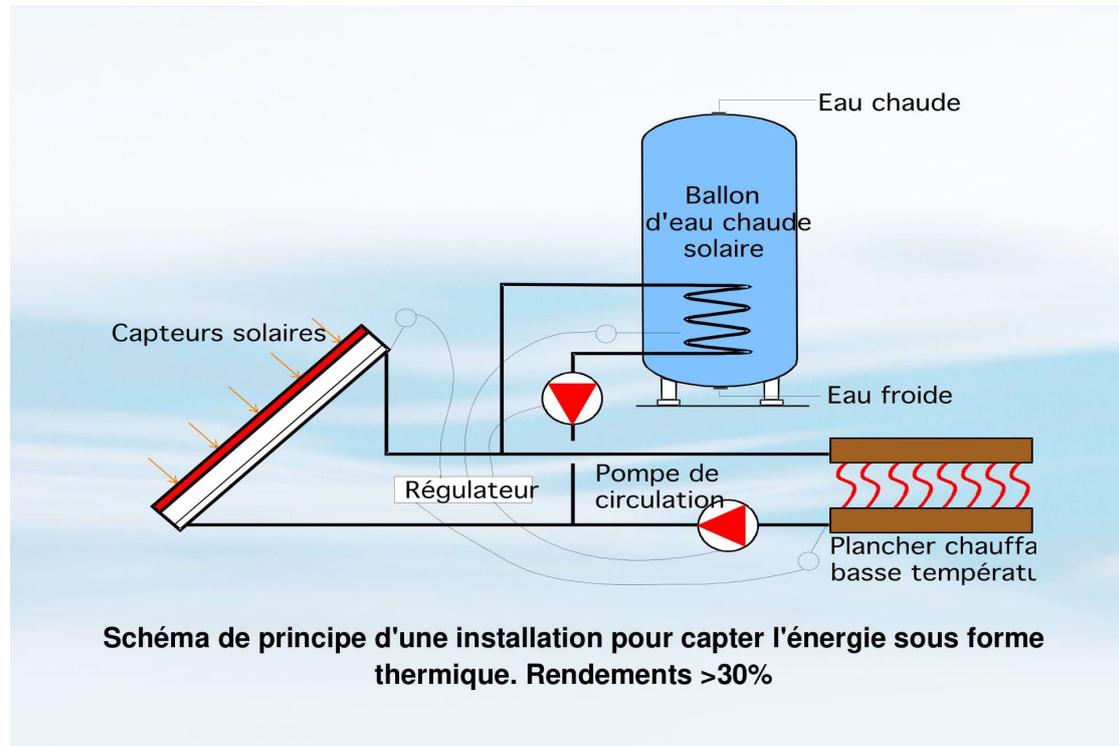
## 11. Le soleil en direct : un flux considérable... et très faible (bis)



Diapositive 12.

Si on regarde le cas de la France, on voit que cette insolation au sol, sans grande surprise, augmente quand on va de chez les Ch'tis vers chez les Marseillais. Et que, par ailleurs, même à latitude donnée, elle n'est pas homogène. Alors, est-ce que vous savez pourquoi elle est plus faible ici que là, à la même latitude? Exactement, à cause des nuages. D'où viennent les dépressions en France de l'Ouest? Qu'amènent les dépressions? Des nuages. Et donc la nébulosité est plus importante près de l'Atlantique que près de la Méditerranée, et donc l'insolation annuelle est plus importante près de la Méditerranée que près de l'Atlantique. Et vous voyez que le gradient n'est pas complètement ridicule. Ce n'est pas une variation 3%. Donc si vous voulez du soleil, c'est mieux d'aller au Sud et c'est mieux d'aller près de la Méditerranée. Il se trouve que le plus grand parc installé en Europe est au nord, c'est au nord du Rhin. C'est comme ça.

## 12. Exploitation n°1 : douches, bains et radiateurs



Diapositive 13.

Alors, la première manière d'exploiter cette énergie, c'est tout simplement de chauffer de l'air ou de l'eau. Alors, il y a une première planche que j'aurais pu vous montrer et que je ne vous montre pas mais vous allez trouver tout seul de quoi il s'agit. La première exploitation – en ordre de grandeur, et de très loin – de l'énergie solaire c'est? Pardon? Non, je l'ai entendu. Le chauffage. C'est le chauffage des bâtiments. Tout bêtement. Vous n'avez pas besoin d'allumer le chauffage l'été. Juste, c'est de très loin le premier apport dans l'utilisation de l'énergie par les Hommes. Et du reste vous pouvez accroître ce terme en mettant des fenêtres au Sud, des vérandas, etc. Donc, dans la réhabilitation thermique des bâtiments, par exemple, si vous n'avez pas de problème d'espace au sol et que vous avez une façade côté Sud, une des opérations classiques consiste à rajouter une véranda. Rajoutez une surface vitrée et l'hiver ça vous sert de radiateur. Ça vous fait une serre et l'air chaud rentre dans la maison. Ça marche très bien.

## 12. EXPLOITATION N°1 : DOUCHES, BAINS ET RADIATEURS

La deuxième manière qu'on peut avoir d'exploiter cette énergie thermique, c'est de faire de l'eau pour se laver ou de l'eau pour se chauffer. Alors, l'eau pour se laver, c'est assez simple parce que vous mettez une surface de capteurs sur le toit. Alors là, c'est la douche solaire pour ceux d'entre vous qui en ont déjà utilisé une en camping. Donc c'est une surface noire devant laquelle vous faites passer de l'eau. Ça chauffe l'eau et... sauf que c'est plus gros qu'une douche solaire quand vous êtes chez vous, parce que vous prenez en général des douches qui sont un peu plus copieuses, et à ce moment, l'eau chaude va chauffer un cumulus dont vous vous servez ensuite pour prendre des douches.

L'autre option, ça peut être d'utiliser la chaleur fournie par cette eau pour chauffer l'intérieur d'un logement. Alors là, vous ne chauffez pas avec le soleil qui rentre par les fenêtres ou l'air chaud qui rentre par la véranda. Vous allez faire rentrer la chaleur par un circuit d'eau également, et ensuite ce circuit d'eau va relarguer les calories à l'intérieur de la maison. Cela étant, comme un circuit d'eau qui vous capte la chaleur, ce n'est pas à très haute température, il est quand même moins chaud globalement ce circuit d'eau que celui que vous avez en sortie de chaudière pour un chauffage central. Vous avez besoin de surfaces radiantes qui sont plus importantes que ce que vous avez avec un chauffage central classique.

Donc malheureusement, on ne peut pas faire un rétro-fit sur les maisons existantes qui ont des radiateurs qui ont été dimensionnés pour de l'eau à 60 degrés pour y faire passer du chauffage solaire avec de l'eau qui a été chauffée dehors en plein hiver à 40 ou 45 degrés. D'accord? Vous ne pouvez pas. Donc ça ne marche que si vous cassez tous les radiateurs pour les remplacer par des radiateurs quatre fois plus gros ou bien si vous avez un plancher chauffant. C'est la raison pour laquelle les maisons qui sont chauffées au soleil, avec des capteurs solaires sur le toit, en général, quand elles sont construites comme ça, elles sont équipées d'un plancher chauffant et vous avez donc un chauffage par le sol pour avoir une très grande surface radiante à une température pas très élevée.

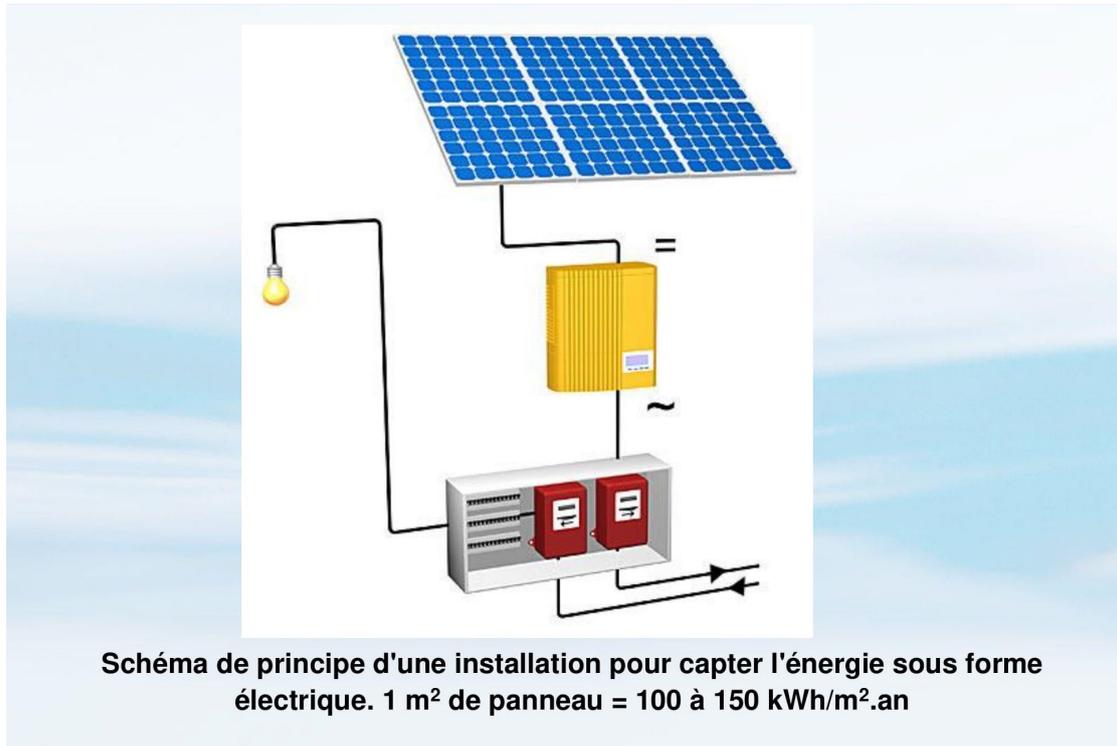
Alors, cette énergie solaire-là est assez en vogue sous les tropiques. Sous les tropiques vous avez – dans les territoires d'outre-mer en France – vous avez pas mal de logements qui sont équipés avec des chauffe-eau solaires de cette nature. Notamment parce que les tropiques ne sont pas équipés de réseaux de gaz. Donc, c'est soit de l'électricité, soit du fioul. Et les énergies concurrentes étant plus chères que le gaz...

En France l'énergie la moins chère pour chauffer de l'eau c'est le gaz. Mais sous les tropiques, vous n'avez pas de réseau de gaz en général. Donc à ce mo-

## *12. EXPLOITATION N°1 : DOUCHES, BAINS ET RADIATEURS*

ment les énergies concurrentes, c'est le fioul et l'électricité, et les deux énergies concurrentes sont significativement plus chères. Et donc ça peut valoir le coup, comme il y a beaucoup plus de soleil, de mettre ce genre de chauffe-eaux.

### 13. Exploitation n°2 : néons et télévisions



Diapositive 14.

La deuxième exploitation du soleil, c'est l'effet photoélectrique. Donc, comme vous le savez, c'est la création d'un courant dans une matière, qui est du silicium avec des petits trous et des petits électrons en trop avec des éléments qu'on a mis soigneusement là où il fallait. C'est la création d'un courant quand vous exposez cette matière au soleil. Des panneaux solaires, vous en avez de toutes les tailles. Là par exemple, au cours d'un colloque, on m'a offert ce petit gadget : ce sac à dos. Et ça c'est un panneau solaire. Je m'en suis rendu compte parce que je voulais m'asseoir dessus au jardin du Luxembourg et on m'a dit qu'il ne fallait pas que je fasse ça.

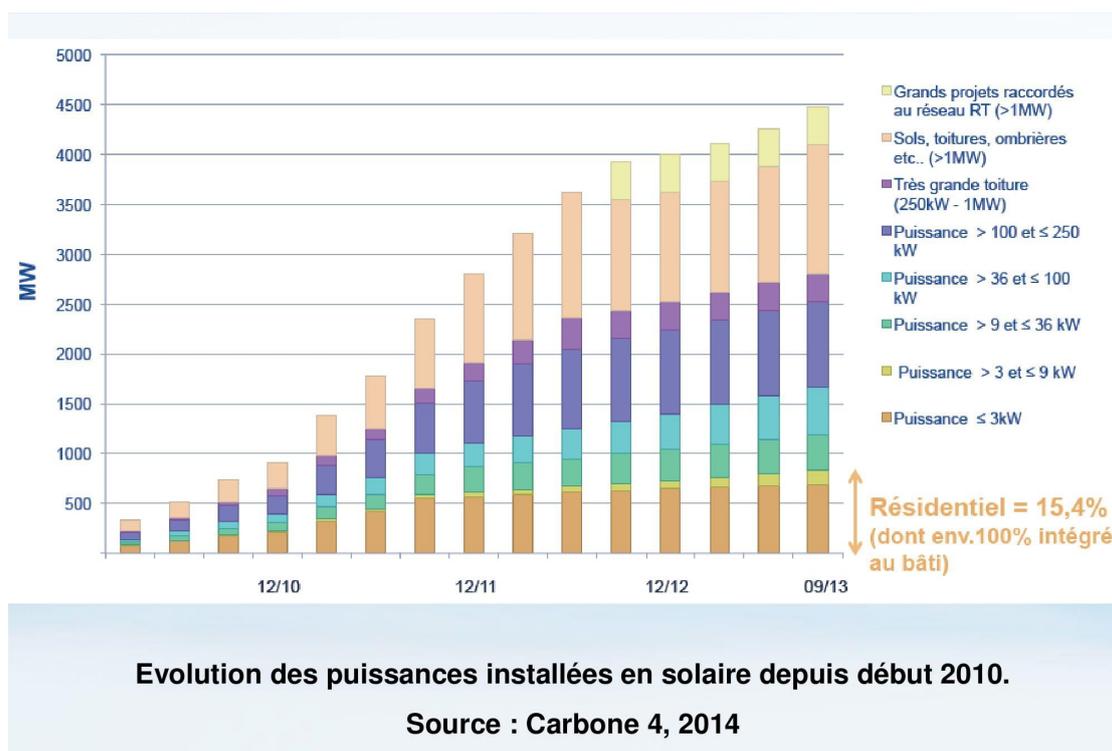
Voilà donc, vous en avez de toutes les dimensions. Je vous en montrerai après qui sont un peu plus gros que ça. Donc, l'idée du panneau solaire, c'est évidemment encore une fois que ça vous donne du courant quand il y a du soleil. Alors, c'est très bien parce qu'il y a beaucoup de soleil partout mais vous allez voir que, par ailleurs, il y a un certain nombre de limitations parce que du soleil, comme je le disais tout à l'heure, il n'y en a pas toute la journée alors que l'électricité,

### 13. EXPLOITATION N° 2 : NÉONS ET TÉLÉVISIONS

on aime bien l'utiliser toute la journée. Et puis, vous avez, par ailleurs, une densité de puissance avec ce genre d'installation qui n'est pas extrêmement élevée. La manière dont fonctionne, aujourd'hui en France, l'installation de l'énergie solaire, c'est que très peu de sites font de l'électricité pour la consommer eux-mêmes en étant autonomes. À part le refuge du dôme du Goûter et quelques autres baraques de cette nature, en règle générale ce n'est pas comme ça que ça marche.

En fait, on a favorisé les installations connectées au réseau parce qu'il y avait des objectifs d'augmentation des EnR dans tous les pays européens et que les EnR qui ont été favorisées en premier dans tous les pays européens sont les EnR électriques. Et du coup, le but du jeu n'est pas nécessairement que vous ayez un peu d'électricité pour vous, c'est que vous ayez de l'électricité pour mettre sur le réseau. Donc, la façon dont ça fonctionne en France, c'est que, quand vous avez une installation photoélectrique, vous avez deux contrats différents : vous avez un contrat qui concerne l'installation et qui vous fait injecter l'électricité sur le réseau avec un tarif d'achat qui est garanti – qui est à prix fixe et garanti. Et de l'autre côté, pour votre consommation, vous avez un contrat normal de consommateur d'électricité. D'accord ? Et les deux sont séparés. C'est une autre manière de dire que le développement du photovoltaïque en France est fait comme une activité économique et non pas fait comme un élément de consommation personnelle. C'est essentiellement une activité économique. En gros, vous louez votre façade Sud de toit exactement comme vous loueriez une surface pour une boutique. Vous êtes propriétaire du commerce mais c'est exactement ça le principe.

## 14. Le solaire PV, une énergie plus « centralisée » qu'il n'y paraît



Diapositive 15.

Alors, l'image d'Épinal jusqu'à récemment, c'était le panneau sur le toit. Alors, ce graphique, il a été arrêté après 2014 mais ça vous donne quand même une indication. En fait, l'essentiel des surfaces photovoltaïques qui ont été développées en France, aujourd'hui, sont des grandes surfaces photovoltaïques. Donc, l'énergie solaire photovoltaïque en France, comme dans beaucoup d'autres pays, ce n'est pas une énergie de particuliers : c'est une énergie d'industriels comme les autres. Vous avez des développeurs de projets qui sont des gens qui trouvent des terrains ou trouvent des grands bâtiments, font réaliser l'installation (si le contrat à tarif garanti payent les charges), encaissent les résultats et ont un résultat net. Ce sont des opérateurs, des entreprises, qui font ça pour l'essentiel des surfaces qui sont installées en photovoltaïque en France.

## 15. En fait, le PV ressemble désormais plus à ça

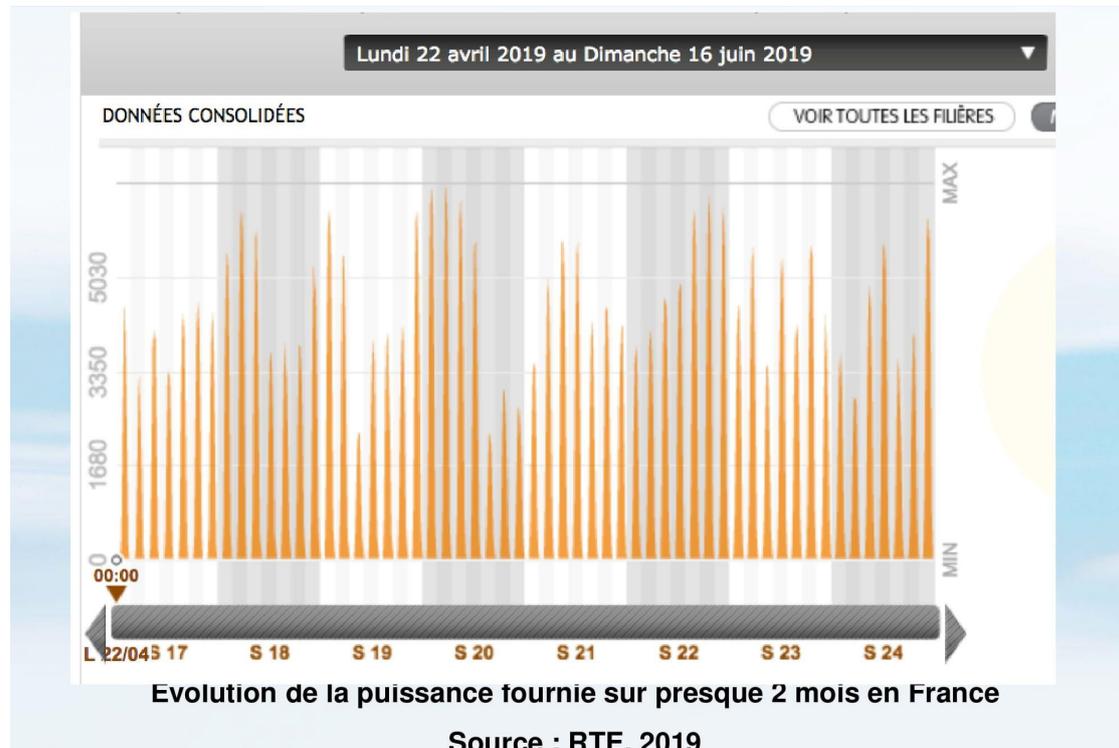


**Grande installation PV au sol. 1 hectare par MW en gros**

Diapositive 16.

Voilà, par exemple, une photo aérienne de la plus grande centrale solaire au sol installée en France. Alors, retenir que le photovoltaïque au sol est assez consommateur d'espace, puisque vous avez besoin d'un hectare par mégawatt de puissance. Et c'est un hectare qui est mobilisé en quasi-totalité. Alors, il y a des gens qui se disent : on peut en faire des ombrières, les mettre à trois mètres du sol, faire pousser des fraises en dessous, etc. Mais globalement, c'est quand même un hectare qui est mobilisé en quasi-totalité. Une autre manière de dire ça, c'est que sur 10 hectares, vous mettez 10 mégawatts de puissance. 10 hectares, pour faire tout de suite la comparaison qui vous intéresse, c'est également l'emprise d'une centrale nucléaire sur laquelle vous avez 4 gigawatts de puissance. Donc 10 mégawatts, 4 gigawatts : 400 fois plus. Donc, le photovoltaïque au sol est très consommateur d'espace. C'est un de ses inconvénients.

## 16. Le solaire PV, il y en a plus en journée!



Diapositive 17.

La deuxième particularité du photovoltaïque, c'est que... Alors ici, vous avez quelque chose que j'ai fait ce matin à partir du site de RTE : vous avez ici la puissance injectée sur le réseau jour après jour sur quasiment deux mois. Alors, ne demandez pas pourquoi le brillant polytechnicien qui travaille chez RTE ne permet pas que l'on regarde ça sur deux mois, c'est sur 54 jours. Pourquoi 54? Peut-être son chiffre fétiche quand il joue au loto... Mais enfin bon, c'est quasiment deux mois et donc ce que vous voyez, c'est que vous avez évidemment un maximum tous les jours mais que ce maximum, il peut varier d'un facteur 2 à 3 en l'espace de quelques jours et ça, c'est l'effet justement de la nébulosité.

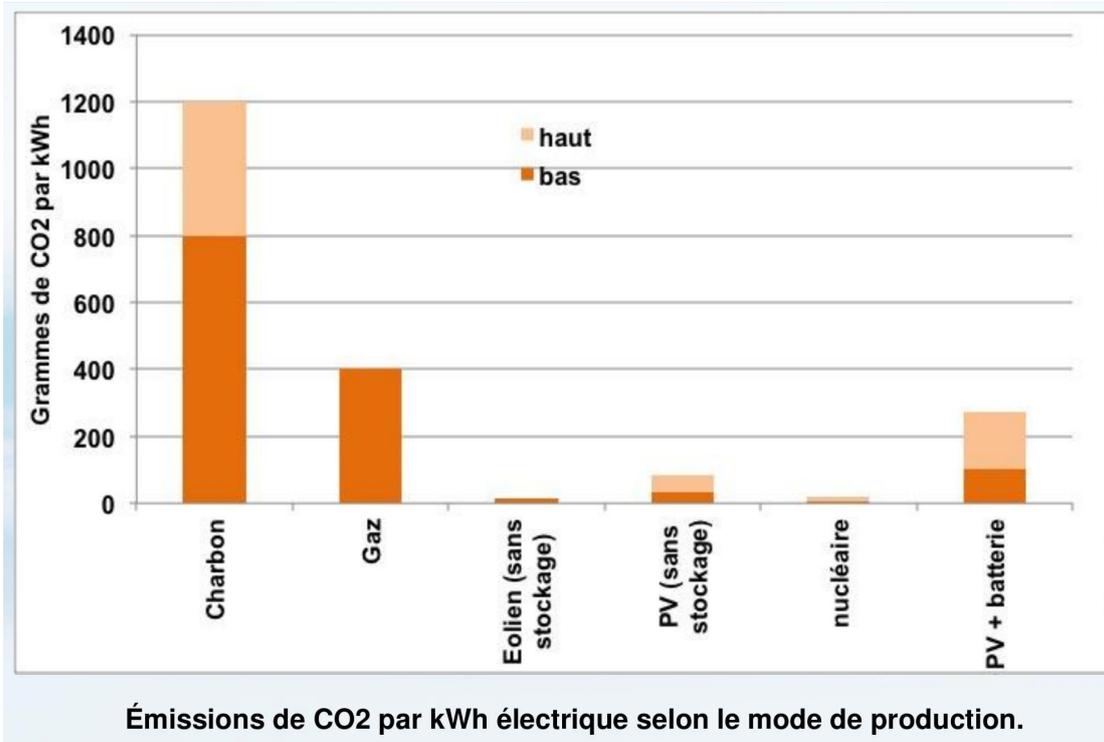
S'il y a beaucoup plus de nuages, s'il fait mauvais, il pleut. Vous vous retrouvez avec une puissance qui est fortement variable. Donc, la partie prévisible à long terme de l'énergie solaire, elle est là, elle n'est pas là – dans la mesure où trois mois à l'avance, vous connaissez l'inclinaison de l'axe de rotation de la Terre sur le plan de son orbite. Donc vous savez quelle sera l'insolation. Par contre, vous ne savez pas quelle sera la nébulosité. Donc, ce sur quoi vous sa-

## *16. LE SOLAIRE PV, IL Y EN A PLUS EN JOURNÉE!*

vez que vous pouvez tabler, et de façon absolument certaine, c'est la fraction du potentiel que vous avez avec une forte nébulosité. Un jour où il pleut, en gros. C'est là-dessus que vous pouvez tabler, pas sur autre chose. Et vous voyez qu'il y a encore un facteur d'incertitude de 2 à 3 par rapport à ce que vous pouvez avoir au maximum.

Vous voyez également quelque chose d'absolument évident sur ce graphique, et j'y reviendrai plus tard, c'est que la fourniture s'interrompt toutes les nuits. Je le répète, une nuit, par définition, c'est quand il n'y a pas de soleil. Ce qui veut dire que, si on veut avoir un approvisionnement significatif en provenance de l'énergie solaire dans certains scénarios très optimistes sur les énergies renouvelables à 2050, vous avez le solaire et l'éolien qui peuvent atteindre 30% chacun de l'approvisionnement énergétique mondial. Je dis bien énergétique, pas électrique. Et à ce moment, ce que vous voyez immédiatement en regardant ce graphique, c'est que ça pose à l'évidence, la question de savoir qu'est-ce que l'on fait quand on est là. C'est évidemment une question qui se pose tout de suite, j'y reviendrai.

## 17. Le solaire, zéro CO<sub>2</sub>?



Diapositive 18.

Je vous ai dit tout à l'heure : on peut très bien avoir une énergie qui est renouvelable et son dispositif de capture qui ne l'est pas. Alors, en l'occurrence, le solaire photovoltaïque correspond aussi à cette définition. Puisque le soleil est parfaitement renouvelable. Enfin en tout cas, pour que le soleil ne se renouvelle plus, il va falloir attendre 4 milliards d'années. Donc, ça ne sera plus tellement votre problème, ni le mien. Par contre, pour capturer l'énergie solaire, aujourd'hui vous utilisez des panneaux photovoltaïques qui nécessitent d'utiliser un certain nombre de matériaux qui sont parfaitement non renouvelables. Il faut utiliser de l'acier, il faut utiliser du cuivre, il faut utiliser du silicium, il faut utiliser des dopants, il faut utiliser de l'aluminium, il faut utiliser du verre.

Alors, là-dedans, il y a des matériaux pour lesquels le problème de stock, vous serez mort, et moi aussi, et l'humanité aussi qu'on n'aura toujours pas de problème de disponibilité (typiquement le fer). Par contre, vous en avez d'autres pour lesquels vous pouvez avoir un vrai problème de disponibilité. Pas au sens où il n'y en aura plus, mais au sens où on commencera à avoir de vrais pro-

## 17. LE SOLAIRE, ZÉRO CO<sub>2</sub> ?

blèmes pour avoir des mines avec des concentrations qui font que l'on arrive à obtenir quelque chose pour un effort raisonnable. Et ça se matérialise (le fait que les énergies renouvelables aient un dispositif de capture qui n'est pas renouvelable) par le fait que vous avez, du coup, utilisation de matériaux non renouvelables qu'il a bien fallu fabriquer dans le dispositif de capture. Et donc vous avez des émissions de CO<sub>2</sub> liées à la fabrication du dispositif de capture.

Alors là, vous avez des ordres de grandeur pour comparaison. Ici, vous avez les émissions liées à la production d'un kWh au charbon. Et donc, ce que vous avez là, c'est que vous retrouvez le kilo par kWh dont je vous avais parlé au moment où on avait parlé des énergies fossiles. Alors, ça se balade selon la technologie, que vous faites de l'ultra-super-critique machin chouette ou que vous êtes dans une vieille centrale pourrie. Voilà, c'est ça, la marge. Ici, vous avez les émissions sur une centrale à gaz à cycles combinés. C'est une technologie raisonnablement récente, il n'y a pas trop de centrales pourries donc je ne vous ai pas mis en haut et en bas. Et après, vous passez dans d'autres types de productions, qui sont dites non-fossiles.

Donc, ici, vous avez le nucléaire. Ici, vous avez l'éolien sans stockage. Ici, vous avez le photovoltaïque sans stockage – c'est-à-dire brut, brut de fonderie, en sortie de panneaux – et ici, si vous stockez sur batteries. Alors là, en sortie de panneaux, vous voyez que ça peut varier. Et la raison pour laquelle ça peut varier, c'est que ça dépend de la manière dont vous allez fabriquer le panneau, ou plus exactement du pays dans lequel vous allez fabriquer le panneau. Comme fabriquer un panneau solaire, c'est fondre du silicium et que c'est de la métallurgie qui se fait avec de l'électricité, si vous êtes en Chine, vous allez avoir un contenu carbone de votre silicium fondu qui sera très supérieur au contenu carbone si vous faites ça en France. Par ailleurs, derrière, la quantité de kWh que vous allez avoir par an dépend – comme je vous l'ai montré tout à l'heure – de la latitude et de la nébulosité. Donc là, les valeurs que vous avez, c'est pour la France. Selon que vous êtes au Nord ou au Sud et que vous avez fait fabriquer le panneau ici plutôt que là, vous voyez que vous vous baladez entre 30 et 80 grammes de CO<sub>2</sub> par kWh. Mais si – comme je le disais tout à l'heure – vous vous posez également la question de savoir ce que vous faites quand il n'y a pas de soleil (et donc que vous stockez), à ce moment-là, j'ai pris l'hypothèse du stockage sur batteries. Sur barrage réversible ça serait évidemment beaucoup moins que ça.

Sur batteries, vous avez besoin de fabriquer la batterie, c'est de la métallurgie aussi, et un kWh stocké et restitué sur une batterie, c'est n'importe quoi entre 50 et 200 grammes de CO<sub>2</sub> par kWh électrique. Alors ici, j'ai pris une valeur médiane et par ailleurs, quand vous stockez et que vous déstockez, vous al-

## 17. LE SOLAIRE, ZÉRO CO<sub>2</sub> ?

lez perdre une partie de l'électricité que vous avez stockée. Vous avez une perte qui est de l'ordre de 20%. Donc, ça veut dire que vous devez surdimensionner votre production pour la partie qui sera stockée de 1 sur 0,8. Donc un peu plus de 20%. Si vous mettez bout-à-bout les émissions supplémentaires liées au fait que vous avez produit de l'électricité qui ne sert qu'à compenser les pertes de stockage et les émissions de fabrication de la batterie, voilà, vous arrivez à la conclusion qu'un kWh photovoltaïque stocké sur batterie, ça se balade quelque part entre 100 et 250 grammes de CO<sub>2</sub>. Alors, je n'ai pas regardé la durée de vie qu'ils s'étaient prises dans l'ACV (Analyse du cycle de vie). De mémoire, c'est 25 ans ou 30 ans. Après, en fait, vous avez des panneaux qui peuvent continuer à fonctionner mais avec des rendements dégradés.

En fait, c'est ça le sujet. La question de la durée de vie est toujours un truc qui est très, comment dire... piégeux, dans les analyses de cycle de vie. Parce que par exemple pour les bâtiments, les durées conventionnelles, c'est 50 ans. Eh bien évidemment, on ne construit pas des bâtiments pour qu'ils s'écrasent au bout de 50 ans. Sauf les espèces de commerces de boîtes métalliques dégueulasses pour faire les commerces de banlieues, où, effectivement, ça on ne compte pas trop dessus. Mais sinon, dès que vous faites un logement, c'est évident qu'on ne le construit pas pour qu'il s'effondre tout seul dans 50 ans. Voilà. Vous avez des durées conventionnelles. Sur le photovoltaïque c'est 25 ou 30 ans.

## 18. On sait ce qui sort, moins ce qui rentre!

Factor	Typical Energy Invested Additions in a PV System	M€uros/year (Equiv)	GWh Equiv/year	Energy Invested in ER <sup>2</sup> X
a <sub>1</sub>	Module, inverters, trackers and metallic infrastructures (labor excluded)			0.120
a <sub>2</sub>	Accesses, foundations, canalizations and perimeter fences		148,0	0.028
a <sub>3</sub>	Transportations. From local manufacturers to		96,0	0.018
a <sub>4</sub>	Module Washing		10,7	0.002
a <sub>5</sub>	Self Consumption in Plants		26,8	0.005
a <sub>6</sub>	Operation and Maintenance Energy Costs	200	342,4	0.066
a <sub>7</sub>	Electrical Network/Power lines restructuring	45	77,0	0.015
a <sub>8</sub>	Security and Surveillance	68	116,4	0.022
a <sub>9</sub>	Communications and remote control and Management	5	8,6	0.002
a <sub>10</sub>	Faulty Modules, Inverters, trackers	10	17,1	0.003
a <sub>11</sub>	Fairs, Exhibitions, promotions, Conferences, etc.	40	68,5	0.013
a <sub>12</sub>	Circumstantial and Indirect Labor (not included in Direct labor activities) and Associated Economic/energy costs: Consultants, Notary Public, Public Register, Civil Servants/Public Officers, etc.	5,7	19,3	0.004
a <sub>13</sub>	Cost of land rent or long term ownership	13	22,3	0.004
a <sub>14</sub>	Energy investments of Evacuation Lines and Rights of Way	3	5,1	0.001
a <sub>15</sub>	Pre-inscription, Inscription, Registration bonds and fees	0	0,0	0.000
a <sub>16</sub>	Associated Energy Costs to injection of intermittent loads: Pump up Costs and/or other massive storage systems, if applied		0	0
a <sub>17</sub>	Associated Energy Costs to injection of intermittent loads: Network Stabilization Associated Costs (Combined Cycles)	50	85,6	0.016
a <sub>18</sub>	Insurances	42	71,9	0.014
a <sub>19</sub>	Administration Expenses	32	54,8	0.011
a <sub>20</sub>	Equipment Stealing and vandalism	7	12,0	0.002
a <sub>21</sub>	Force Majeure Acts of God and others: Wind storms, Lighting, storms, flooding, hail		0	0
a <sub>22</sub>	Municipality Taxes, duties and levies (2-4% total project)	7	12,0	0.002
a <sub>23</sub>	Premature phase out of unamortized manufacturing and other equipment	30	51,4	0.010
a <sub>1</sub> to a <sub>23</sub>	Total Invested Energy Additions	558	1245,8	0.360

Derived from conventional Life Cycle Analysis studies . Bankier and Gale quoting several studies and authors with poli, mono thin film, etc.

**EROEI~8.3**

Some Balance Of System (BoS) energy expenses, ignored in some or many LCA's on solar PV. These expenses are calculated directly in energy form (Prieto-Hall in preparation)

Other necessary energy inputs usually ignored in energy payback analyses for a Solar PV System in Spain. Most of them are derived from economic expenses translated into energy equivalences and distributed over a 25 year period (Some additional economic costs not included, such as Royal Decree tax for electricity producers or due payments to Agents representatives.

**1**  
**Final EROEI = ----- = 2.7**  
**0.36**

**kWh restitués par kWh utilisés pour le solaire selon Prieto & al.**

Diapositive 19.

Alors après, il y a un autre sujet, c'est le rendement énergétique du photovoltaïque. Donc là, je vous ai parlé de l'empreinte carbone mais on peut également s'intéresser à son rendement énergétique. Il y a une question intéressante – alors, je ne vais pas vous énumérer là-dedans mais – il y a une question intéressante de savoir où est-ce que j'arrête le périmètre de ce que je prends en compte. Parce que vous voyez, là, il y a un ingénieur espagnol – qui en l'occurrence est un ancien du photovoltaïque, il a passé son temps à installer et à gérer des parcs photovoltaïques en Espagne – qui un jour s'est amusé à faire le calcul de ce que donne le retour sur investissement énergétique du photovoltaïque (c'est-à-dire combien d'années de fonctionnement du panneau il faut pour rembourser l'énergie de fabrication du panneau).

C'est ça, le calcul qu'il a fait. Et il a dit : « Je ne vais pas prendre que le panneau. Je vais prendre le panneau, je vais prendre son installation – parce qu'il faut des camionnettes au pétrole pour venir installer le panneau, il faut du ciment pour les fondations, il faut de l'acier, il faut venir laver le panneau à

## 18. ON SAIT CE QUI SORT, MOINS CE QUI RENTRE!

intervalles réguliers... » Du reste, le Qatar (je crois) a des problèmes avec son photovoltaïque parce que, quand il y a des tempêtes de sable, ça colle plein de sable sur les panneaux. Après, vous ne pouvez pas le nettoyer comme ça parce que le sable raye le verre. Vous ne pouvez pas le nettoyer à l'eau parce qu'il n'y a pas d'eau. Vous ne pouvez pas le nettoyer à l'eau de mer parce que ça laisse du sel partout... Enfin bref, ils se sont un peu enquinés avec cette opération d'après ce que j'ai compris. Mais donc, il faut le laver, il faut mettre une clôture autour, il faut passer à intervalles réguliers, vérifier que tout va bien, il faut mettre des onduleurs, il faut... Bref. Cet ingénieur est allé jusqu'au bout (des gens dans des bureaux qui font des études pour savoir où est ce qu'on va installer le parc photovoltaïque, des autorisations administratives, etc.).

Donc, il a fait la contrepartie de tout ça. Et alors, ça date de quelques années donc évidemment, ça s'est amélioré depuis. Mais il y a quelques années, il disait : ben voilà, en gros, pour UN d'investi dans la fabrication du panneau photovoltaïque et de tout ce qui l'entoure, je vais ressortir TROIS sur sa durée de vie. Dit autrement, si on considère que la durée de vie de l'installation c'est 25 ans, eh bien la fabrication de l'installation et l'énergie qu'il faut utiliser pour faire fonctionner les ingénieurs qui dimensionnent le machin, etc., etc., en fait ça représente l'équivalent de 8 ans de fonctionnement. Alors, encore une fois, c'était il y a quelques années. C'est quelque chose qui, évidemment, s'est amélioré depuis, mais voilà.

C'est un exercice intéressant parce que – alors, je ne rentrerai pas dans le détail aujourd'hui mais – il y a des gens qui ont théorisé que le rendement du système énergétique, pour qu'on ait une société élaborée, il faut qu'il soit supérieur à DOUZE ou TREIZE. C'est-à-dire qu'il faut que vous ayez un retour sur investissement énergétique qui soit supérieur à DOUZE ou TREIZE pour qu'on ait une société élaborée dans laquelle les gens ont le temps d'aller faire des études à l'école des Mines et non pas qu'ils soient tous occupés à faire pousser leur nourriture. Alors, je n'ai pas été vérifier le multiple. En tout cas, ça me paraît à peu près évident qu'à TROIS, ça ne marche pas. Et même à CINQ à mon avis ça ne marche pas bien.

Alors, sur le pétrole à ses débuts, si vous excluez le raffinage, vous êtes à un sur cent. Donc, en gros, il fallait investir 1 pour faire sortir 100 d'un puits de pétrole. Le pétrole aujourd'hui, on est plutôt à 1 sur 10 en moyenne. Le pétrole de schiste ou les sables bitumineux, on est à 1 sur 3, ou 1 sur 4, donc là, ça commence à être vraiment pas terrible. Le nucléaire, si vous demandez aux gens qui travaillent dedans, ils vous disent 1 sur 60, si vous demandez aux anti-nucléaires, ils vous disent 1 sur 5. Mais, en l'occurrence, pour avoir fait les calculs, je pense qu'on est beaucoup plus proche du 1 sur 60. Non, mais

## *18. ON SAIT CE QUI SORT, MOINS CE QUI RENTRE!*

les antinucléaires, ils vous sortent toutes les hypothèses... le truc le plus défavorable possible. Ils vous enrichissent l'uranium avec des centrales à charbon, etc. Si vous regardez l'hydroélectricité, c'est pas mal. L'hydroélectricité c'est 1 sur quelques dizaines. C'est clair que les biocarburants, on le verra plus tard, ça peut être 1 pour 1, 1 pour 1,2 on va dire. Donc, dans les énergies fossiles historiques... Le gaz doit être à 1 pour 30. Donc, dans les énergies fossiles historiques, vous êtes à 1 pour plusieurs dizaines. Et c'est ça qui a permis de faire la société très sophistiquée dans laquelle on vit. Les énergies renouvelables diffuses, typiquement le soleil, ont en général des ratios beaucoup plus bas. Et c'est ça qui fait dire à un certain nombre de gens que ça sera compliqué d'avoir une société élaborée sur la base simplement de ces énergies. Ce n'est pas pour ça qu'il ne faut pas s'en servir, mais ça fait partie des contreparties.

## 19. Exploitation n°3 : je concentre très fort



Diapositive 20.

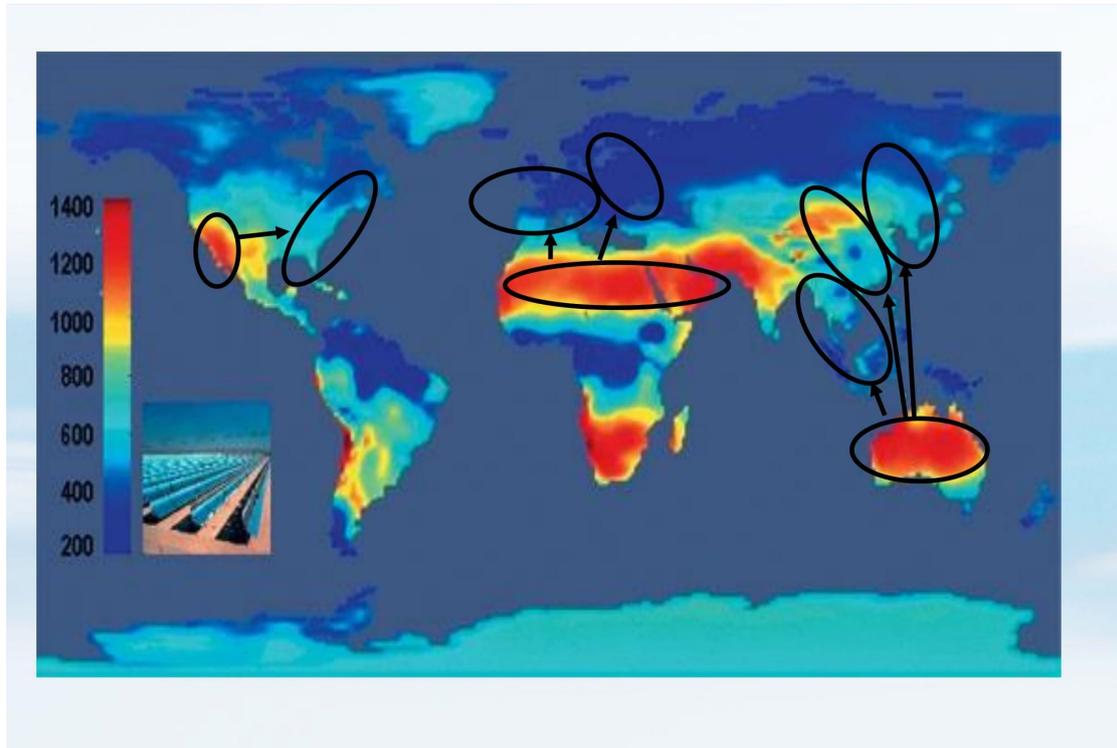
Vous avez une dernière manière d'exploiter le rayonnement solaire à des fins énergétiques. Alors, c'est toujours dans le domaine électrique mais cette fois-ci, c'est avec de la concentration. Alors, le solaire à concentration, on prêle à Archimède de l'avoir utilisé il y a longtemps pour mettre en déroute les bateaux ennemis avec des grands miroirs paraboliques. Et plus récemment, on s'en sert pour faire des centrales qui sont aussi des centrales électriques et qu'on appelle des centrales thermodynamiques. Alors là, le principe c'est de retrouver une machine de Carnot. Dit autrement, vous utilisez l'énergie solaire que vous concentrez sur un point chaud pour faire une source chaude à votre centrale. Donc, au lieu de faire brûler du charbon, ou de casser des noyaux d'uranium en deux, eh bien vous allez concentrer du rayonnement solaire.

C'est ça, votre source chaude. Du coup, chauffer un réservoir de saumure. Et ce réservoir de saumure, si votre champ de miroirs est suffisamment important, il peut être porté à une température suffisamment élevée pour que ça permette de passer une partie de la nuit. Donc, l'intérêt du solaire à concentration, par

### *19. EXPLOITATION N° 3 : JE CONCENTRE TRÈS FORT*

rapport au solaire photovoltaïque, c'est que ça vous supprime pour partie la question de « quand il n'y a pas de soleil je fais quoi? ». Ce qui est un gros, gros avantage dans la gestion des réseaux. Alors, la source froide, c'est l'air ambiant. Donc, le rendement n'est pas très bon. Mais ce n'est pas très grave parce que, si vous êtes dans le désert... Alors, c'est grave pour la consommation de matériaux. Parce que si vous avez besoin de trois fois plus de miroirs, vous avez besoin de trois fois plus de verre, de métal, etc., par kWh produit. Par contre, ce n'est pas un problème d'espace puisque vous avez tout l'espace que vous voulez. Mais c'est un problème de matériaux, ça c'est clair.

## 20. Le solaire à concentration, avenir des échanges ?



Diapositive 21.

Je vous ai montré tout à l'heure la France. Vous avez ici une carte de l'insolation en ce qui concerne le monde dans son ensemble. Et donc, vous voyez que les endroits où c'est pertinent d'aller mettre du solaire à concentration ou du photovoltaïque, ce sont les endroits qui sont cerclés en rouge. Alors malheureusement, ce que vous voyez également, c'est que, à quelques exceptions près, en particulier la Californie – parce que la Californie est un endroit qui est un gros consommateur d'électricité : vous vous rappelez peut-être qu'en termes économiques, si la Californie était un état indépendant, ça serait la 7<sup>e</sup> puissance économique mondiale, donc c'est quand même un gros paquet d'activités, donc une grosse consommation électrique – mais à part la Californie, l'essentiel des zones qui sont très bien insolées sont dans des endroits où il n'y a personne. Donc si on utilise...

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

Je vous ai montré l'assèchement, je ne vous ai pas montré l'augmentation de l'insolation. L'assèchement, en fait, il résulte de deux choses. Il résulte d'une

## 20. LE SOLAIRE À CONCENTRATION, AVENIR DES ÉCHANGES ?

baisse de la pluviométrie. Donc ça, effectivement, ça vient d'une diminution de la nébulosité. Globalement. Mais ça vient aussi d'une augmentation de l'évaporation, et ça il n'y aura pas de lien avec les nuages. Donc, ce que je vous ai montré la dernière fois, c'était l'assèchement du pourtour du bassin méditerranéen. Ce que vous voyez là, donc, encore une fois, c'est que les grandes zones d'insolation sont loin des grandes zones de consommation.

Alors, il y a des gens qui ont imaginé que l'on pouvait installer des batteries de centrales solaires photovoltaïques à concentration dans ces zones-là puis tirer des grandes lignes électriques qui iraient jusque dans les pays ou les zones dans lesquelles on consomme beaucoup d'électricité. C'est quelque chose qui n'est pas complètement idiot, dans la mesure où, après tout, vous avez bien des grandes lignes maritimes, des grandes lignes aériennes. Donc, on pourrait très bien faire des grandes lignes électriques. Faut dire, sur le fond, ce n'est pas plus compliqué. Par contre, ça pose des questions intéressantes d'accords de partage parce qu'il est évident que si vous utilisez le soleil des maliens, si les maliens sont « bigornés » normalement, ils ne vont pas vous laisser l'utiliser gratuitement. Donc, il y a une question de partage. Donc, dans l'idée des gens qui disent « les énergies renouvelables c'est une manière de s'affranchir de la dépendance aux autres », bah c'est moins sympathique mais ça n'empêche pas de le faire. Et en tout état de cause, ce n'est pas quelque chose qui peut se faire rapidement. Soit dit en passant, sur les matériaux qui sont nécessaires pour faire des panneaux solaires, on se rend également extrêmement dépendants. Aujourd'hui, les dix premiers fabricants de cellules photovoltaïques dans le monde sont chinois. Les dix premiers ! Les dix premiers ! Donc, tous les plans de développement du solaire, en Europe, typiquement, sont des plans qui favorisent l'industrie chinoise. Alors, on peut le faire si on pense que c'est une bonne idée, mais ça a ses contreparties.



## *21. CONCENTRER LE SOLAIRE, PLUS FORT QUE CONCENTRER L'EAU*

Ça fait quand même la superficie d'une grosse ville. Mais par contre, en termes d'occupation globale d'espace, ce que vous voyez, c'est que ce n'est pas quelque chose qui est totalement délirant. Si on n'a pas de problème de matériaux. En fait, on a des problèmes de matériaux, évidemment, si on veut commencer à remplacer la totalité de l'électricité qu'on consomme dans le monde par du solaire à concentration. Ça sera toujours le problème.

## 22. Différence photovoltaïque - concentration

**Photovoltaïque = production en bout de réseau <-> concentration = production en tête de réseau**

**Se passer de réseau ?  $\sum$  pointes locales = 5 fois pointe globale + il faut stocker localement (c'est beaucoup plus cher)**

Diapositive 23.

Par contre, ça a un avantage sur le photovoltaïque. C'est que le photovoltaïque est de la production de bout de réseau. Et le réseau n'a pas été fait pour ça. Le réseau est un système qui a, historiquement, été fait pour être un système descendant. Donc, vous avez de la production en tête de réseau à très haut voltage. Et puis après, vous perdez du voltage comme vous perdez de l'altitude, et donc, vous avez l'électricité qui est progressivement distribuée sur un nombre croissant de zones et de consommateurs, dans un processus qui est un processus de descente en tension. Et puis vous avez par ailleurs une mutualisation. Parce que si vous regardez – je ne sais pas si je vous avais déjà fait le calcul – si vous regardez la puissance que peut soutirer en France, la totalité des appareils électriques installés, c'est quatre à cinq fois la puissance électrique installée en production. C'est clair ou je répète? La puissance installée en production, la puissance pilotable installée en production, est de l'ordre d'une centaine de gigawatts. La puissance totale de tous les appareils installés en France (vos aspirateurs, ascenseurs, batteurs à mayonnaise, laminoirs, trains, etc.), c'est quelques centaines de gigawatts. C'est cinq fois plus en gros. L'intérêt du réseau, c'est que

## 22. DIFFÉRENCE PHOTOVOLTAÏQUE - CONCENTRATION

ça mutualise la production parce que, bien évidemment, le conducteur du train, quand il conduit le train, il n'est pas en train de se servir de son aspirateur chez lui. Donc, toutes les machines ne sont pas utilisées en même temps. Et donc, avec une puissance plus réduite que la puissance de la totalité des machines électriques installées dans ce pays, vous êtes quand même capables de servir tout le monde par effet de mutualisation.

Dans le rêve Rifkinien (Rifkin, essayiste américain sur le sujet du Green Deal) dans lequel chacun vit heureux chez soi avec son panneau solaire et sa batterie, sans réseau, à ce moment, vous êtes obligé de dimensionner la puissance de pointe de toutes les installations locales à la consommation de pointe de toutes les installations locales. C'est clair ou ce n'est pas clair? Et donc, à ce moment, vous êtes obligés d'installer quatre à cinq fois plus de puissance dans le pays. Donc le réseau est une source d'économie de puissance installée. C'est à ça qu'il sert. Et c'est justement parce que les pays qui se sont électrifiés il y a longtemps avaient moins de moyens qu'aujourd'hui qu'ils ont créé des réseaux : pour mutualiser les moyens existants et pas avoir à les dupliquer partout. Donc, le solaire à concentration, il est intéressant parce qu'il est en tête de réseau et donc, il bénéficie de cet effet de mutualisation de la tête de réseau versus le photovoltaïque qui lui ne bénéficie pas de cet effet. Ce que je suis en train de vous dire donc, là en indirect, c'est que l'autoconsommation photovoltaïque, c'est-à-dire le fait que chacun ait chez soi de quoi consommer sa propre électricité, contrairement à une idée couramment répandue, ça augmente très fortement les investissements globaux dans un pays, et donc, ça augmente très fortement le prix total de l'électricité dans un pays. Et si vous avez quelqu'un qui localement paye son électricité moins chère grâce à ça, c'est juste un effet de passager clandestin. La surcharge sera reportée sur tous les autres.

Je vais vous le dire encore autrement : comme nous avons en France un système électrique qui est un système à coûts fixes (puisque le nucléaire c'est des coûts fixes et le réseau, c'est des coûts fixes), si vous rajoutez des panneaux solaires pour ne pas consommer l'électricité du réseau quand vous avez du soleil, vous rajoutez un troisième système à coûts fixes par-dessus deux systèmes à coûts fixes. Donc, le coût global de l'ensemble augmente. C'est extrêmement simple. Oui?

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

Un plafond de quoi? \*\*\* Réponse auditoire \*\*\* Ce n'est pas intéressant de quel point de vue? C'est-à-dire la question c'est : « est-ce que pour un surplus de population, ça ne vaut pas le coup que ce surplus lui ait son installation de son côté? » Ah non! Alors, plusieurs réseaux mutualisés, c'est une duplication d'infrastructure. C'est un seul réseau qui est intéressant parce que, comme ça vous

## 22. DIFFÉRENCE PHOTOVOLTAÏQUE - CONCENTRATION

faites communiquer tous les consommateurs et tous les outils de production ensemble. donc, c'est là que vous avez l'effet de mutualisation le plus important. Après si vous dites « les consommateurs supplémentaires je les laisse hors réseau, ils n'ont qu'à s'équiper chez eux », en fait, là, vous les privez globalement de l'électricité marginale que le réseau pourrait leur fournir, enfin que le réseau et les appareils de production du réseau pourraient leur fournir. Et c'est beaucoup moins cher cette électricité marginale que le coût complet de production d'une installation autonome. On y viendra après. Dans tous les cas de figure, quand vous avez un réseau, vous avez intérêt à vous en servir.

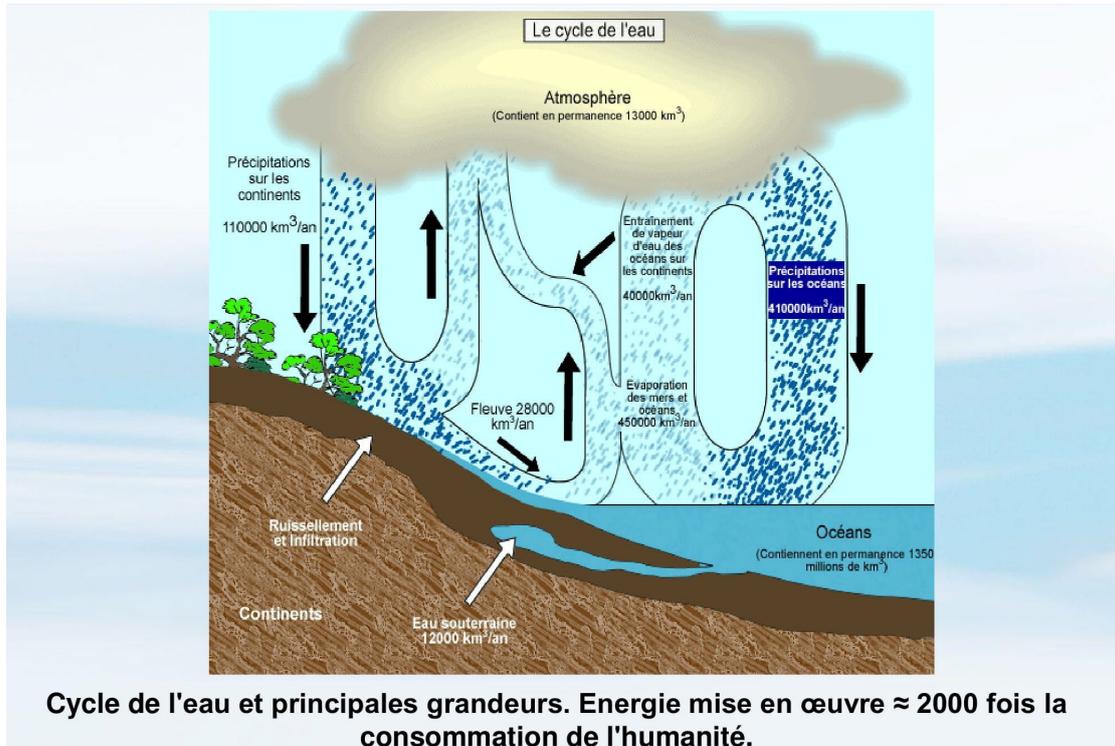
\*\*\* Question auditoire inaudible \*\*\*

Le réseau est un système maillé. C'est une toile d'araignée en gros, et donc, vous mettez à n'importe quel point de la toile soit un consommateur, soit un dispositif de production. Il est partiellement en étoile mais il est partiellement aussi en toile d'araignée. Quand il est purement en étoile, vous êtes dans ce qu'on appelle des presque îles électriques, typiquement la Bretagne ou le Sud-Est de la France et le gestionnaire du réseau n'aime pas ça, je peux vous dire. Il aime bien avoir de la redondance.

\*\*\* Question auditoire sur la problématique de la position sur le réseau \*\*\*

Alors, attendez... Quand je dis « en tête de réseau », je parlais du voltage, je ne parlais pas d'une position géographique. C'est-à-dire que le réseau en France c'est un backbone, un squelette à 400 kV. En dessous, un réseau moyenne tension entre 20 et 90 kV, et encore en dessous un réseau de distribution à 220 V. Enfin, en 380 V triphasé. Les têtes de réseaux, je voulais dire des installations de production qui sont branchées sur la partie à 400 kV, c'est ça que je voulais dire. Que la centrale soit à Gardanne où à Gravelines, ce n'est pas le sujet. C'est d'être sur le réseau à 400 kV. Parce que, quand vous regardez, quand vous faites de rapides calculs, vous vous rendez compte que la déperdition électrique à ces tensions-là, à 400 kV, pour aller d'un bout à l'autre de la France, c'est quelques pourcents. C'est 2% à 3%. Donc, du coup, vous pouvez mettre votre centrale un peu où vous voulez, pourvu que vous ayez la capacité de transport.

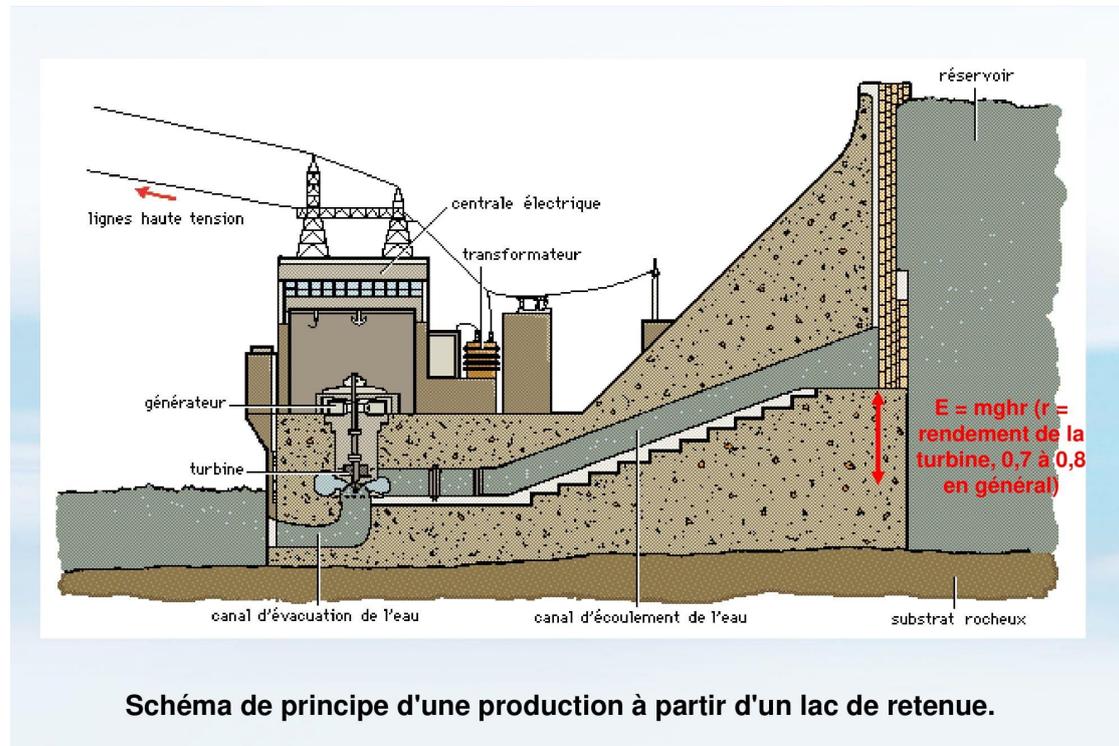
## 23. L'hydroélectricité commence par cela...



Diapositive 24.

Je vous l'ai dit tout à l'heure, un deuxième effet du soleil, c'est qu'il évapore l'eau et donc, il la fait précipiter.

## 24. Puis continue par ici



Diapositive 25.

Ce cycle de l'eau est à l'origine de l'exploitation de la première électricité d'origine renouvelable que nous ayons en importance qui est donc, l'hydroélectricité. Alors, l'hydroélectricité, dans son principe, c'est extrêmement simple : c'est le perfectionnement des moulins à eau. Vous avez une énergie potentielle de chute – qui est la masse, fois la constante d'attraction, fois la hauteur – et donc ce que vous allez récupérer quand vous turbinez de l'eau, c'est exactement ça. C'est-à-dire : c'est de l'énergie potentielle qui devient de l'énergie cinétique quand vous ouvrez la vanne, fois un coefficient de perte qui est dû au fait que vous avez un peu de frottements. Vous avez un peu de frottements dans la canalisation qui va du barrage vers la turbine et vous avez un peu de frottements sur la turbine elle-même. Alors question : combien on peut en faire ? Oui ?

\*\*\* Question auditoire sur le rendement de 0,7-0,8 \*\*\*

C'est le rendement total. C'est mécanique. Donc, en fait dès que vous avez un... Et inversement le rendement du moteur électrique est très bon aussi. Donc, la transmission mécanique de l'eau aux ailettes de la turbine a un très bon coef-

*24. PUIS CONTINUE PAR ICI*

ficient, et par ailleurs, la transformation du mouvement en électricité a un très bon coefficient aussi.

## 25. Le calcul « théorique »

Massif	Superficie km2	précipitations annuelles (mm)	Hauteur moyenne de chute (mètres)	Energie potentielle max TWh	Energie électrique max TWh
Rhone Alpes	44 000	1 000	1 500	180	144
Reste Massif Central	20 000	1 200	1 000	65	52
Suisse	41 000	800	2 000	179	143
Pyrénées	50 000	1 000	1 000	136	109
Autriche	84 000	1 000	1 500	343	275
Norvège	100 000	500	1 000	136	109
Suède	100 000	500	1 000	136	109
Italie	80 000	600	1 000	131	105
Reste de l'Europe	100 000	800	1 000	218	174
<b>Total</b>				<b>1 525</b>	<b>1 220</b>

reliefs                      Volumes d'eau retenus max                       $E = mgh$                        $E = mghr$

Diapositive 26.

Alors, la question c'est : combien on peut en faire ? Ici, vous avez un petit calcul théorique pour l'Europe, justement, puisque la question m'a été posée tout à l'heure. En gros, de l'hydroélectricité, vous pouvez en faire facilement là où Mère Nature fait tomber l'eau en altitude et que vous pouvez assez facilement – cette eau qui tombe en altitude – la collecter en altitude, faire une canalisation qui descend beaucoup plus bas et la turbiner beaucoup plus bas. Donc, le seul endroit de relief qui vous offre cette opportunité, ça s'appelle des montagnes. Donc, les montagnes : qu'est-ce qu'elles vous permettent de faire ? Elles ont des vallées suspendues : c'est-à-dire des vallées que vous pouvez fermer en altitude. L'eau qui ruisselle dans ces vallées – que ce soit de l'eau de fonte de glaciers, de l'eau de fonte de neige, ou de la pluie – vous la collectez. Ça s'appelle un barrage. Et, du barrage, vous faites descendre (ou pas) – du reste, ça dépendra où vous avez mis le barrage – mais du barrage, vous faites descendre un tuyau en bas de vallée pour avoir la plus haute hauteur de chute possible. Et en bas de vallée, vous turbinez l'eau. C'est juste un jet d'eau qui va actionner une turbine. De temps en temps, vous n'avez pas de grande hauteur de chute. Par exemple,

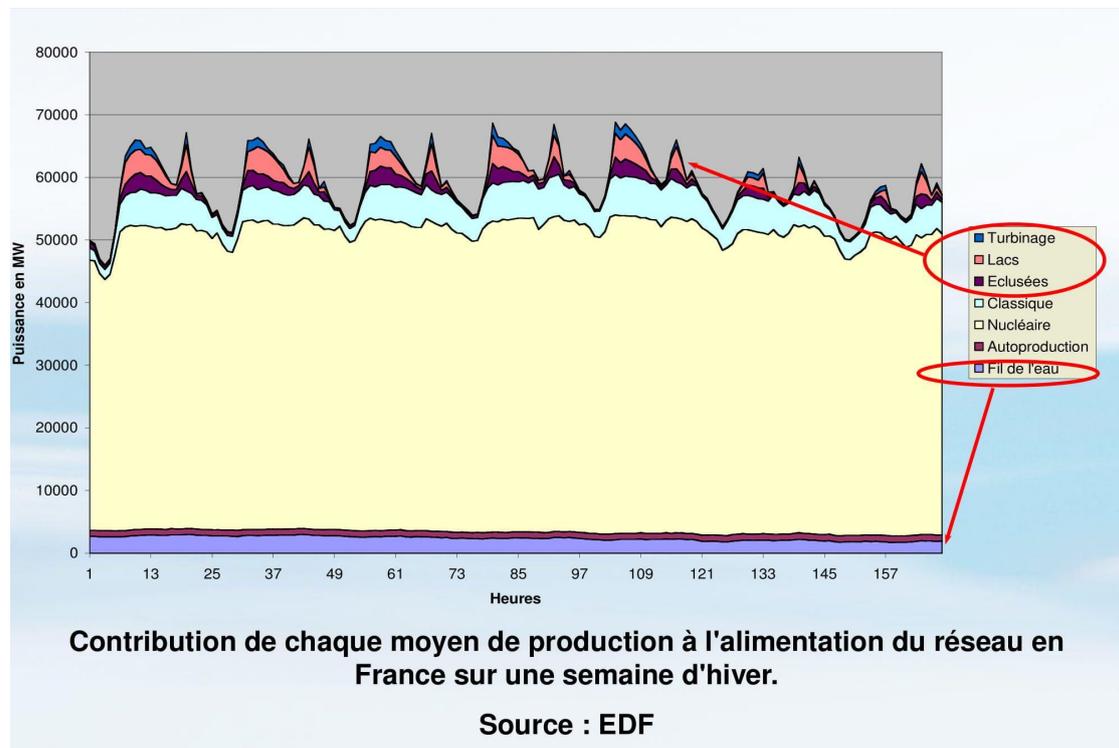
## 25. LE CALCUL « THÉORIQUE »

pour ceux d'entre vous qui connaissent le barrage de Serre-Ponçon, à Serre-Ponçon, vous n'avez pas de hauteur de chute. Vous avez juste la hauteur d'eau du barrage. Parce que vous n'avez pas de dénivellation à l'aval.

Alors question : combien est-ce qu'on peut en avoir dans cette affaire ? donc, ici, j'ai regardé un certain nombre de massifs montagneux que vous avez en Europe. Pour chacun d'entre eux, j'ai regardé leur superficie et leur hauteur moyenne au-dessus des vallées, d'accord ? Donc, ça vous donne, une fois que vous avez le nombre de millimètres de pluie par an, fois la superficie, vous avez le volume d'eau qui tombe. Et une fois que vous avez la hauteur de là où ça tombe par rapport au fond de vallée, vous avez la hauteur de chute. Donc là, vous avez la masse d'eau tombée en altitude fois la hauteur de chute, il n'y a plus qu'à rajouter  $g$  qui est la même chez tout le monde et ça vous donne le potentiel théorique qui peut venir de l'hydroélectricité. C'est très simple, le calcul d'ordre de grandeur est très simple. Et ce que vous constatez, c'est que si on regarde le... Voilà, donc là, après, vous avez le rendement, on va dire, qui s'applique.

Aujourd'hui, en Europe, l'hydroélectricité représente un peu moins de 1000 térawattheures – c'est entre 500 et 1000, je ne me rappelle plus exactement la quantité. Donc, vous voyez qu'on n'est pas très, très loin du maximum théorique de ce que l'on peut faire. On a équipé l'essentiel des montagnes suédoises, norvégiennes, dans les Alpes, etc. On ne peut plus faire grand-chose. Ce qu'on peut encore faire, c'est des bassins de rétention artificiels. Par exemple, je me suis amusé un jour à faire un petit calcul théorique sur la quantité d'eau qu'il faudrait pomper au-dessus du Léman si on voulait stocker de cette manière les énergies intermittentes des éoliennes ou des panneaux solaires. Donc, vous pouvez imaginer noyer toutes les vallées qui sont au-dessus du Léman. Donc, pour tous les gens qui aiment bien aller faire du ski dans les stations qui sont juste au sud du Léman, vous oubliez : il n'y a plus de vallée, il n'y a plus de station. On fait des barrages partout. Mais ça peut pomper l'eau du Léman et compenser l'intermittence des éoliennes. Mais c'est le seul genre de truc que vous pouvez faire aujourd'hui. C'est-à-dire, l'eau de pluie qui tombe naturellement, on a à peu près tout construit.

## 26. Et en pratique ?



Diapositive 27.

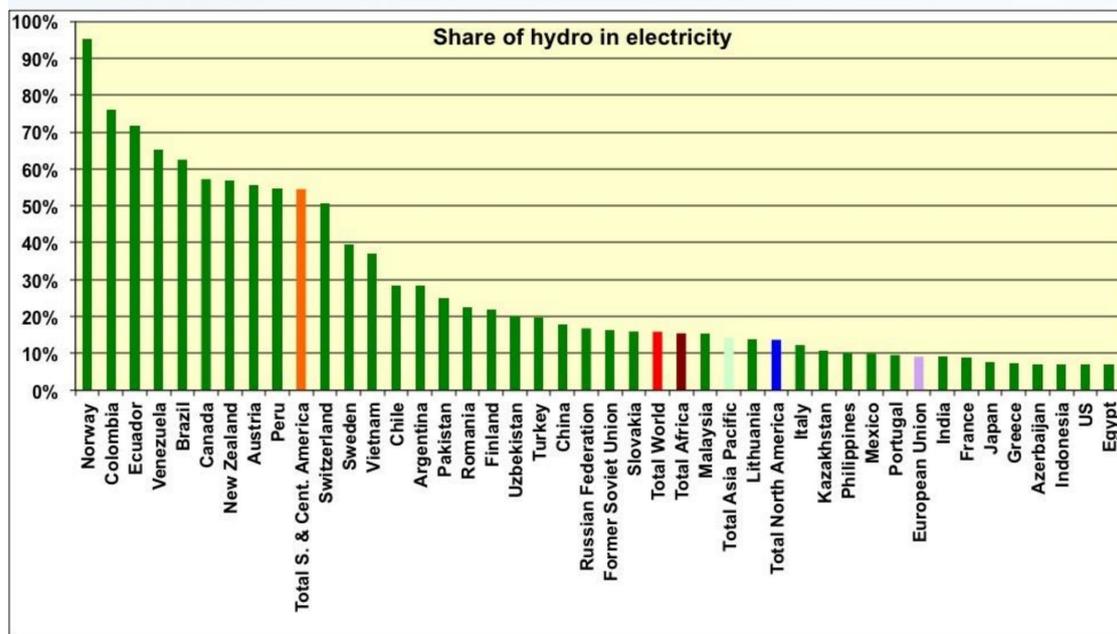
Alors, l'hydroélectricité en fait, tout le monde a en tête le barrage que je viens d'évoquer mais j'ai été incomplet dans mes explications parce qu'il y a une deuxième source de production électrique qui est importante qui est ce qu'on appelle l'électricité au fil de l'eau. Alors là, c'est l'exact inverse du barrage qui fait beaucoup de puissance (puisque vous avez une forte hauteur de chute) et pas la possibilité d'assurer de la production toute l'année (parce que sinon le lac de barrage se viderait rapidement).

Le fil de l'eau, c'est l'exact inverse. C'est une dérivation d'un fleuve : une faible hauteur de chute, et ça tourne toute l'année. Alors, en fait, ça tourne toute l'année, plus ou moins fortement. Je vais vous donner un exemple : vous savez que quand on parle du débit du Rhône, on parle du débit d'un fleuve qui, au printemps, se balade à presque mille mètres cubes à la seconde à certains endroits, mais l'été ça peut être dix fois moins (un été un peu sec). Vous vous souvenez peut-être que l'année dernière, le Doubs a été totalement à sec sur une partie de son lit. Donc, le débit, même d'un barrage au fil de l'eau, eh bien

## 26. ET EN PRATIQUE ?

vous pouvez avoir une production l'été qui est significativement inférieure à ce qu'elle est au printemps ou à l'automne. Et puis de l'autre côté, vous avez les barrages qui servent à faire de la régulation de pointe. Et donc là-dedans, vous allez trouver ce qu'on appelle les éclusés et les barrages de haute chute. Alors, les écluses, ce sont des barrages de petites chutes. En fait, c'est juste ça, la différence. Donc, ce sont des barrages avec un réservoir, donc une retenue. Simplement, vous n'avez pas une grande hauteur de chute derrière la retenue. Alors que les barrages de haute chute, typiquement Grand'Maison, c'est un barrage de haute chute. Serre-Ponçon est probablement dans les écluses.

## 27. Hydroélectricité = montagnes, ou à peu près



Part de l'hydroélectricité dans la production électrique par pays en 2017.

Source des données : BP Statistical Review

Diapositive 28.

Une fois que je vous ai dit ça, la question c'est : quelle est la fraction de l'hydroélectricité dans l'alimentation électrique des pays aujourd'hui ? Alors, ce que vous voyez... Oui ?

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

« Y a-t-il une limite au nombre de barrages au fil de l'eau qu'on peut mettre sur un fleuve ? »

Oui, au sens de : à partir du moment où il faut que vous fassiez un kilomètre pour avoir dix mètres de hauteur de chute, eh bien si vous avez 300 km de fleuve, vous pouvez mettre 300 barrages au fil de l'eau. Donc, ça fait beaucoup mais ça fait que ça. Et par ailleurs sur 10 mètres de hauteur de chute, vous allez quand même avoir beaucoup moins que sur 2000 m que vous pouvez avoir dans les Alpes.

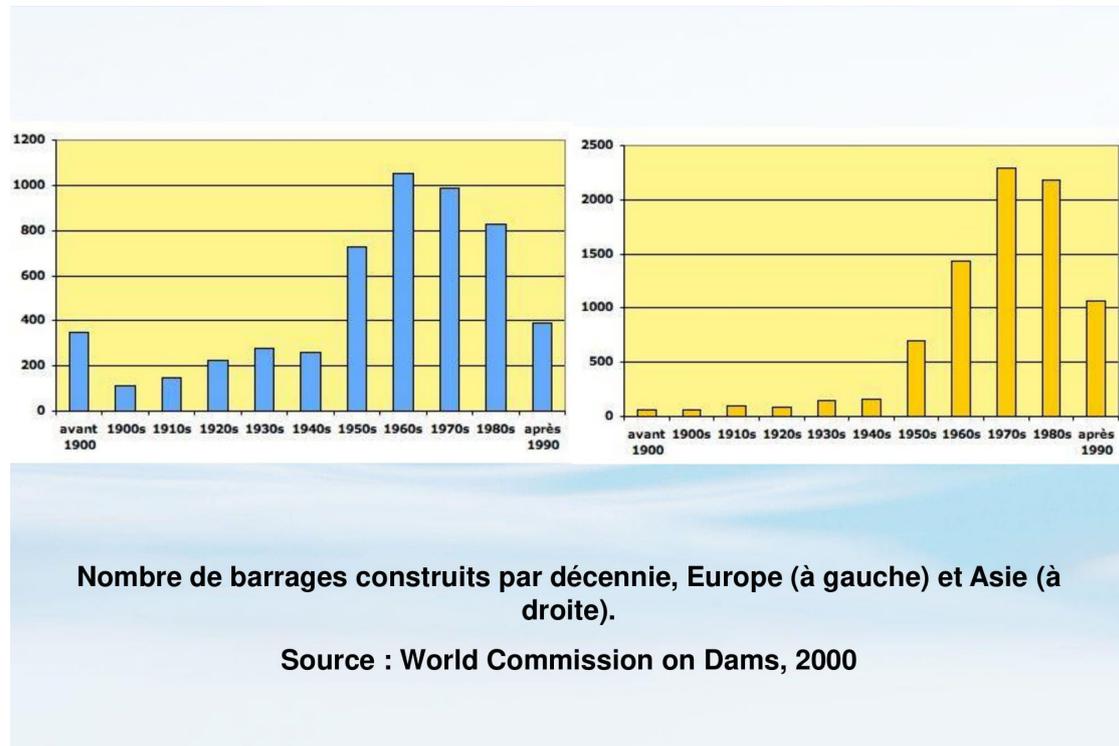
Dernier point, le fleuve sert aussi pour la navigation – ça ne vous aura pas échappé – de temps en temps. Le fleuve, du reste, ça sert tellement pour la navigation que, là aussi, dans les conséquences de la sécheresse de l'été dernier,

## 27. HYDROÉLECTRICITÉ = MONTAGNES, OU À PEU PRÈS

vous avez le Rhin qui s'est tellement asséché – le bassin versant du Rhin s'est tellement asséché, et le niveau du Rhin est devenu tellement bas – qu'une partie des transports de marchandises qui permet à l'industrie allemande de tourner (et même à certaines centrales à charbon de tourner – une très bonne nouvelle de mon point de vue) : les transports n'ont pas pu avoir lieu parce qu'il n'y avait plus assez d'eau dans le fleuve. Donc, une partie de l'industrie allemande a tourné au ralenti à la fin de l'année dernière et ça explique peut-être la petite récession qu'a connue l'Allemagne sur le dernier trimestre de l'année 2018.

Donc, les barrages au fil de l'eau, vous avez un nombre limite lié au fait que la hauteur de chute du fleuve entre son embouchure et le début de l'endroit où vous mettez des barrages au fil de l'eau est aussi limitée. Donc ici, vous voyez la part de l'hydroélectricité dans l'approvisionnement électrique d'un certain nombre de pays. Vous voyez que le champion mondial toutes catégories en proportion, c'est la Norvège, qui est aussi le premier producteur européen en valeur absolue (de térawattheures hydroélectriques). De mémoire, un norvégien consomme trois fois plus d'électricité qu'un français. Ça doit être dans ces eaux-là. Voilà. La France n'est pas très loin de la moyenne européenne. Vous voyez à 10%. Enfin à peu près 10%. Et vous voyez également qu'il y a des continents qui sont mieux lotis que d'autres. Et en particulier, l'Amérique du Sud est très bien lotie parce que vous avez beaucoup de montagnes (la Cordillère des Andes), beaucoup de flotte (il tombe beaucoup de pluie à l'équateur) et donc, vous avez la possibilité de mettre beaucoup de barrages.

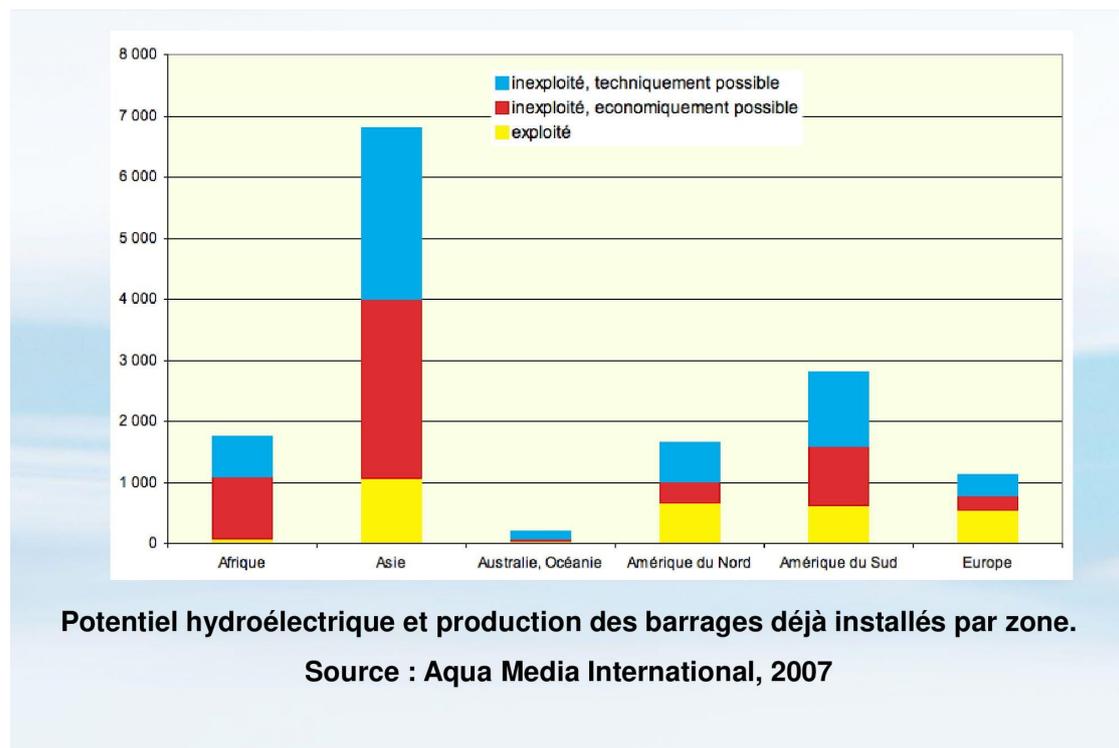
## 28. Y'a du rab ?



Diapositive 29.

Alors, en Europe, je vous le disais tout à l'heure, les barrages, on a un peu mangé notre pain blanc. Au sens que l'on a installé à peu près tous ceux que l'on pouvait installer. Ce n'est pas aussi simple que ça ailleurs dans le monde. Enfin, ce n'est pas aussi vrai ailleurs dans le monde.

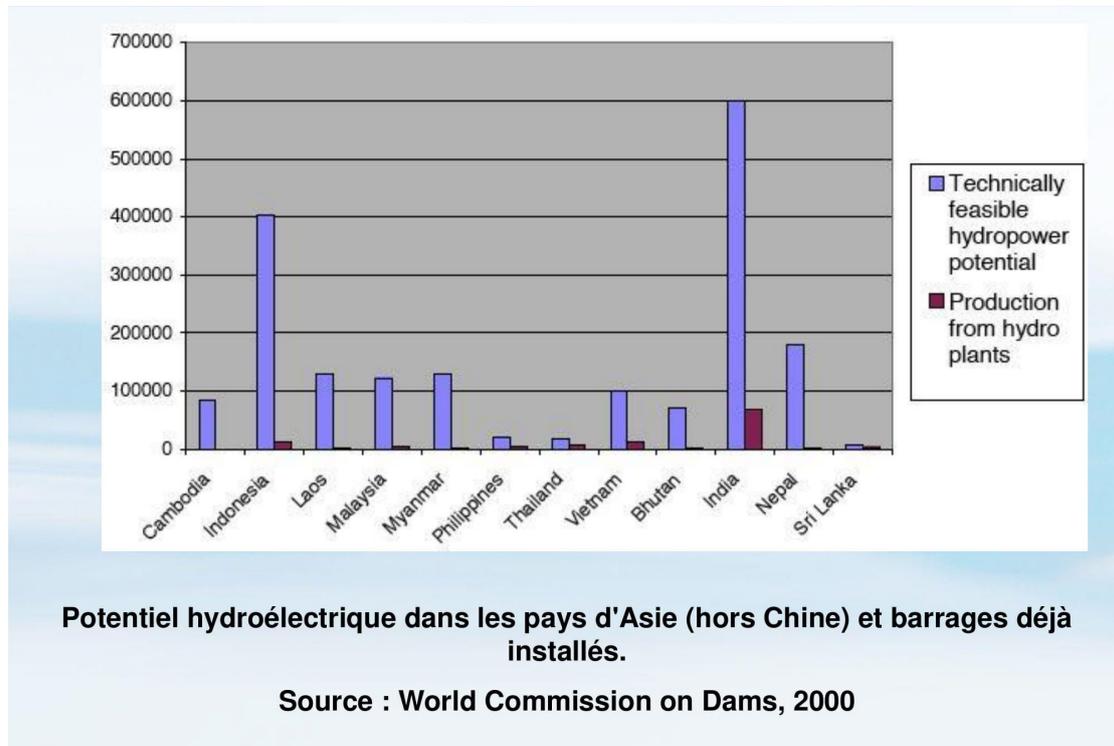
## 29. En faire encore plus n'est pas aussi facile partout



Diapositive 30.

Ici, vous avez un graphique qui vous représente pour chaque zone ce qui a été équipé, ce qui est encore envisageable économiquement et ce qui pourra l'être techniquement si on se fout du prix (en gros). Et ce que vous voyez donc, pour l'Europe (tout à droite), c'est que (de mémoire) on est à 600 térawattheures d'électricité produite aujourd'hui. Le petit calcul théorique que je vous ai fait tout à l'heure, c'est que si je prends toute la flotte qui tombe sur toutes les montagnes, on est plutôt à 1200. Vous voyez, ça correspond à peu près au fait que la moitié est équipée. Mais si je ne prends que ce qui est économiquement considéré comme pertinent aujourd'hui, on est plutôt aux deux tiers ou aux trois quarts.

### 30. Qui peut avoir du rab ?



Diapositive 31.

C'est en Asie, en gros, que vous avez le plus gros potentiel de barrages restant à construire. Alors, retenez également une chose importante, c'est que l'essentiel des barrages dans le monde, je parle bien des barrages, ne servent pas à produire de l'électricité. Ils servent à quoi? À l'irrigation. Absolument. Ça sert à faire des retenues d'eau pour l'irrigation. Alors, en France, vous avez aussi cet usage parfois sur certaines retenues d'eau. Ce qui veut dire que, quand vous avez... Et vous avez également des lacs de barrage qui servent pour le tourisme.

Par exemple, sur le barrage de Serre-Ponçon il y a une école de voile de mémoire. Ce qui veut dire que vous pouvez commencer à avoir (avec les retenues de barrage) des conflits d'usages. C'est-à-dire que les uns disent « turbinez-moi l'eau pour avoir de l'électricité sans carbone ». Les autres disent « ne turbinez pas l'eau parce que je veux la garder pour l'irrigation » et les troisièmes disent « ne faites ni l'un ni l'autre parce que je veux pouvoir faire de la voile sur le lac de barrage ». donc, vous avez des conflits d'usages qui peuvent apparaître avec les retenues d'eau. Et notamment entre l'agriculture et la production hy-

### 30. QUI PEUT AVOIR DU RAB ?

droélectrique. Pardon, et j'oubliais un dernier conflit d'usages, qui est de soutenir les débits d'étiage. Puisque à la fois pour des raisons de production des centrales nucléaires en France (de refroidissement donc), mais aussi pour des raisons écologiques (parce qu'il faut que les poissons aient encore un peu d'eau pour survivre dans les fleuves), vous avez également des lâchés d'eau dans les barrages qui ont pour principal déterminant le fait de soutenir le débit d'étiage pour qu'il reste de l'eau dans le fleuve. Donc, les barrages peuvent avoir des usages qui sont variés.

## 31. C'est renouvelable, pas toujours inoffensif



**Photo du lac de barrage de Vajont (Italie), après le glissement de terrain (plus de 2000 morts à l'aval)**

Diapositive 32.

Voici un lac de barrage. Il s'agit du barrage de Vajont, à Longarone en Italie, qui, à la fin des années cinquante ou au début des années soixante, je ne me souviens jamais, a connu un accident. Il y a eu des pluies diluviennes, et une partie de la montagne qui était située... vous voyez bien là que ça s'est détaché là. Donc, c'est comme la face des Drues sauf que ce n'est pas les Drues. Donc, une partie de la montagne s'est détachée, a fait un énorme glissement de terrain qui est rentré dans le lac de barrage. Du coup, le lac de barrage a débordé. Toute la flotte est passée par-dessus le mur de barrage, a dévalé la vallée très encaissée qui était à l'aval et ça a fait plus de 2000 morts. Vous avez également, en France, la rupture du barrage de Fréjus Malpasset. Alors qui, lui, était une retenue d'eau à usage agricole, qui a également fait plus de 400 morts. Et enfin, l'installation la plus meurtrière.

Enfin, l'accident d'une unité de production électrique qui a fait le plus de morts dans le monde en instantané, c'est? Ben non, ce n'est pas Tchernobyl, si non je ne vous poserais pas la question. Ce n'est pas drôle. C'est un barrage. C'est

### 31. C'EST RENOUVELABLE, PAS TOUJOURS INOFFENSIF

le barrage de Banqiao en Chine, qui au milieu des années 70... C'est un complexe de barrages qui s'est rompu également à la suite de pluies diluviennes. Et alors, évidemment, les statistiques ne sont pas très fiables, mais qui a fait n'importe quoi entre 20 et 100 mille morts. Là-dedans, une partie des gens sont morts de la vague de crue, et beaucoup d'autres sont morts parce que, comme les voies de communication étaient coupées et que vous aviez de l'eau croupie partout, ils sont morts du choléra. Voilà donc, les barrages, contrairement à une idée reçue, ne sont pas des installations complètement anodines. Et une blague que je fais souvent, c'est, si on me donne le choix entre habiter près d'une centrale nucléaire et à l'aval d'un barrage, je choisis près de la centrale nucléaire sans hésiter. L'aval du barrage, ça a fait beaucoup plus de morts dans le monde historiquement.

\*\*\* Question auditoire sur les barrages réversibles \*\*\*

Alors oui, vous avez également avec les barrages – c'est ce que je disais tout à l'heure, mais j'en ai parlé au moment où je parlais de remonter l'eau du Léman – on peut faire des stations de pompage. Donc, la station de pompage, c'est un barrage réversible. Les stations de pompage, ce sont des barrages réversibles. C'est-à-dire que vous avez à la fois une turbine qui permet de turbiner l'eau en provenance de la retenue et une pompe. Pardon, et quand l'eau a été turbinée, au lieu de la laisser repartir dans le fleuve ou dans la rivière, vous la mettez dans une retenue à l'aval. Et quand vous avez de l'électricité en trop sur le réseau, vous faites le chemin inverse. C'est-à-dire, qu'avec une pompe, vous prenez l'eau de la retenue aval et vous la remettez dans la retenue amont. Et cette installation-là s'appelle une station de pompage. Et en France, on en a cinq gigawatts de stations de pompage. Sachant que la puissance installée, c'est 100 gigawatts. Alors... Mais ce sont des installations qui permettent de faire – comment dire – de récupérer un peu d'électricité (pas tant) et de fournir un peu d'électricité (pas tant). Parce que, en termes de fraction de la consommation quotidienne que ça permet, c'est une toute petite partie.

\*\*\* Question auditoire sur le bilan carbone de l'hydraulique \*\*\*

10 grammes de CO<sub>2</sub> au kWh, l'hydraulique.

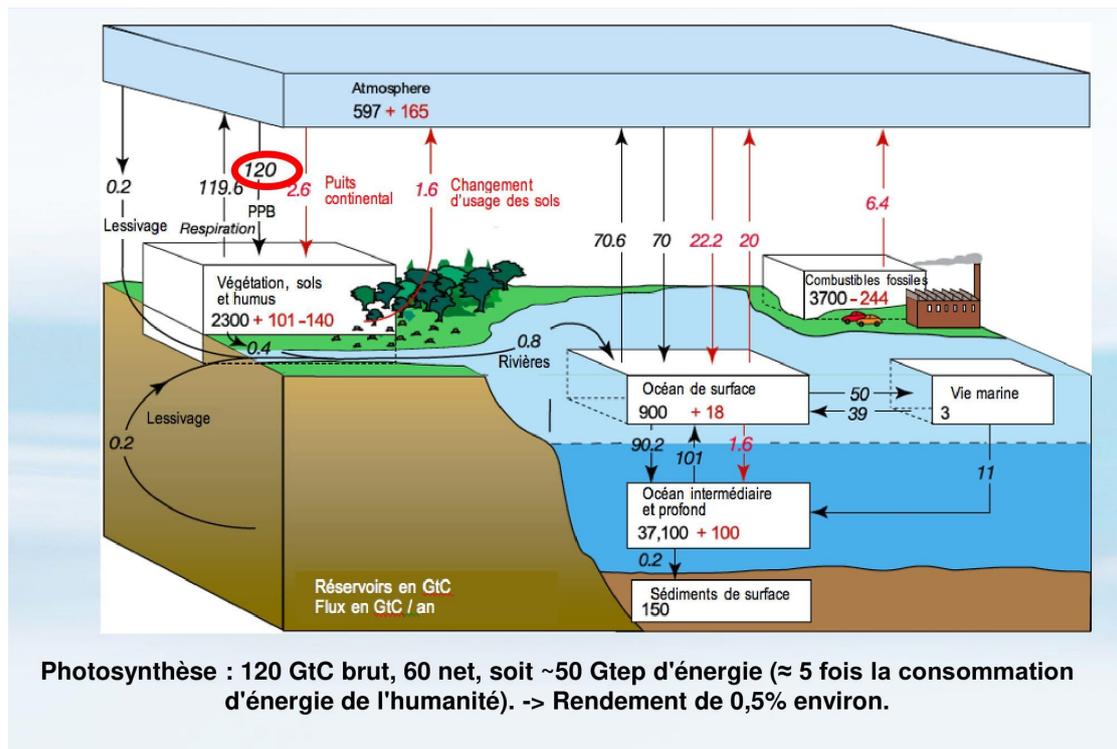
\*\*\* Question auditoire sur la durée de vie de l'hydraulique \*\*\*

Alors, ça dépend si on parle de la durée de vie du mur du barrage – qui normalement est raisonnablement éternelle (parce que sinon, les gens qui sont à l'aval ont du souci à se faire) – ou si on parle de sa durée de fonctionnement normal. Et Alors, en fait, si effectivement, on ne le purge pas. Ce qui se passe, c'est que, quand l'eau qui ruisselle à l'amont, notamment en montagne, arrive dans le barrage, elle est chargée de sédiments. Et donc, vous avez – exactement comme la sédimentation près des côtes dans les océans – vous avez une sédimentation

### *31. C'EST RENOUVELABLE, PAS TOUJOURS INOFFENSIF*

au fond du lac de barrage qui se fait. Donc, si vous ne purgez pas à intervalles réguliers pour enlever la boue que vous avez, en gros, au fond, effectivement, au bout d'un moment, vous ne pouvez plus vous en servir. Vous ne pouvez plus vous servir du barrage comme d'un lac de retenue. Après, vous pouvez toujours vous en servir comme d'une installation au fil de l'eau mais plus comme d'un lac de retenue. Absolument. Mais j'ai déjà posé exactement la même question aux gens d'EDF. Et la réponse qui m'a été faite n'a jamais été une réponse du genre : au bout de 80 ans, vous ne pouvez plus vous en servir. Je crois que c'est très dépendant de la façon dont vous l'entretenez.

## 32. La photosynthèse, seule manière de réduire le carbone oxydé



Diapositive 33.

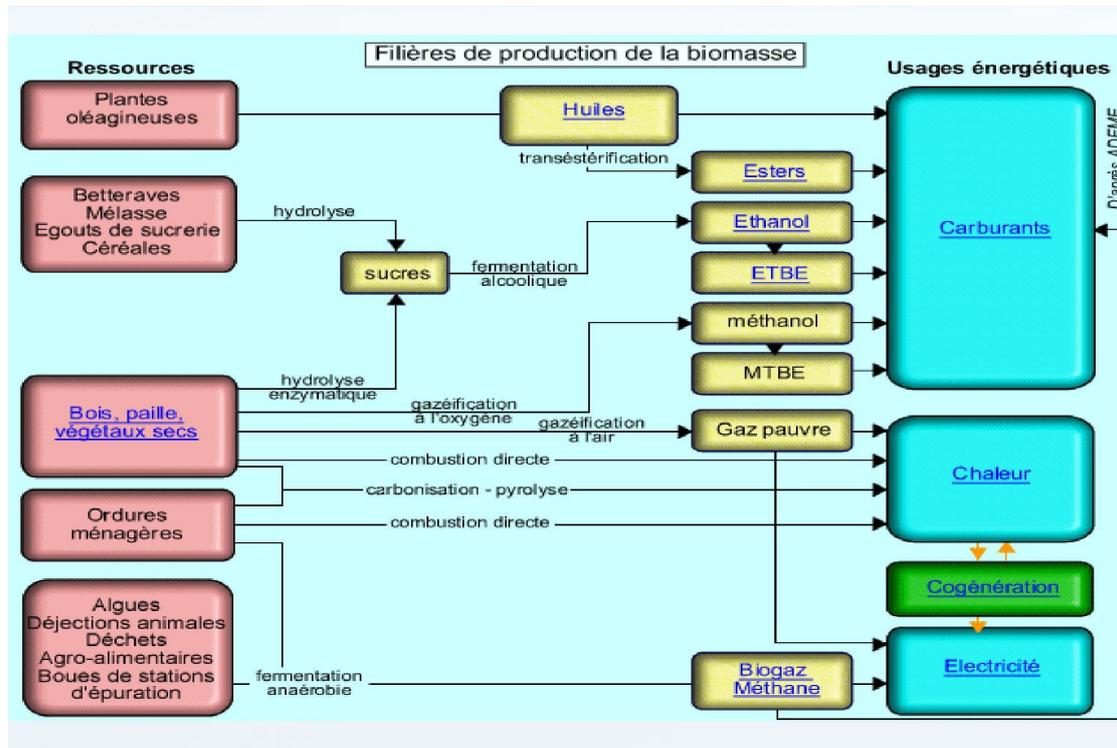
Alors, maintenant, on va s'intéresser à la biomasse. Ici, vous voyez que, sur ce petit graphique, que je vous avais montré sur le cycle du carbone, vous avez 120 milliards de tonnes de carbone qui sont, chaque année, séquestrées par les écosystèmes terrestres sous forme de photosynthèse. Alors, ces écosystèmes terrestres respirent dans le même temps. Ou plus exactement, même, les arbres respirent. Donc, les arbres respirent exactement comme les animaux. Ils ont un processus d'oxydation. Et donc, ce qu'on appelle la productivité primaire nette, c'est-à-dire ce qui est séquestré par la photosynthèse moins ce qui respire par les plantes, ça représente 60 milliards de tonnes de carbone par an.

Alors, comme le pétrole et le charbon sont essentiellement du carbone, 60 milliards de tonnes de carbone séquestrées par la biomasse, ça veut dire qu'en contenu énergétique cela fait 60 milliards de tonnes équivalent pétrole. En ordre de grandeur... En ordre de grandeur. La consommation actuelle de l'humanité c'est 14. Donc il y a plein de gens qui disent « Miam, miam, il y a tout ce

### 32. LA PHOTOSYNTHÈSE, SEULE MANIÈRE DE RÉDUIRE LE CO<sub>2</sub>

qu'il faut dans la biomasse pour qu'on puisse substituer tous nos usages énergétiques. » La réalité est un peu plus compliquée que cela parce que, d'abord une bonne partie de cette biomasse, ce ne serait pas idiot qu'elle reste là où elle est parce que ça s'appelle des écosystèmes. Ensuite, une bonne partie de cette photosynthèse sert à faire pousser des choses que nous mangeons. Donc, le convertisseur, c'est nous et le contenu énergétique, c'est ce que l'on mange. Donc ça, normalement, ce n'est pas disponible pour faire fonctionner des convertisseurs extra-corporels, c'est-à-dire des machines. Donc, en fait, quand vous regardez la fraction de cette biomasse qui est disponible pour l'usage des Hommes, vous n'avez sûrement pas 60 milliards de tonnes équivalent pétrole par an mais vous pourriez quand même en avoir quelques milliards de tonnes. Ça, ce n'est pas complètement déraisonnable.

### 33. Ensuite, il y a N manières de s'en servir



Diapositive 34.

Donc après, cette biomasse, il y a plein de manières de s'en servir. Vous pouvez, comme je le disais tout à l'heure, vous servir directement du bois et le brûler. Ou directement de ce qui brûle et le brûler. Vous pouvez en faire des agrocarburants. On va rapidement regarder en quoi ça consiste. Et vous pouvez en faire du biogaz. J'en ai parlé rapidement tout à l'heure. donc, en gros, vous en faites des combustibles solides, liquides ou gazeux (exactement comme avec les combustibles fossiles) et qui ont, en gros, à peu près les mêmes usages. C'est-à-dire qu'avec le bois, vous pouvez faire de la chaleur domestique ou de la chaleur industrielle (exactement comme avec le charbon) ou de l'électricité (exactement comme avec le charbon). Les rendements sont moins bons.

Pourquoi est-ce que les rendements sont moins bons avec le bois? \*\*\* Réponse auditoire inaudible \*\*\* Non, c'est beaucoup plus bête que ça. Exactement, c'est la faute à M. Carnot. C'est parce que la température de combustion du bois est plus basse que la température de combustion du charbon. Juste ça. Donc, les rendements sont moins bons. Et donc, on peut utiliser du bois en sub-

### 33. ENSUITE, IL Y A N MANIÈRES DE S'EN SERVIR

stitut du charbon, encore une fois, dans tout un tas de trucs. Les cimenteries ou les centrales électriques. On peut utiliser des agrocarburants en substitut des combustibles liquides. Donc les voitures, les avions, etc. Le monde aérien ne rêve que de ça. Ils rêvent de faire voler tous les avions de la planète avec des agrocarburants. Alors, je vous donne tout de suite le résultat (j'y reviendrai après) : j'en doute ! J'en doute parce qu'aujourd'hui le kérosène, c'est 10% du pétrole que l'on consomme sur terre. Si je transforme toutes les céréales que nous produisons sur terre en agrocarburants, ça me fait un quart du pétrole qu'on consomme. Donc il faudrait que les avionneurs, enfin que les compagnies aériennes, captent à elles-seules la moitié de la production céréalière mondiale transformée en agrocarburants pour faire voler tous les avions du monde aux agrocarburants. Je ne suis pas complètement sûr de parier sur le fait que ça va marcher. Et vous pouvez en faire des combustibles gazeux. J'en ai parlé tout à l'heure. Donc, c'est un substitut au gaz naturel et vous pouvez à nouveau en faire de l'électricité, de la chaleur, ou du carburant.

## 34. Le plus simple : brûler ce que l'on trouve

Energie finale  $\approx$  8,6 Mtep en 2004 (9,1 en 2015)

85 % chaleur maisons individuelles principales (7,3Mtep)

13% chaleur dans l'industrie bois/papier (1,17Mtep)

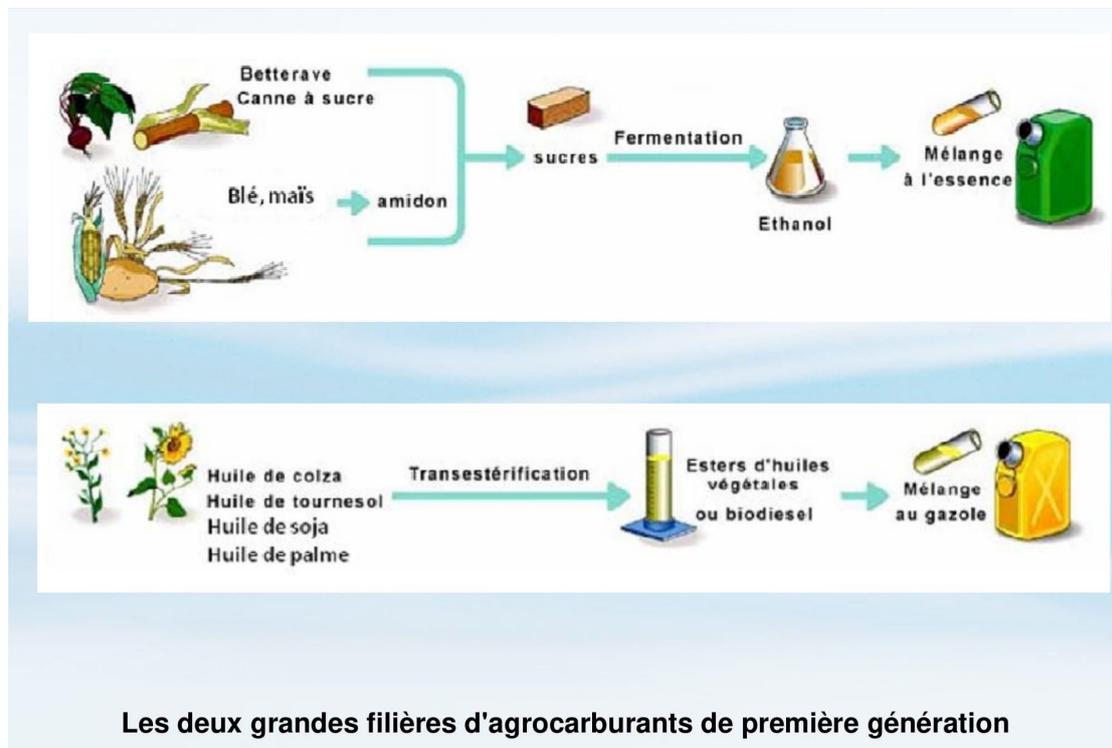
2 % chaleur dans le collectif/tertiaire avec ou sans réseau de chaleur (0,17Mtep)



Diapositive 35.

Voilà la version combustible solide. Vous avez là, évidemment, des rendements qui sont bons puisque ce sont les rendements de combustion à de la chaleur. Si, par contre, vous allez dans l'électricité, vous êtes plutôt à 20% de rendement. Donc, ce sont des rendements qui ne sont pas bons. Pas bons du tout.

### 35. Ah, sainte voiture, comment te conserver ?



Diapositive 36.

Ensuite, vous pouvez en faire des combustibles liquides. Si vous en faites des combustibles liquides, en fait, vous n'allez pas pouvoir faire des agrocarburants, on va dire, de façon simple.

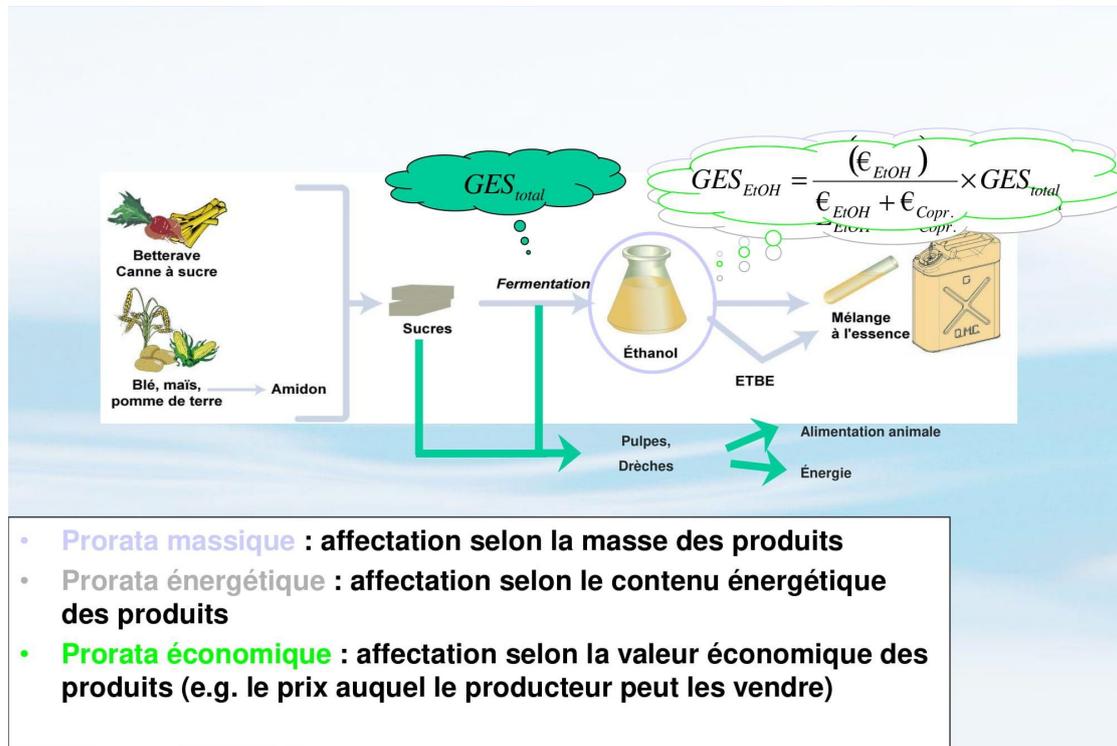
La première filière pour faire des agrocarburants, c'est une filière qui consiste à produire des choses qui peuvent se transformer en éthanol par fermentation. Donc, c'est soit de l'amidon (des céréales), soit du sucre (des betteraves, ou de la canne). Vous donnez ça à manger à des petites bactéries. Les petites bactéries vont vous faire un jus sucré, le jus de fermentation.

C'est exactement comme le vin. Même principe. Exactement comme le vin, vous avez un mélange d'eau et d'alcool, vous devez séparer les deux, donc vous allez devoir distiller. Et le gros problème du processus de production du bioéthanol, c'est exactement celui-là. C'est que vous avez une opération de distillation. Donc, vous avez une opération qui demande de consommer beaucoup de chaleur. Et donc, c'est la raison pour laquelle le rendement à l'arrivée n'est pas bon du tout.

### 35. AH, SAINTE VOITURE, COMMENT TE CONSERVER ?

Vous avez un deuxième processus de production d'agrocarburants qui, lui, passe par des oléagineux. Donc à ce moment, vous allez faire un substitut au diesel, et non pas à l'essence, avec des plantes oléagineuses. Donc, typiquement du tournesol, du soja, des arachides, etc. Et là, le processus d'extraction, lui, est purement mécanique. Par exemple, la graine de tournesol, vous vous contentez de l'écraser donc vous n'avez pas besoin de grandes quantités de chaleur. Et donc, le rendement de transformation est bien meilleur. Par contre, le rendement de production est plus mauvais. C'est-à-dire qu'avec des betteraves, vous avez plusieurs dizaines de tonnes de betteraves à l'hectare quand vous les cultivez, alors qu'avec des oléagineux, vous avez (de mémoire) quelques tonnes à l'hectare de graines de tournesol, ou de graines de soja, ou de graines de colza. Donc le rendement de culture est beaucoup moins bon. Par contre, derrière, le rendement de production est bien meilleur.

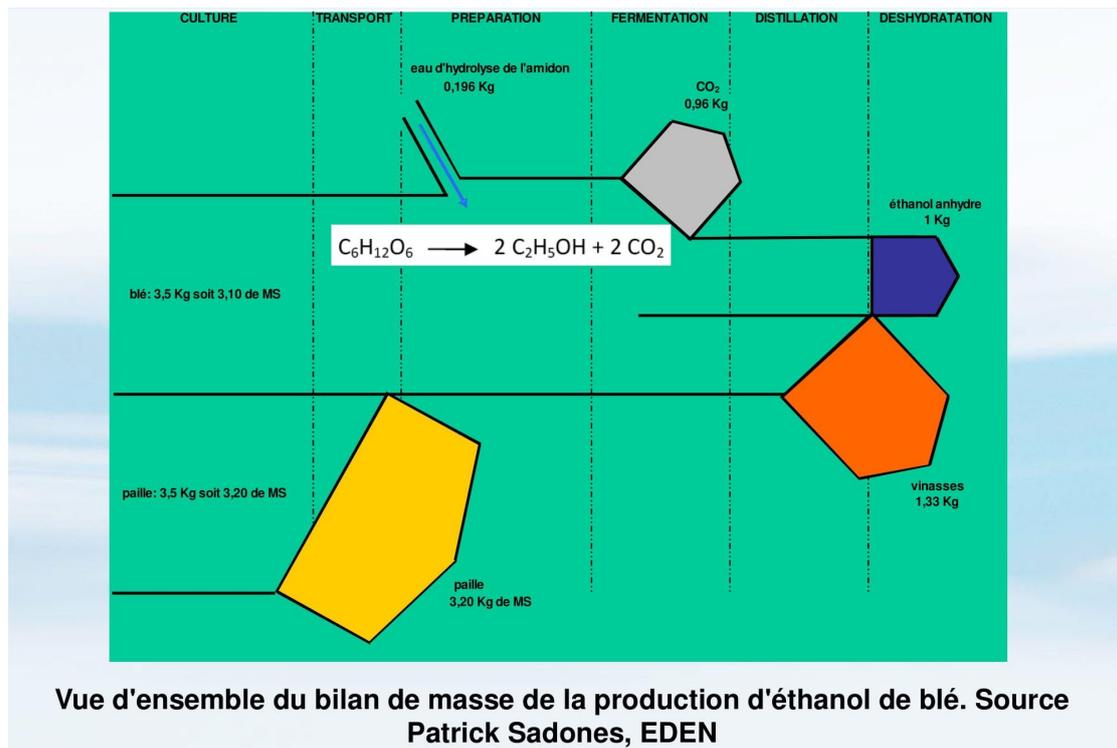
## 36. Comptons les économies, donc, mais comment ?



Diapositive 37.

Question : c'est quoi le bilan carbone de cette affaire? La question est compliquée parce que, quand vous produisez des agrocarburants, en fait, vous ne produisez pas que des agrocarburants. Vous produisez ça et d'autres choses. Quand vous faites de l'éthanol, en pratique, vous allez avoir plusieurs manières de compter. Vous pouvez affecter selon la masse. Vous pouvez affecter selon la valeur économique. Vous pouvez affecter selon l'énergie de transformation qui a été nécessaire. Enfin bref, vous avez plusieurs règles. Et en fonction de celle que vous utilisez, vous n'avez pas le même résultat.

### 37. En masse, on a surtout autre chose que de l'éthanol

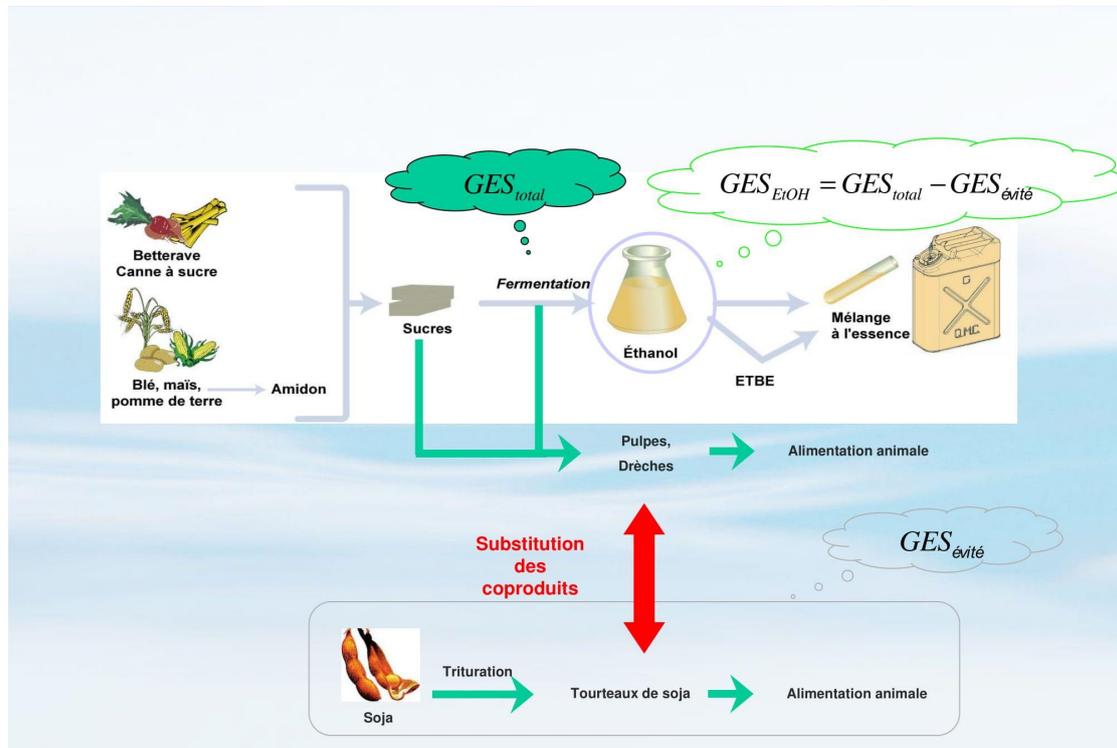


Vue d'ensemble du bilan de masse de la production d'éthanol de blé. Source Patrick Sadones, EDEN

Diapositive 38.

Alors, prenons l'exemple de l'éthanol. L'éthanol consiste à faire des cultures. La culture vous produit du grain et de la paille. Question : est-ce que vous affectez une partie des intrants à la culture de la paille ou pas? Ensuite, une fois que vous allez faire votre fermentation (betteraves, c'est pareil), une fois que vous allez faire votre fermentation, vous allez obtenir un jus sucré. Est-ce que vous affectez une partie des intrants à l'eau ou pas? Au CO<sub>2</sub> qui s'échappe ou pas? Etc.

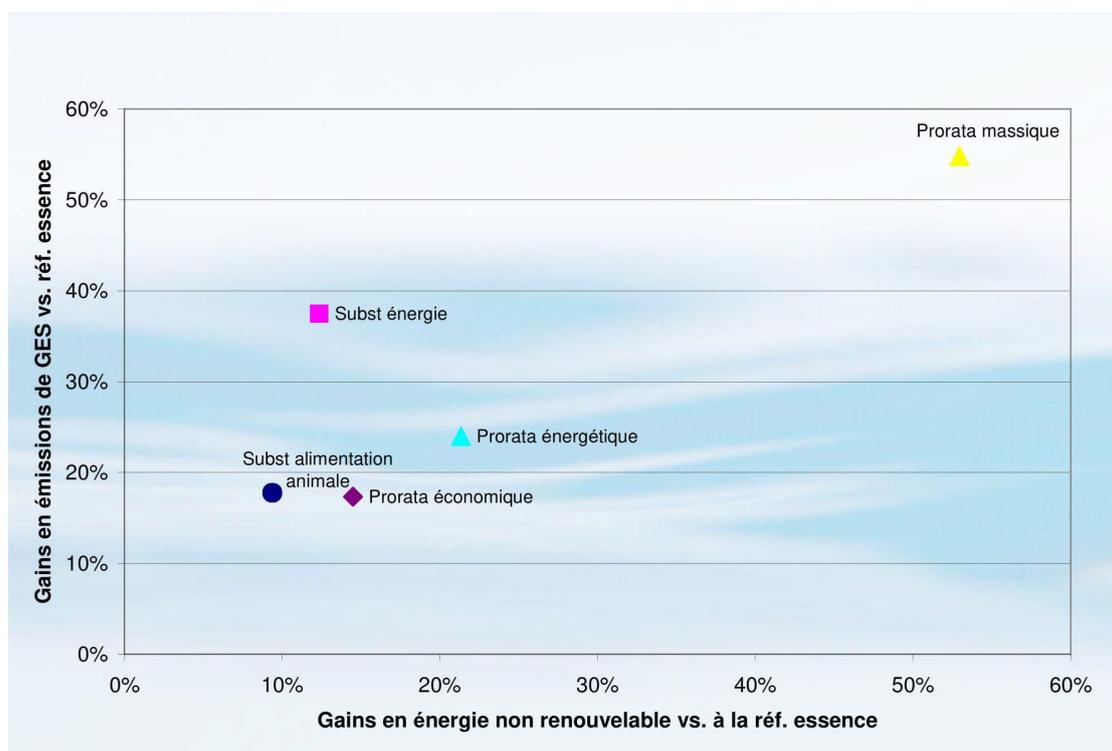
### 38. Plus facile en comptant les grains?



Diapositive 39.

Et donc, en fonction de la méthode que vous utilisez, vous avez des résultats très différents. Vous avez également des coproduits. Les coproduits, par exemple, en ce qui concerne l'éthanol, sont des drèches de betteraves. Donc ce sont les résidus végétaux que vous avez une fois que vous avez pressé vos betteraves. Ça sert en alimentation animale. Est-ce que vous le valorisez au contenu énergétique? Parce que c'est un contenu énergétique sinon ça n'aurait aucun intérêt en alimentation animale. Est-ce que vous le valorisez à la valeur économique versus celle de l'éthanol? Ou est-ce que vous dites : « C'est un déchet parce que je n'ai pas fait de l'éthanol pour avoir des drèches. J'ai juste fait de l'éthanol pour avoir de l'éthanol et donc, ça vaut zéro. » Voilà. Donc en fonction de la méthode que vous utilisez, vous n'avez pas le même résultat.

### 39. Là comme ailleurs, le résultat dépend de la méthode...



Diapositive 40.

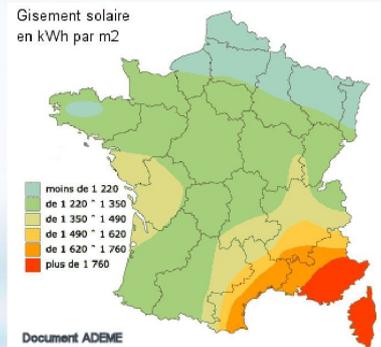
Et ici, vous avez le gain que vous avez à la fois en CO<sub>2</sub> et en énergie par rapport à un litre de pétrole ordinaire selon la méthode que vous utilisez. Et vous voyez que, entre la méthode la plus favorable et la méthode la plus défavorable, eh bien dans un cas de figure vous avez quasiment 60% d'économie à la fois en CO<sub>2</sub> et en contenu fossile par rapport à un litre de pétrole ordinaire. Et avec la plus mauvaise des méthodes que vous pouvez utiliser, ou la plus défavorable, vous n'avez que 10%. Dit autrement, vous n'êtes pas loin du UN pour UN. Aux États-Unis, une des raisons d'avoir développé massivement l'éthanol à partir de maïs, c'est que, comme la distillation est faite avec du gaz et du charbon, qu'ils ont en abondance chez eux (alors qu'ils sont importateurs de pétrole), eh bien ça leur permet d'utiliser une énergie domestique pour alimenter les voitures (en substitution d'une énergie importée). Alors même que le rendement n'est pas très loin de UN pour UN. Et je rappelle, encore une fois, que les États-Unis utilisent 40% de leur maïs pour faire de l'éthanol.

## 40. A l'origine, toujours la même histoire : la photosynthèse

**Insolation moyenne en France : 1200 à 1700 kWh/m<sup>2</sup>.an**

**0,5% de rendement là-dessus**

**Photosynthèse = 1 500 (kWh/m<sup>2</sup>.an) x 10 000 (m<sup>2</sup> par ha) x 0,5% (rendement) ÷ 11 600 (kWh par tep) = 6,5 tep brut (soit environ 13 à 15 t de matière sèche par hectare et par an).**



**En substitut au chauffage : 3 à 4 tep net**

**En substitut aux carburants : 1 tep net dans les bons cas de figure (en France), 0 dans les mauvais ; 3 tep net au Brésil... si pas de déforestation.**

**La France = 50 M d'ha de surface métropolitaine ; consomme 70 Mt de pétrole...**

Diapositive 41.

Le potentiel de cette affaire... donc j'y reviens. Alors, maintenant, je vais prendre la France. Donc, vous voyez que l'insolation moyenne de la France, c'est, allez, on va dire  $1500 \text{ kWh m}^{-2}$  en moyenne. Le rendement de la photosynthèse... Tiens, je n'aurais pas dû l'afficher avant de vous poser la question... c'est moins de 1%. Dit autrement, l'énergie qui va être contenue dans le glucose que la plante va synthétiser à partir de l'énergie solaire, c'est moins de 1% de l'énergie solaire reçue par la plante au cours de l'année. Donc, ce n'est pas très bon le rendement de la photosynthèse.

En France, nous avons donc... Là, ça vous donne le calcul de la quantité d'énergie que ça permet d'avoir. En France, nous avons 55 millions d'hectares. Donc, vous voyez, si on a une substitution aux carburants avec des processus de production d'agrocarburants qui ont une tonne équivalent pétrole à l'hectare, on pourrait faire l'équivalent de 55 millions de tonnes de pétrole. Je vous

#### 40. A L'ORIGINE, TOUJOURS LA MÊME HISTOIRE : LA PHOTOSYNTHÈSE

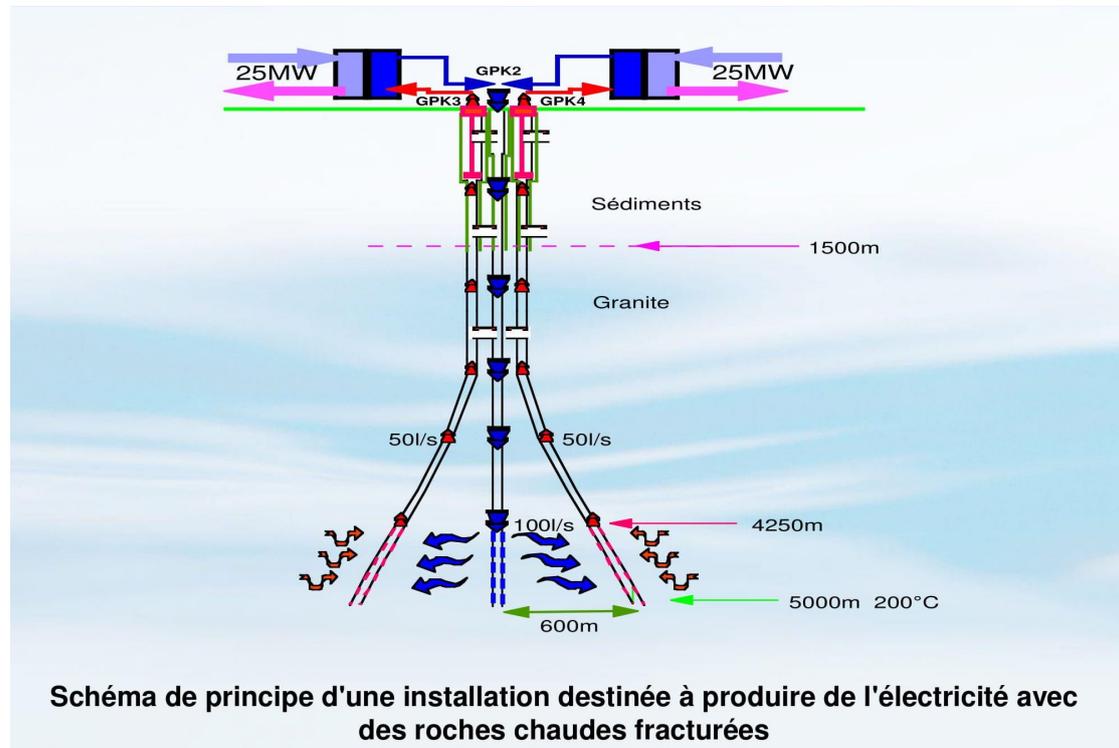
rappelle qu'aujourd'hui, rien que du pétrole, on en consomme en France 75 millions de tonnes. Oui ?

*\*\*\* Question auditoire sur l'augmentation de la photosynthèse \*\*\**

Est-ce qu'on peut augmenter la photosynthèse ? Alors, avec les espèces végétales actuelles, pas tant que ça. Parce que la fourchette que je vous ai montrée là est globalement... Enfin, voilà. Par contre, vous avez des espèces, en particulier les algues, qui peuvent croître plus vite avec la même quantité d'énergie solaire. Mais par contre, vous n'avez pas la surface pour les faire pousser. Parce que vous n'allez pas recouvrir la moitié de la France d'eau salée. Et si vous voulez utiliser des bassins d'eau salée flottants qui représentent un tiers de la superficie de la France, ça va quand même faire beaucoup.

Voilà. Donc, vous êtes quand même fortement limités, à la base, par le fait que la photosynthèse est une petite fraction de l'énergie solaire reçue. Et donc, vous voyez bien que, dans un pays dans lequel on utilise 240 millions de tonnes équivalent pétrole d'énergie primaire – c'est ça la consommation de la France – même en utilisant du bois en direct, et en ne mangeant plus évidemment, je suis limité à 100, à 150. 150 mettons. Si je continue à manger et donc, que je n'utilise que le quart de la superficie française qui est constituée de forêts, eh bien, j'ai le quart de cette valeur donc je suis plutôt aux alentours de 30. Ce qui est en gros, ce qu'on utilise aujourd'hui en provenance de la biomasse dans le pays. Non un peu moins, on n'en utilise que la moitié. Donc, on a un petit potentiel d'augmentation mais ce n'est pas comme si ça allait remplacer la totalité de ce qu'on utilise par ailleurs dans la chaleur.

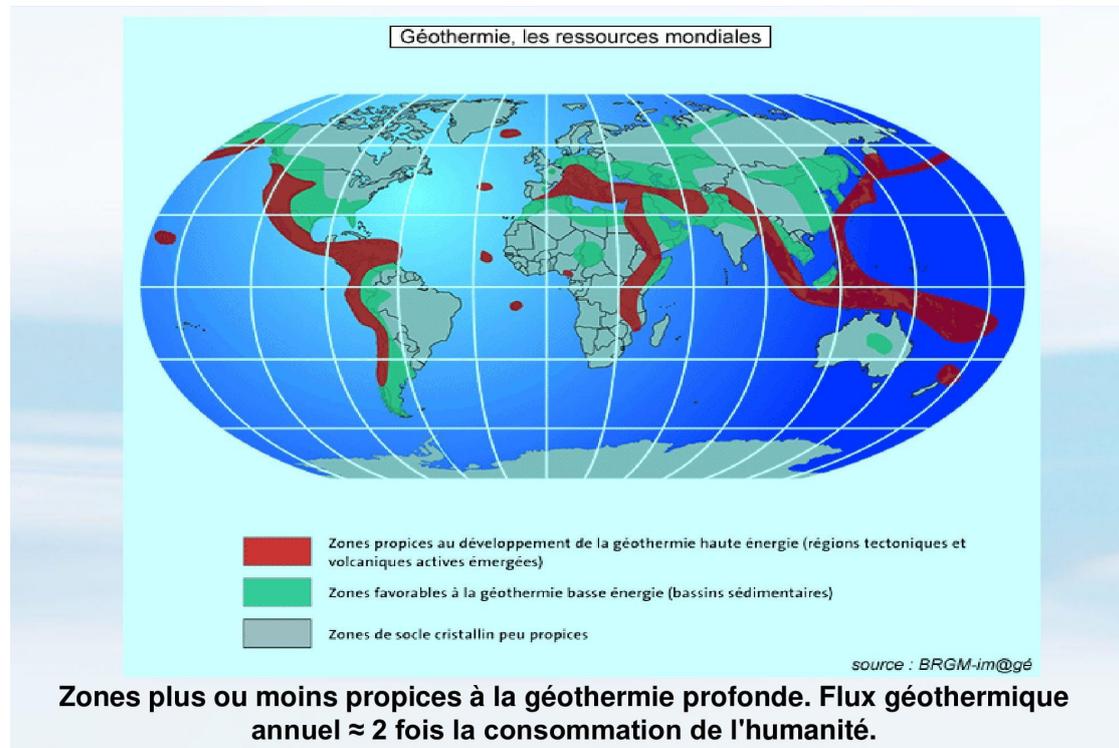
## 41. La géothermie profonde, comment ça marche ?



Diapositive 42.

Après la biomasse, on va regarder la géothermie profonde. La géothermie, enfin la géothermie en commençant par la géothermie profonde. Donc, la géothermie, c'est une machine de... La géothermie profonde, ça se voit également comme une machine de Carnot pour faire de l'électricité. Le principe est toujours le même : vous avez une source chaude, une source froide et ce qui vous fait la source chaude, c'est un puits d'injection dans lequel vous injectez de l'eau qui dans le sous-sol très chaud, se transforme en eau très chaude sous pression qui remonte par des puits de récupération et ça vous fait votre source chaude.

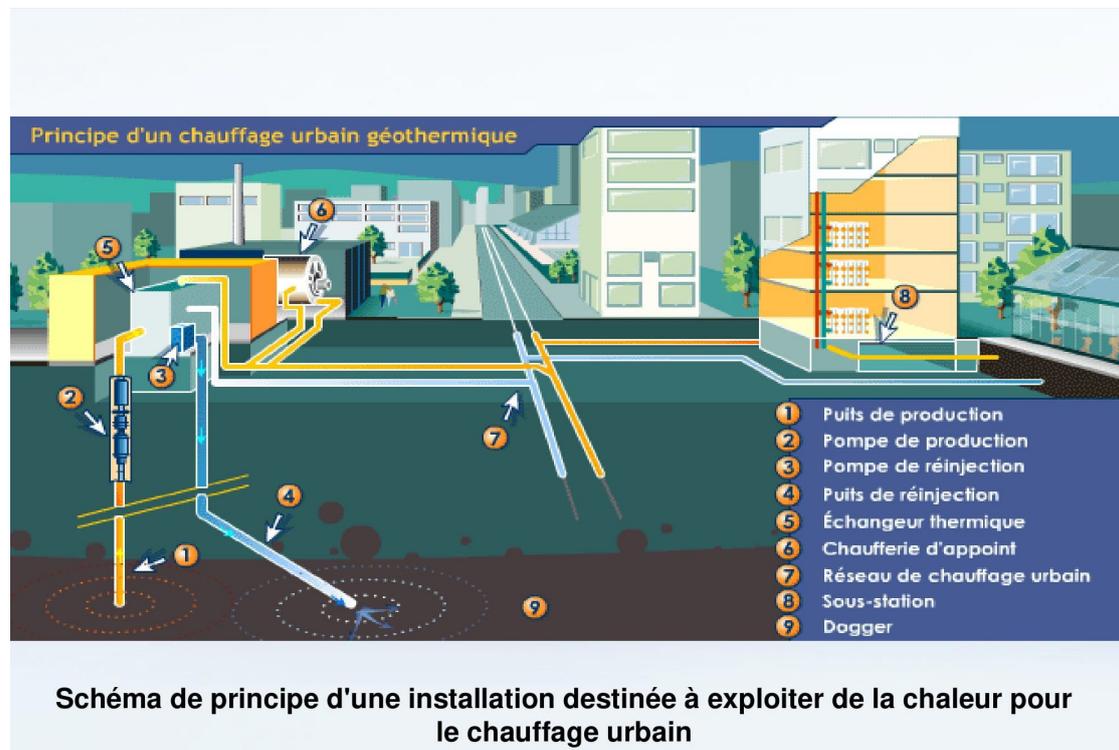
## 42. Le chauffage par le sol, en somme



Diapositive 43.

Alors, c'est quelque chose qui marche bien là où vous avez de la grande quantité de chaleur dans les tréfonds du sol et donc dans les zones volcaniques. C'est-à-dire là où vous avez des failles où vous pouvez aller chercher de la chaleur. Il y a un problème technique non négligeable lié à l'exploitation de cette technologie qui est que, comme c'est un circuit ouvert dans le sous-sol, au moment où l'eau circule dans le sous-sol, elle se charge en toutes les cochonneries oxydantes qu'elle peut trouver à cet endroit-là. Et donc, l'eau qui remonte est chargée en tout un tas de trucs et elle est très corrosive. Et donc, c'est un des problèmes qu'il y a en général : c'est que les installations ont besoin d'être blindées contre la corrosion de ce qui remonte du sous-sol.

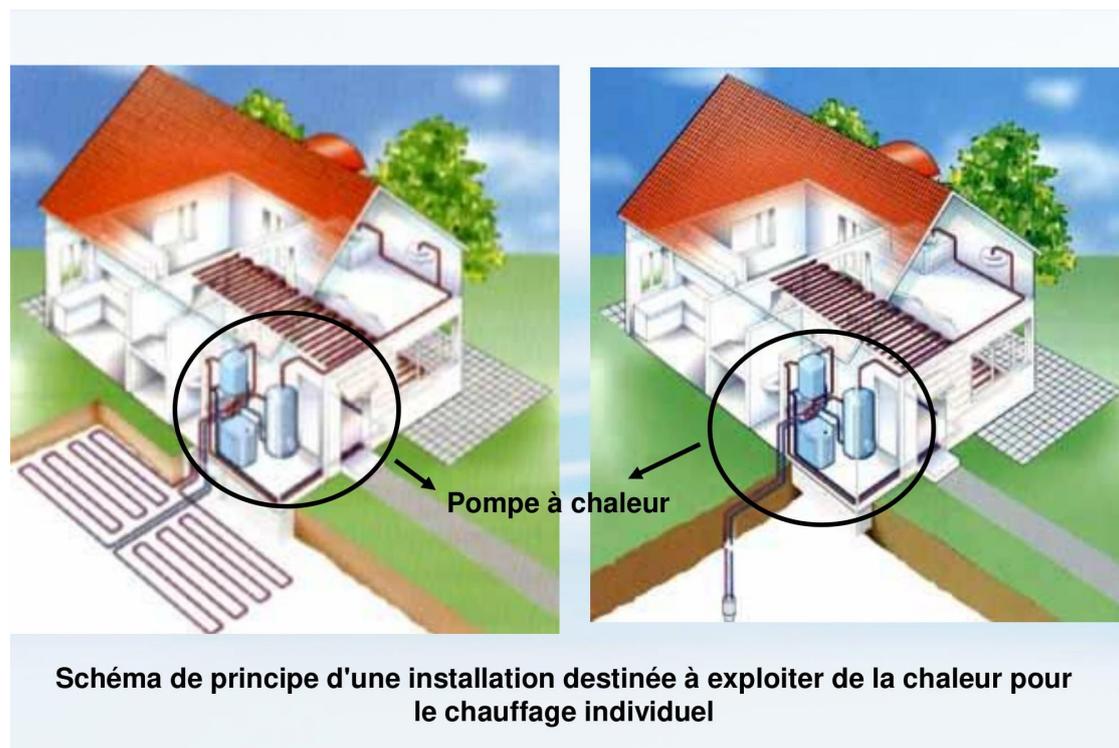
### 43. La géothermie profonde, comment ça marche ?



Diapositive 44.

Vous avez une version intermédiaire – qui sert à chauffer la maison de Radio France pour ceux d’entre vous qui ne le savent pas – qui est d’aller pomper de la chaleur dans une nappe intermédiaire, cette fois-ci pour faire du chauffage urbain dans la nappe du Dogger (Jurassique moyen) sous l’Ile-de-France. Et donc là, c’est toujours pareil, vous allez chercher de l’eau chaude mais vous ne vous en servez pas pour faire de l’électricité. Ce n’est pas assez chaud de toute façon, ça doit être à 80 °C.

#### 44. La géothermie pas profonde du tout, comment ça marche ?



Diapositive 45.

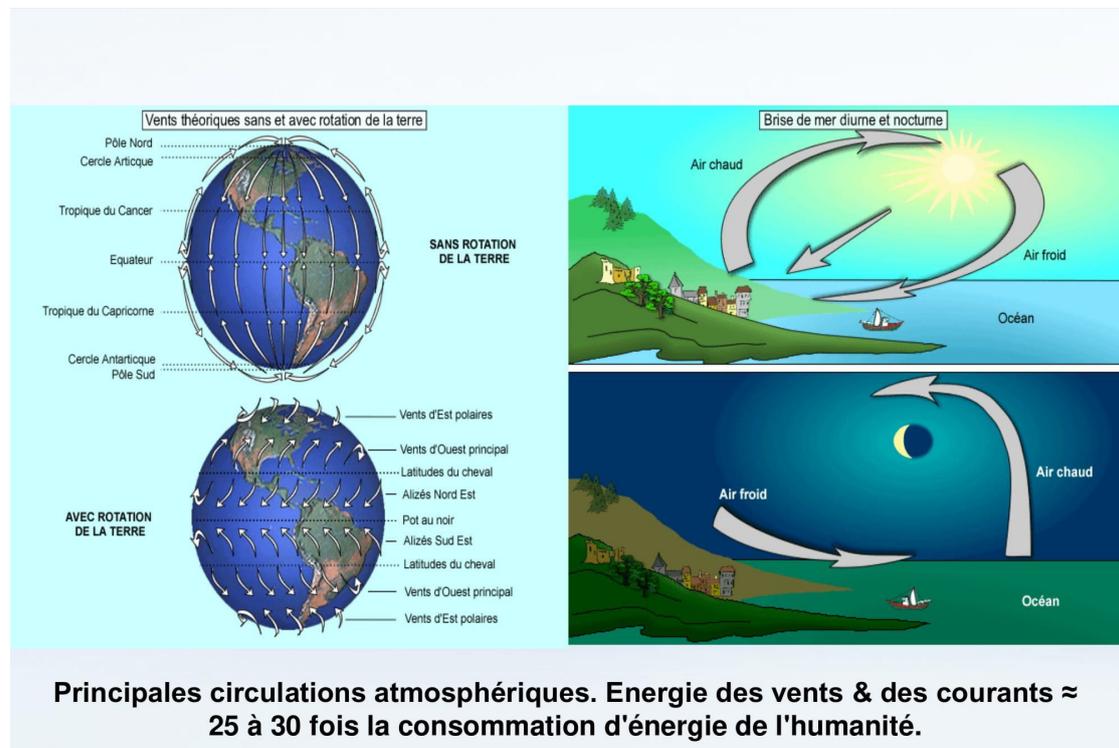
Et enfin, la troisième manière de se servir de ce qu'on appelle la géothermie, en fait, c'est des pompes à chaleur. Et les pompes à chaleur servent à vous extraire des calories, soit de l'air, soit de l'eau. Donc, le principe est toujours le même. En fait, c'est un frigo inversé une pompe à chaleur. Donc, un frigo, vous voyez bien ce que c'est. Ça vous refroidit l'intérieur du frigo, ça vous chauffe l'extérieur. Eh bien là, c'est un frigo que vous mettez sur l'extérieur et donc, il vous refroidit l'extérieur et vous chauffe l'intérieur. Soit vous avez une pompe qu'on appelle eau-eau. C'est-à-dire que le circuit qui va chercher les calories à l'extérieur, c'est un circuit d'eau. Il va chercher les calories dans le sol et il les transfère dans le logement. Et là, vous avez un circuit de chauffage central donc une boucle d'eau chaude.

Soit ça va chercher les calories dans l'air et ça les transfère à un circuit, une boucle d'eau chaude dans l'intérieur du logement. Et à ce moment, ça s'appelle air-eau. Si c'est simplement un appareil à air conditionné réversible, que vous

#### *44. LA GÉOTHERMIE PAS PROFONDE, COMMENT ÇA MARCHE?*

avez dans un certain nombre d'endroits, à ce moment, ça s'appelle une PAC air-air. Donc là, simplement, ça va chercher les calories dans l'air et ça vous les colle dans l'air. Ça, ça ne marche évidemment que sur une seule pièce alors que les PAC air-eau ou eau-eau, elles peuvent servir de chauffage central et ensuite distribuer la chaleur via un réseau de chauffage central.

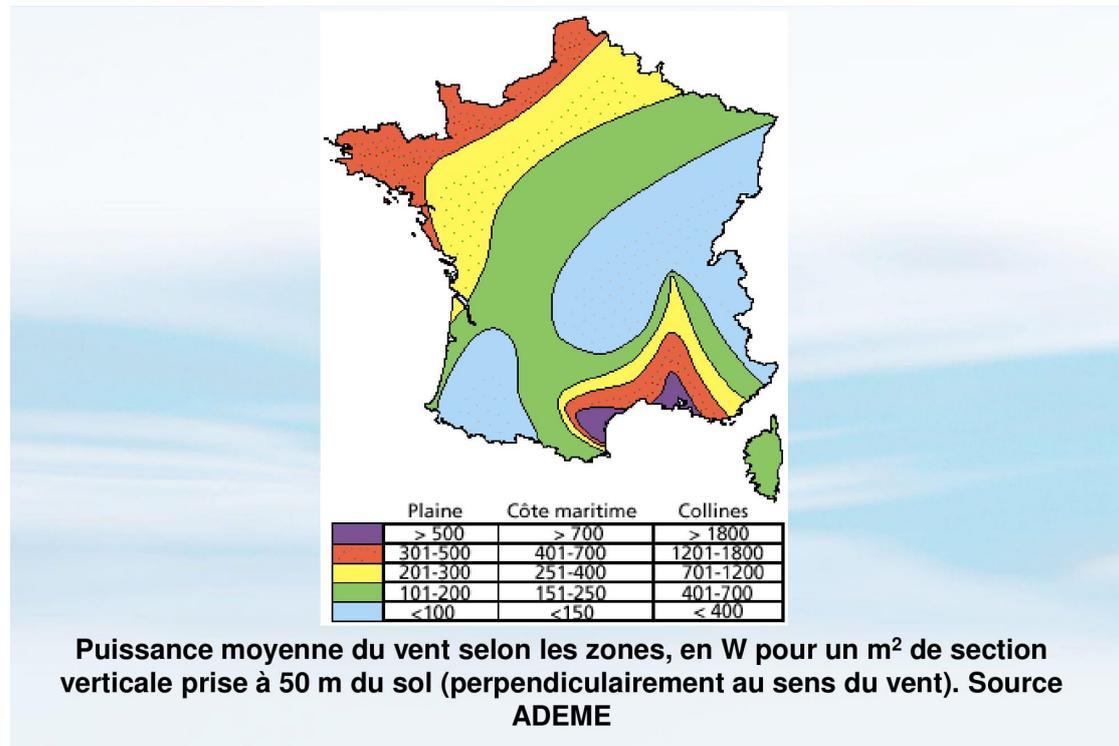
## 45. L'éolien commence par cela...



Diapositive 46.

Maintenant, on va parler du vent. Alors, le vent, c'est la deuxième grande EnR très en vogue que vous avez en ce moment. Le vent est dû à des différences de pression atmosphérique que vous pouvez avoir, soit de façon chronique avec des grandes circulations, par exemple les alizés, soit de façon conjoncturelle voire très conjoncturelle, typiquement les thermiques, pour ceux d'entre vous qui font du bateau.

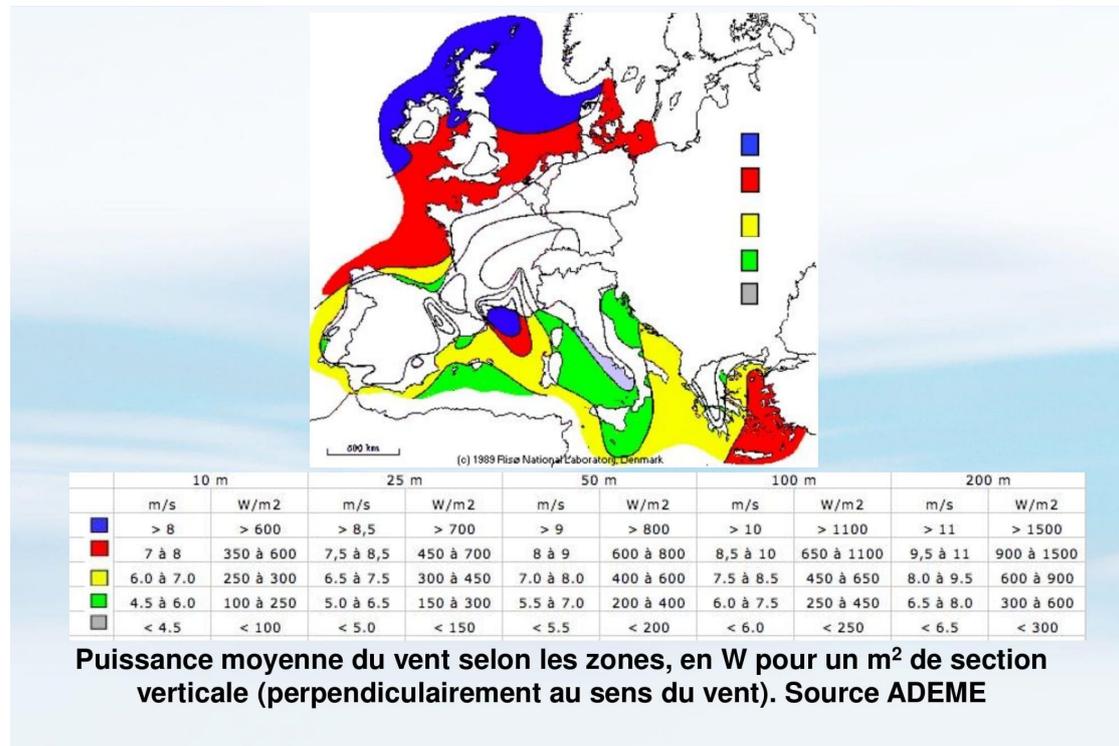
## 46. ... puis continue ici...



Diapositive 47.

Quand vous regardez la carte des vents en France ou en Europe, ce que vous constatez, c'est qu'il y a deux grandes zones en France où il y a pas mal de vent : c'est le couloir rhodanien et la façade Atlantique.

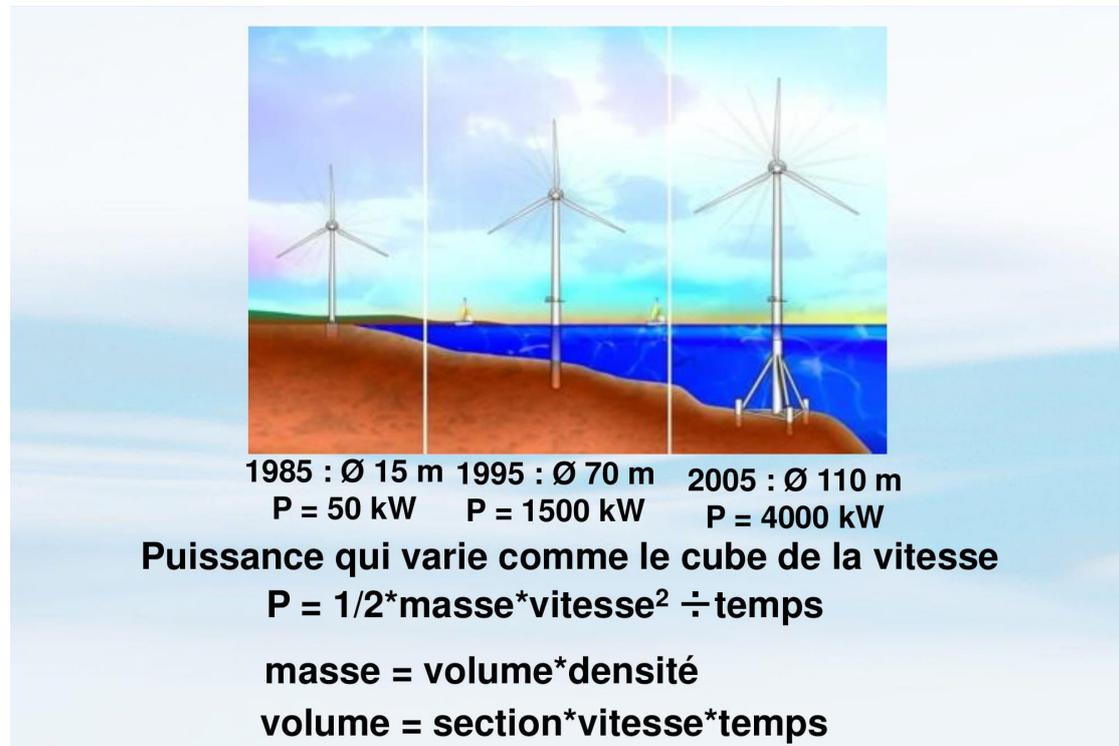
## 47. Le vent, un caprice plus ou moins fréquent



Diapositive 48.

Et plus largement en Europe, vous voyez que vous avez le Golfe du Lion et la façade Atlantique. Et en particulier, le nord de la façade Atlantique.

## 48. Quel piège pour Eole ?



Diapositive 49.

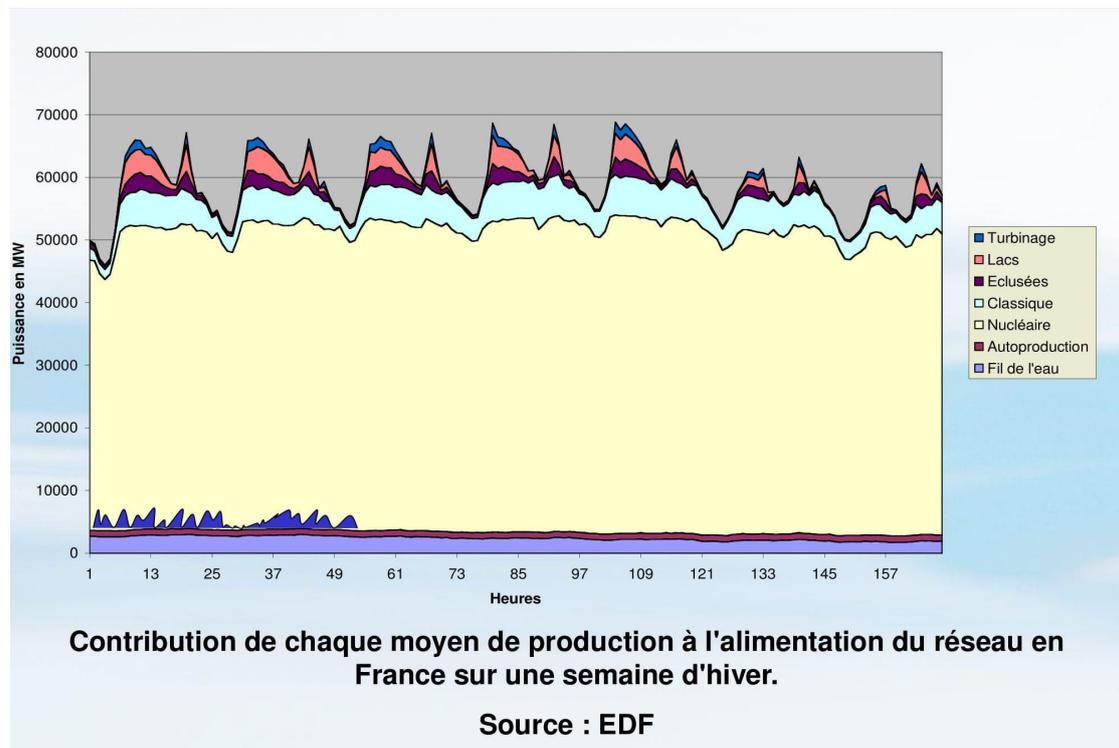
Pour récupérer l'énergie du vent, eh bien, on fait un moulin à vent. Donc, ça s'appelle une éolienne. Et les éoliennes ont une puissance qui dépend de la section efficace, c'est-à-dire de la section qui va être couverte par les pales de l'éolienne. Par ailleurs, la puissance étant la moitié de la masse fois la vitesse au carré que divise le temps, en fait, vous vous rendez compte que cette affaire-là est une fonction du cube de la vitesse du vent. Donc, la puissance d'une éolienne varie comme le cube de la vitesse du vent. Et donc, c'est quelque chose qui est rapidement variable au cours du temps. Vous pouvez avoir des grandes variations de puissance.

Par exemple, avec le parc installé en France, après le passage de la tempête Miguel, eh bien la puissance injectée sur le réseau est passé de 10 gigawatts à moins de 1 gigawatt en l'espace d'une journée. donc, on a diminué la puissance injectée par les éoliennes de 9 gigawatts. Comme les journalistes adorent compter en centrales nucléaires, ça fait neuf centrales nucléaires, voilà. En l'espace d'une journée. Donc, ça fait quand même des grandes variations. On envisage

#### 48. QUEL PIÈGE POUR EOLE?

également maintenant de mettre des éoliennes flottantes. Alors pourquoi est-ce qu'on a envie de mettre les éoliennes sur la mer ? Parce que, sur la mer, vous avez moins de résistance au vent et donc, vous avez des vents qui sont plus réguliers. Et donc, vous avez une production annuelle qui est plus importante. Par contre, vous avez des coûts qui augmentent fortement parce que, à terre vous plantez directement l'éolienne dans la terre, plus vous allez en mer et plus vous avez besoin d'une infrastructure sous-marine qui est importante. Et si vous avez une éolienne flottante, vous avez besoin d'une infrastructure sous-marine qui est encore plus importante parce qu'il faut faire une grande plate-forme d'ancrage, des câbles, etc.

## 49. Plus d'éolien = plus de pointe = plus de fossiles ?



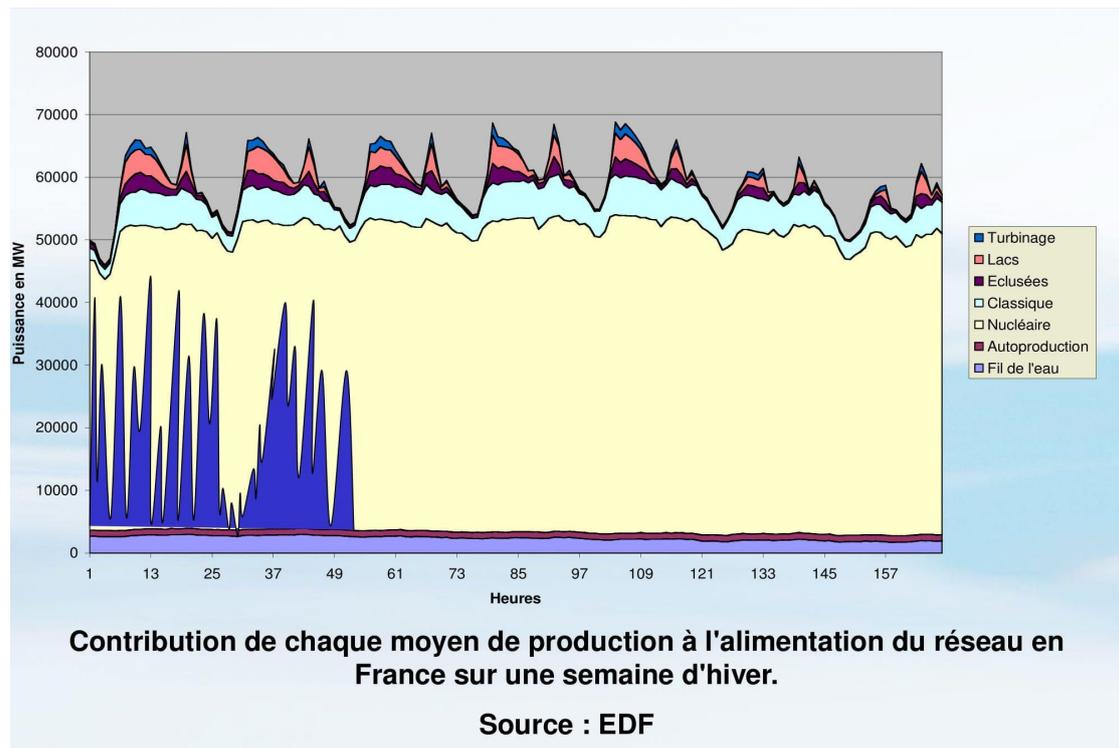
Diapositive 50.

L'éolienne, comme elle vous produit (comme le solaire) une électricité qui arrive quand les conditions le déterminent et non pas quand vous en avez besoin, elle va mordre sur votre production dite « de base ». Donc, la production de base dans un pays, c'est celle qui tourne tout le temps. C'est la production dont vous avez besoin tout le temps.

Ici, vous avez une semaine typique d'hiver en France. Eh bien, vous voyez la base, c'est tout ce qui se trouve sous le creux. C'est ce que vous allez avoir – en l'occurrence, ici, c'est de la semi-base parce que la base, c'est plutôt annuel – donc, c'est ce que vous avez absolument toute l'année. Mais disons que là, ce que vous avez sur une semaine, vous voyez, ça s'arrête là. Et donc, pour assurer le surplus qui va au-dessus, il faut des moyens qui soient pilotables. Parce que vous avez deux pointes dans la journée : la pointe du matin aux alentours du milieu de la matinée et la pointe de 19h du soir. La pointe de 19h du soir a lieu à 19h du soir. Elle n'a pas lieu à 15h parce qu'il y a du vent à 15h. Donc, comme vous avez besoin de moyens pilotables pour assurer la pointe au moment où

49. PLUS D'ÉOLIEN = PLUS DE POINTE = PLUS DE FOSSILES?

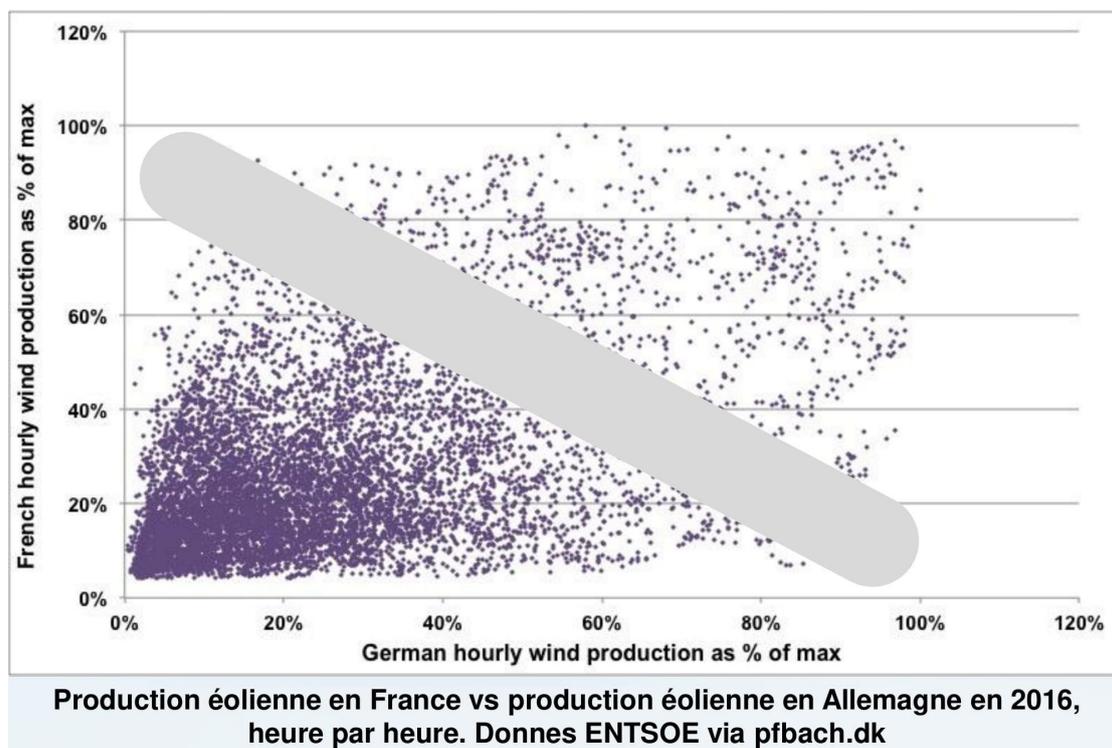
elle a lieu (pour le moment en tout cas. Eh bien, on considère que les moyens intermittents s'imputent sur la base. J'y reviendrai après. Alors, quand vous n'en n'avez qu'un peu, ça n'oblige pas à changer la façon dont vous envisagez la base.



Diapositive 51.

Quand vous en avez beaucoup, évidemment, ça devient un peu plus un problème. Donc ça, l'éolien, une fois que je vous ai dit ça, je vous ai à peu près tout dit sur la façon dont ça marche.

## 50. Du vent chez les voisins quand on en manque chez nous ?



Diapositive 52.

Après, quelques éléments complémentaires pour savoir si on peut en faire beaucoup ou pas. Un des premiers éléments sur l'éolien est de savoir : si on couvre une superficie suffisamment importante, est-on assuré qu'il y ait toujours du vent quelque part, de telle sorte que l'on puisse compter sur une puissance garantie ?

Alors ici, vous avez un nuage de points que j'ai fait, il n'y a pas longtemps pour deux pays adjacents, qui sont la France et l'Allemagne, heure par heure – donc vous avez 8760 points sur ce graphique. L'abscisse du point, c'est la fraction du parc allemand qui est utilisée. Dit autrement, c'est la fraction de la puissance installée qui est effectivement produite. donc, si vous avez un 20% sur cette valeur et que le parc installé est de 50 gigawatts, ça veut dire que, à ce moment-là, vous avez 20 de 50, c'est-à-dire 10 gigawatts de produits. C'est bon ? Alors, j'ai mis en pourcentage du parc installé, ou de la valeur maximale plus exactement, et non pas en puissance fournie, pour éviter d'étaler le nuage

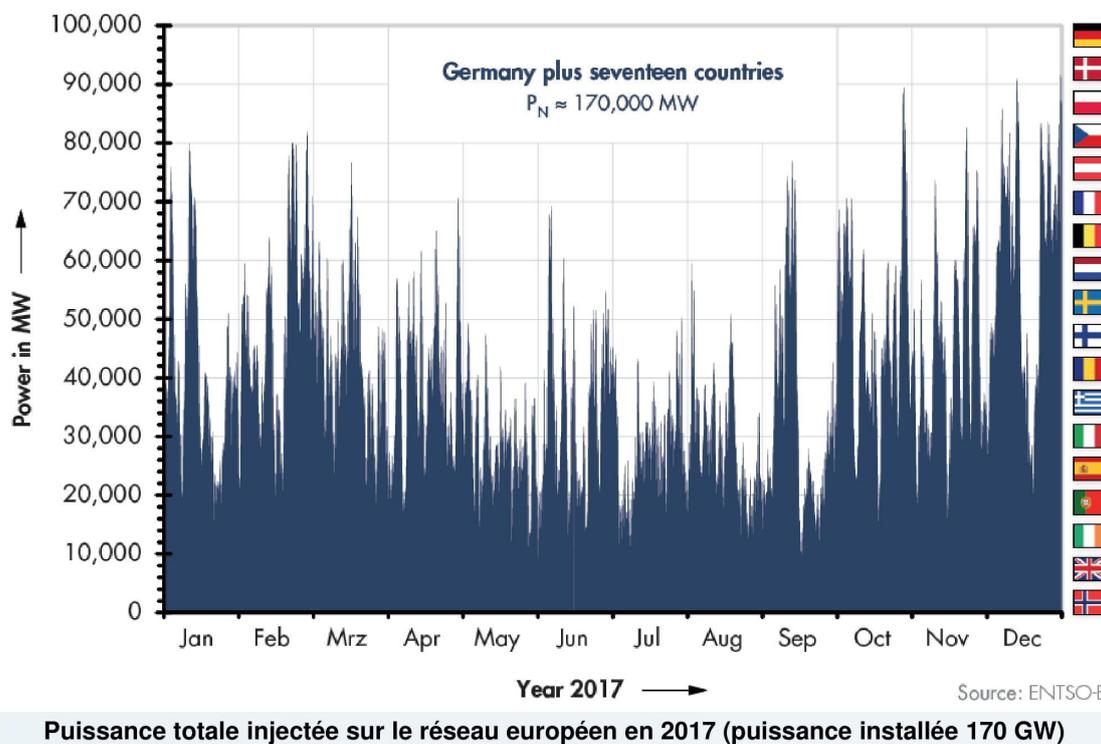
## 50. DU VENT CHEZ LES VOISINS QUAND ON EN MANQUE CHEZ NOUS?

parce que les puissances installées dans les deux pays ne sont pas du tout les mêmes. Là, j'ai 100 d'un côté et 100 de l'autre de manière absolument certaine puisque c'est, à chaque fois, la fraction de la puissance installée qui produit effectivement.

Alors, si vous aviez un foisonnement parfait, c'est-à-dire si quand il n'y a pas de vent chez l'un, il y en a chez l'autre et réciproquement, tous les points devraient se trouver dans une zone qui ressemble à ça. Dit autrement, quand ça tourne à plein d'un côté, ça tourne pas du tout de l'autre, comme ça, je n'ai pas trop d'électricité. Quand ça tourne à plein de l'autre côté, je n'en ai pas du tout dans le premier pays parce que comme ça je n'ai pas trop d'électricité. Et moins j'en ai dans un pays donné et plus j'en ai dans le pays adjacent. De telle sorte que la somme des deux est constante. D'accord?

Ça, c'est une situation dans laquelle ça correspond effectivement à « il y a toujours du vent quelque part, et non seulement il y en a quelque part, mais il y en a assez ». Ce que vous voyez sur ce graphique, c'est que ce n'est pas ça que l'on observe. Ce que l'on observe, c'est que la probabilité maximale de ne pas avoir de vent en Allemagne, c'est quand vous n'avez pas de vent en France. Donc, une autre manière de dire ça, c'est que le fait de regarder deux pays ensemble plutôt qu'un seul pays ne vous augmente pas de manière significative la puissance garantie sur laquelle vous pouvez compter. C'est ça la conclusion de ce nuage de points.

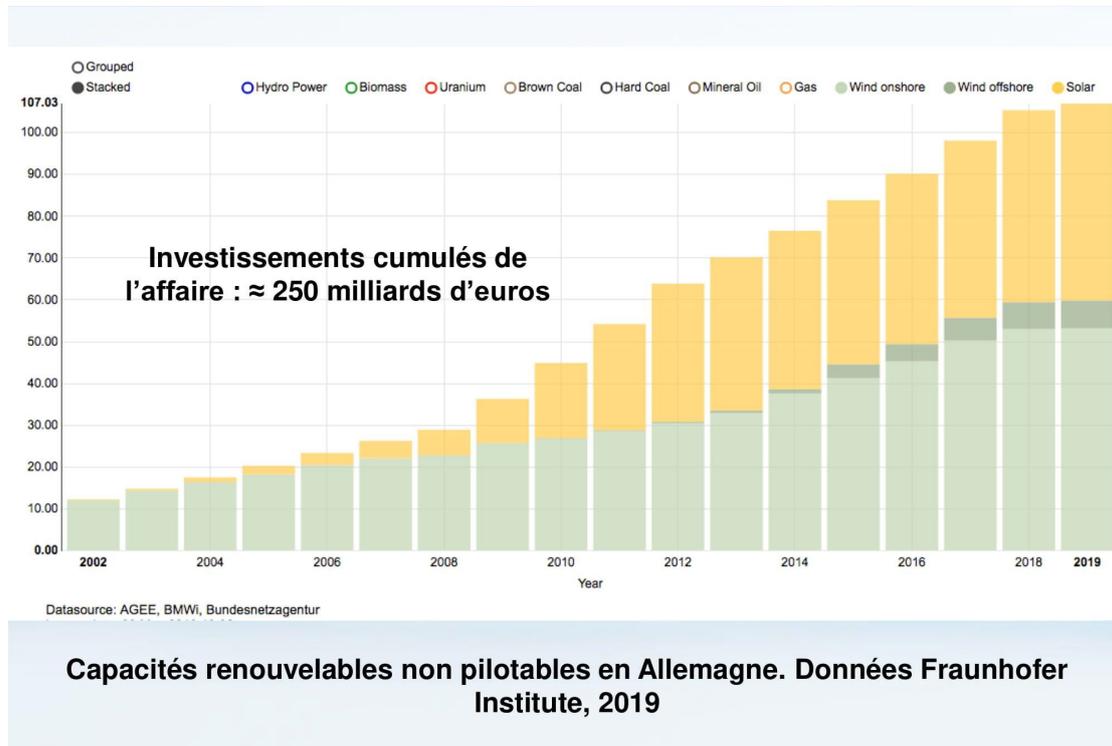
## 51. Encore plus variable que les cours de la bourse



### Diapositive 53.

C'est quelque chose que vous pouvez retrouver sous une autre forme, avec ici, la puissance qui est injectée sur une année. Alors là, vous ne voyez même pas les minima annuels (parce que ça peut descendre quasiment là), mais la puissance injectée sur le réseau européen avec tous les pays qui sont là. Et ce que vous voyez, c'est que, d'aller d'un bout à l'autre de l'Europe, ça ne vous évite pas quand même de très grandes variations de puissance (en ce qui concerne la puissance éolienne injectée). Par ailleurs, vous voyez ici que la puissance installée en Europe actuellement, c'est 170 gigawatts. Et vous voyez que ça ne monte quasiment jamais au-dessus de 90. Donc, ça veut dire qu'à un instant donné, vous ne pouvez jamais avoir la totalité de la puissance installée qui produit, si je regarde toutes les éoliennes européennes. Et par contre, à tout instant, la puissance minimale qui est garantie par ces 170 gigawatts, elle n'est pas plus élevée que 10 gigawatts. Vous voyez, là, ça descend jusqu'à 10. Et en fait, si on avait une résolution plus fine, vous verriez que par moment ça descend même un peu en-dessous.

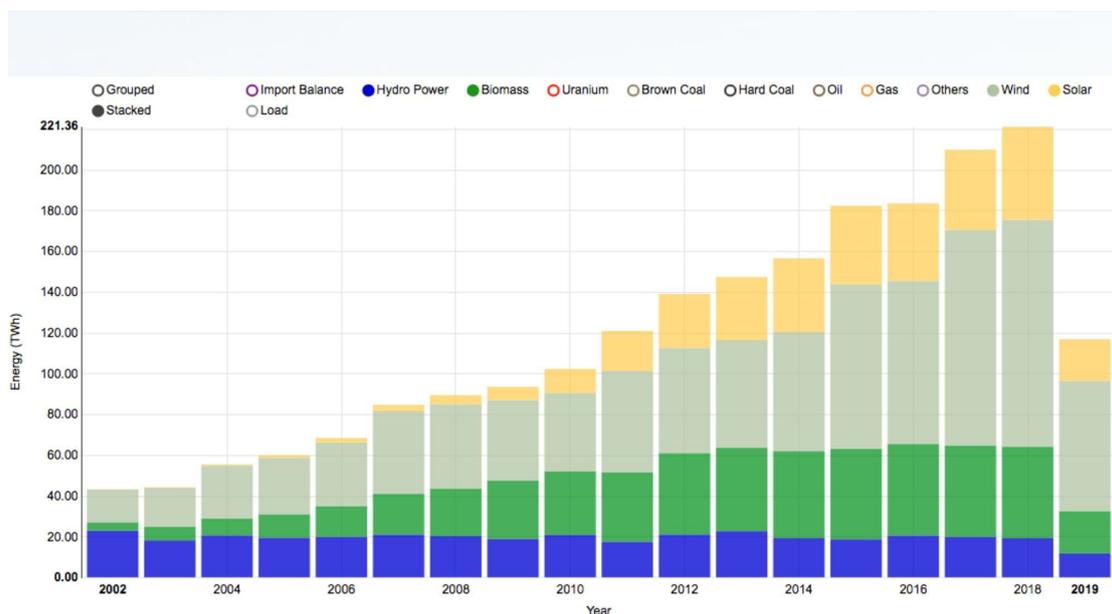
## 52. Les GW renouvelables augmentent...



Diapositive 54.

Alors ça, ça porte une conséquence importante à avoir en tête sur la manière de comparer les modes fatales – PV et éolien – avec les modes pilotables. Ici, vous avez la puissance installée en Allemagne, depuis 2002. Vous voyez, en 2002, l'Allemagne avait 10 gigawatts d'éolien. Aujourd'hui elle a 100 gigawatts : solaire, éolien offshore, éolien onshore (à terre), d'accord? 100 gigawatts. Qui soit dit en passant, mon ordre de grandeur, c'est que ça lui a coûté à peu près 250 milliards d'euros à installer.

## 53. La production aussi...

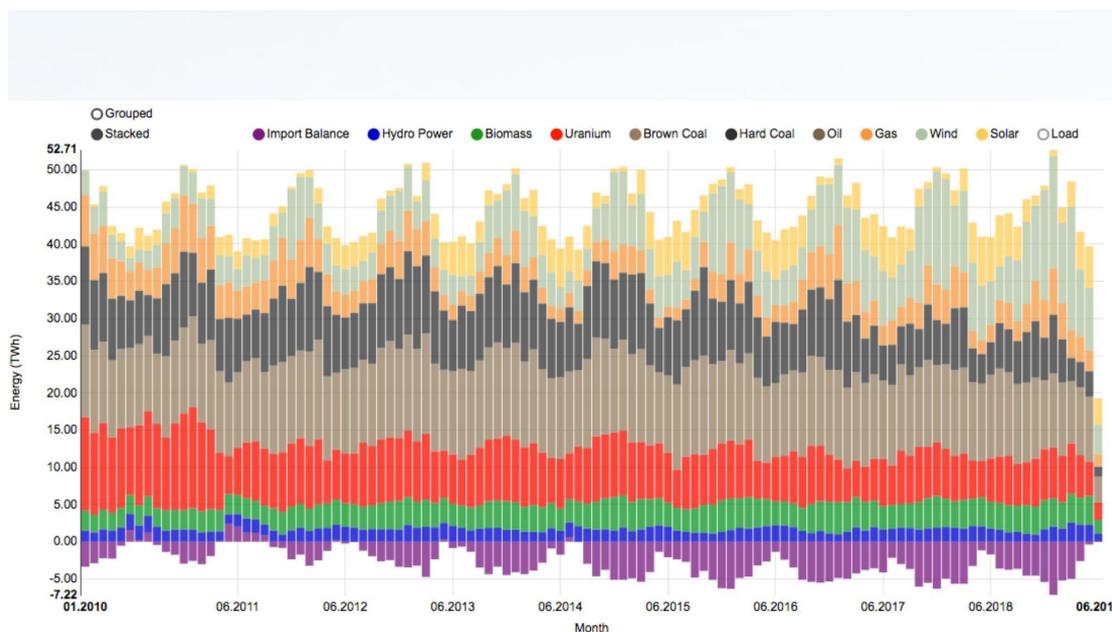


**Evolution de la production électrique renouvelable depuis 2002, en TWh**  
Source 50 Hertz, Amprion, Tennet, TransnetBW, Destatis, EEX, 2019,  
via <https://www.energy-charts.de>

Diapositive 55.

Voilà maintenant à quoi ressemble la production électrique renouvelable. Alors, j'ai un peu triché là-dedans parce que j'ai rajouté le biogaz (qui est pilotable), et j'ai rajouté l'hydroélectricité (qui est pilotable). Mais peu importe. Même si vous ne regardez que la partie éolienne et solaire, vous constatez que c'est en forte augmentation.

## 54. La consommation électrique est constante...



Consommation électrique mensuelle en Allemagne de 2010 à 2019. Données 50 Hertz, Amprion, Tennet, TransnetBW, Destatis, EEX, 2019 via <https://www.energy-charts.de>

Diapositive 56.

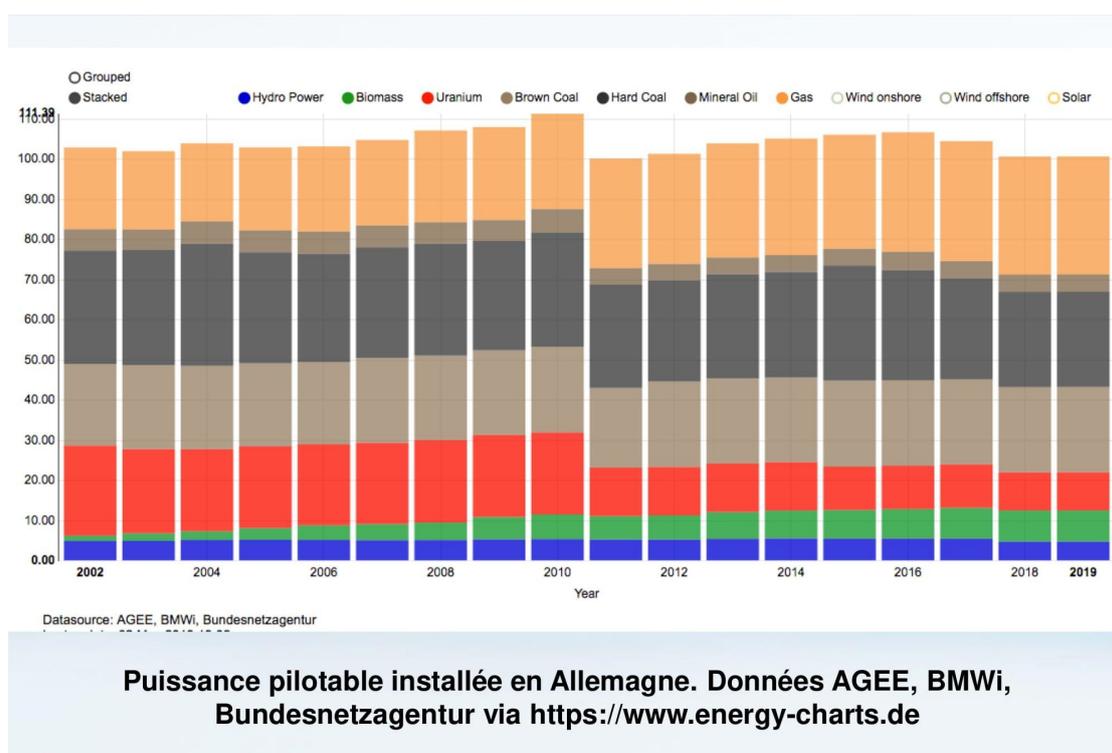
Ce que vous constatez également, si on regarde la consommation allemande sur les dix dernières années, c'est qu'elle est à peu près *flat*. Vous voyez là, vous avez le maximum de la consommation allemande : toujours à peu près la même. Ce que vous constatez, par contre, c'est que les exportations augmentent. J'y reviendrai juste après. Donc, ça veut dire que l'augmentation de la production électrique allemande, en fait, sert essentiellement à augmenter ses exportations. Mais ni ça ne baisse, ni ça n'augmente sa consommation domestique.

Soit dit en passant, ce qu'on voit aussi implicitement sur ce graphique, c'est que l'idée parfois avancée que si vous avez un point d'eau dans le fond de votre jardin ou une éolienne dans le fond de votre jardin, ça rend l'énergie citoyenne (c'est-à-dire que vous voyez ce qui produit, et du coup vous faites attention à votre facture) : vous voyez que ce n'est pas totalement probant quand vous voyez que ça ne bouge absolument pas au niveau de la consommation allemande. Alors, avec ce que je viens de vous montrer donc : de plus en plus de puissance installée, de plus en plus de productions, une consommation qui ne

#### 54. LA CONSOMMATION ÉLECTRIQUE EST CONSTANTE...

bouge pas. Maintenant je vous pose la question : la puissance installée dans les autres moyens, comment est-ce qu'elle a évoluée? Il y en a deux qui trichent parce qu'ils connaissent déjà la réponse, je pense. Ça n'a pas bougé.

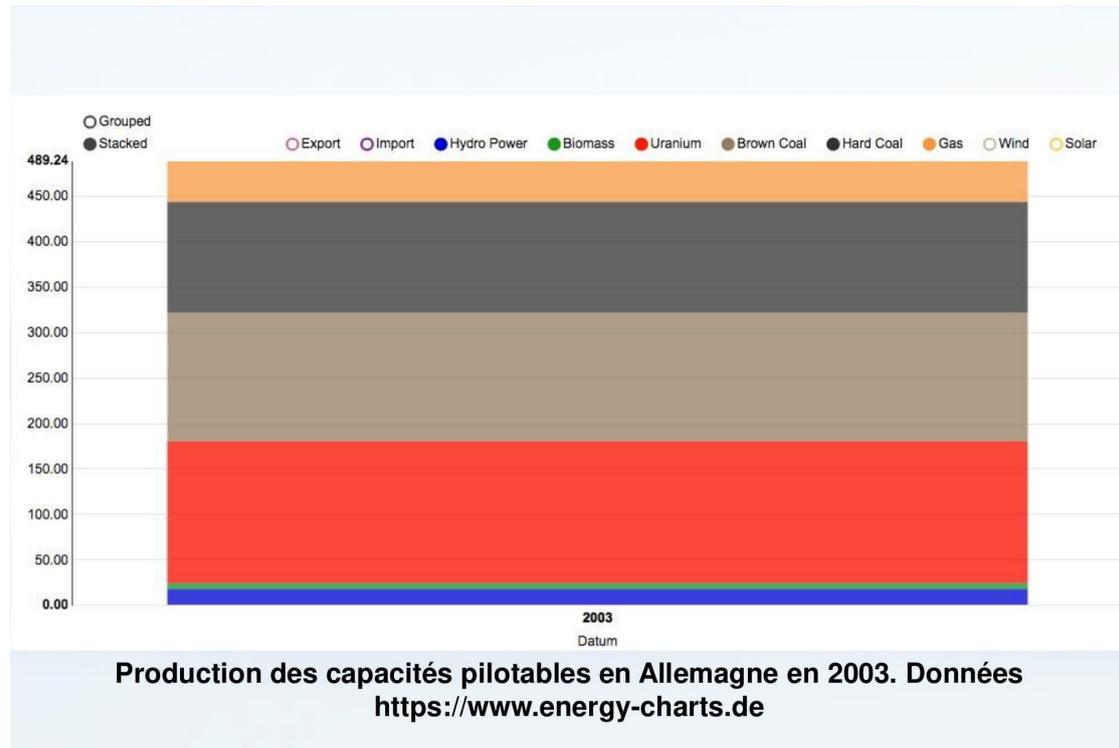
## 55. Et donc, la puissance installée en « pas ENR » baisse?



Diapositive 57.

Ici, vous avez la puissance installée en moyens pilotables dans laquelle j'ai remis l'hydroélectricité (qui est pilotable) et le biogaz. Ici, vous avez le nucléaire, dont vous voyez la forte chute quand ils ont baissé les réacteurs. Après, vous avez le charbon et vous avez le gaz. Alors, lignite, charbon, gaz. Ce que vous voyez, c'est qu'on avait 100 gigawatts de puissance pilotable en 2002. Ça monte un peu, ça descend un peu, ça monte un peu, ça descend un peu. On a 100 aujourd'hui. donc, l'augmentation – pourtant pas négligeable puisqu'ils avaient 100 gigawatts de moyens pilotables, ils ont rajouté 100 autres gigawatts – de moyens intermittents éoliens et solaires n'a pas conduit à baisser la quantité de moyens pilotables qu'avait l'Allemagne. Du coup, que s'est-il passé si la puissance installée n'a pas variée? Ils l'utilisent moins.

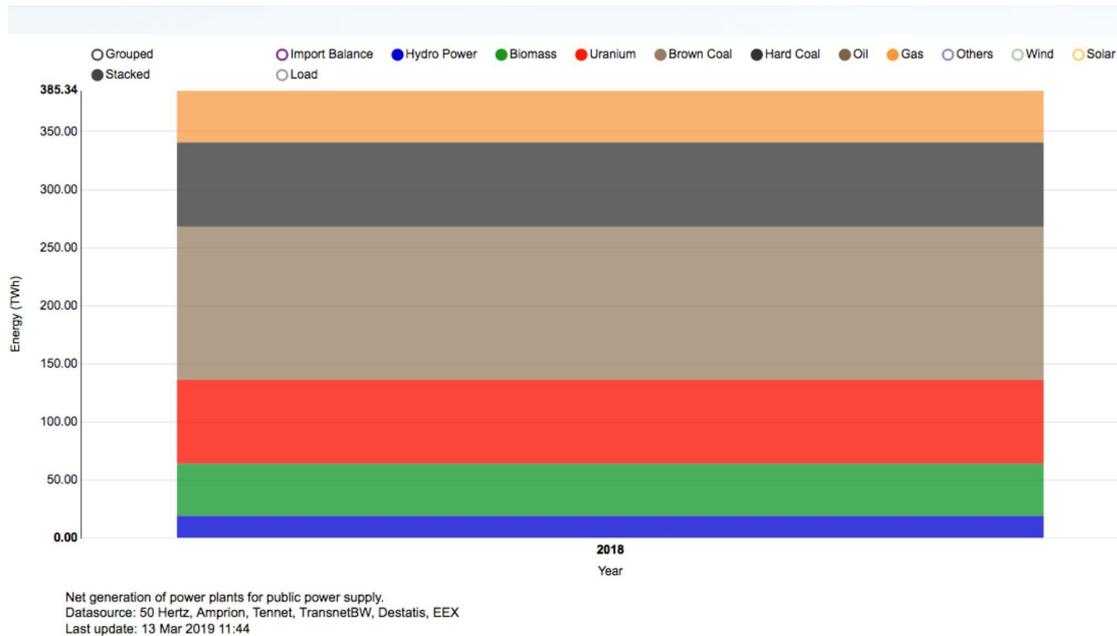
## 56. Passer d'un facteur de charge élevé...



Diapositive 58.

En 2002, ces moyens pilotables ne fournissaient pas loin de 500 TWh d'électricité.

## 57. ... à un qui l'est moins



**Production des capacités pilotables en Allemagne en 2018. Données Données**  
<https://www.energy-charts.de>

Diapositive 59.

Aujourd'hui ils en fournissent un peu moins de 400. Donc, en fait, ils ont toujours la même puissance installée et ils ont baissé son facteur de charge. Conséquence logique : qu'est ce qui se passe pour les comptes d'exploitation de ces électriciens ? Ils se cassent la gueule. Et en fait, c'est un processus que vous observez partout en Europe. C'est-à-dire que les électriciens qui possédaient des moyens dits conventionnels avant l'émergence des EnR sont tous en train de faire grise mine. Alors, je ne dis pas que c'est une bonne ou une mauvaise chose. Je dis que c'est quelque chose qu'on voit absolument partout en Europe. Ce n'est pas propre à EDF qui a aussi ses comptes qui font un peu grise mine. Oui ?

\*\*\* Question auditoire sur la vente de la production EDF \*\*\*  
C'est ce qu'ils font : ils l'exportent un peu là. Parce que le surplus d'électricité ici conduit à la fois à baisser le facteur de charge et à augmenter les exportations. S'ils n'avaient pas augmenté les exportations, ils baisseraient encore plus le facteur de charge. C'est un arbitrage entre les deux. Les exportations, soit

57. ... À UN QUI L'EST MOINS

dit en passant, conduisent aussi à baisser le facteur de charge des voisins pour exactement les mêmes raisons. Oui ?

\*\*\* Question auditoire sur le marché de l'électricité \*\*\*

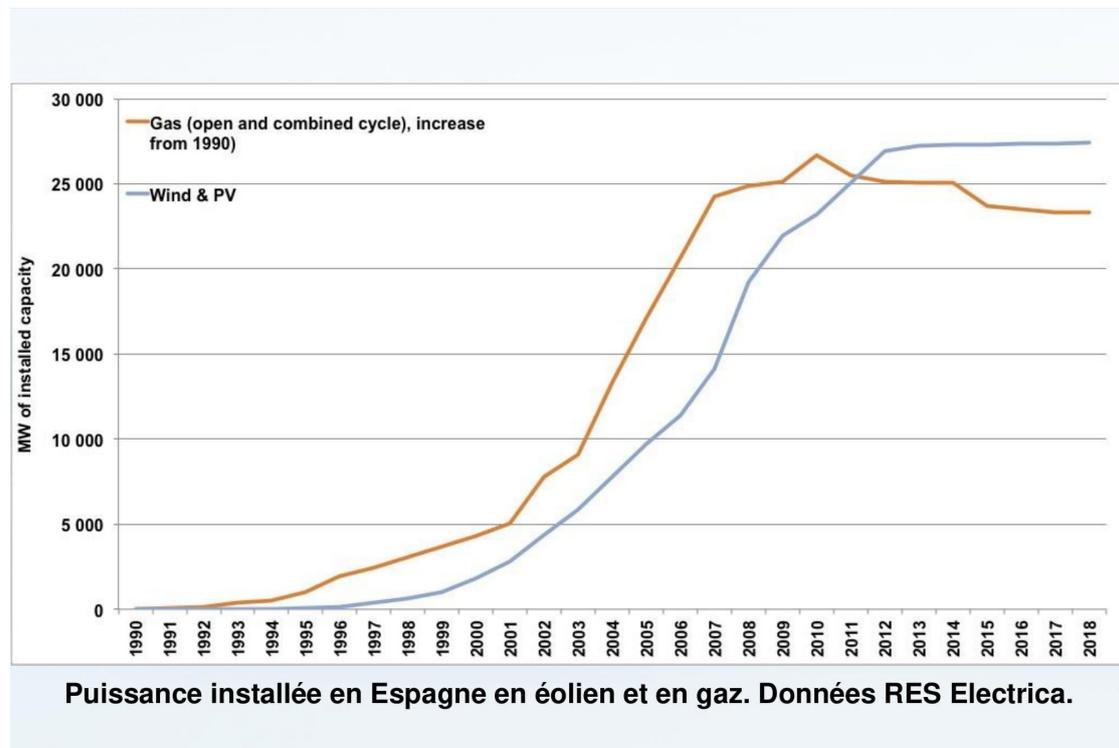
Alors, attendez, je ne comprends pas. Là pour le moment on ne parle pas de marché : on parle d'électrons et de physique.

\*\*\* Question auditoire sur un prix plus élevé \*\*\*

Ah oui ! Ah non ! Ils ne peuvent pas. Je n'ai malheureusement pas le temps pendant ce cours de vous expliquer longuement en détail pourquoi mais vous pouvez regarder s'il y a des conférences de Percebois qui tournent sur Internet. Ils ne peuvent pas parce que la manière dont le marché d'électricité est organisée, c'est qu'à tout instant, le marché s'aligne sur le coût marginal de production le plus élevé des moyens disponibles. Or, le coût marginal de production des EnR est nul, et donc, ça vous tire globalement le marché vers le bas. Et donc, ils ne peuvent pas faire monter les prix. Ils n'y arrivent pas à cause de ce mécanisme-là.

Alors, on a inventé une rustine, soit dit en passant, qu'on est en train de mettre en place, qui s'appelle les mécanismes de capacités. Donc justement, comme on sait qu'on a besoin de garder de la puissance pilotable, l'opérateur dit : « Vous me garantissez que ce truc-là est activable si j'en ai besoin et je vous paye pour ça. »

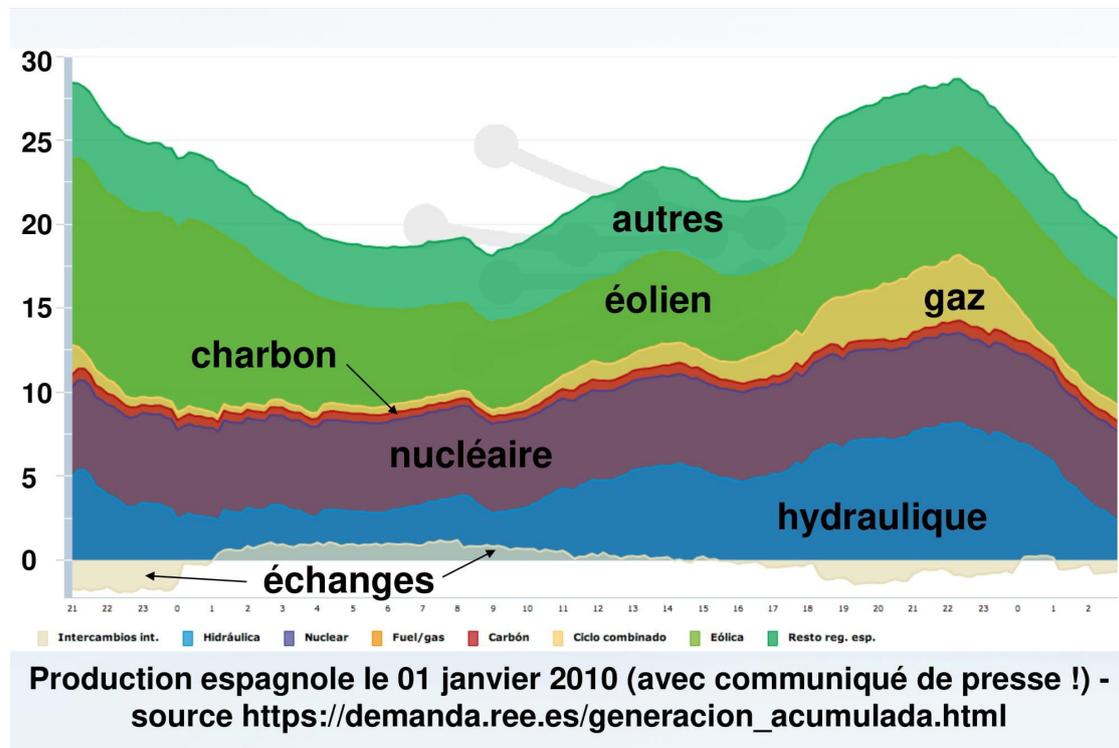
## 58. Et les espagnols ?



Diapositive 60.

Voilà le cas espagnol. Les Espagnols ont installé 25 gigawatts d'éoliennes depuis la fin des années 90. Dans le même temps – parce que eux, ils étaient en train d'équiper leur parc – ils ont installé 25 gigawatts de centrales à gaz. Donc en fait, ils ont installé très exactement 1 pour 1 entre les modes non pilotables et les modes pilotables. Si les modes non pilotables étaient auto-suffisants, ils n'auraient évidemment pas construit des centrales à gaz à côté. D'accord ? C'est un deuxième élément qui montre que ça ne suffit pas d'avoir des moyens non pilotables.

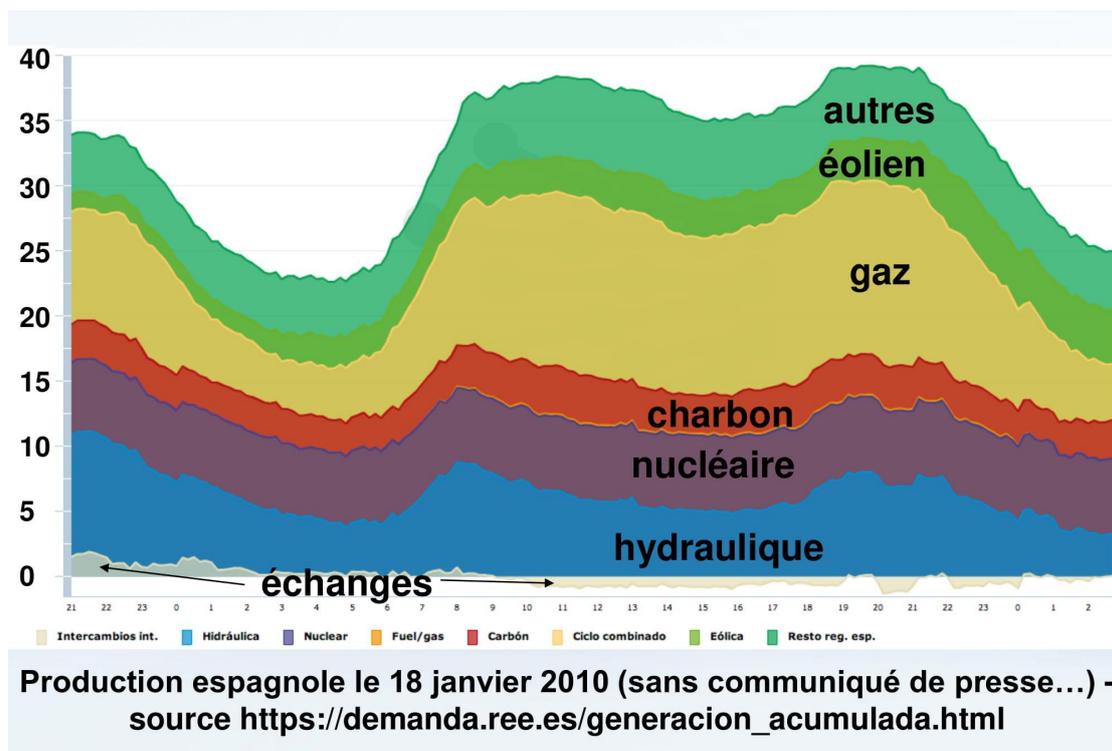
## 59. Eolum und gazum



Diapositive 61.

Et du coup, ce que font les Espagnols, c'est que, quand il y a beaucoup de vent, eh bien, ils utilisent le vent.

## 60. Eolum und gazum, suite



Diapositive 62.

Puis, quand il n'y a pas beaucoup de vent, ils utilisent le gaz. La conclusion que j'en tire pour la France, c'est que si, en France, nous développons fortement les modes non pilotables (donc, éolien et solaire et quelles qu'en soient les raisons), après ce que je viens de vous dire, et avec votre propre argent, est-ce que vous avez plutôt envie de parier qu'on garde autant de réacteurs nucléaires et qu'on baisse le facteur de charge ou plutôt envie de parier qu'on va supprimer des réacteurs nucléaires? Moi, avec mon propre argent, j'ai envie de parier qu'on va baisser le facteur de charge.

Qu'est-ce que ça donne sur la sûreté du parc, cette histoire? Ça donne que vous avez un parc que vous êtes obligés de garder pour avoir la puissance garantie qui tourne moins souvent. Donc, qui encaisse moins d'argent (si le prix du MWh n'augmente pas) et donc, vous avez besoin d'entretenir un parc qui est un système à coûts fixes en gagnant moins d'argent... Est-ce que vous pensez que ça augmente la sûreté? Ce n'est pas complètement sûr... Eh bien, vous arrivez à faire ce qui a été suggéré tout à l'heure. C'est-à-dire que vous vendez votre kWh

## 60. EOLUM UND GAZUM, SUITE

plus cher. Et à ce moment, vous avez toujours le même nombre de réacteurs, vous payez toujours l'électricité nucléaire le même prix, au total, pour moins de kWh. Et vous avez rajouté en plus le coût des modes intermittents. D'accord ?

Donc, mon pari, c'est que si nous allons au bout de l'expérience du 50% de nucléaire en France, et vous serez vivants au moment où vous verrez que le pari va au bout ou qu'on l'abandonne. Mon pari, c'est que l'essentiel va être fait, non pas en fermant des réacteurs nucléaires – peut-être qu'on en fermera deux ou trois – mais ça va être fait en baissant le facteur de charge des réacteurs existants. Et à un moment ou à un autre, soit on recapitalisera, soit on ré-encadrera les prix. Soit il se passera quelque chose de très bizarre. Soit EDF n'aura plus les moyens d'assurer la sûreté avec l'argent qu'elle gagnera, on fermera des réacteurs, et il y aura des blackouts. De toute façon, il va se passer un truc bizarre. La seule chose sur laquelle je ne parie pas, c'est qu'on va réussir à remplacer des moyens pilotables par des moyens non pilotables de façon massive. Parce que, pour le moment, aucun pays n'arrive à le faire. Oui ?

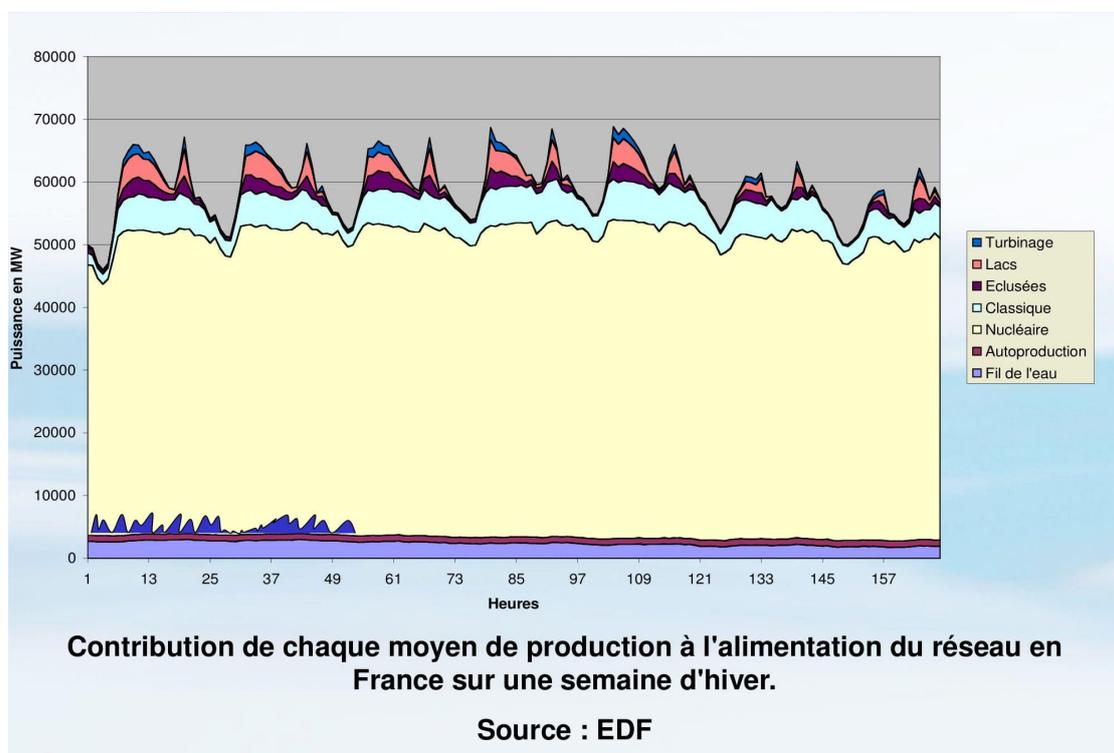
\*\*\* Question auditoire sur la gestion de l'énergie nucléaire \*\*\*

Oui, puisqu'on a décidé en pratique qu'on allait attendre que Flamanville démarre avant de fermer Fessenheim. Oui ?

\*\*\* Question auditoire sur le critère pilotable du nucléaire \*\*\*

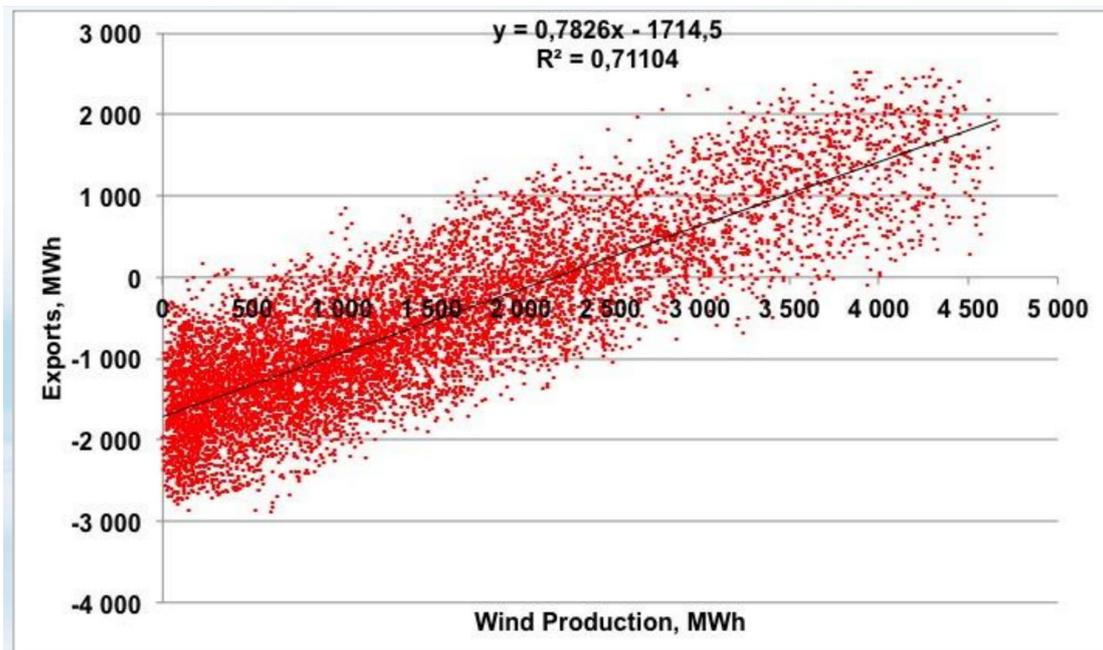
Bien sûr que le nucléaire est pilotable. Je l'ai dit rapidement la dernière fois mais le nucléaire, vous arrivez aujourd'hui à faire baisser sa puissance de 80% en une demi-heure et à la faire remonter dans les mêmes proportions en une demi-heure aussi. Vous avez une marge de 30 mégawatts par minute sur les réacteurs nucléaires français. Je l'ai précisé la dernière fois. J'espère que je ne suis pas en train de préciser un truc que vous étiez en train de discuter avec votre copain à ce moment-là... Mais je l'ai précisé la dernière fois et ce n'est pas le cas de tous les réacteurs nucléaires dans le monde. Mais, comme en France, on a un gros parc, vous avez besoin notamment de couvrir une partie de la variation quotidienne avec du nucléaire, ce qui était montré sur la courbe de charge que je peux vous remonter... C'est passé où ? Là !

Vous voyez là que le nucléaire varie un peu dans la journée. Et quand la tempête Miguel est passée... enfin pas la tempête Miguel mais une précédente, le parc nucléaire français a baissé sa capacité de 10 gigawatts en l'espace d'une journée. Parce qu'il a dû s'effacer justement devant l'éolien allemand. Donc, le nucléaire français, comme il est dominant dans la production, il est capable de faire du suivi de charge. On lui a demandé de faire ça. Dans les autres pays quand il fait 20-30% de l'approvisionnement. Alors là, c'est clair qu'il tourne en base à 100% de sa puissance toute l'année.



Diapositive 50.

## 61. Et avec ça, que donne le résultat ?



Production éolienne horaire vs exportations horaires au Danemark en 2016.

Source des données : Paul-Frederik Bach ; <http://www.pfbach.dk/>

Diapositive 63.

Alors, dernier point sur l'éolien – ce que je vous montre est aussi partiellement vrai pour le solaire. Il y a quelque chose auquel il faut faire attention aussi, c'est que je vous ai montré que les exportations allemandes avaient augmentées avec le temps.

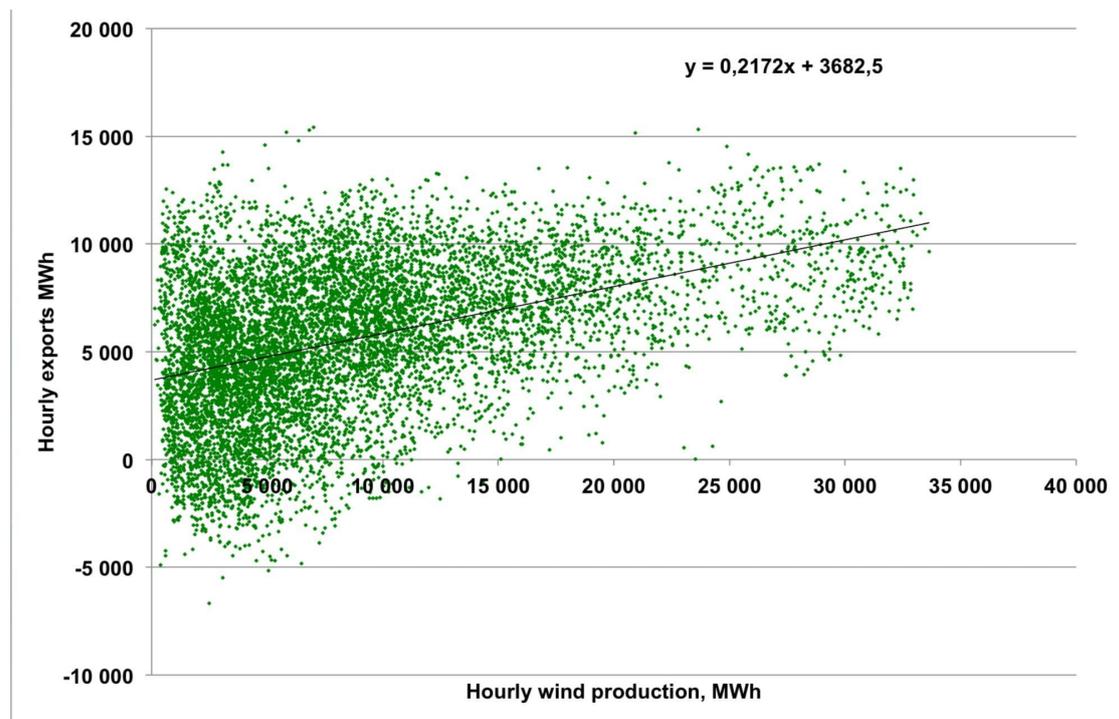
En fait, il y a un pays qui est encore plus intéressant à regarder de ce point de vue, c'est le Danemark. Ici, vous avez au Danemark l'exportation nette. Donc là, ils sont en importation, 0 équilibré, en surplus / en exportation, en fonction de la puissance éolienne au Danemark. Vous voyez de manière extrêmement claire que, en gros, quand les éoliennes ne tournent pas, le Danemark importe son électricité de ses voisins (notamment du charbon allemand). Parce que quand il n'y a pas beaucoup de vent au Danemark, il n'y en a pas beaucoup en Allemagne non plus.

Donc, c'est justement le moment où l'Allemagne fait tourner ses centrales à charbon à plein régime. Et quand vous avez énormément de vent, eh bien, le Danemark exporte son surplus. Et alors, il l'exporte, entre autres, vers les

*61. ET AVEC ÇA, QUE DONNE LE RÉSULTAT?*

pays scandinaves qui ont plein de barrages, donc qui arrêtent leur barrage, qui achètent l'électricité là à zéro, voire à moins de zéro, et par contre qui revendent l'électricité des barrages fort chère au Danemark quand on est là. Donc, les suédois et les norvégiens adorent le programme éolien danois qu'ils ne remercieront jamais assez.

## 62. Qui consomme vraiment les électrons éoliens allemands ?

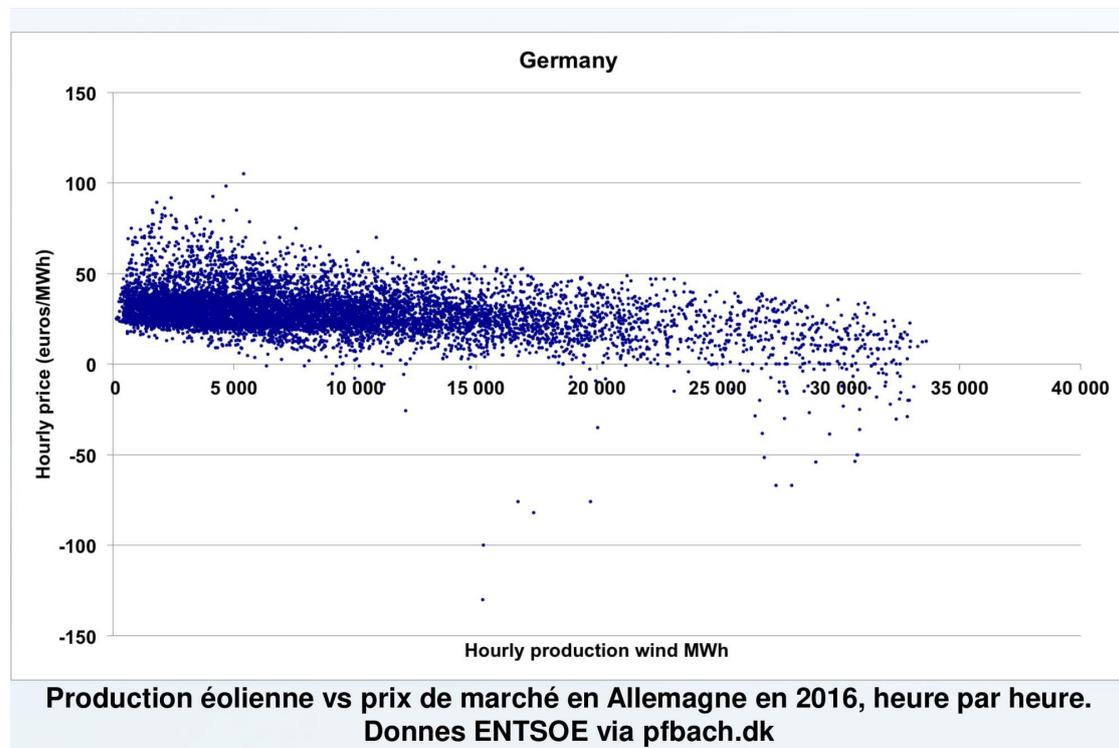


Production éolienne horaire vs exportations horaires en Allemagne. Données ENTSOE

Diapositive 64.

Vous avez également le même processus avec l'Allemagne où vous avez – alors, le nuage de points est un peu moins resserré mais vous voyez quand même – une tendance très nette du fait que plus vous avez d'éolien en Allemagne et plus les exportations nettes sont élevées.

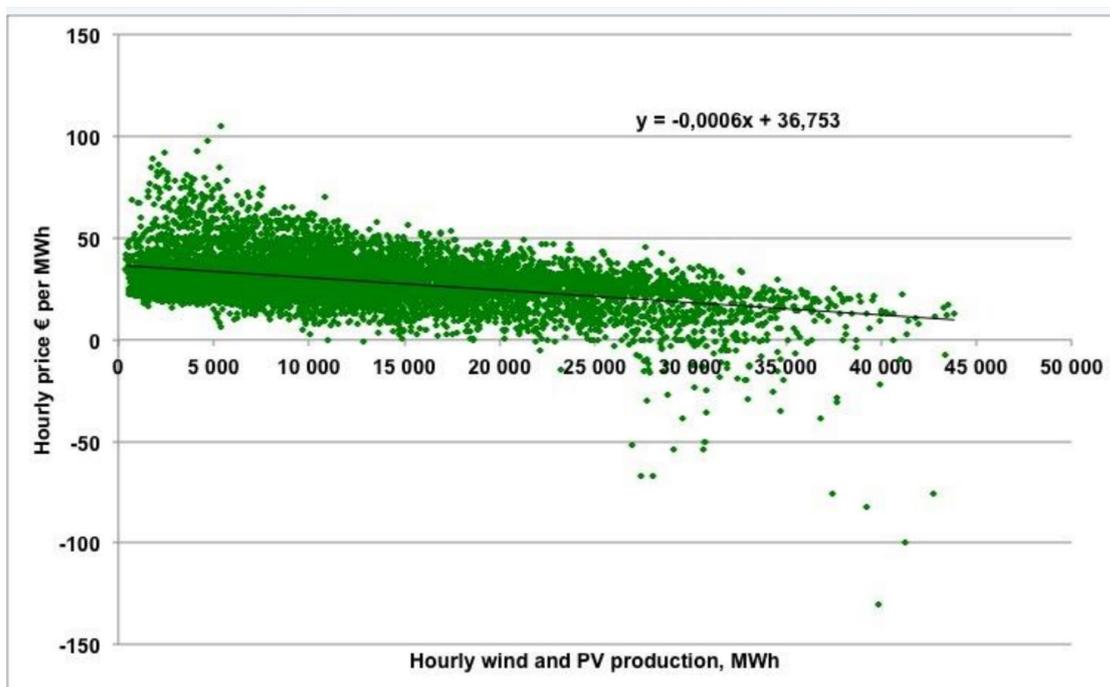
## 63. Le prix de marché? il dépend... du sens du vent!



Diapositive 65.

Vous avez également les prix de marché qui ont tendance à baisser quand la puissance éolienne injectée augmente.

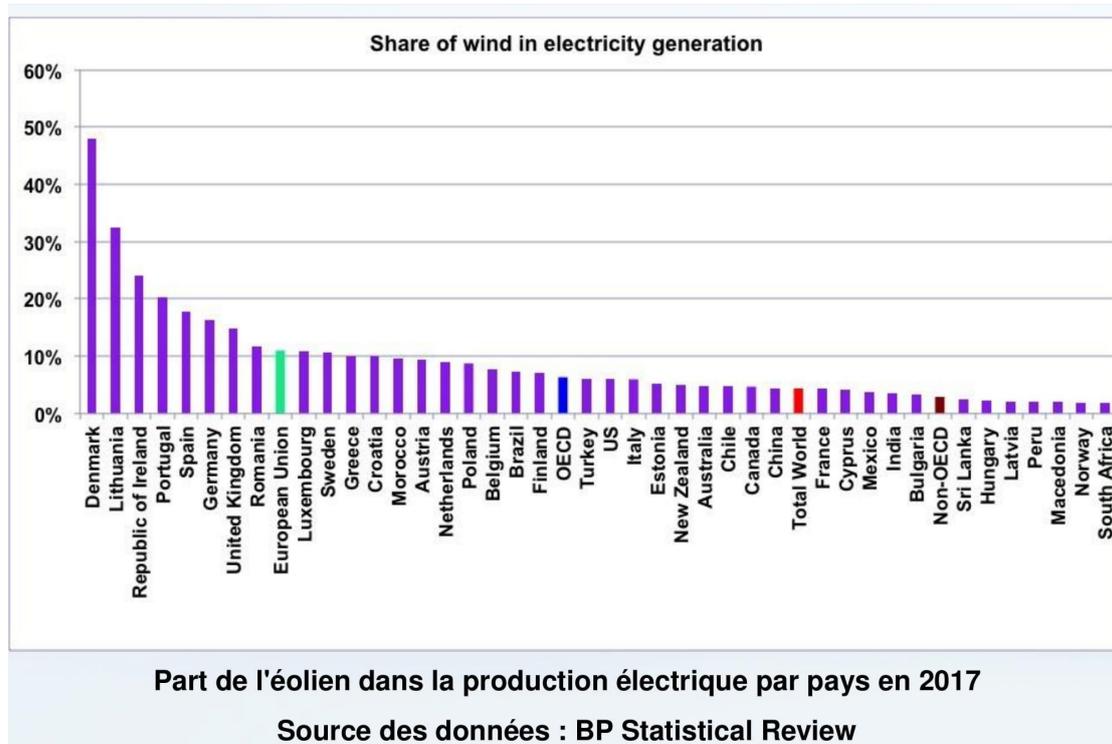
Et à partir du tiers de la puissance installée, vous commencez à avoir ce qu'on appelle des prix négatifs. C'est-à-dire que ça coûte moins cher aux producteurs de payer le consommateur pour prendre l'électricité (donc on paye le consommateur pour prendre l'électricité à ce moment-là, pas longtemps, mais on le paye) plutôt que de débrancher l'éolienne. Parce que c'est une opération plus compliqué de la débrancher et de la rebrancher.



Production éolienne + solaire vs prix de marché en Allemagne en 2016, heure par heure. Données ENTSOE via pfbach.dk

Diapositive 66.

## 64. Et avec ça, que donne le résultat ?



Diapositive 67.

Voilà quelle est la part de l'éolien dans la génération électrique d'un certain nombre de pays. Alors, ce n'est pas pour rien que je vous ai montré le Danemark. Parce qu'en fait, c'est la part dans la génération électrique, ce n'est pas la part dans la consommation effective puisqu'une bonne partie de son électricité est exportée. Son électricité éolienne est exportée. Donc, la part dans la consommation effective est beaucoup plus faible que ça. En fait, l'Union Européenne ne communiquant pas avec ses voisins, au Danemark comme ailleurs, ce qui est intéressant, c'est de raisonner plutôt avec ça. Donc aujourd'hui, on est aux alentours de 10%. Alors, dans l'Union Européenne prise globalement, l'éolien mord quand même sur un peu de fossiles. C'est clair.

## 65. Parlons matériaux

**Table 10.4** Range of materials requirements (fuel excluded) for various electricity generation technologies<sup>52</sup>

Materials (ton/TWh)	Generator only				Upstream energy collection plus generator			
	Coal	NGCC	Nuclear PWR	Biomass	Hydro	Wind	Solar PV (silicon)	Geothermal HT binary
Aluminum	3	1	0	6	0	35	680	100
Cement	0	0	0	0	0	0	3,700	750
Concrete	870	400	760	760	14,000	8,000	350	1,100
Copper	1	0	3	0	1	23	850	2
Glass	0	0	0	0	0	92	2,700	0
Iron	1	1	5	4	0	120	0	9
Lead	0	0	2	0	0	0	0	0
Plastic	0	0	0	0	0	190	210	0
Silicon	0	0	0	0	0	0	57	0
Steel	310	170	160	310	67	1,800	7,900	3,300

Key: NGCC = natural gas combined cycle; PWR = pressurized water reactor; PV = photovoltaic; HT = high temperature

**Consommation de métal ou minerais par MWh pour divers modes**  
**Source des données : Quadrennial Technology Review, Concepts in Integrated Analysis, September 2015**

Diapositive 68.

Question : après, si on veut passer à des modes décentralisés de manière significative, est-ce qu'on a des limites ailleurs ? Il y en a une qui est importante, alors, qui est peu évoquée mais que vous voyez, ici, sur ce graphique que j'ai tiré d'un document dont vous avez la référence en bas. Et qui vous donne les quantités de matériaux, et en particulier, de métaux qui sont utilisés par MWh. Mais en fait, c'est le rapport de proportion qui est important en fonction des modes de production. Et ce que vous constatez en gros, c'est que quand vous passez des modes (on va dire) concentrés – dont notamment le nucléaire qui est décarboné mais pas que, que vous avez ici – à des modes diffus (on va dire le vent et le solaire photovoltaïque), vous avez une multiplication par quelques dizaines à quelques centaines (par exemple pour le cuivre).

Donc, vous avez un facteur multiplicateur très important en ce qui concerne les matériaux qui sont utilisés par MWh produits. Or, ces matériaux sont aujourd'hui produits avec des énergies fossiles. D'accord ? La mine, elle fonctionne aujourd'hui avec des engins de mines. La métallurgie fonctionne avec du charbon

## 65. PARLONS MATÉRIAUX

et de l'électricité fossile. Les transports intermédiaires fonctionnent avec du pétrole. Donc, tout ça fonctionne avec des moyens qui sont des moyens fossiles. L'importance des matériaux, que vous avez là, fait que si on devait produire tous ces matériaux avec juste des panneaux solaires et des éoliennes (c'est-à-dire si on devait boucler le système), il est évident que le prix de production du solaire et de l'éolien serait considérablement supérieur à ce qu'il est aujourd'hui.

Dit autrement, le solaire et l'éolien, aujourd'hui, ça ne coûte pas cher parce que le dispositif de capture non renouvelable est fait à bas prix parce qu'on utilise des énergies non-renouvelables pour faire ce dispositif de capture. C'est clair ou je répète ?

## 66. Parlons argent

**Dès lors qu'un mode non pilotable (éolien, solaire) ne permet pas de diminuer la puissance pilotable mais juste de s'en servir moins quand il y a du vent ou du soleil, il y a deux manières de comparer les couts :**

**On peut comparer le cout complet du mode non pilotable avec le cout du combustible évité du mode pilotable**

**Ou ajouter le cout du stockage au mode non pilotable pour le rendre à nouveau pilotable. Attention : stocker engendre des pertes et donc il faut produire plus de 1 kWh bruts pour avoir 1 kWh piloté.**

Diapositive 69.

Et du coup, avec ce que je viens de vous dire, quand on compare le coût d'un système pilotable avec un système non-pilotable, il faut faire très attention au fait que l'on compare des choux et des carottes. Je le redis, vous ne pouvez pas considérer qu'un kWh qui fait que votre cuisinière fonctionne quand vous avez faim vaut la même chose qu'un kWh qui arrive quand il y a du vent. Parce que si vous n'avez faim que quand il y a du vent c'est parfait, mais si vous avez faim à d'autres moments que quand il y a du vent, ça marche moins bien. De même qu'un kWh qui permet au train de partir à 8h, quoiqu'il arrive, n'a pas la même valeur qu'un kWh qui permet au train de partir quand il y a du vent. Et donc, quand on compare les coûts de production des modes pilotables et des modes non-pilotables, j'insiste, on compare des choux et des carottes.

Il n'y a que deux manières de comparer les choses. Ou bien vous considérez que le mode non-pilotable n'évite pas le mode pilotable (ce que je vous ai montré tout à l'heure quand vous avez des modes pilotables installés, vous rajoutez du non pilotable) : ça ne vous permet pas d'enlever du pilotable, par contre ça

## 66. PARLONS ARGENT

vous permet de vous en servir moins. Quand vous ne vous en servez pas, ce que vous économisez, c'est le coût du combustible au moment où vous ne vous en servez pas. D'accord? Le coût du combustible, quand vous ne vous en servez pas, dans une centrale à lignite, c'est 10 euros du MWh. Dans une centrale à charbon dans le monde, c'est quelques dizaines d'euros – en gros 20 euros du MWh. Et dans une centrale à gaz, c'est 50 euros du MWh. Dans une centrale nucléaire, c'est de l'ordre de l'euro par MWh. Donc, le coût du combustible évité peut se comparer au coût complet du mode non-pilotable, ça c'est une première comparaison qui est légitime.

La deuxième comparaison, c'est dire : « Je vais carrément supprimer le mode pilotable. » À ce moment, vous devez rajouter le coût du stockage au mode non-pilotable. Vous devez refaire un système pilotable. Et le coût du stockage, ça vous conduit à multiplier par n'importe quoi entre deux et cinq fois. Ça vous conduit à multiplier par n'importe quoi, entre deux et cinq, le coût de production du mode non-pilotable. Et donc, quand vous faites ré-intervenir le coût du stockage, ça va évidemment rendre l'équation totalement différente. Donc, si je prends un MWh éolien en sortie d'éolienne, il vaut 50 euros, très bien. Mais une fois que je l'ai stocké-restitué, ça va plutôt se rapprocher de 100 à 150. Et ça, encore une fois, c'est dans un monde dans lequel j'ai des énergies fossiles pour me faire l'éolienne et le dispositif de stockage. Oui?

\*\*\* Question auditoire sur le coût lié à des changements d'usages \*\*\*  
C'est très difficile de calculer un coût de changement d'habitude. L'ADEME, quand elle a sorti son rapport 100% EnR, a supposé qu'il y avait les deux tiers de la puissance appelée dans le pays qui étaient déplaçables sans investissement nécessaire. Sans investissement nécessaire. C'est un postulat hardi. Pour ne pas dire plus. Parce que les habitudes, sauf à ce que vous arriviez chez tout le monde avec le fusil, ce n'est pas si simple que ça à changer. Parce qu'il y en a plein qui correspondent à des contraintes que vous ne changez pas si facilement.

Je vais vous donner un exemple : si vous habitez tout seul et que vous faites – ce qui est une très bonne chose – que vous lavez vos chemises vous-même. Eh bien, ou bien vous lavez vos chemises quand vous êtes chez vous et pas en cours, ou bien vous lavez vos chemises quand il y a du vent. Pour ça, il faut que vous ayez une machine programmable. Il faut, soit dit en passant que vous rentriez chez vous pas longtemps après la fin de la lessive parce que si vous rentrez chez vous 2 jours après la fin de la lessive, vous pouvez recommencer parce que tout a moisi. Donc, vous avez besoin d'investir dans quelque chose qui est soit une machine programmable alors que vous ne l'avez pas, soit une machine programmable plus le voisin qui passe chercher votre linge. Ou une femme de ménage que vous payez. Mais dans tous les cas de figure, ce n'est pas quelque chose de totalement anodin.

## 66. PARLONS ARGENT

Donc l'idée qu'il n'y a pas d'argent à mettre dans l'adaptation à une offre fluctuante, moi, c'est une hypothèse qui me semble parfaitement farfelue. C'est pour ça que je dis, ces coûts implicites d'adaptation à une offre qui n'est plus garantie, ils sont réels. Donc, soit il y a des coûts d'adaptation, soit il y a des coûts de stockage. Et donc, quand on dit, l'éolien c'est moins cher que le nucléaire parce que l'éolien c'est 60 euros et le nucléaire c'est 100 euros, on compare des choux et des carottes. Ce qu'il faut comparer, c'est soit le coût du combustible évité dans le nucléaire quand on s'en sert pas, ça oui. Soit le coût de l'éolien stocké-restitué, plus renforcement réseau — je vais vous faire une petite règle de trois dans trois secondes – comparé au nucléaire (ou au charbon ou au gaz, soit dit en passant, c'est le même principe).

## 67. Parlons argent (bis)

100% Nucléaire			100% Eolien	
Facteur de charge	≈ 70%	$\xrightarrow{\times 3-4}$		≈ 20%
Durée de vie	60 ans	$\xrightarrow{\times 2-3}$		20 à 30 ans
Réseau	≈ 0	$\xrightarrow{\times 1,5-2}$		≈ 0,5 à 1 fois cout éolienne
Stockage intersaisonnier	10%	$\xrightarrow{\times 2}$		50%-60%
Cout au kW installé	3-5.000 €	$\xrightarrow{\div 2-3}$		1.500 € (sauf offshore)
Total invest./kWh				≈ x 10-20

Diapositive 70.

Alors, voilà une petite règle de trois que je peux tenter pour vous donner un ordre de grandeur. À gauche, j'ai un système 100% nucléaire. Alors, mon système 100% nucléaire, soit dit en passant, il est possible parce que comme je le disais tout à l'heure, avec le nucléaire, je peux faire du suivi de charge. Donc, je peux très bien avoir un système dans lequel je n'ai que du nucléaire si c'est des réacteurs mode français. À droite, j'ai un système dans lequel je n'ai que de l'éolien, avec évidemment le stockage.

Alors, mon facteur de charge si je n'ai que du nucléaire, il va se balader aux alentours de 70% sur l'année. Parce que je ne peux pas avoir 100% puisque j'ai des fluctuations. L'éolien continental, il est aux alentours de 20. C'est avec ça que j'ai fait mes calculs. Si on met de l'offshore, c'est plutôt 25 ou 30%. Ça veut dire que, pour une même quantité d'électricité utilisée à la fin de l'année, j'ai besoin de trois à quatre fois plus de puissance installée en éolien qu'en nucléaire puisque mon facteur de charge est 3 à 4 fois plus bas.

## 67. PARLONS ARGENT (BIS)

Après, mon éolienne va durer 20 à 30 ans. Mon réacteur, il peut durer 60. Donc, je dois rejouer une fois, voire deux, quand je suis en éolien versus quand je suis en nucléaire. Après, si je suis en nucléaire, je n'ai pas besoin de coûts additionnels dans le réseau, il existe déjà. Alors que, si je me mets des éoliennes partout, j'ai des raccordements à faire dans tous les sens. Et puis, si j'ai trois à quatre fois plus de puissance installée, instantanée, ça veut dire qu'il va y avoir des moments, où au lieu de cracher 100 gigawatts, mon appareil de production va m'en cracher 250. Il n'arrivera jamais au total des 300 à 400. Mais il va quand même en cracher 250. Aujourd'hui, le réseau n'est pas dimensionné pour ça. Donc ça veut dire qu'il faut que je renforce le réseau.

Après, il va falloir que je stocke une partie de l'électricité produite. Alors, si je suis en pur éolien, j'ai plus l'hiver j'ai moins l'été. Si je suis en pur solaire, c'est l'exact inverse. Si j'ai un mélange des deux, je lisse un peu sur l'année mais j'ai quand même besoin de stockage inter saisonnier. Et donc ça, ça m'augmente mon coût. Là, j'ai fait l'hypothèse que j'allais construire des STEP dans les Alpes. Justement, c'était la solution des stations de pompage avec l'eau du Léman. Par contre, le nucléaire reste plus cher au kW installé. Quand on fait vraiment n'importe quoi, c'est 7000 euros, comme à Flamanville. Si on fait venir les chinois, ça sera 3000, puisque c'est à peu près ce qu'ils ont payé à Taishan. Voilà. Donc, c'est pour ça que j'ai mis 3 à 5 000 en série. Par contre, l'éolien, c'est beaucoup moins cher, c'est 1500, voire éventuellement 1000. Donc là, j'ai un facteur 2, 3 voire 4 en défaveur du nucléaire. Mais, si je fais la somme des fois et des diviser ici, je me retrouve à l'arrivée avec, au premier ordre, un besoin en capitaux qui est d'un ordre de grandeur au-dessus ( $\times 10$ ) si j'ai un système totalement basé sur du non-pilotable.

Donc, voilà une règle de trois. C'est un peu rustique mais ça vous permet de sentir l'ordre de grandeur. Et ça vous permet de constater que, contrairement à une idée couramment répandue, en terme d'investissements qui sont nécessaires pour que le système fonctionne en mode pilotable (j'insiste), il faudra rajouter les investissements...

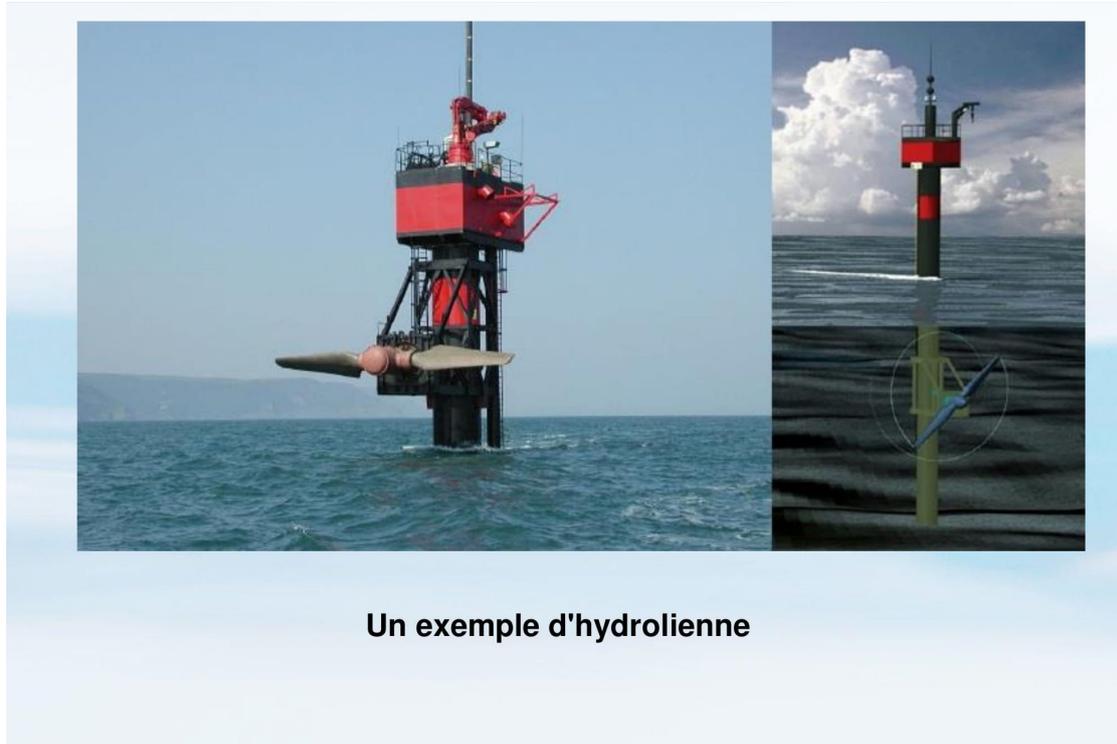
Vous évitez le stockage mais vous rajoutez les investissements chez les particuliers pour qu'ils s'adaptent au fait que de temps en temps il n'y a pas d'électricité. Donc, vous rajouterez les batteries chez les particuliers, vous rajouterez tous les appareils programmables chez les particuliers, etc. Donc ça vous rajoutera du CAPEX chez les particuliers. Du capital.

Voilà, donc, c'est juste pour dire, en fait contrairement à une idée couramment répandue, ce système-là est beaucoup plus cher que ce système-là. Et la raison pour laquelle on a fait dans un premier temps des modes centralisés

67. *PARLONS ARGENT (BIS)*

de grosse puissance avec un réseau, c'est justement parce que c'est moins cher. C'est justement pour ça que tous les pays au monde ont fait exactement comme ça. Les gros modes centralisés avec un réseau.

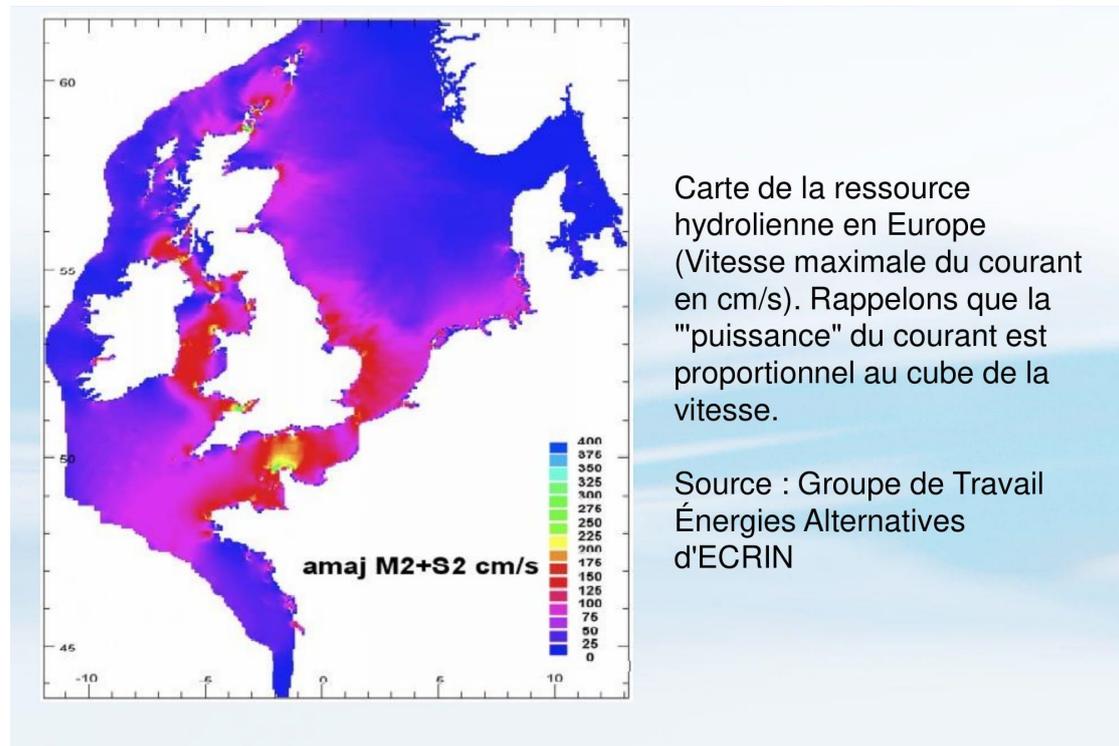
## 68. Passons de sur l'eau à sous l'eau



Diapositive 71.

On peut mettre les éoliennes au-dessus de la surface, on peut également les mettre sous la surface. Alors, quand on met les éoliennes sous la surface de l'océan, ça s'appelle une hydrolienne.

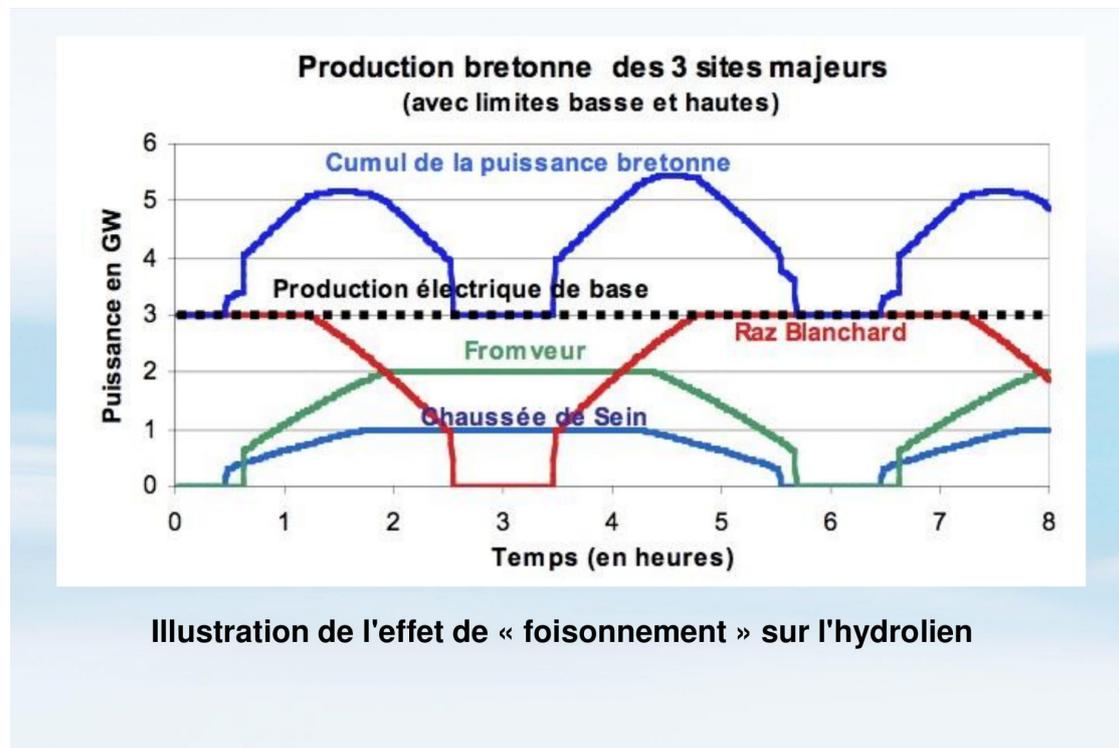
## 69. Passons de sur l'eau à sous l'eau (bis)



Diapositive 72.

C'est fait pour capter les courants de marée qui sont particulièrement forts en Manche et sur le pourtour de la Grande-Bretagne. Et puis, ils sont particulièrement forts près de La Hague, comme vous pouvez le voir pour répondre à une question qui m'a été posée tout à l'heure.

## 70. Passons de sur l'eau à sous l'eau (ter)



Diapositive 73.

L'intérêt des courants de marée par rapport au vent et au soleil, c'est qu'ils sont totalement prévisibles, non seulement calendairement, mais en amplitude. Les coefficients, pour ceux d'entre vous qui sont bretons... Il y a des bretons ici? Bon, donc vous savez, puisque vous avez regardé les tables de marée, que l'on connaît les coefficients de marée, les moments où il faut aller chasser les palourdes 32 ans à l'avance. Aucun problème. Donc l'amplitude de la marée est connue très longtemps à l'avance. Et le moment dans la journée où elle arrive aussi. Ce qui veut dire qu'en mettant des hydroliennes aux bons endroits, c'est-à-dire espacées d'un quart de longueur d'onde, vous pouvez avoir un approvisionnement garanti assez significatif. C'est ça l'idée. Alors, par contre, ça pose un certain nombre d'inconvénients les hydroliennes. Vous travaillez en milieu salé. Il y a un conflit d'usages avec les pêcheurs parce que les pêcheurs ont envie d'aller racler les fonds pile là où vous mettez des hydroliennes. Ça demande beaucoup de matériaux par mégawatt de puissance installée. Donc c'est intéressant, mais...

## 71. Passons de sous l'eau à juste la surface

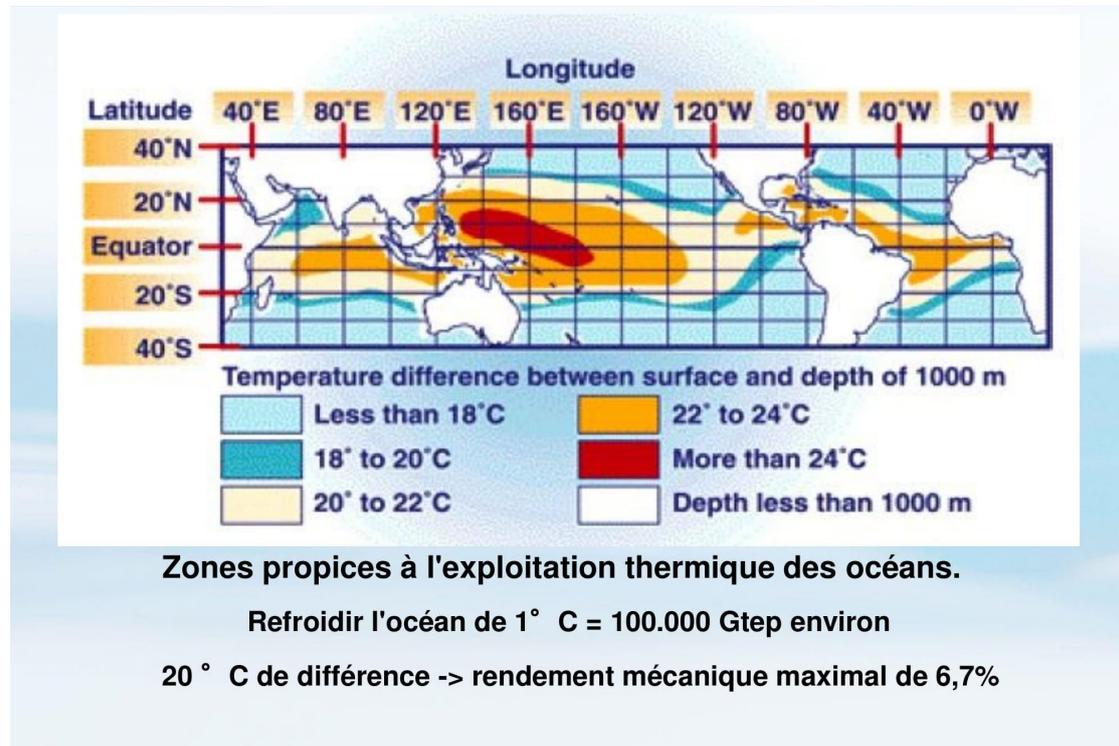


**Un exemple de dispositif d'exploitation de l'énergie des vagues.  
Puissance = 750 kW, soit... 1/2000ème d'une grosse centrale  
électrique (et production fortement variable).**

Diapositive 74.

Vous pouvez utiliser l'énergie des vagues. Regardez la puissance de cette affaire-là. 750 kW. Contre 100 gigawatts de puissance électrique installée en France. On peut en faire quelques-uns si on veut faire des reportages télévisuels amusants mais bon, ça ne va pas faire beaucoup plus que ça.

## 72. Passons de profond sous l'eau à la surface



Diapositive 75.

On peut utiliser des machines thermodynamiques qui exploitent la différence de température. Alors ça, c'est une machine de Carnot particulièrement inefficace. Oui? Il faut que j'accélère parce qu'il reste 10 minutes. Donc, c'est un truc que vous n'avez pas compris ou... à la fin du cours alors. On peut faire des machines thermodynamiques – des machines de Carnot – particulièrement inefficaces avec une différence entre la température de surface qui est aux alentours de 30 degrés (enfin 25-30 degrés), et l'eau profonde qui est à 4 degrés partout dans le monde. Et à ce moment, vous exploitez la différence, en faisant avec une grande circulation d'eau, voilà. C'est un truc qui peut s'envisager.

## 73. Parlons à nouveau argent

**Un baril de pétrole en sortie de puits à 10\$ (coût d'exploration compris) : 0,4 centime le kWh**

**~ 2 à 3 centimes par kWh pour le gaz sur le marché de gros**

**3 à 10 centimes le kWh électrique nucléaire**

**~ 4 centimes le kWh électrique pour le charbon (hors coût du CO<sub>2</sub>).**

**Et puis...**

**Eolien 6 à 8 centimes par kWh (hors coût d'intermittence)**

**Photovoltaïque ~2 à 20 centimes par kWh hors cout intermittence**

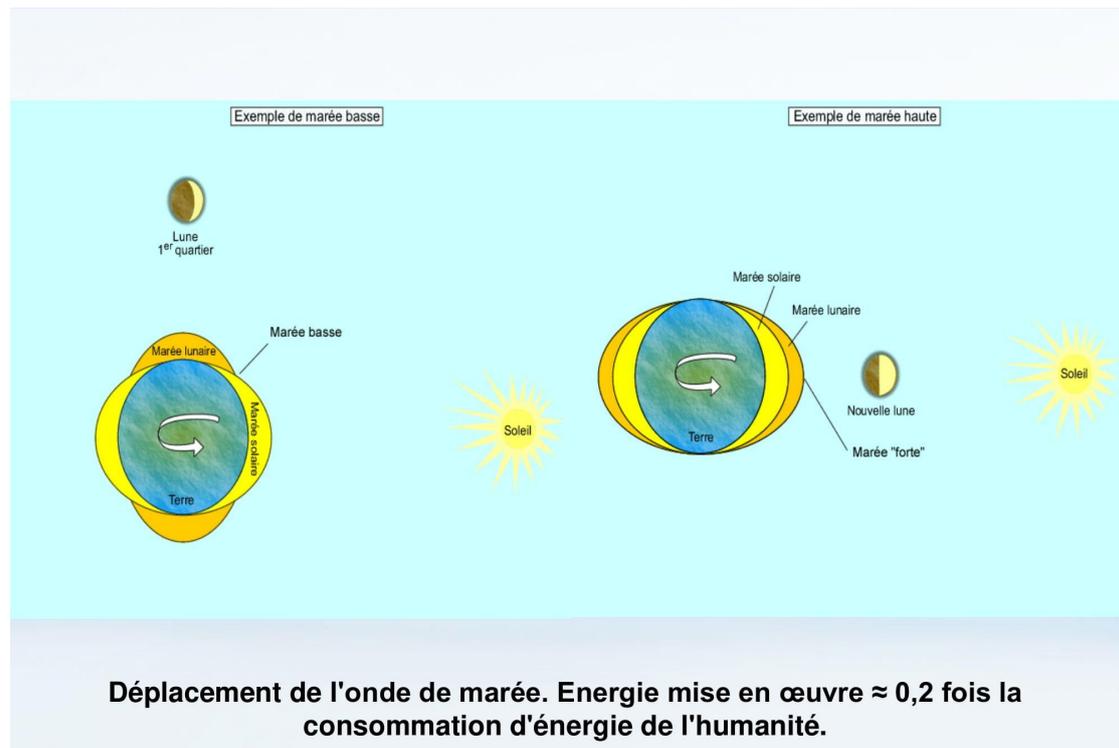
**Solaire à concentration ~15 centimes par kWh**

**Une taxe carbone à 200 € t CO<sub>2</sub> : +20 centimes par kWh électrique pour le charbon, +10 pour le gaz**

Diapositive 76.

Si on regarde à l'arrivée ce que coûtent ces trucs différents, voilà à quoi ressemblent les énergies aujourd'hui que nous avons dans le « concentré ». Et dans le « déconcentré », voilà ce que nous avons en termes de prix. Et j'insiste, encore une fois, sur le fait que ça, c'est aujourd'hui produit avec ça. On n'a pas un système autonome. J'insiste, quand on aura que des panneaux solaires et des éoliennes pour faire de la mine et de la métallurgie et des transports, on reparlera du coût des éoliennes, des panneaux solaires. Alors, ça ne veut pas dire qu'on ne peut pas en faire plus, ce n'est pas ce que je suis en train de dire. Ça veut juste dire que pour le moment, la baisse de coûts très forte qu'on a eue est un effet de la mondialisation. C'est un effet de la mondialisation.

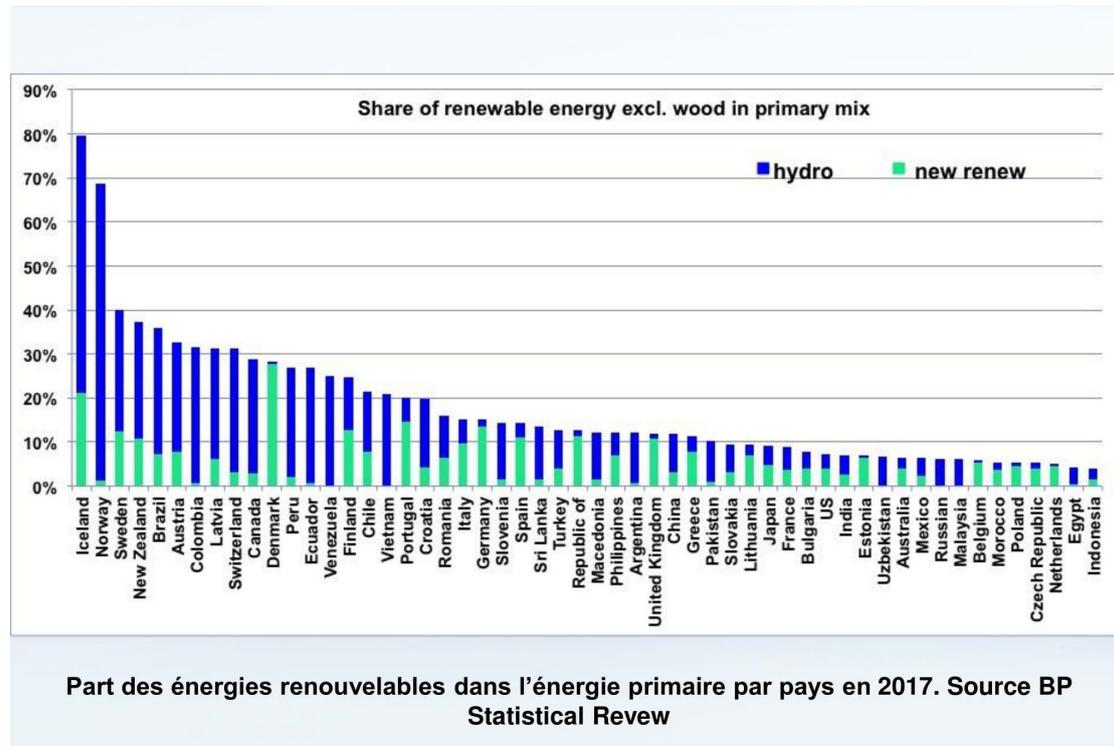
## 74. Marée haute, marée basse, marée haute, marée basse...



Diapositive 77.

Enfin, on peut finir en disant que l'on peut également utiliser l'énergie des marées. Donc ça, c'est le barrage hydroélectrique de la Rance, les bretons connaissent évidemment, enfin sauf ceux qui habitent dans le Morbihan, mais ils ne sont pas des vrais Bretons. \*\*\* Rires \*\*\* Attendez, si vous croisez un bigouden quand même, vous me faites rire...

## 75. Alors, utilise-t-on des énergies renouvelables ?



Diapositive 78.

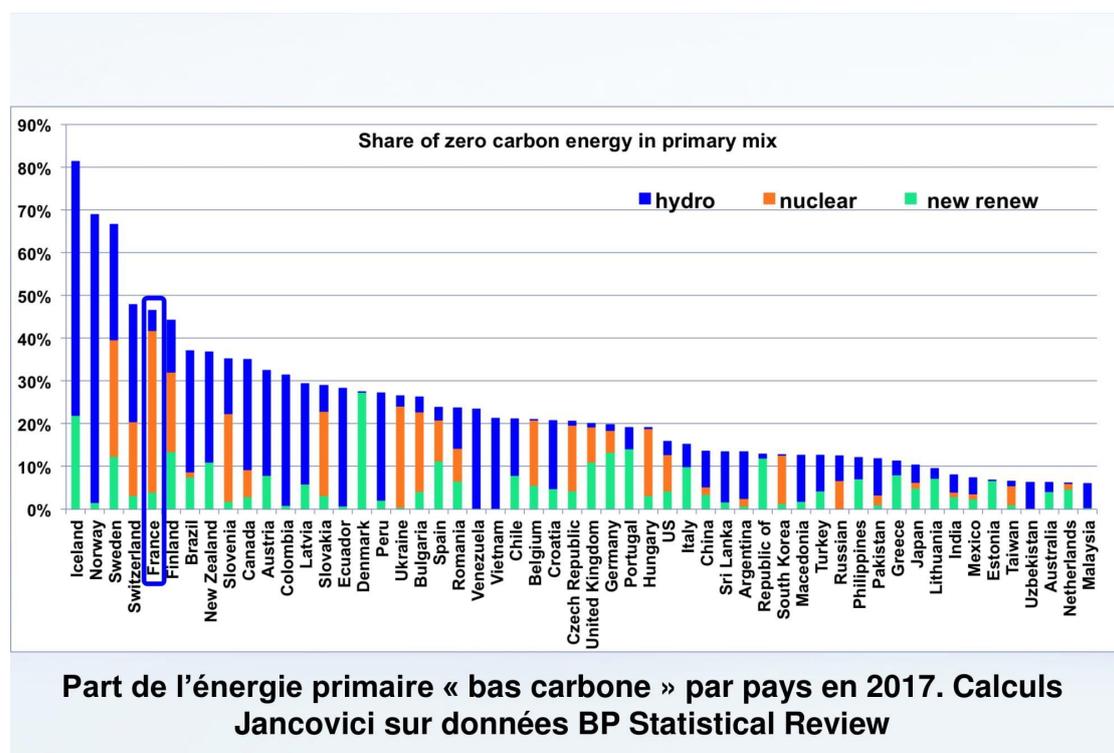
Une fois qu'on a fait le panorama, donc, vous avez ici la part des énergies renouvelables dans l'approvisionnement énergétique d'un certain nombre de pays. Alors, vous voyez que ce n'est pas la Norvège qui gagne, c'est l'Islande. Parce que, dans la partie vert clair en bas, en fait, j'ai mis nouvelles énergies renouvelables. En fait, ce ne sont pas des nouvelles énergies renouvelables. Là-dedans vous avez la géothermie qui est une ancienne énergie renouvelable. Donc l'Islande est aussi un très gros consommateur d'électricité par personne. Et les islandais utilisent à la fois beaucoup d'hydroélectricité mais aussi beaucoup de géothermie. Donc la Norvège n'arrive qu'en deuxième position.

Alors, vous voyez que dans cette affaire-là, si on regarde la France, la France n'est pas extrêmement bien placée. Vous voyez, on est bas. On est à 10% en gros. En fait, la raison à cela, c'est que dans les pays qui sont assez plats et assez densément peuplés – il y a bien pire que nous en Europe, les hollandais et les belges – on peut oublier les énergies renouvelables (enfin en substitution rapide) parce que les deux grandes énergies renouvelables dans le monde, je le

## *75. ALORS, UTILISE-T-ON DES ÉNERGIES RENOUVELABLES?*

répète, c'est l'hydroélectricité et la biomasse. C'est là que vous avez du stock. La biomasse a une fonction de stock, le barrage a une fonction de stock que ni le vent ni le soleil n'ont. Et vous avez besoin d'espace et de montagnes si vous voulez avoir beaucoup de forêts et beaucoup de barrages. Donc, si vous êtes dans un pays qui est richement doté en forêts et richement doté en barrages – ce qui en Europe est le cas par exemple de la Scandinavie, ce qui en Amérique du Sud est par exemple le cas du Brésil, ou par exemple le cas de la Colombie, ou par exemple le cas du Canada en Amérique du Nord – et que vous avez une population pas trop importante dans le pays, à ce moment, vous pouvez rêver d'un approvisionnement qui serait 100% renouvelable. Si vous êtes dans un pays plat et densément peuplé – typiquement la Belgique – ça devient très compliqué.

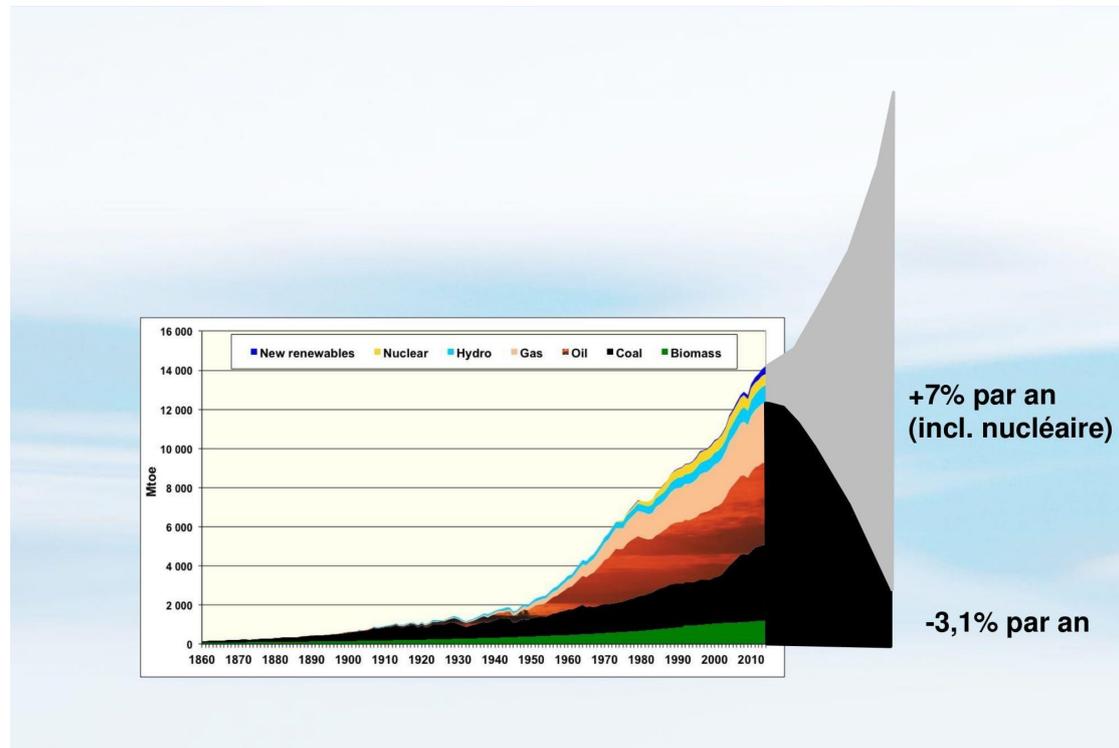
## 76. En retard, la France, vraiment ?



Diapositive 79.

Et en fait l'équation commence à être un peu plus jouable à partir du moment où vous faites rentrer la totalité du décarboné, et notamment le nucléaire.

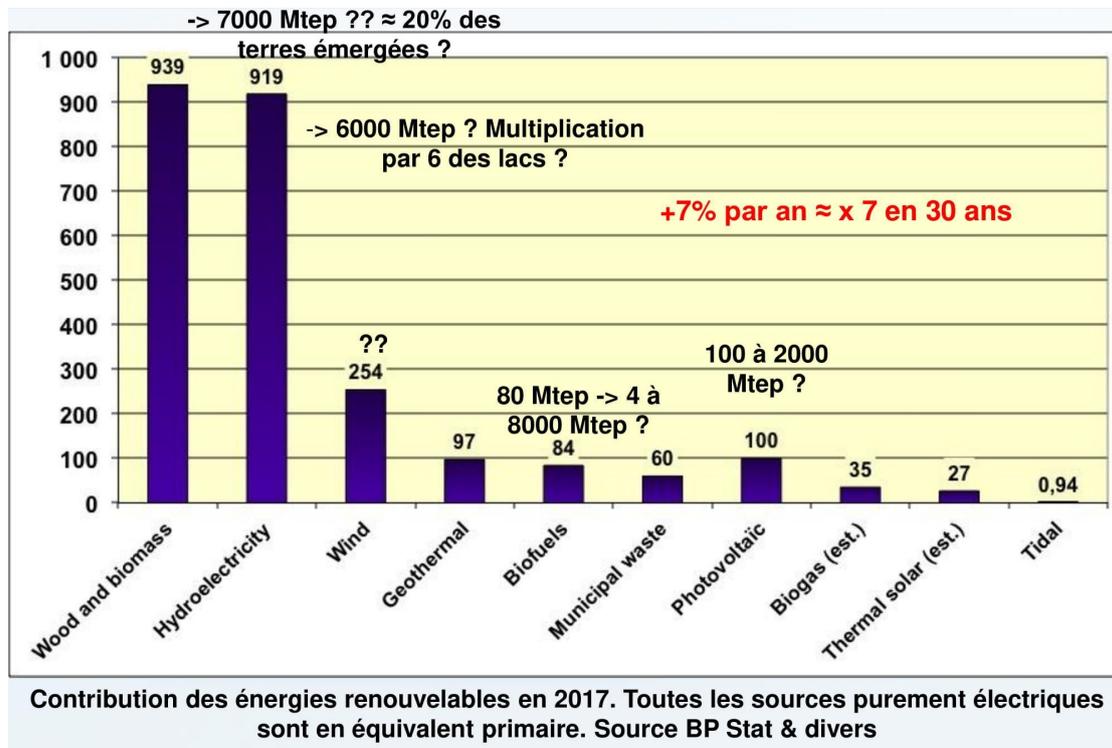
## 77. Je vous rappelle le cahier des charges



Diapositive 80.

Pour autant, pour finir avec « Est-ce qu'on va devenir un jour 100% renouvelable dans un contexte de PIB croissant? » – car je vous signale que même le scénario négaWatt considère que le PIB va croître : c'est un économiste qui a proposé le volet économique du scénario négaWatt en disant que le PIB allait croître. Exactement comme dans la Stratégie Nationale Bas Carbone – à ce moment, ça veut dire que vous devez satisfaire une équation de ce type. Vous devez avoir de plus en plus d'énergie (parce que le PIB répond essentiellement à la quantité de machines en fonctionnement, donc à l'énergie) et vous devez avoir de moins en moins de fossiles (et donc le rythme de croissance qu'on doit avoir pour le décarboné, c'est 7% par an). Si on veut tenir les accords de Paris. Et là-dedans j'ai inclus le nucléaire. Si on ne met pas le nucléaire, le rythme de croissance sur les autres ENR, c'est plutôt 10% par an.

## 78. Alors, qu'espérer des EnR ?



Diapositive 81.

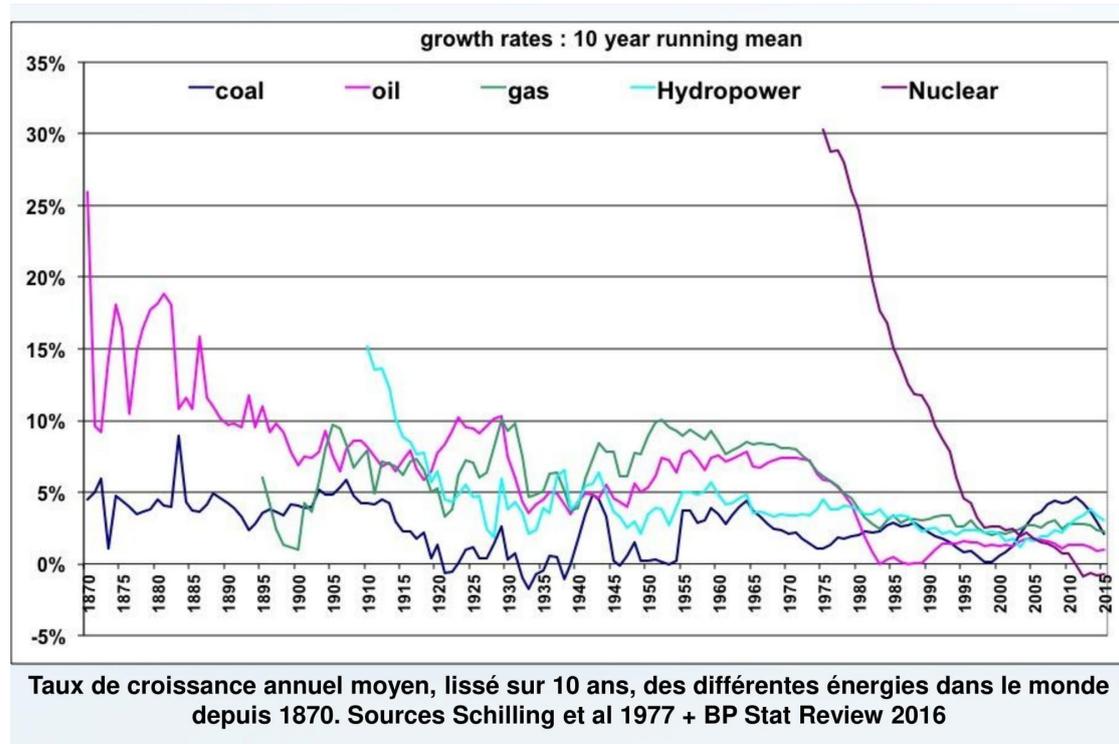
Alors voilà, on va jouer comme le banquier avec les intérêts composés. Si je fais 7% par an sur 30 ans, ça fait fois SEPT. C'est simple SEPT. Alors question : est-ce que je peux multiplier par SEPT l'approvisionnement en biomasse ? Ben, si on est toujours aussi nombreux, qu'on cultive toujours autant, même si on mange moins de viande mais que l'agriculture devient moins productive parce qu'on met moins d'engrais et moins de phytosanitaires... On retombe sur ce qui s'est passé à l'origine quand on était 100% EnR avec un problème de concurrence d'usage des sols, qui est qu'on ne peut pas utiliser les sols pour faire tout à la fois. Donc utiliser les sols pour faire à la fois de l'agriculture très extensive et plein de forêts, et tout ça avec une planète à 8 milliards d'individus, c'est compliqué. Pareil pour l'hydroélectricité : est-ce que je peux multiplier les lacs de barrage par SEPT ? Alors, c'est tout ça en même temps, j'insiste, puisque c'est 7% pour l'ensemble de l'approvisionnement renouvelable. On est d'accord ? C'est tout ça en même temps. Ça ne peut pas être la biomasse ou les barrages. C'est tout en même temps.

## 78. ALORS, QU'ESPÉRER DES ENR?

Donc, est-ce que je peux dans le même temps et en 30 ans multiplier par SEPT les lacs de barrage? Bon, voilà. Je vous parlais des agrocarburants. Donc, dans un monde dans lequel on doublerait la mobilité et où ça serait fait avec des agrocarburants. Vous voyez aujourd'hui on consomme 4 milliards de tonnes de pétrole par an, un peu plus, 4,2. Il faudrait donc passer à 8000 Mtep. 8 milliards de tonnes de carburant. Sachant qu'aujourd'hui les agrocarburants en font 70 millions. Est-ce qu'on va y arriver? Ce n'est pas complètement sûr. Donc, la réponse, c'est qu'il n'est pas complètement certain, quand on joue avec les règles de trois, qu'on retombe sur les résultats des modèles sophistiqués qui disent que 100% EnR, on va y arriver.

Alors là, je vous rappelle une règle essentielle que je vous invite à garder en tête toute votre vie professionnelle durant : quand une règle de trois qui vous semble pas complètement déconnante invalide les résultats d'un modèle très sophistiqué auquel vous ne comprenez rien, c'est que le modèle a tort. Et donc, la seule bonne question, c'est de savoir où. Mais j'insiste, ce n'est pas parce que le modèle est sophistiqué et que vous n'y comprenez rien, que le modèle est plus intelligent que vous. S'il n'est pas capable de retrouver les ordres de grandeurs auxquels vous parvenez avec une règle de trois bien posée, c'est que le modèle est faux. Il y a plein de modèles justes dans la vie. Le modèle qui fait voler l'avion est juste. L'avion ne s'écrase pas à chaque atterrissage. Donc, il y a plein de modèles justes. Mais si, encore une fois, ce à quoi vous arrivez avec une règle de trois ne recoupe pas un modèle sophistiqué, c'est que le modèle a tort. Alors, est-ce qu'on peut faire 7%? 10%? 15%? 20%? Parce qu'il est évident que si on est limité sur ces trucs-là, ça veut dire que là je dois faire, et en particulier sur le solaire et l'éolien, je dois faire des pourcentages de croissance de 20-30-40% par an. On est d'accord?

## 79. +30% par an, combien de temps ?



Diapositive 82.

Question : est-ce que dans le passé, on a su faire quelques dizaines de % de croissance par an longtemps ? Eh bien, je vous remontre un ensemble de courbes parce que je vous avais montré ça juste pour le pétrole.

Rappelez-vous. Je vous avais montré le rythme de croissance de la production de pétrole dans le monde sur le dernier siècle et demi. Et je vous avais montré que, partant de 15% par an, c'était descendu maintenant quasiment à zéro.

Vous pouvez faire ça avec toutes les énergies sur lesquelles vous avez des séries longues. Et ce que vous voyez, c'est que des énergies qui restent en taux de croissance au-dessus de 10% pendant très longtemps, ça n'arrive jamais. Et même le nucléaire, qui était parti de très haut (parce que quand vous partez de epsilon, c'est facile d'avoir des très forts taux de croissance tous les ans), eh bien très vite, vous retombez à des taux de croissance qui sont inférieurs à 5 ou 10%...

## 79. +30% PAR AN, COMBIEN DE TEMPS?

Et si je prends le problème à l'envers, si j'applique 8% de taux de croissance à ça et à ça [montre les renouvelables sur la diapositive précédente], 10% de taux de croissance en 30 ans, vous ne tombez absolument pas sur ce qui permet d'éviter les deux tiers ou les trois quarts des combustibles fossiles en 30 ans.

Voilà donc, la conclusion de ce cours sur les énergies renouvelables, c'est par là où j'ai commencé, c'est-à-dire :

- Ça regroupe des réalités très diverses.
- C'est très dépendant de la géographie d'un pays. Donc, tous les pays ne partent pas à armes égales dans la course.
- Si vous avez beaucoup de soleil, pour exploiter le soleil vous êtes quand même mieux partis que la Suède ou l'Antarctique.
- Si vous avez beaucoup de forêts, c'est quand même beaucoup plus facile de chauffer tout le monde au bois ou de chauffer quasiment tout le monde au bois comme en Suède que si vous êtes en Belgique.
- Si vous avez beaucoup de montagnes, c'est beaucoup plus facile (comme les norvégiens) d'avoir plein de barrages (et en plus beaucoup de montagnes par habitant) et de consommer trois fois l'électricité qu'on a en France, que si vous êtes à nouveau en Belgique, etc.

Les énergies renouvelables, c'est très dépendant des conditions géographiques locales. Et considérer que, partout dans le monde, ces énergies vont permettre de nous débarrasser des énergies fossiles, alors même qu'historiquement, c'est l'inverse qui s'est passé, et tout ça pour pas cher, est un résultat sur lequel à titre personnel, je ne parierais pas mes propres deniers.

Donc, il est vraisemblable que l'avenir qui va s'écrire (et dont on parlera la prochaine fois de la méthode de gestion qui va avec, donc de la comptabilité carbone) sera fait d'un mélange d'économies d'énergie (et donc pour partie de contraction économique), de nucléaire, et d'énergie renouvelable dans des proportions qui dépendront pour le coup des contextes géographiques, politiques, sociaux et culturels locaux.

*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).