



FCHg!

Discover
the energy
of hydrogen

Grzegorz Karwasz
Anna Kamińska

Uniwersytet Mikołaja Kopernika

Matériel didactique : collège et lycée.

« Sources d'énergie alternatives » n'est pas le meilleur titre



Premièrement, nous ne parlons pas de la « production » d'énergie, mais de sa *transformation*. Les physiciens pensent que la quantité totale d'énergie dans l'Univers est conservée.

La masse totale, selon l'équation $E=mc^2$, entre également dans ce budget. La conversion d'une partie de la masse en énergie est la clé de la « production » d'énergie dans le noyau du Soleil, dans les centrales nucléaires et dans la centrale de fusion ITER prévue par Cadarache (Centre d'études nucléaires à Saint-Paul-lès-Durance).

Les sources d'énergie « alternatives » ne sont pas non plus le meilleur terme. On parle parfois de sources « renouvelables », c'est-à-dire le vent, l'eau, le photovoltaïque et, parfois, l'utilisation de la biomasse.

Une centrale nucléaire, probablement quelque part en Allemagne. Chaque « source » est spécifique.



This project has received funding from the Fuel Cells and Hydrogen 2 Joint Undertaking (JU) under grant agreement No 826246. The JU receives support from the European Union's Horizon 2020 research and innovation programme and Italy, Denmark, Poland, Germany, Switzerland.

L'humanité, dans son histoire, a appris à se tourner vers diverses des « sources » d'énergie

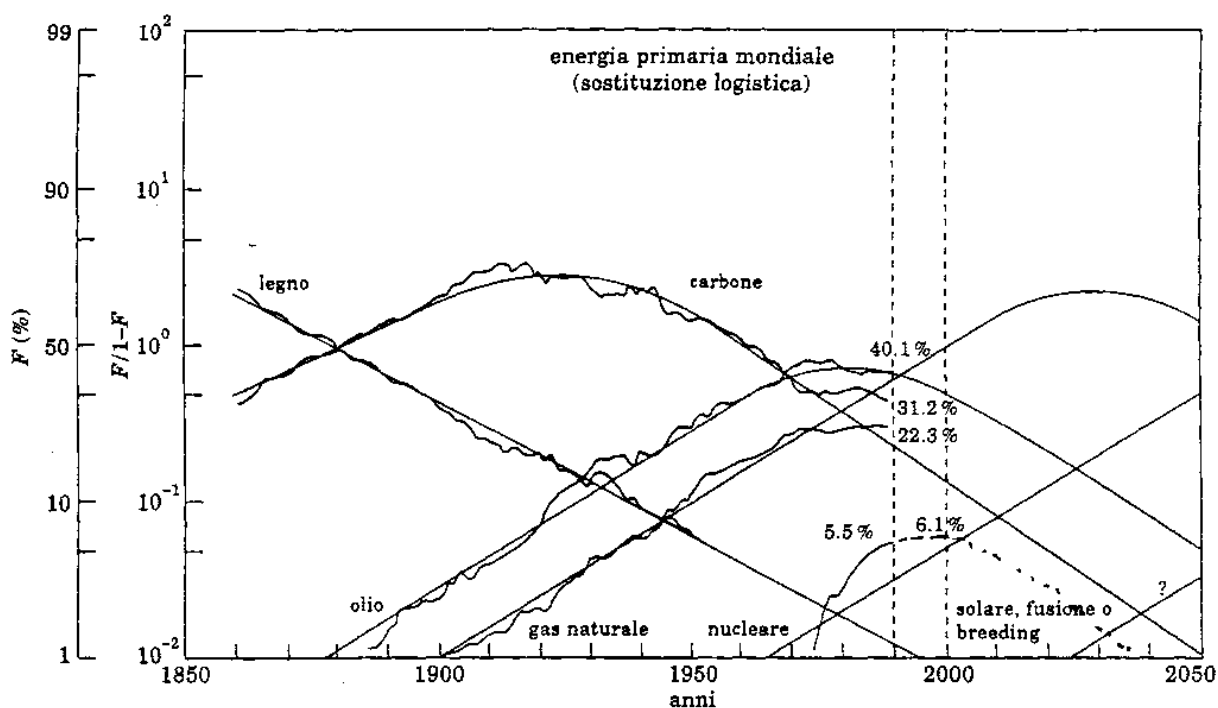


Fig. 3. - Analisi storica (IIASA, C. Marchetti) della evoluzione delle energie primarie a livello mondiale. Le curve di modello seguono i criteri logistici delle sostituzioni di mercato e si proiettano sugli anni futuri dando le previsioni fino al 2050.

Il s'agit d'une vieille illustration, datant des années 1990, montrant les changements prévus dans les « sources » d'énergie. Nous sommes maintenant à la limite de ces prédictions, ce qui nous permet de les comparer avec la situation réelle.

Une observation précieuse que nous pouvons faire ici est que les différents *vecteurs* d'énergie atteignent un maximum d'utilisation (le charbon au début du XXe siècle), après quoi la courbe chute.

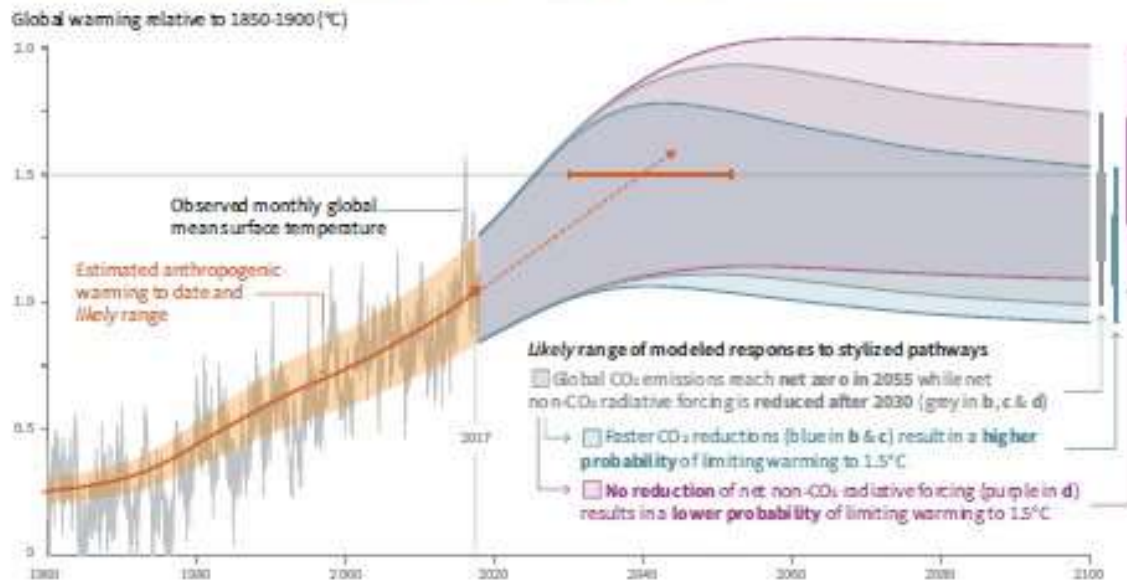
Nous constatons également que les prévisions ne tiennent pas compte des nouvelles inventions comme le gaz de schiste.

Le point d'interrogation indique : solaire (déjà prêt), thermonucléaire (pas encore prêt), etc.

Les scénarios les plus optimistes supposent que nous mettrons fin à l'augmentation des émissions de CO₂

Cumulative emissions of CO₂ and future non-CO₂ radiative forcing determine the probability of limiting warming to 1.5°C

a) Observed global temperature change and modeled responses to stylized anthropogenic emission and forcing pathways



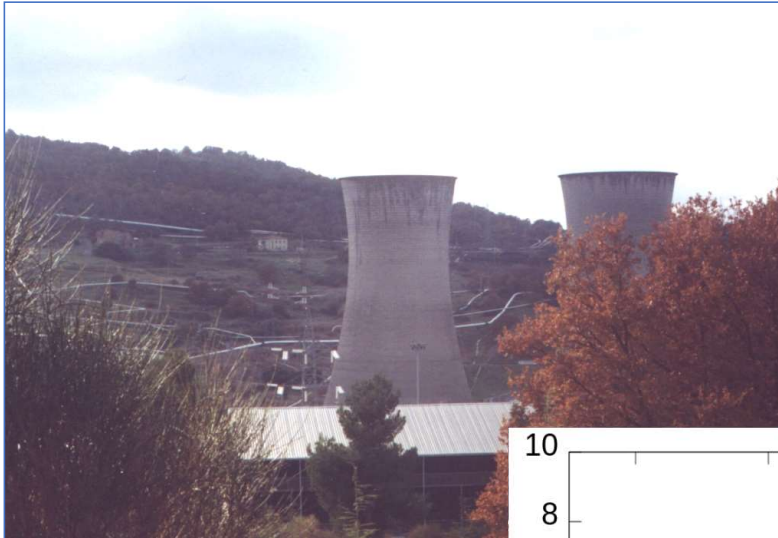
Il est clair que pour arrêter/ralentir le processus de réchauffement de la planète, nous devons mettre fin aux émissions de CO₂. Les scientifiques soulignent que la durée de vie du CO₂ émis est de 150 ans.

Rappelant que dans le passé (lointain) de la Terre, les températures étaient légèrement (1-3 °C) plus élevées, le panel du GIEC, dans son dernier rapport (XII 2018), postule comme l'un de ses objectifs une augmentation ne dépassant pas 1,5 ° d'ici 2040.

Si nous ne faisons rien pour réduire les émissions de CO₂, la température augmentera de 2 °C.

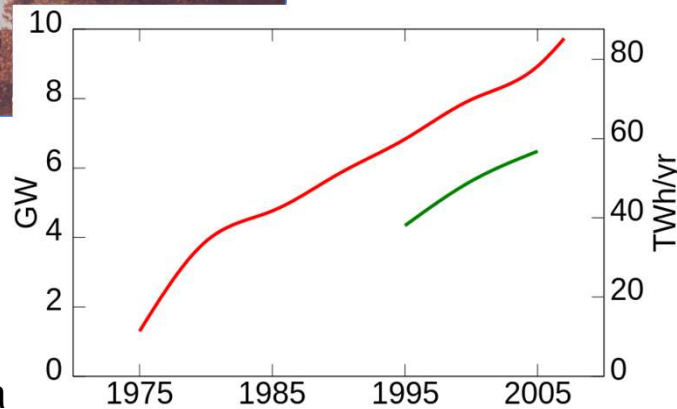
Pas plus : il n'y a plus autant de carbone à brûler.

Des sources d'énergie alternatives, c'est-à-dire n'émettant pas de CO₂, sont nécessaires : vent, géothermie, etc.



Centrale géothermique,
Pozzuoli, Italie

Wikipédia



Les sources d'eau chaude géothermiques sont connues depuis l'Antiquité. Certains pays, comme l'Islande, fondent toute leur économie sur ces sources.

Si nous comparons le flux d'énergie solaire (1367 W/m²) au flux d'énergie géothermique (environ 65 mW/m²), nous constatons une énorme différence.

La moitié de cette énergie est la chaleur de l'intérieur de la Terre qui se refroidit encore, l'autre moitié est l'énergie des désintégrations radioactives (²³⁸U, ⁴⁰K, ²³²Th).

Les ressources totales de ce type d'énergie sont faibles : un potentiel global de 10 GW pourrait être fourni par 20 unités de centrales nucléaires.

Des sources d'énergie alternatives, c'est-à-dire n'émettant pas de CO₂, sont nécessaires : vent, géothermie, etc.

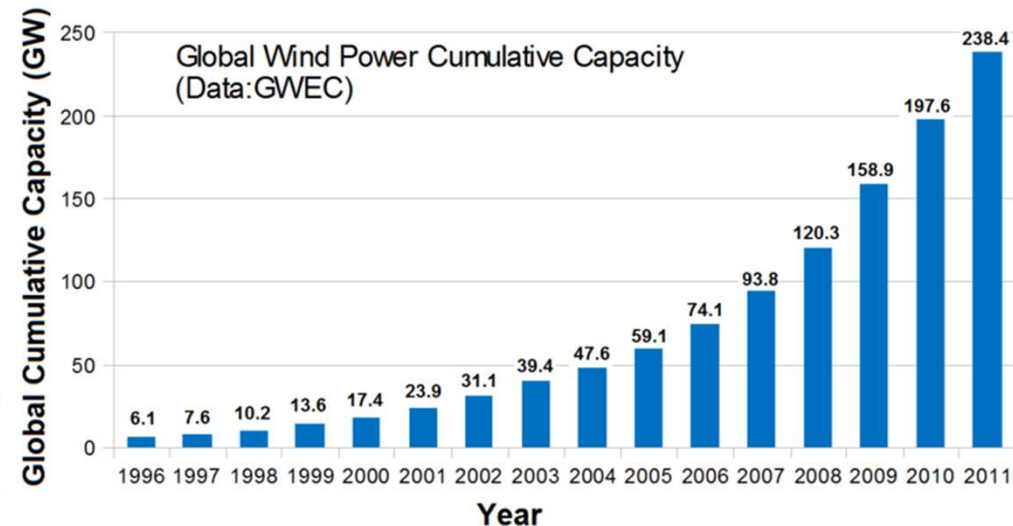


Au Danemark (2018), plus de 40 % de la capacité des centrales électriques est fournie par le vent. Le Danemark est un pays particulièrement venteux.

D'autres pays investissent également dans des centrales éoliennes. Même l'Italie « ensoleillée » tire 3 % de son énergie du vent.

La croissance, au niveau mondial, est exponentielle (voir ci-dessous).

Ø 10m → 20-30 kW
Ø 90m → 3 MW = 1000 d'exploitations agricoles



IPCC panel, décembre 2018

This project has received funding from the Fuel Cells and Hydrogen 2 Joint Undertaking (JU) under grant agreement... The JU receives support from the European Union's Horizon 2020 research and innovation programme and Italy,

Les panneaux photovoltaïques semblent être les plus prometteurs



L'efficacité des panneaux photovoltaïques est limitée par les lois de la physique :

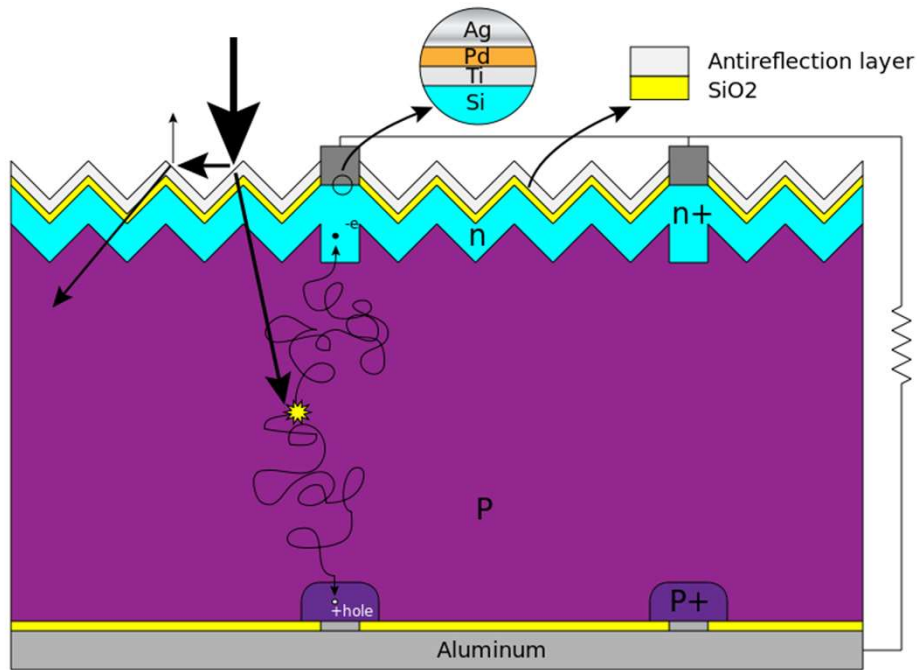
1. L'énergie d'un photon doit être supérieure à l'écart énergétique d'un semi-conducteur. Pour le silicium, cet écart est de $1,1 \text{ eV}^*$, ce qui signifie que même les rayons IR transportent suffisamment d'énergie (les photons de la lumière rouge ont une énergie de $1,8 \text{ eV}$).
2. Cependant, la tension dans un panneau photovoltaïque (Si) n'est pas de $1,1 \text{ V}$ mais d'environ $0,6\text{-}0,7 \text{ V}$. La raison en est la polarisation de la jonction *n-p*.
3. Si le photon a une énergie supérieure à l'écart énergétique, l'excès d'énergie est converti en chaleur. Si elle est inférieure à l'écart, toute l'énergie est convertie en chaleur. Ainsi, l'efficacité intrinsèque d'un seul panneau de Si est de l'ordre de $10\text{-}15 \%$.
4. Des rendements plus élevés peuvent être fournis par des semi-conducteurs plus coûteux, tels que le GaAs, qui ressemble dans une certaine mesure au Si : dans les vols spatiaux, le coût accru des panneaux photovoltaïques ne constitue pas un problème important.

- 16 % dans les modules à hétérojonction ;
- 14 % dans les modules en silicium monocristallin ;
- 13 % dans les modules en silicium polycristallin ;
- 10 % dans les modules en silicium microsphérique ;
- 6 % dans les modules en silicium **amorphe**.

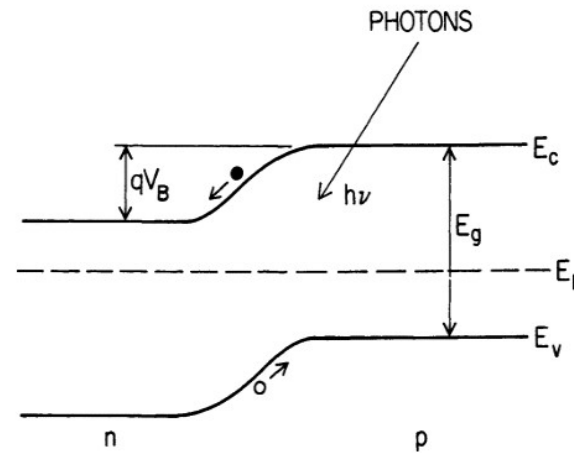


This project has received funding from the Fuel Cells and Hydrogen 2 Joint Undertaking (JU) under grant agreement No 826246. The JU receives support from the European Union's Horizon 2020 research and innovation programme and Italy, Denmark, Poland, Germany, Switzerland.

Peut-on construire des panneaux photovoltaïques (PV) plus efficaces ?



Les applications pratiques des panneaux PV nécessitent une couche à plusieurs niveaux (Source : Wikipédia)

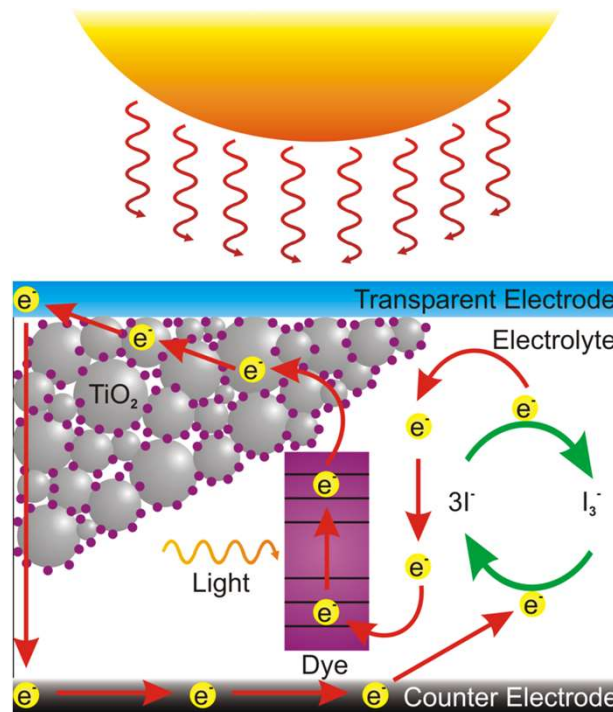
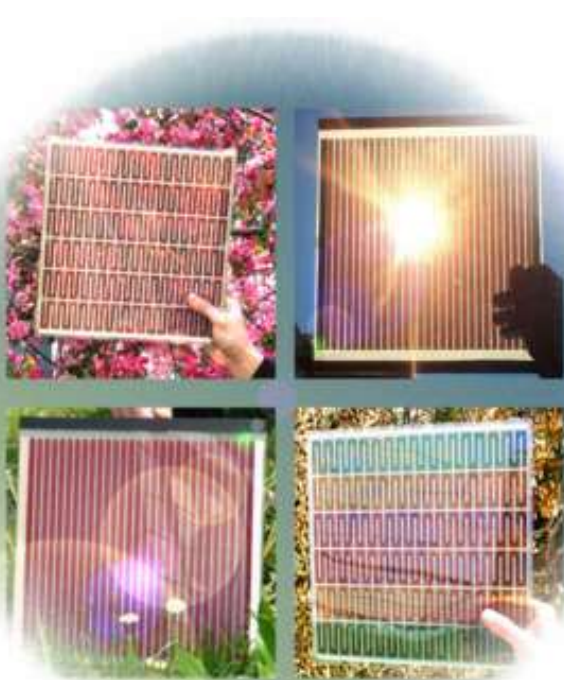


La cellule photovoltaïque est constituée de deux types de semi-conducteurs : Si dopé P (type *n* – les électrons sont des porteurs de charge) et Si dopé B (type *p* – avec des électrons « manquants », c'est-à-dire des « trous » positifs comme porteurs de charge).

Fonctionnement de la jonction *n-p* : les photons (ceux qui portent une énergie supérieure au gap E_g) forment des paires d'électrons et de trous. Les électrons « glissent » le long de la bande de conduction (inclinée). E_c est la limite (inférieure) de la bande de conduction, E_v est le bord (supérieur) de la bande de valence. E_f est ce que l'on appelle le niveau de Fermi, qui se forme lorsque deux semi-conducteurs sont connectés. V_B est la tension utile : 0,4 V pour Si.

<https://www.sciencedirect.com/topics/engineering/pn-junction>

Des cellules photovoltaïques bon marché et flexibles utilisent un substrat peint en blanc



Une question importante dans les cellules photovoltaïques est la "récolte" du spectre solaire. L'énergie du photon doit correspondre exactement à la bande interdite : les photons de faible énergie sont inutiles et les photons de forte énergie provoquent un excès d'énergie nuisible.

Michael Grätzel a surmonté cette difficulté en basant la cellule sur un substrat blanc (TiO_2 nanostructuré, un semi-conducteur avec une bande interdite plutôt élevée). La collecte du spectre solaire se fait avec un pigment brun artificiel.

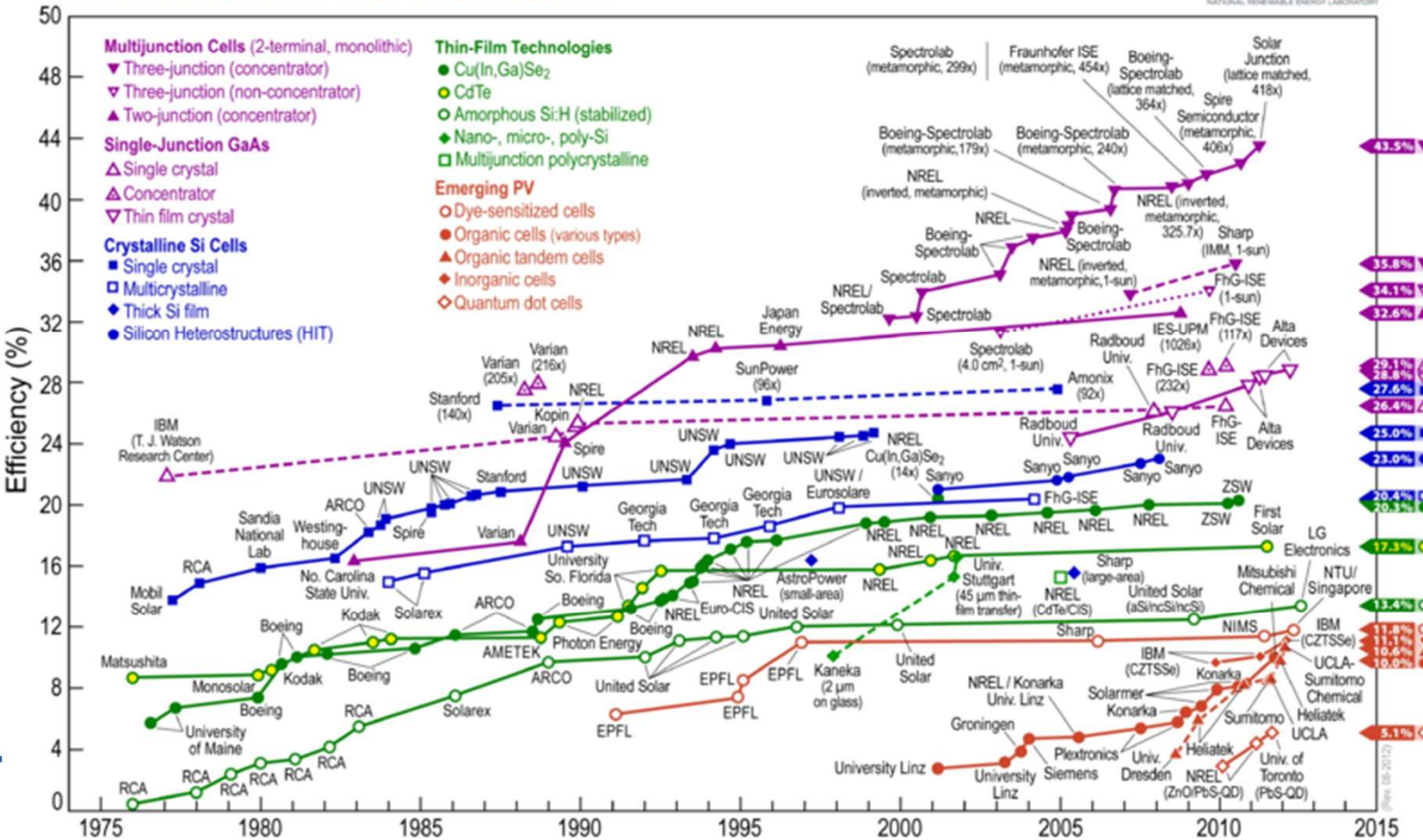
La cellule de Grätzel peut être fabriquée sous forme de films souples et bon marché.

https://en.wikipedia.org/wiki/Dye-sensitized_solar_cell

Les panneaux photovoltaïques semblent être les plus prometteurs



Best Research-Cell Efficiencies



Des rendements plus élevés peuvent être obtenus par l'astuce consistant à « collecter » successivement des parties distinctes du spectre solaire (voir leçon 2) : les photons les plus énergétiques (lumière bleue) sont absorbés en premier ; les photons moins énergétiques ne sont pas absorbés, etc.

Dans les cellules PV à trois étages, des rendements allant jusqu'à 40 % ont été atteints.

Le problème est, comme d'habitude, le coût.

La combustion de la biomasse est-elle « verte » ?



Centrale de cogénération à Metz.
La station utilise la biomasse de déchets de bois comme source d'énergie et fournit de l'électricité et de la chaleur à 30 000 foyers.

La source traditionnelle de chaleur avant l'ère industrielle était le bois. Aujourd'hui, les « granulés de bois » sont devenus très populaires. Sont-ils respectueux de l'environnement ? Lisez ce que dit Wikipédia :

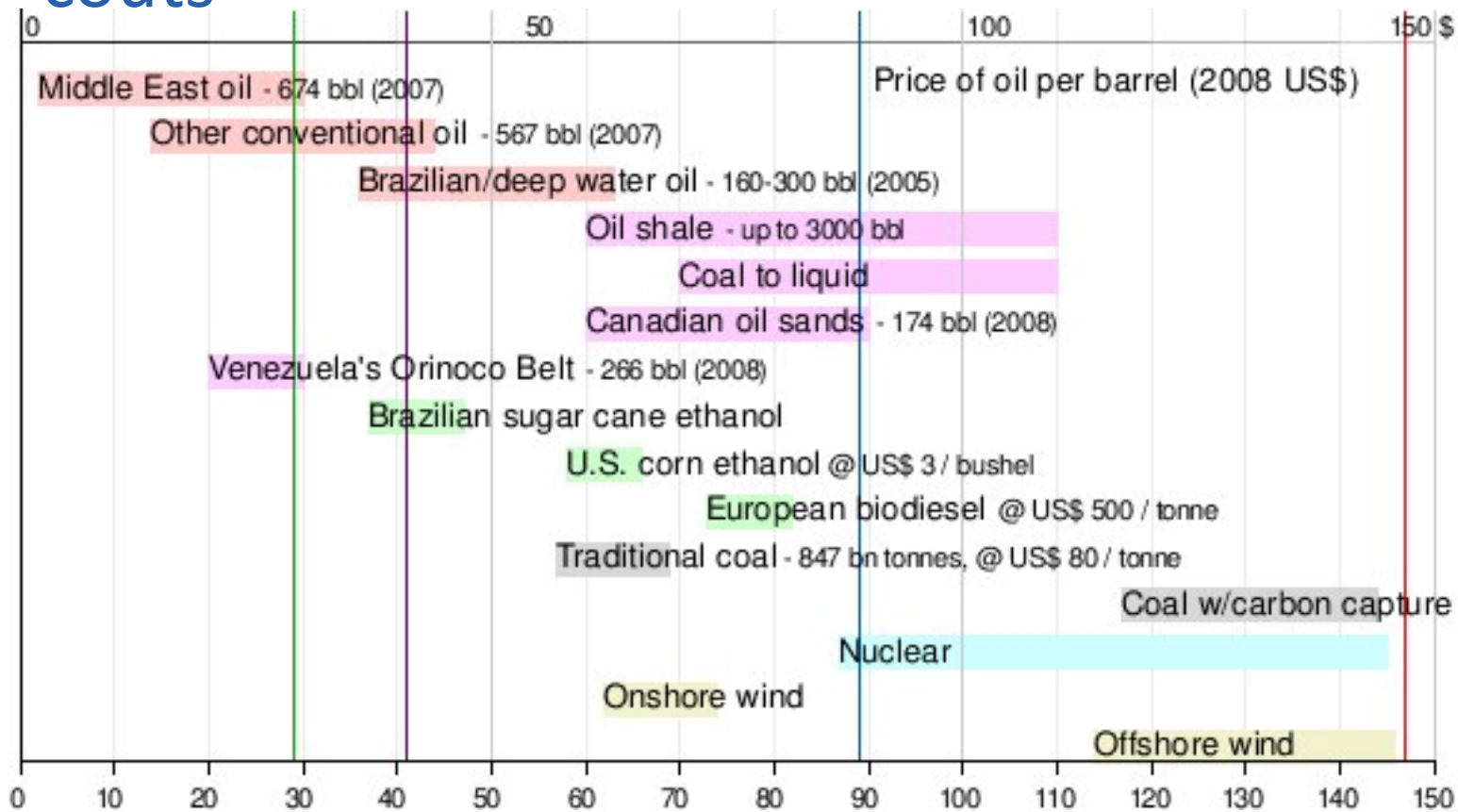
« La combustion de la biomasse dégage des émissions de carbone, environ un quart de plus que la combustion du charbon (par unité d'énergie), mais elle a été classée comme une source d'énergie « renouvelable » dans le cadre juridique de l'UE et des Nations unies, car les plantes peuvent être régénérées.

L'utilisation de la biomasse comme combustible entraîne une pollution de l'air sous la forme de monoxyde de carbone, de dioxyde de carbone, de N_2O , de NO , de NO_2 (oxydes d'azote), de composés organiques volatils, de particules et d'autres polluants à des concentrations supérieures à celles des sources de combustible traditionnelles telles que le charbon ou le gaz naturel. »

Źródło: <https://en.wikipedia.org/wiki/Biomass>



Le choix des sources d'énergie dépend des coûts



Comme le montre cette étude approfondie du Département américain de l'énergie, l'éventail des coûts est large : l'éolienne en mer est le plus cher.

Le charbon est bon marché, sauf si l'on recourt au captage du CO₂.

L'essence est toujours la moins chère.

Le coût du photovoltaïque dépend fortement du pétrole : la production de silicium consomme d'énormes quantités d'énergie.

La politique énergétique doit être décidée par des experts.

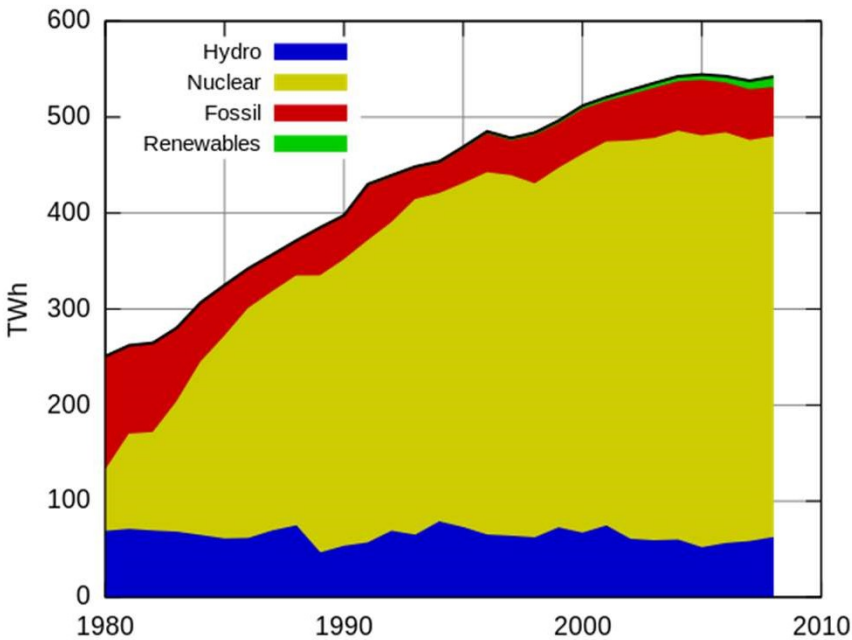
Département de l'énergie des États-Unis



This project has received funding from the Fuel Cells and Hydrogen 2 Joint Undertaking (JU) under grant agreement No 826246. The JU receives support from the European Union's Horizon 2020 research and innovation programme and Italy, Denmark, Poland, Germany, Switzerland.

Qu'en est-il des centrales nucléaires ?

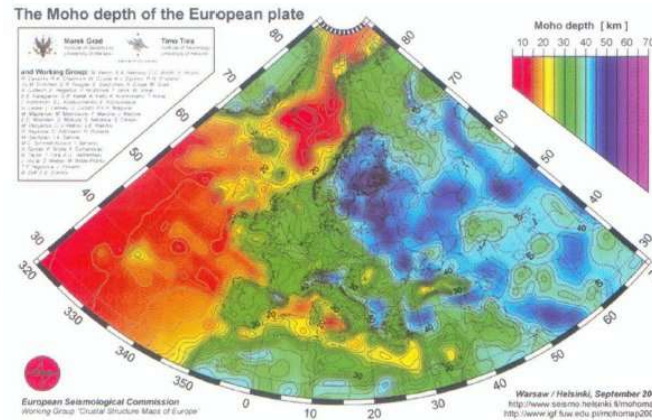
Electricity Production in France



Les centrales nucléaires sont chères : nous paierons 4 à 5 milliards de dollars pour une unité de 500 MW. La Corée construit 4 unités dans les Emirats Arabes.

Le coût de l'électricité en France est inférieur à la moyenne de l'UE-28, ce qui s'explique en partie par la part importante des centrales nucléaires (à base d'uranium).

Une centrale nucléaire (1 GW) utilise environ 1 kg d'uranium par jour, contre 10 000 tonnes de charbon dans une centrale classique.



Rys. 4. Głębokość, na jakiej znajduje się nieciągłość Moho dla płyty europejskiej. Na najmniejszej głębokości znajduje się ona w obrębie oceanów (kolor czerwony, pomarańczowy), najgłębiej zaś położona jest w rejonie Finlandii i Estonii. Skorupa ma większą grubość również z rejonie zderzeń płyt – pod Alpami, Pirenejami i górami Kaukazu.

Les dépôts de combustible usé (c'est-à-dire les « cendres » hautement radioactives) constituent un autre problème.

En Europe de l'Est, les roches stables magmatiques ont jusqu'à 70 km d'épaisseur.

Le thorium est l'une des alternatives à l'uranium

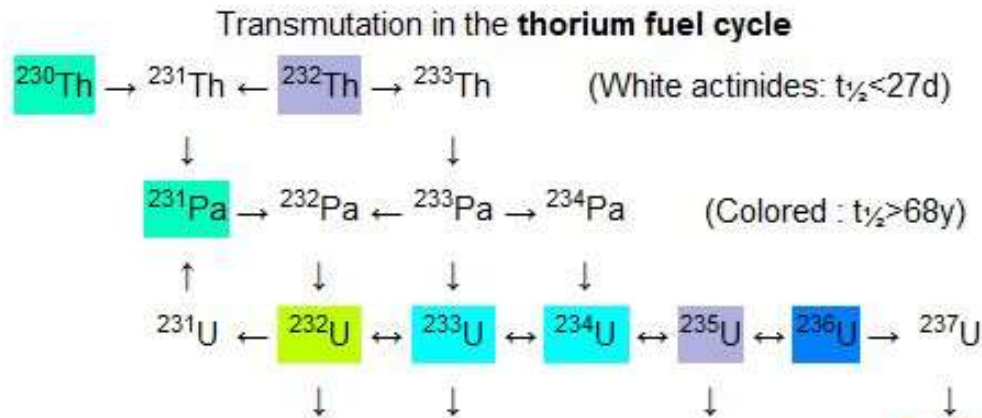


Table 9. Total Direct investment costs.

Item	Best Estimate Million US\$	Lower limit Million US\$	Upper limit Million US\$
EGU	58.98	45.61	67.51
Secondary Loop	59.55	45.69	72.21
Auxiliary Systems	7.69	6.15	9.23
Accelerator System	184.45	165.45	217.10
Mech. & Electrical Classical Eq.	233.50	210.15	256.85
General Assembly	37.88	30.30	45.45
Instrumentation & Control	35.00	28.00	42.00
Structures & Civil Work	175.00	140.00	210.00
Total	792.05	671.35	920.35

Un fait généralement négligé concernant les centrales électriques à base d'uranium est que ses minerais sont en voie d'épuisement. Certains combustibles ont été produits à bas prix sous forme d'uranium « dilué » provenant de bombes nucléaires. Cependant, avec une faible teneur en uranium, les minerais peuvent devenir du « carbone jaune ».

Il existe un autre élément chimique voisin de l'uranium sur le tableau périodique de Mendeleïev : le thorium. Il est peu radioactif et abondant, par exemple, dans les sables de la Baltique.

Un réacteur à base de thorium a été proposé par le lauréat du prix Nobel italien, (pour ses découvertes sur les particules élémentaires) Carlo Rubbia. L'avantage d'un tel réacteur est qu'il est auto-stable : le thorium a besoin d'une source externe de neutrons.

Le problème est qu'aucun pays ne veut la construire.

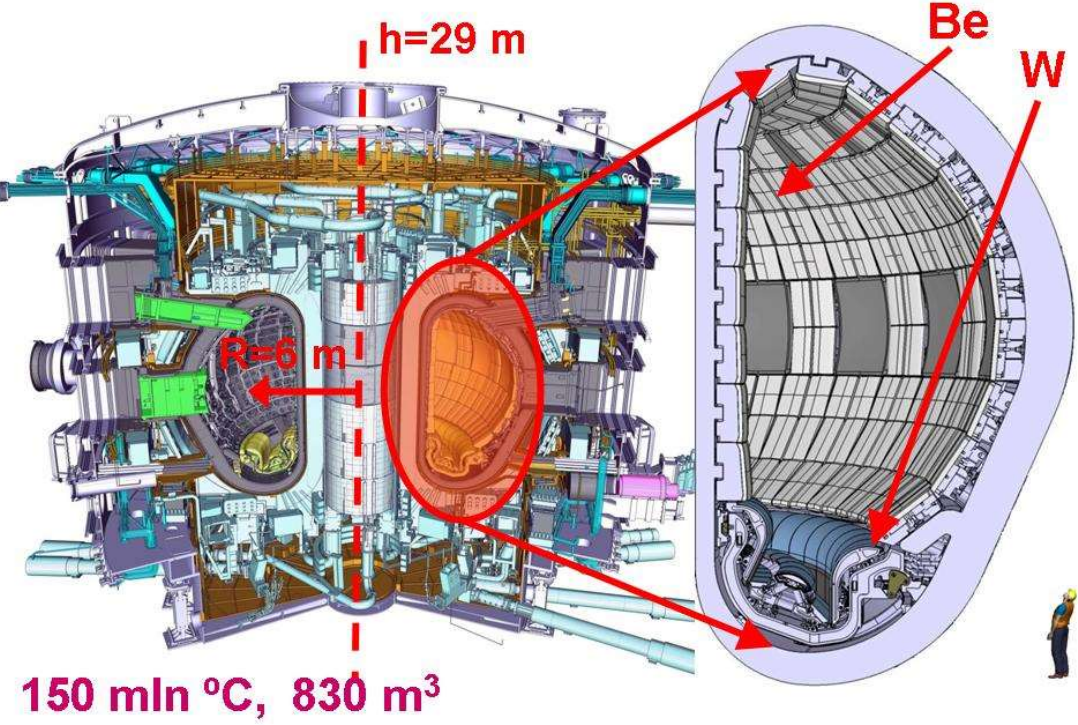


GK est un expert de l'UE qui évalue des projets de recherche.

This project has received funding from the Fuel Cells and Hydrogen 2 Joint Undertaking (JU) under grant agreement No 826246. The JU receives support from the European Union's Horizon 2020 research and innovation programme and Italy, Denmark, Poland, Germany, Switzerland.

Une centrale à fusion – c'est pour quand ?

The ITER Tokamak

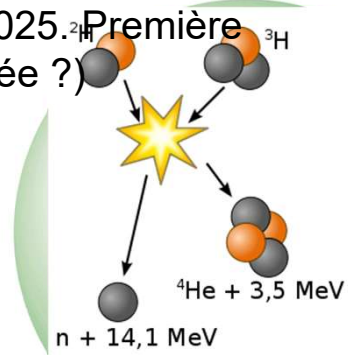


© D.J. Campbell, ITER, with permission

- Peut-on contrôler la réaction de fusion (c'est-à-dire la fusion des noyaux de He avec H, comme dans le Soleil) ?
- Les scientifiques ont appris à le contrôler il y a une cinquantaine d'années avec de gros aimants dans des machines appelées tokamaks.
- Mais la réaction ne produit pas d'énergie ?
- Nous obtenons de l'énergie nette de la réaction depuis 20 ans maintenant : ${}^3\text{H} + {}^2\text{H} \rightarrow {}^4\text{He} + n$, au JET en Angleterre, par exemple.
- Alors pourquoi ne l'utilisons-nous pas ?
- Car il faut ajouter le coût du maintien de l'électricité dans les aimants, du refroidissement, etc.



La première machine de production d'énergie nette de 500 MW devrait être prête à Cadarache, vers 2025. Première application industrielle – vers 2050 (en Corée ?)



GK est un expert de l'IAEA sur les processus nucléaires dans ITER.



This project has received funding from the Fuel Cells and Hydrogen 2 Joint Undertaking (JU) under grant agreement No 826246. The JU receives support from the European Union's Horizon 2020 research and innovation programme and Italy, Denmark, Poland, Germany, Switzerland.

Le futur peut être différent



Dresden Seminar
22.Aug. 2017

A possible Scenario of World Energy



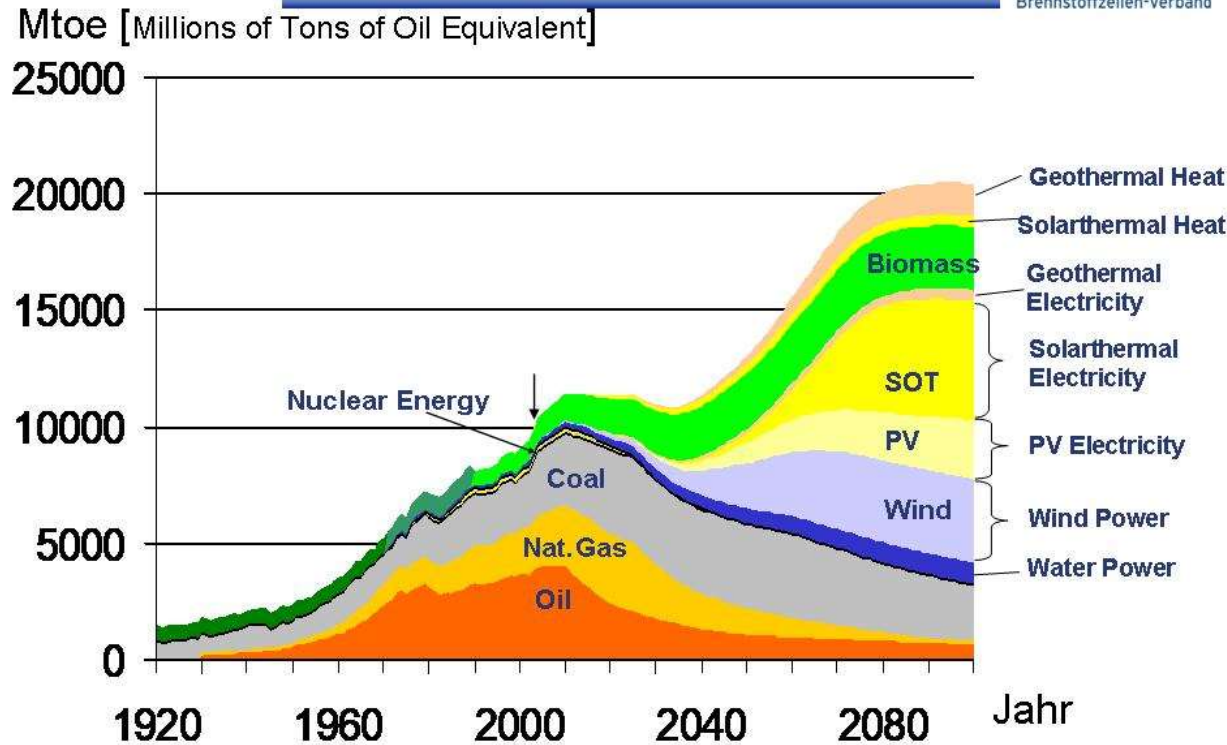
Les prédictions sur les technologies futures sont très risquées. Nous extrapolons généralement ce que nous savons *déjà*.

En 2100, la demande d'énergie ne sera pas inférieure à celle d'aujourd'hui. Des « sources » connues comme l'eau, le vent, le photovoltaïque seront utilisées.

Le rayonnement solaire peut être concentré par un immense miroir, chauffant l'eau pour une turbine (solaire thermique). Il existe probablement d'autres solutions.

Le problème sera le stockage de l'énergie : **l'hydrogène** est une possibilité.

Il ne fait aucun doute que de nouveaux spécialistes seront nécessaires.



Merci à : Dr Johannes Töpler, Deutscher Wasserstoff- und Brennstoffzellenverband

This project has received funding from the Fuel Cells and Hydrogen 2 Joint Undertaking (JU) under grant agreement No 826246. The JU receives support from the European Union's Horizon 2020 research and innovation programme and Italy, Denmark, Poland, Germany, Switzerland.

Le vrai problème ne sera pas la production, mais le stockage



Dresden Seminar
22.Aug. 2017

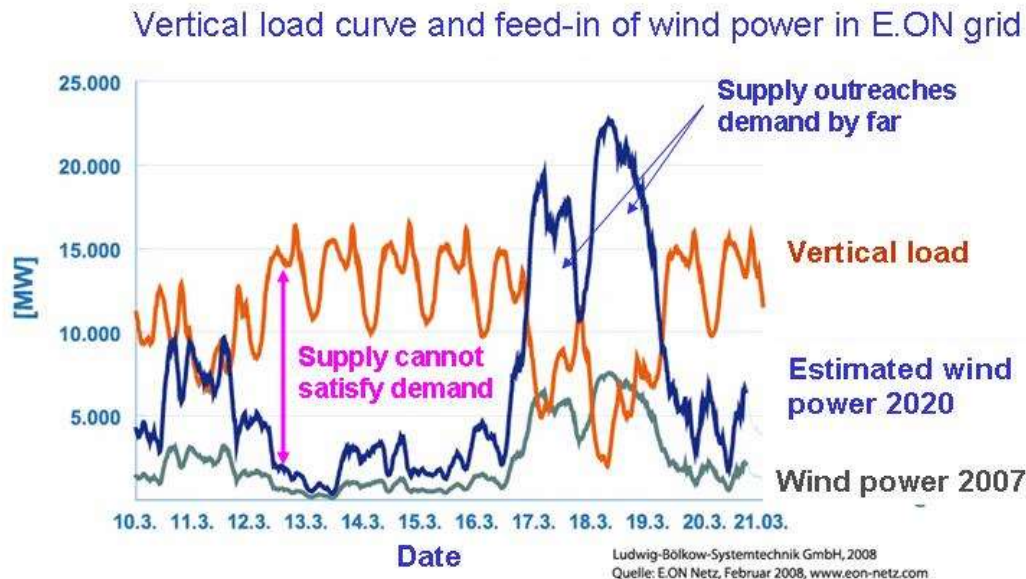
Fluctuating renewable electricity



Presque toutes les « sources » d'énergie de l'image précédente dépendent du vent et du soleil, c'est-à-dire de la météo : elles *produisent* de l'énergie quand elles le peuvent, et non quand on en a besoin.

Comme vous pouvez le voir sur la photo ci-contre, il y aura déjà un problème de pénurie d'énergie en Allemagne l'année prochaine, lorsqu'il n'y aura ni vent ni soleil.

Produire de l'**hydrogène** dans des cellules photovoltaïques et le stocker dans de grands réservoirs est une solution possible pour combler les déficits énergétiques.



Merci à : Dr Johannes Töpler, Deutscher Wasserstoff- und Brennstoffzellenverband

This project has received funding from the Fuel Cells and Hydrogen 2 Joint Undertaking (JU) under grant agreement No 826246. The JU receives support from the European Union's Horizon 2020 research and innovation programme and Italy, Denmark, Poland, Germany, Switzerland.

Expériences avec le photovoltaïque



- Un grand nombre de jouets sont alimentés par des sources photovoltaïques (voitures, animaux, calculatrices). Veuillez en trouver autant que possible et les apporter à l'école.
- L'enseignant prépare différentes sources de lumière : ampoules LED, ampoules à économie d'énergie, ampoules classiques. Il est important d'en préparer plusieurs, même du même type. Notez la puissance nominale consommée par chacun d'eux.
- Les élèves sont répartis en groupes de 3-4 et se déplacent avec leurs « jouets » d'une source lumineuse à l'autre : ils vérifient quelle est la distance maximale de la source lumineuse à laquelle les jouets fonctionnent encore. Ils prennent des notes.
- Accordez 15 minutes pour discuter des résultats. Les conclusions ne seront pas faciles : chaque cellule photovoltaïque peut avoir un rendement et une sensibilité spectrale différents, réagissant différemment aux différentes sources de lumière.



This project has received funding from the Fuel Cells and Hydrogen 2 Joint Undertaking (JU) under grant agreement No 826246.
The JU receives support from the European Union's Horizon 2020 research and innovation programme and Italy, Denmark, Poland, Germany, Switzerland.

Débat d'élèves



L'enseignant divise la classe en groupes, chacun d'eux devant préparer pour la leçon suivante les arguments en faveur de la « source » d'énergie choisie : photovoltaïque, éolienne, hydraulique, nucléaire (?), fusion, biomasse.

- Chaque groupe prépare une analyse des avantages et des coûts (investissement, fonctionnement, démantèlement, coûts sociaux, risques sanitaires).
- Défendez votre « source » d'énergie autant que possible : ne présentez pas les inconvénients aux autres groupes avant qu'ils ne le demandent : il s'agit d'un débat politique.





Nous terminons notre présentation avec une autre couverture de « Focus » :

L'ère de l'hydrogène arrive

Le nouveau carburant peut rendre le monde plus juste, plus pacifique et plus propre

