

# VII - LES ÉNERGIES RENOUVELABLES



## Chapitre 36 - Présentation des énergies renouvelables

▶ <https://youtu.be/t26nlH1rtCg>

## Chapitre 37 - L'exploitation directe du flux solaire

▶ <https://youtu.be/bEq7HF95Ru0>

## Chapitre 38 - L'hydroélectricité

▶ <https://youtu.be/eKF407pEE7Y>

## Chapitre 39 - La photosynthèse / biomasse et la géothermie

▶ [https://youtu.be/IK\\_ZaqtCLs](https://youtu.be/IK_ZaqtCLs)

## Chapitre 40 - L'éolien

▶ <https://youtu.be/ag5KgwS4dFk>

## Chapitre 41 - L'état actuel des ENR

▶ <https://youtu.be/5s17fdJatkM>

### 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...**

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

Définition : une énergie renouvelable est une énergie dont le stock se renouvelle au moins aussi rapidement à la vitesse à laquelle on la "consomme".

Cette définition est anthropocentrée : les échelles de temps retenues sont celles pertinentes pour l'espèce humaine

Energies renouvelables :

- tout ce qui dérive de la photosynthèse : la biomasse annuelle et tous ses dérivés
- l'hydroélectricité (action indirecte du soleil sur les éléments : cycle de l'eau, avec l'évaporation et la condensation)
- rayonnement solaire
- le vent

Ne font pas partie des énergies renouvelables :

- les énergies fossiles dont les délais de reconstitution sont hors de proportion
- l'énergie nucléaire qui dépend de l'uranium qui ne se renouvelle pas sur terre

Objectif de la leçon :

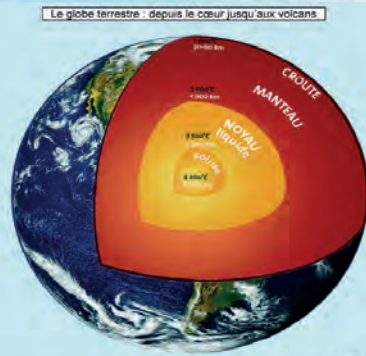
- montrer la grande diversité des énergies renouvelables en terme de potentiel, rendement, facilité d'utilisation, ... aucune homogénéité
- si l'énergie est renouvelable, le dispositif de capture peut l'être beaucoup moins... au point de remettre en cause le qualificatif renouvelable dans certains cas

## 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)**



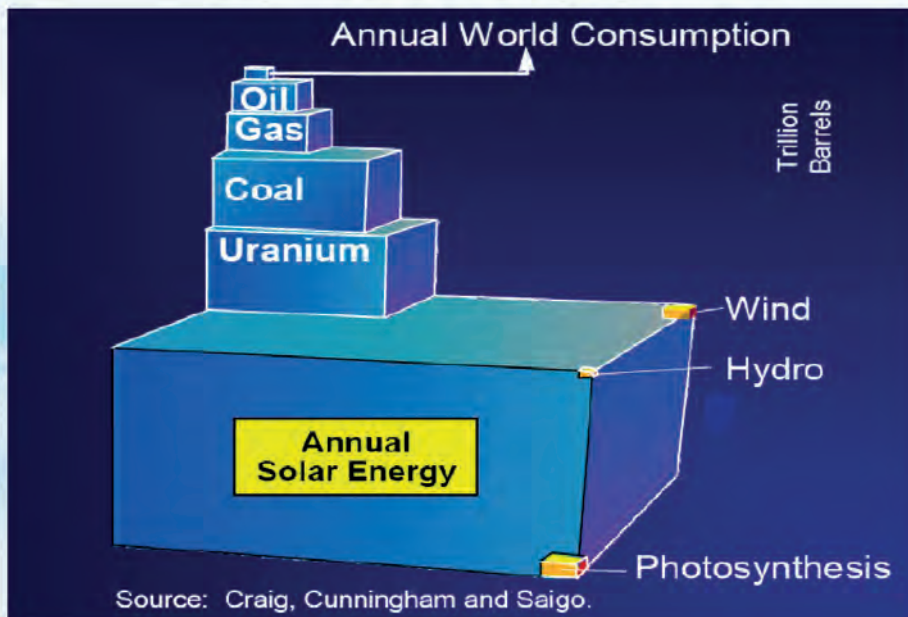
Jean-Marc Jancovici - Mines Paris Tech mai-juin 2019 - [www.manicore.com](http://www.manicore.com)

Suite de la définition

De “faux renouvelables” existent :

- exploitation thermique des déchets : pour parler d'énergie renouvelable, il faut être capable de comptabiliser les déchets organiques et de les séparer des autres sources incinérées (plastique)
- la géothermie : être capable de distinguer la géothermie de surface et la géothermie profonde. Cette dernière, même si elle est inépuisable à l'échelle humaine, n'est pas renouvelable. La terre ne se réchauffe pas elle-même (sauf à considérer le flux annuel / l'incrément de chaleur très faible issu de la désintégration de quelques éléments radioactifs présents dans les profondeurs, phénomène continu de décroissance radioactive du globe)

## Le verre à moitié plein : quelle abondance !



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

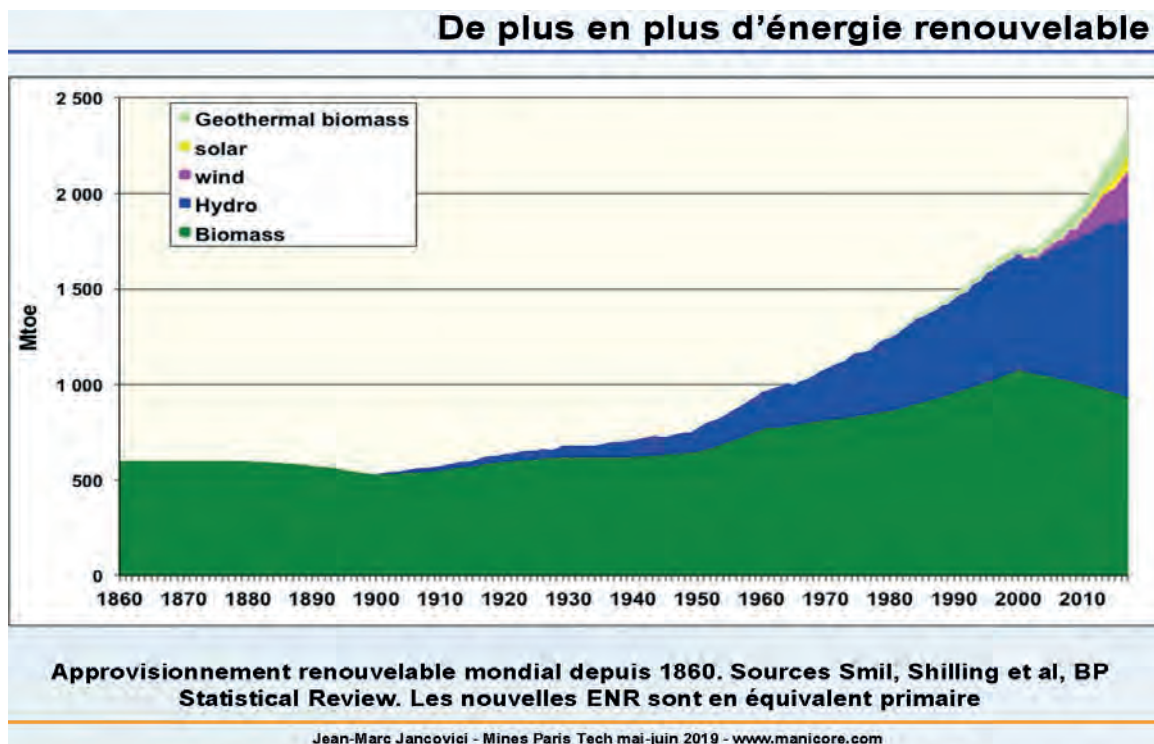
Le potentiel d'énergie renouvelable est largement supérieur aux besoins humains.

L'énergie solaire qui arrive au sommet de l'atmosphère tous les ans (avant réflexion par les nuages, les déserts, ...) équivaut à 10 000 fois la quantité d'énergie consommée par les hommes.

Problème : les énergies renouvelables abondantes ont pour caractéristiques d'être très diffuses. Difficile de les extraire de leur environnement pour les placer dans un convertisseur.

Exemple : le rayonnement à 3 Kelvin de l'univers ("Fond diffus cosmologique") est une source d'énergie inépuisable et gigantesque mais impossible à exploiter.

Donc prendre en compte la quantité disponible ne suffit pas : il faut considérer la densité et la facilité d'usage (deux caractéristiques des énergies fossiles d'ailleurs).

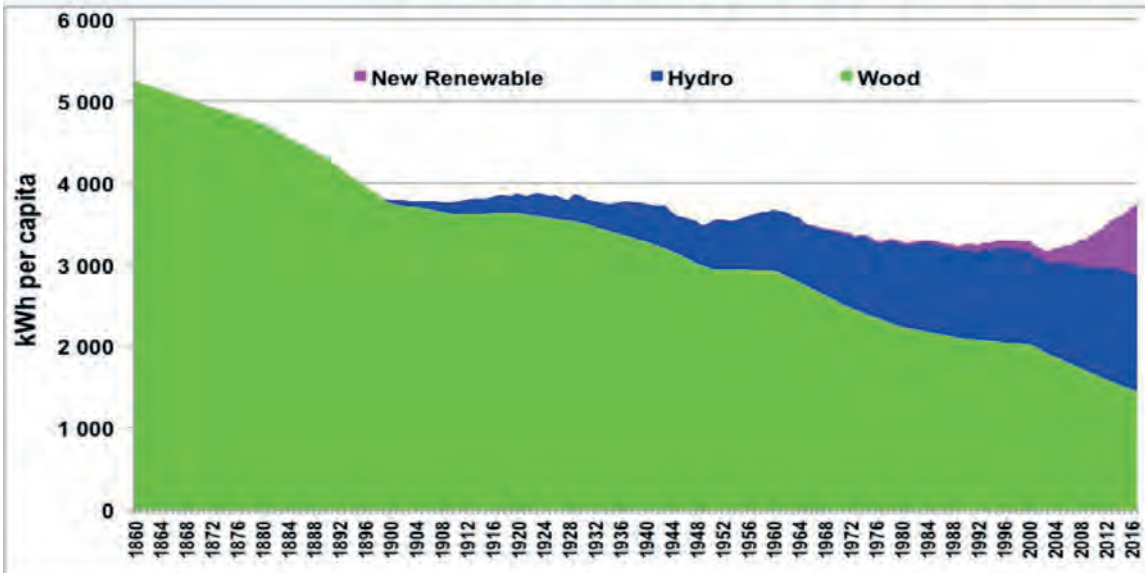


Quantité d'énergie renouvelable utilisée par les hommes depuis 150 ans.

- la biomasse n'est pas une nouveauté, et demeure la première énergie "renouvelable" (ce qualificatif se discute)
- 4 sources d'énergie purement électriques s'y sont ajoutés :
  - hydro-électricité
  - et récemment éolien, solaire et biogaz et géothermie

Bilan : les énergies renouvelables sont avant tout des forêts et des barrages

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



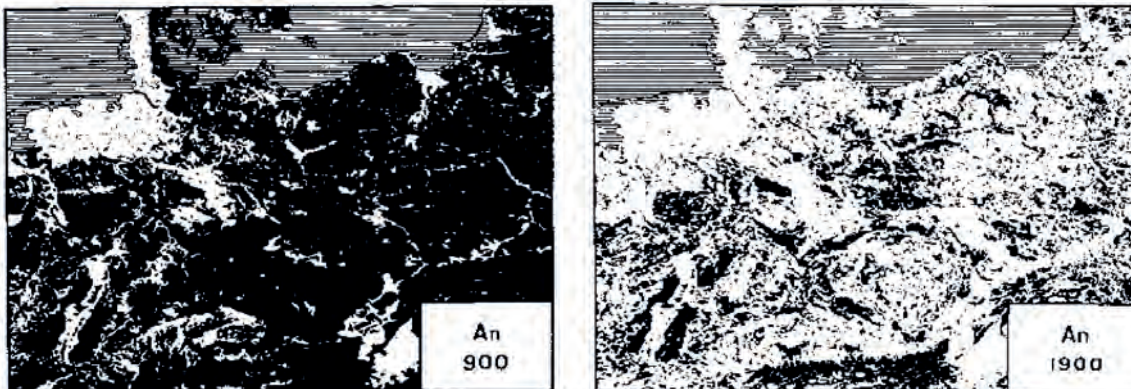
Approvisionnement renouvelable mondial depuis 1860. Sources Smil, Shilling et al, BP Statistical Review. Les nouvelles ENR sont en équivalent primaire

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

Quantité d'énergie renouvelable utilisée par personne sur terre

A l'échelle d'un individu on constate non pas une croissance de la consommation des énergies renouvelables mais une baisse depuis 150 ans. Chute de la biomasse et augmentation de l'hydroélectricité puis des nouvelles énergies renouvelables.

## Une énergie renouvelable peut ne pas se renouveler



Couverture forestière de l'Europe à différentes époques

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

La biomasse, une énergie renouvelable ?

Comparaison de la couverture forestière actuelle avec ce qu'elle était il y a 1000 ans

- déforestation extrêmement importante, il y a 1000 ans 80% de l'Europe du nord était recouverte de forêts
- grands défrichements du fait de l'augmentation de la population

Le bois coupé est brûlé

- laissé sur place (les brûlis)
- transporté pour servir de bois de feu... est-ce que cet usage peut être classé dans la catégorie "Energie renouvelable" ?

Du bois coupé dans le cadre d'une déforestation ne peut pas être considéré comme une source d'énergie renouvelable. Cependant dans les mesures et les graphiques, la biomasse inclut le bois coupé lors de déforestation.

En France aujourd'hui, la superficie forestière est stable ou en légère croissance : le bois qu'on exploite peut donc être considéré comme renouvelable.

Toutefois, pas simple d'avoir les chiffres car - de toutes les énergies que nous utilisons - le bois est la seule source d'énergie qui est massivement non commerciale. Partout dans le monde, il s'agit essentiellement une énergie d'autoconsommation et de circuit court. Une bonne part d'économie informelle caractérise ce secteur (avec des parts variables selon les régions du monde).

Les énergies fossiles et nucléaires sont des énergies commerciales (à part en Chine où il arrive que des particuliers exploitent des mines de charbon pour leur propre poêle à charbon) et donc les flux sont parsemés de compteurs, de taxes étatiques ... et en fine, les statistiques sont assez précises.

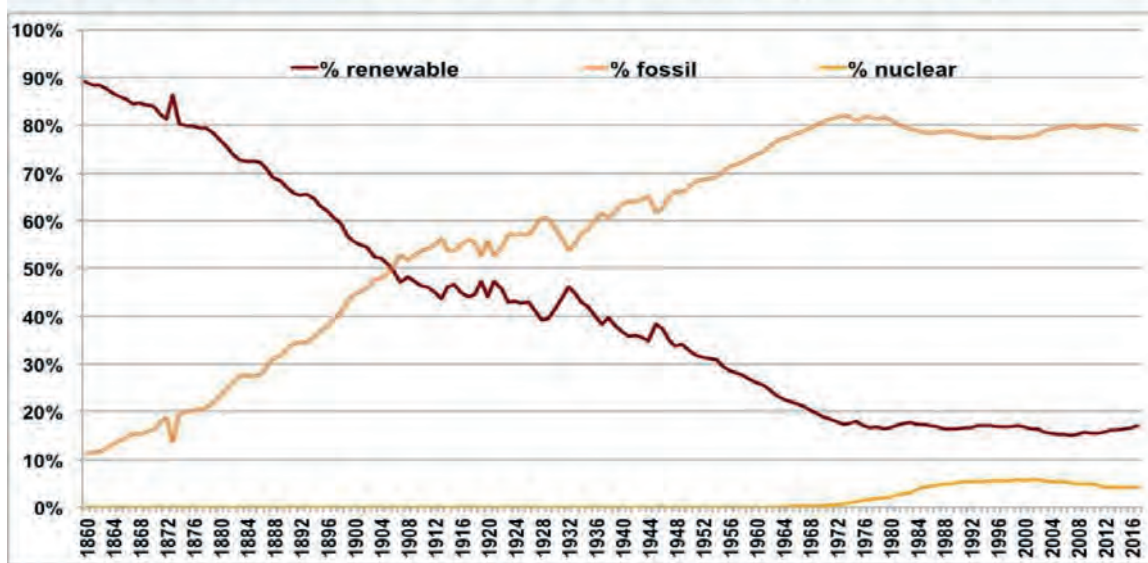
Pour pallier à l'absence de statistiques fiables concernant la production / consommation de biomasse :

- des photos satellites pour mesurer la superficie des forêts ? Trop difficile, résolution satellitaire insuffisante pour les collectes "raisonnées" de bois
- on est finalement contraint à réaliser des estimations, beaucoup moins fiables que les mesures de flux des autres sources d'énergie. Fiabilité à quelques dizaines de pourcents près, on dispose simplement d'un ordre de grandeur de la biomasse comme source d'énergie.

Conclusion :

- une partie du bois utilisé provient de la déforestation : ne peut pas être considéré comme renouvelable mais tout de même inclus dans un ensemble Biomasse qu'on du mal à évaluer
- la limite à l'utilisation du bois est la photosynthèse, dit autrement on ne peut pas utiliser la forêt en mode renouvelable si on exploite plus d'arbres que ce que la photosynthèse est capable de reconstituer. Le seuil de renouvellement d'une forêt est l'accroissement annuel ("l'Accrue forestière annuelle") de la biomasse résultant de la photosynthèse. Si l'exploitation de la forêt franchit ce seuil, elle n'est plus en mode renouvelable... mais la mesure est difficile.

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



Part de chaque famille d'énergie depuis 1860. Sources Smil, Shilling et al, BP Statistical Review. Les nouvelles ENR sont en équivalent primaire

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

Les 3 familles d'énergies utilisées sur terre :

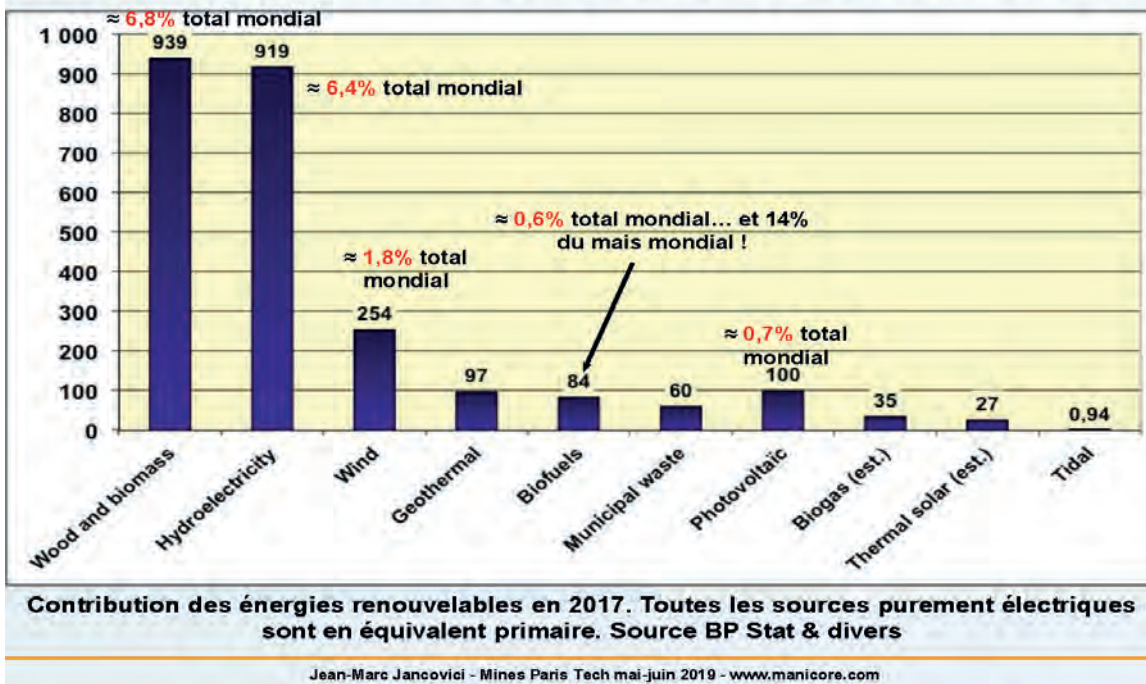
- renouvelables : forte baisse depuis 150 ans, de 90% en 1860 à 16% aujourd'hui (stable depuis le milieu des années 70)
- fossiles
- nucléaires

Un monde 100% renouvelable on connaît, c'était il y a 3 siècles :

- 700 millions d'humaines
- espérance de vie à la naissance sous les 30 ans
- l'essentiel de la population occupée dans les champs

Compatibilité monde 100% renouvelable avec 8 milliards d'individus ? Si oui vec quel mode de vie ?

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



Les énergies renouvelables = 16% de la quantité d'énergie primaire / d'énergie extraite de l'environnement)

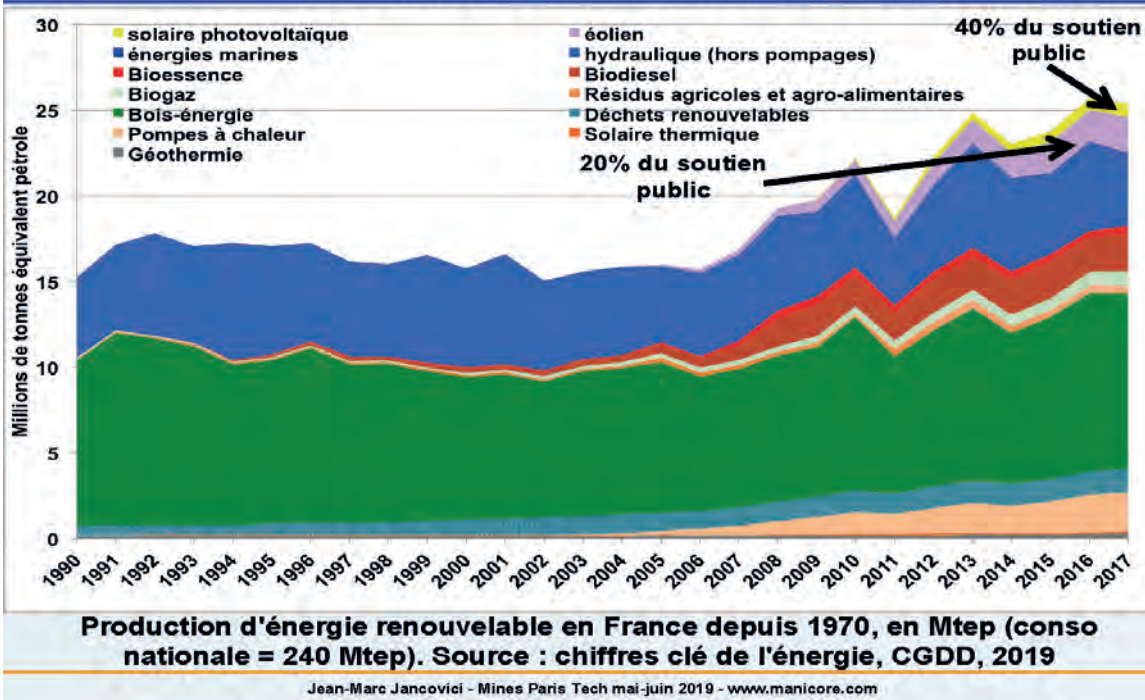
Décomposition en MTeP

- Bois et biomasse = moins de 10% de la quantité d'énergie primaire utilisée dans le monde, avec une fraction renouvelable bien moindre
- Hydroélectricité = fournir une quantité d'énergie primaire comparable à celle de la biomasse (note : en équivalent final, ce serait 8 fois moins)
- Eolien = augmentation sensible ces dernières années mais encore très faible rapporté à la production d'énergie primaire mondiale (moins de 2%). Par ailleurs l'augmentation de la production de charbon augmente encore 5 fois plus vite que la production d'électricité via l'éolien.
- Géothermie
- Biocarburants = une fraction de % mais qui pourtant sont à l'origine de 14% de la production de maïs mondial (les Etats-Unis, qui produisent 1/3 de la production mondiale, consacrent 40% de leur production à fabriquer de l'éthanol pour -- mélangé à l'essence ou au diesel, faire rouler des engins de transport notamment -- le carburant de tous les jours (présence obligatoire / légale de quelques % de biocarburant dans le pétrole vendu à la pompe).
- Déchets urbains
- Solaire photovoltaïque = une fraction de %, augmentation rapide mais existe des freins
- Biogaz (issu de la fermentation végétale ou résidus animaux tels que déjections, graisse, ...), pour produire de l'électricité via de mini-centrales à gaz, pour faire rouler des engins de transport au gaz naturel liquéfié (GNL), pour le chauffage si introduit dans le réseau gaz
- Energie solaire
- Tidal (énergie des marées, 3 Centrales marée-motrice dans le monde)

Question du bilan carbone de certaines pratiques. Par exemple déforester pour produire du maïs destiné à devenir de l'éthanol est pire que d'utiliser du pétrole :

- déforestation
- puis pression supplémentaire sur la forêt relatif à l'usage des sols (concurrence alimentation / production biocarburant)

## Quid de notre chauvinisme renouvelable ?

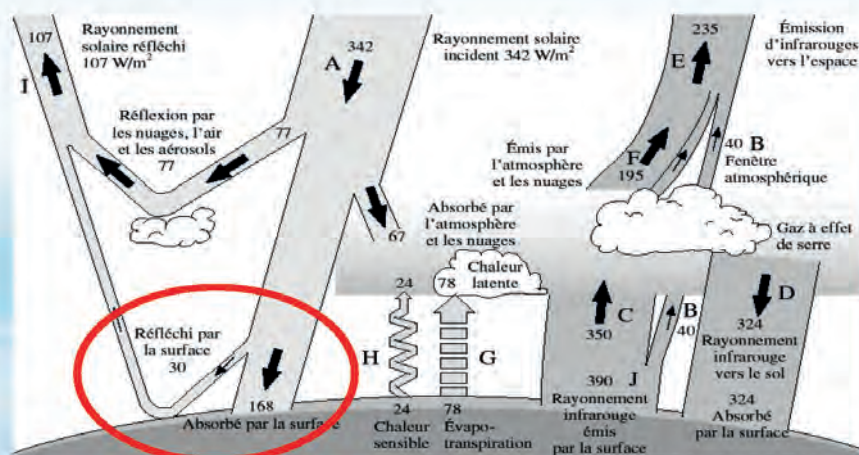


Hierarchie de l'utilisation des énergies renouvelables en France : identique à la hiérarchie mondiale

- bois en premier, essentiellement pour le chauffage
- hydroélectricité en 2e, production en légère baisse par rapport aux années 90 en raison de la baisse du régime pluviométrique
- éolien et photovoltaïque demeurent très minoritaires au sein des énergies renouvelables (comme partout en Europe, sauf en Allemagne)
- éléments non négligeables : les agro-carburants (bio essence + bio diesel) et les pompes à chaleur

## Chapitre 37 - L'exploitation directe du flux solaire

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



**Environ 200 Watts par  $\text{m}^2$  en moyenne annuelle et géographique au niveau du sol : le flux solaire « exploitable » représente environ  $3,2 \cdot 10^{24}$  joules par an, soit 7.000 fois l'énergie consommée par l'humanité ! (11 Gtep/an)**

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

Partie du flux solaire exploitable / qui arrive à la surface de la terre = 200 watts /  $\text{m}^2$   
Moyenne temporelle et spatiale :

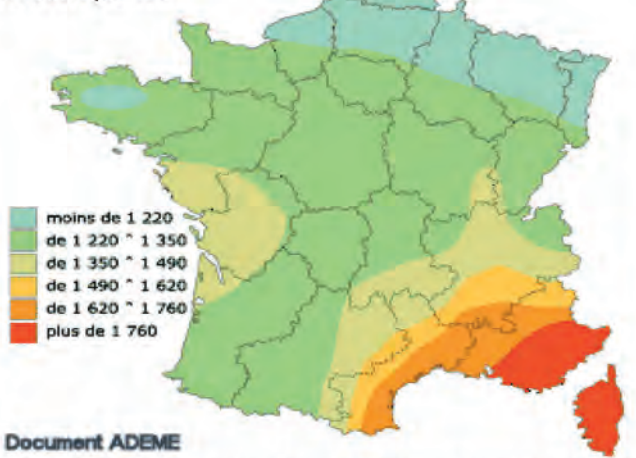


- annuelle (sur 365 jours, été + hiver)
- géographique (inclus toute la surface du globe, des pôles aux tropiques)

Additionné : 7 000 fois la consommation énergétique de l'humanité est potentiellement disponible via le flux solaire.

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

Gisement solaire  
en kWh par m<sup>2</sup>



Document ADEME

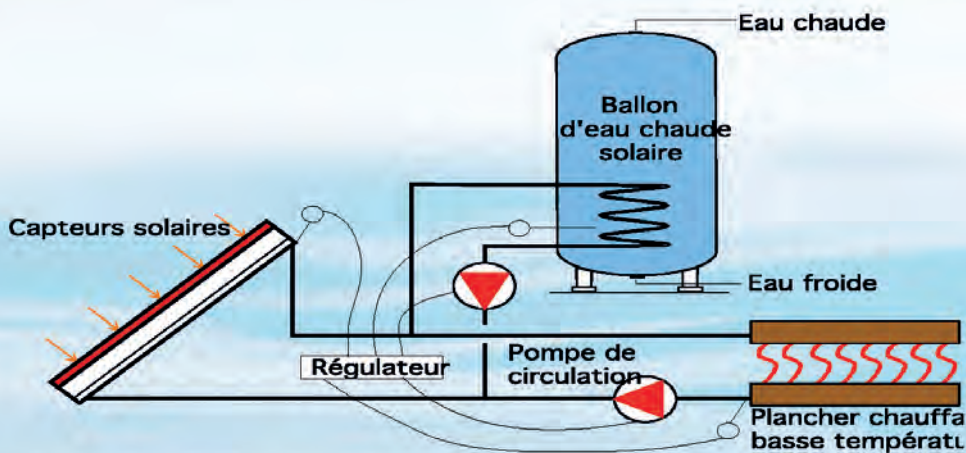
**Energie incidente en France en kWh/m<sup>2</sup>.an. Avec un rendement de 30%, une installation bien placée de 1 m<sup>2</sup> = 400 à 500 kWh/m<sup>2</sup>.an, soit 1% de l'énergie consommée par an et par Français.**

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

Insolation au sol

- augmente sans surprise en allant vers le sud mais n'est pas tout à fait homogène pour une même latitude (insolation supérieure à Marseille qu'à Bayonne en raison du vent / des nuages venus des dépressions atlantiques)
- 1500 kWh par m<sup>2</sup> sur une bonne partie du territoire
- dans un contexte favorable, production possible de 400 à 500 kWh / m<sup>2</sup>, soit 1% de la consommation d'un Français

## Exploitation N° 1 : douches, bains et radiateurs



**Schéma de principe d'une installation pour capter l'énergie sous forme thermique. Rendements >30%**

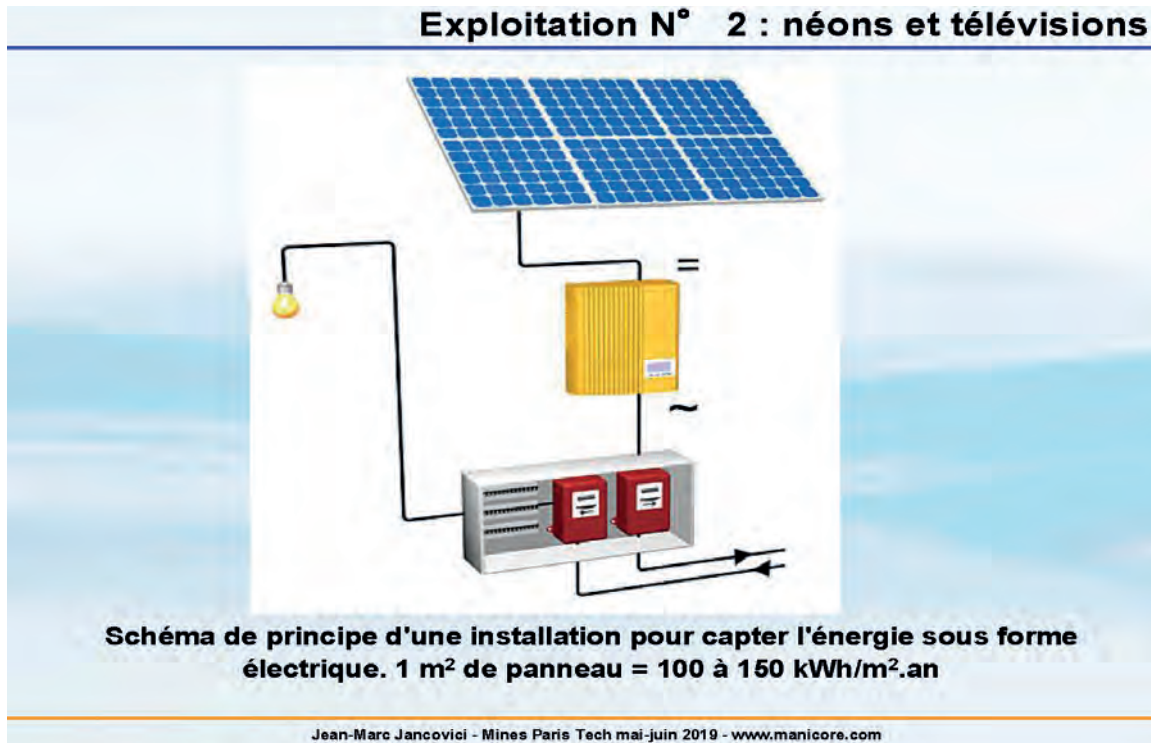
Jean-Marc Jancovici - Mines Paris Tech mai-juin 2019 - www.manicore.com

Usages de l'énergie du rayonnement solaire 1 : chauffer

- chauffer de l'air (ce qui se fait naturellement pour les bâtiments l'été et qui peut être étendu aux autres saisons pourvu que le bâtiment soit bien conçu : exposition sud, baies vitrées, ...)
- chauffer de l'eau pour se laver ou pour se chauffer (note : les installations avec des radiateurs à eau conçus pour contenir de l'eau à 60° ne peuvent pas convenir, la montée en température obtenue via l'énergie thermique n'est pas suffisante et il faut en

outre des radiateurs avec une plus grande surface radiante pour chauffer les mêmes volumes). Le plus souvent exploiter l'énergie solaire pour chauffer une maison consiste à installer un plancher chauffant (= très grande surface radiante sans besoin d'une température très élevée).

L'énergie solaire utilisée pour chauffer connaît un fort développement "sous les tropiques" (Antilles, Guyane, ...) car ces régions n'ont pas de réseaux de gaz, source d'énergie la moins chère pour chauffer de l'eau. Le choix est limité à des sources plus chères, l'électricité ou au fioul, et donc l'exploitation de l'énergie thermique dans ces régions à forte insolation devient rentable.



Usages de l'énergie du rayonnement solaire 2 : l'effet photo-électrique pour l'éclairage et petits appareils

Effet photoélectrique (EPE)

- captation de l'énergie thermique sous forme électrique
- création d'un courant électrique par l'exposition au soleil d'une matière (= ici le silicium contenu dans les panneaux solaires)

1m<sup>2</sup> de panneau solaire = 100 à 150 kWh/m<sup>2</sup> par an

Limitations de la technologie :

- périodes nocturnes
- variations saisonnières
- densité de puissance relativement faible

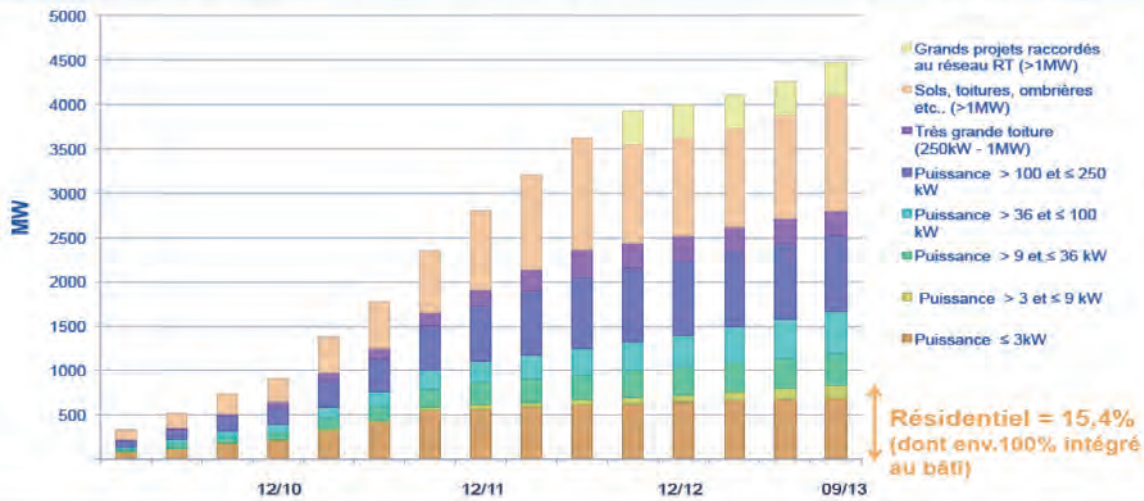
Actuellement en France très peu de sites produisant de l'électricité sont autonomes :

- la croissance des installations dans l'UE s'explique par les objectifs de déploiement des ENR
- historiquement ce sont les ENR électriques qui ont en premier été sponsorisés
- le but d'une installation n'est pas de consommer sur le lieu de production mais d'ajouter cette électricité dans le réseau
- le développement du photovoltaïque est une activité économique et non pas un élément de consommation personnelle ; cela consiste à louer la façade sud du toit de son domicile

En France lorsqu'un particulier met en place une installation photoélectrique, il doit souscrire 2 contrats :

- contrat qui concerne l'installation, qui impose d'injecter l'électricité dans le réseau électrique EDF, avec un tarif d'achat à prix fixe et garanti
- contrat de consommateur d'électricité standard

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



Evolution des puissances installées en solaire depuis début 2010.

Source : Carbone 4, 2014

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

L'essentiel des surfaces photovoltaïques en France (comme dans beaucoup d'autres pays)

- ne se trouve pas sur le toit des maisons mais sur de grandes surfaces,
- il ne s'agit pas d'énergies de particuliers mais une énergie d'industriels comme les autres, qui trouvent les emplacements, paient les installations et encaissent la rémunération garantie

## En fait le PV ressemble désormais plus à ça



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

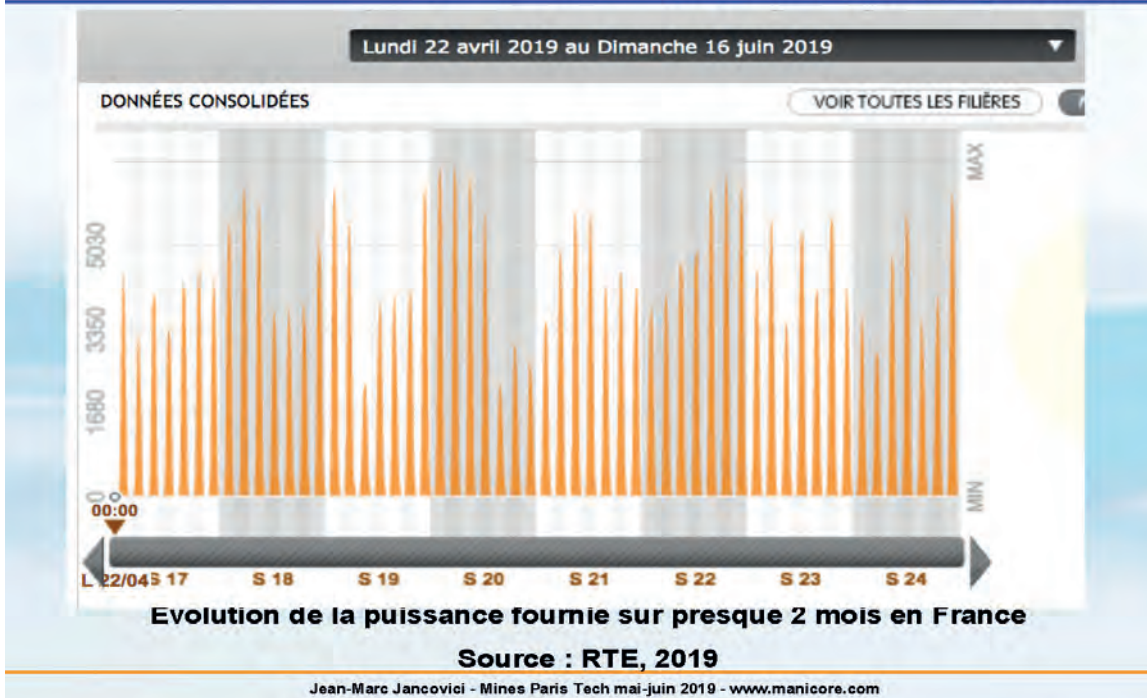
Jean-Marc Jancovici - Mines Paris Tech mai-juin 2019 - www.manicore.com

Photo aérienne de la plus grande centrale solaire au sol installée en France

Note :

- le photovoltaïque est très gourmand en espace puisque pour obtenir 1 mégawatt de puissance, il faut mobiliser 1 hectare de terrain
- dit autrement, sur 1 km<sup>2</sup> (=10 hectares) on obtient 10 mégawatt de puissance là où - pour une même surface - une centrale nucléaire produirait 4 gigawatt de puissance (400 x plus)

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



Autres inconvénients en plus de l'encombrement au sol :

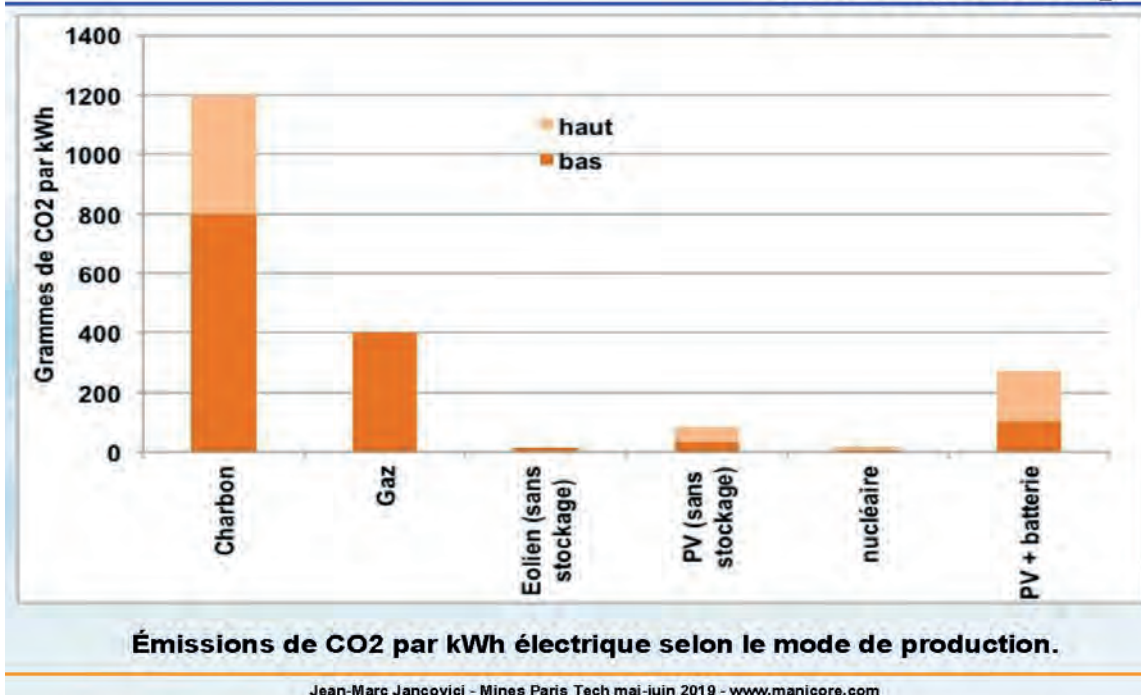
- la forte variabilité des puissances produites en raison de la nébulosité.

La prévisibilité de la production d'énergie est assez incertaine : si on connaît bien l'insolation potentielle (variable selon l'inclinaison de la terre), on ne peut pas prédire l'insolation véritable du fait de la nébulosité. On peut seulement tabler avec certitude sur les valeurs plancher, c'est-à-dire sur la puissance fournie dans un contexte de forte nébulosité

- interruption nocturne

En étant très optimiste, le solaire et l'éolien peuvent atteindre en 2050 30% chacun de l'approvisionnement énergétique mondial (à ne pas confondre avec l'approvisionnement électrique). S'agissant du solaire, comment gérer les interruptions nocturnes ?

## Le solaire, zéro CO<sub>2</sub> ?



La comparaison des émissions de CO<sub>2</sub> selon le mode de production d'électricité.

L'énergie photovoltaïque est certes d'une énergie renouvelable (le soleil inépuisable) mais son dispositif de capture ne l'est pas.

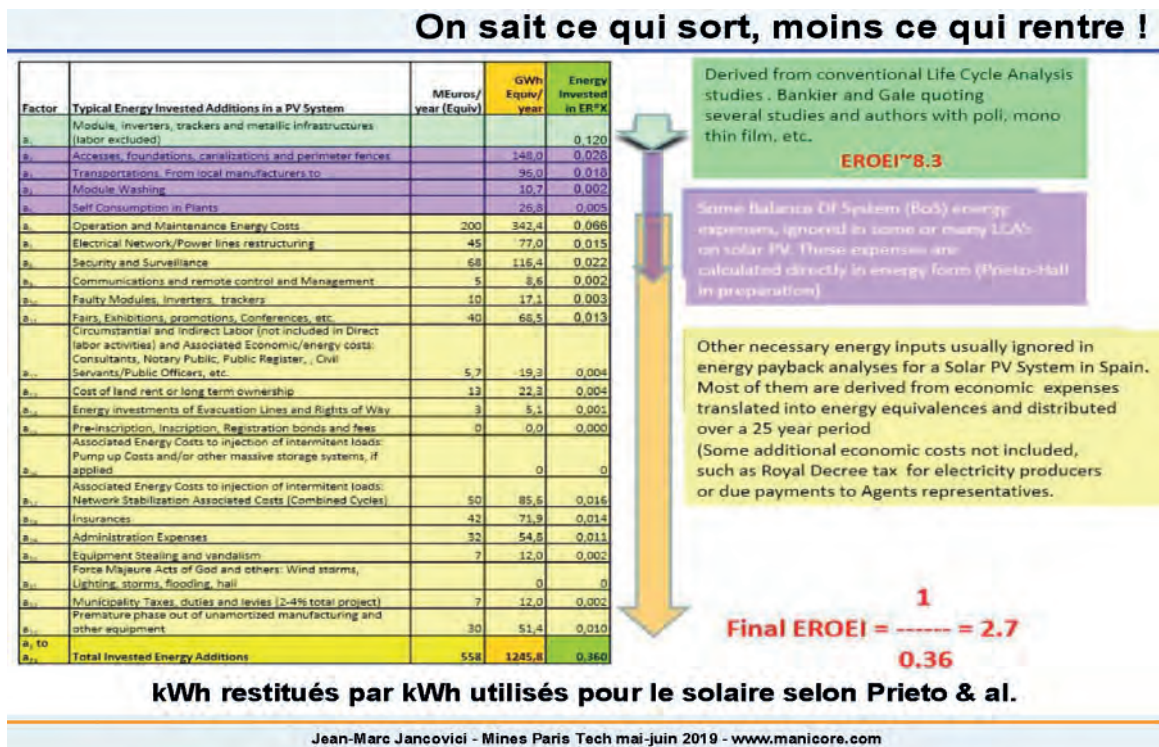
- 1ère conséquence : épuisement possible des ressources disponibles. Les panneaux photovoltaïques sont construits avec des

matériaux non renouvelables (acier, cuivre, silicium, aluminium, verre, ...)

- 2nd conséquence : la construction des dispositifs de capture de l'énergie solaire (ou éolienne) émet du CO2.

Comparaison pour la production 1 kiloWatt / heure d'électricité :

- pour le charbon 1 kw/h = 1 kg CO2
  - gaz = 400 gr
  - éolien sans stockage
  - photovoltaïque sans stockage = assez grande variabilité
- en fonction du pays dans lequel le panneau a été fabriqué. Fabriquer un panneau solaire consiste à fondre du silicium, c'est-à-dire recourir à la métallurgie employant de l'électricité. Fabriquer en Chine, le bilan carbone de la construction d'un panneau solaire (centrales à charbon dominantes) sera bien supérieur à celui d'un panneau fabriqué en France (centrales nucléaires dominantes)
- en fonction de la zone d'emploi des panneaux. La production est variable selon la latitude et la nébulosité.
- nucléaire
  - photovoltaïque avec stockage sur batterie. Les émissions de CO2 supplémentaires proviennent du processus de fabrication de la batterie (métallurgie). Par ailleurs stocker / puis déstocker l'énergie engendre des pertes (environ 20%). Les deux éléments additionnés, 1 kw/h avec des panneaux solaires sur batteries = entre 100 et 250 gr de CO2.



Après l'empreinte carbone du photovoltaïque, il est utile de s'intéresser au rendement énergétique.

Question pertinente, celle du retour sur investissement du photovoltaïque. Dit autrement, combien d'années de fonctionnement d'un panneau photovoltaïque sont nécessaires pour rembourser l'énergie qui a été nécessaire pour le construire, le mettre en place (transport, structure en aluminium, ciment, ...ingénieurs / bureaux d'études) et l'entretenir (lavage à intervalles réguliers, ...)?

Note : entretien des panneaux photovoltaïques peut être très difficile, exemple au Qatar où les panneaux sont soumis aux tempêtes de sables et où le nettoyage demande alors des soins particuliers et de l'eau ... qui justement fait défaut.

Conclusion (ratio s'est certainement amélioré depuis l'étude en question) :

- pour 1 investi dans le panneau, il en ressort 3 sur toute sa durée de vie
- avec une durée de vie de 25 en moyenne, cela représente environ 8 ans de fonctionnement

Pour qu'une société humaine élaborée (comparable à celle issue de la révolution industrielle) puisse subsister, les estimations du rendement énergétique doivent être au-dessus de 12 ou 13. En tout état de cause avec un multiple de 3 ou 5, il s'agit d'un rendement énergétique très insuffisant.

A titre de comparaison :

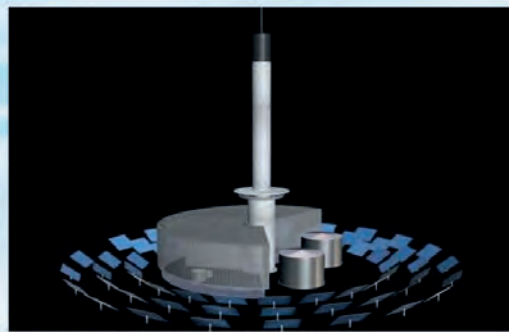
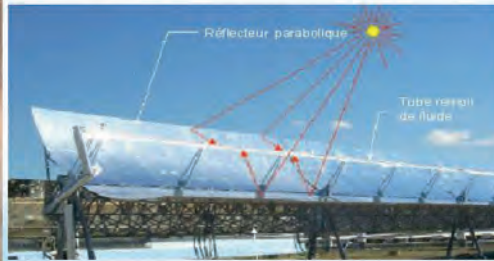
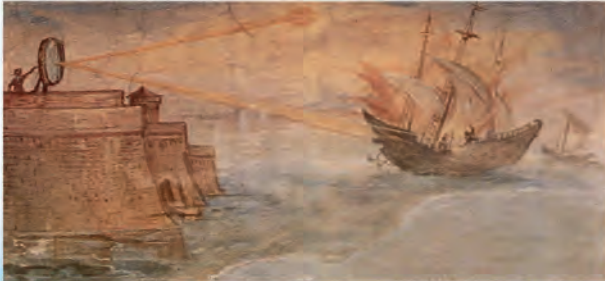
- le pétrole à ses débuts 1 / 100, aujourd'hui 1 / 10 en moyenne (1/3 pour le pétrole bitumineux)
- gaz 1/30
- le nucléaire 1/60 (selon les calculs des anti-nucléaires qui enrichissent l'uranium avec des centrales à charbon 1/5)

- hydroélectricité 1 / quelques dizaines
- biocarburants 1 / 1,2

=> les énergies fossiles (du moins à leur début) ont un rendement élevé de 1 pour plusieurs dizaines, ce qui a permis la société développée actuelle.

=> les énergies diffuses, typiquement le solaire et l'éolien, ont un rendement beaucoup plus faible, ce qui rend difficile l'hypothèse d'un maintien des sociétés développées sur la base de ces seules sources d'énergie

### Exploitation N° 3 : je concentre très fort



**Divers dessins de centrales solaires à concentration**

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

Usages de l'énergie du rayonnement solaire 3 à des fins énergétiques : le solaire à concentration.

Les centrales solaires à concentration / centrales thermodynamiques sur le modèle de la machine de Carnot :

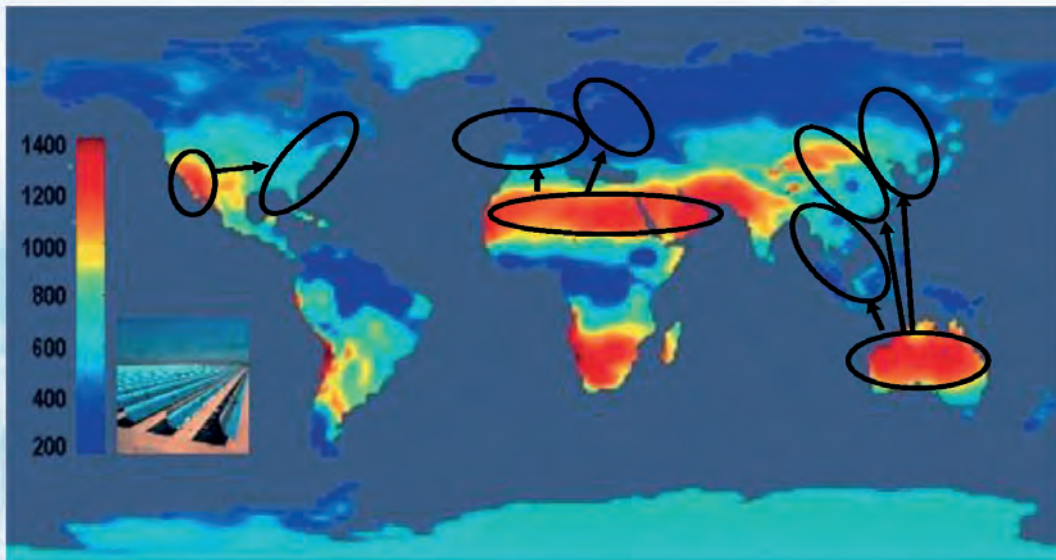
- utilisation de l'énergie solaire, concentrée sur un point chaud
- cette source chaude chauffe un réservoir de saumure (solution de chlorure de sodium dans l'eau)

Avantage :

- avec une installation comportant un champ de miroirs suffisamment important, cette réserve de saumure peut continuer à produire de la vapeur une partie de la nuit
- cela supprime en partie la limite rencontrée avec panneaux photovoltaïques qui ne produisent pas la nuit

Inconvénient : installations gourmandes en espace car en absence de source froide le rendement est assez mauvais et il est donc nécessaire d'installer de vastes champs de miroirs. Gourmands en matériaux.

## Le solaire à concentration, avenir des échanges ?



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

Carte de l'insolation du globe

L'installation du solaire à concentration (et du photovoltaïque) est pertinente

- dans les déserts
- c'est-à-dire dans des zones vides (hormis la Californie)
- les grandes zones d'insolation loin des grandes zones de consommation

Techniquement il serait possible :

- d'installer des batteries au pied des champs solaires
- et de tirer de grandes lignes électriques menant l'électricité vers les zones de consommation

Difficultés à prévoir :

- partage / vente de l'énergie solaire
- mise en place possible mais sur le long terme
- on est aux antipodes du discours selon lequel les énergies renouvelables seraient un moyen de s'affranchir de la dépendance aux autres Etats.

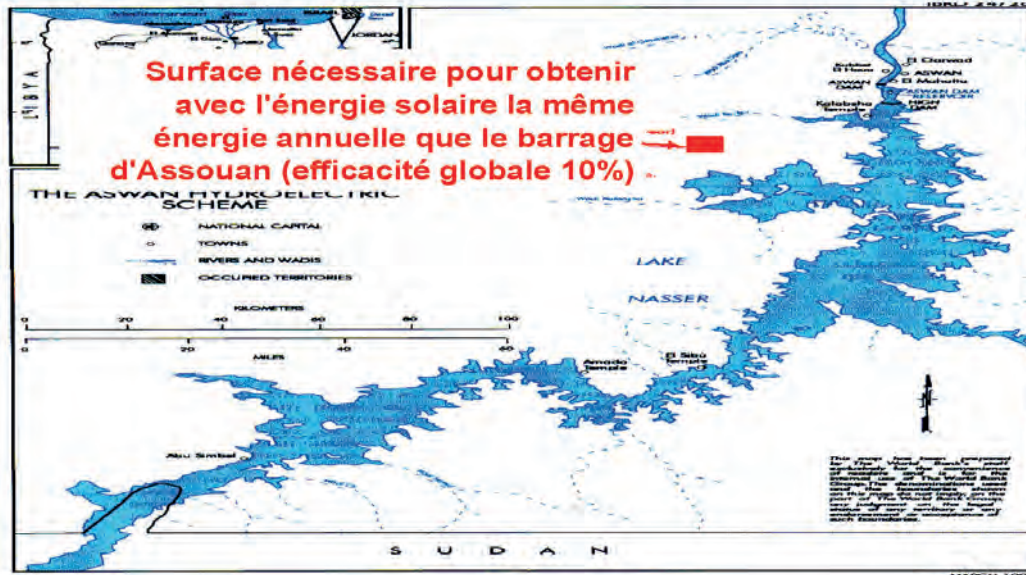
Question de la dépendance à propos des matériaux nécessaires pour la construction des panneaux solaires :

- les 10 premiers fabricants de cellules photovoltaïques dans le monde sont Chinois
- tous les plans de développement du solaire en Europe reviennent à accroître la dépendance extérieure, à l'industrie chinoise en premier lieu

---

Note : changement climatique ne changera pas fondamentalement l'insolation à brève échéance (à ne pas confondre avec l'assèchement des terres, dû à une moindre nébulosité + un accroissement de l'évaporation)

## Concentrer le solaire, plus fort que concentrer l'eau



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

Comparaison de la surface occupée pour produire de l'énergie

- en concentrant l'eau
- et en concentrant l'énergie solaire

La surface d'une "grosse ville" serait nécessaire pour obtenir la même énergie avec une centrale solaire et avec le barrage d'Assouan. Le problème n'est pas l'espace (zones insolées fortement inhabitées le plus souvent) mais la disponibilité des matériaux.

## 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)**

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

Différence entre le photovoltaïque et les centrales solaires.

L'avantage de la concentration solaire : le photovoltaïque est de la production de "bout de réseau" tandis que la concentration solaire se situe en tête de réseau, il contribue à augmenter la puissance pilotable globale / la puissance du réseau.

- La puissance installée en production / la puissance pilotable en France est environ 100 GigaW
- La puissance totale de tous les appareils installés en France (des cafetières aux laminoires en passant par les trains) équivaut à plusieurs centaines de GigaW (environ 5 fois plus).

Si cela fonctionne c'est grâce à la mise en réseau. L'intérêt du réseau est de pouvoir mutualiser la production : le conducteur



du train ne peut pas utiliser son aspirateur pendant qu'il travaille. Toutes les machines n'étant pas utilisées en même temps, un réseau a besoin d'une puissance réduite pour satisfaire tous les besoins.

Avec des panneaux photovoltaïques installés en bout de chaîne, il faut dimensionner la puissance de pointe de son installation particulière à sa consommation de pointe. Cela revient

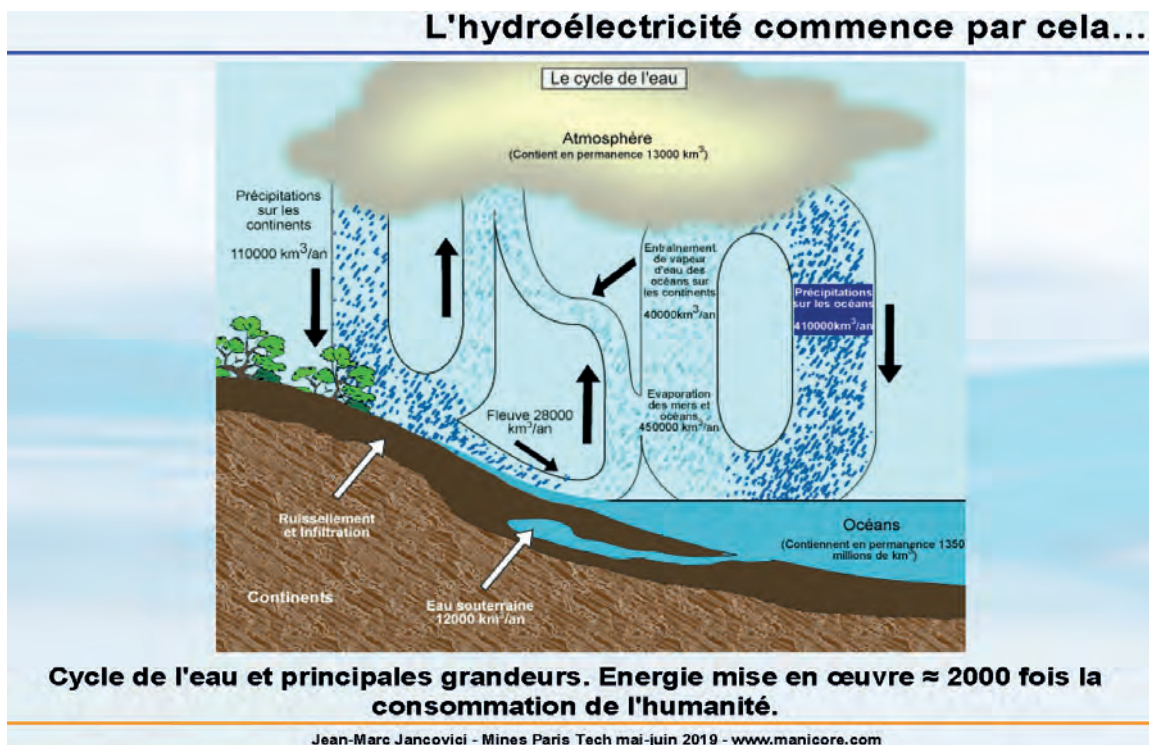
- à installer 4 à 5 fois plus de puissance / de capacité de production électrique en France
- à provoquer un surcoût du fait de la nécessité de stocker localement l'électricité

Le réseau est une source d'économie de puissance installée, c'est sa raison d'être. Historiquement, les pays qui se sont électrifiés au XIXe ont commencé à créer des réseaux pour pouvoir répondre à la demande.

L'autoconsommation photovoltaïque où chacun installe chez soi de quoi consommer sa propre électricité, cela augmente très fortement les investissements globaux dans un pays et donc in fine augmente très fortement le prix total de l'électricité du pays.

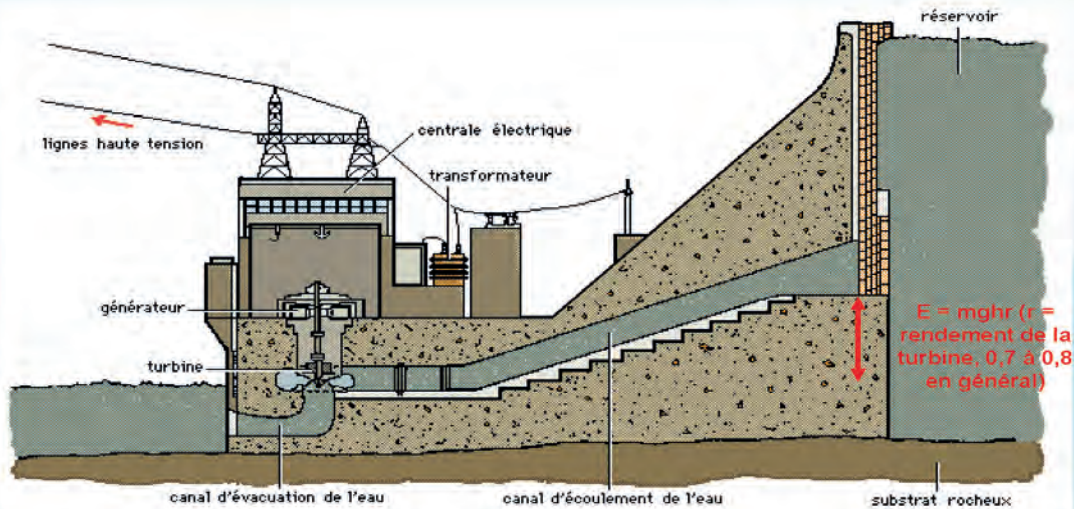
- l'autoconsommateur s'apparente à un passager clandestin = le surcoût payé par la collectivité.
- en France où l'électricité est à coût fixe (avec 2 systèmes à coût fixe, le nucléaire et son réseau), en ajoutant des panneaux solaires pour ne pas payer l'électricité du réseau quand il y a du soleil, les particuliers ajoutent un 3e système à coût fixe et le coût global de l'ensemble augmente.

## Chapitre 38 - L'hydroélectricité



L'effet chauffant du soleil a également pour effet le cycle de l'eau (évaporation de l'eau et donc précipitation).

## Puis continue par ici



**Schéma de principe d'une production à partir d'un lac de retenue.**

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

Le cycle de l'eau est à l'origine de l'exploitation de la première électricité d'origine renouvelable d'importance : l'hydroélectricité. Principe de fonctionnement d'un barrage très simple, il perfectionne celui des moulins à eau.

Turbiner de l'eau consiste à récupérer l'énergie potentielle de l'équation : potentiel de chute x la masse x la constante d'attraction x la hauteur. L'énergie potentielle devient de l'énergie cinétique lorsqu'on ouvre la vanne, avec très peu de perte due au frottement (dans la canalisation qui va du barrage à la turbine + frottement de la turbine elle-même).

## Le calcul « théorique »

Massif	Superficie km <sup>2</sup>	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

$E = mgh$

$E = mghr$

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

Quelle production d'électricité d'origine hydroélectrique est possible en Europe.

En théorie, l'hydroélectricité est praticable en altitude, là où

- l'eau tombe
- et où il est facile de la collecter
- et où il est possible de la canaliser pour la turbiner beaucoup plus bas

En résumé, relief montagneux avec :

- une vallée "suspendue" en altitude

- qu'il est possible de fermer avec un barrage
- pour y emmagasiner l'eau (de fonte de glacier, de fonte de neige, de pluie)

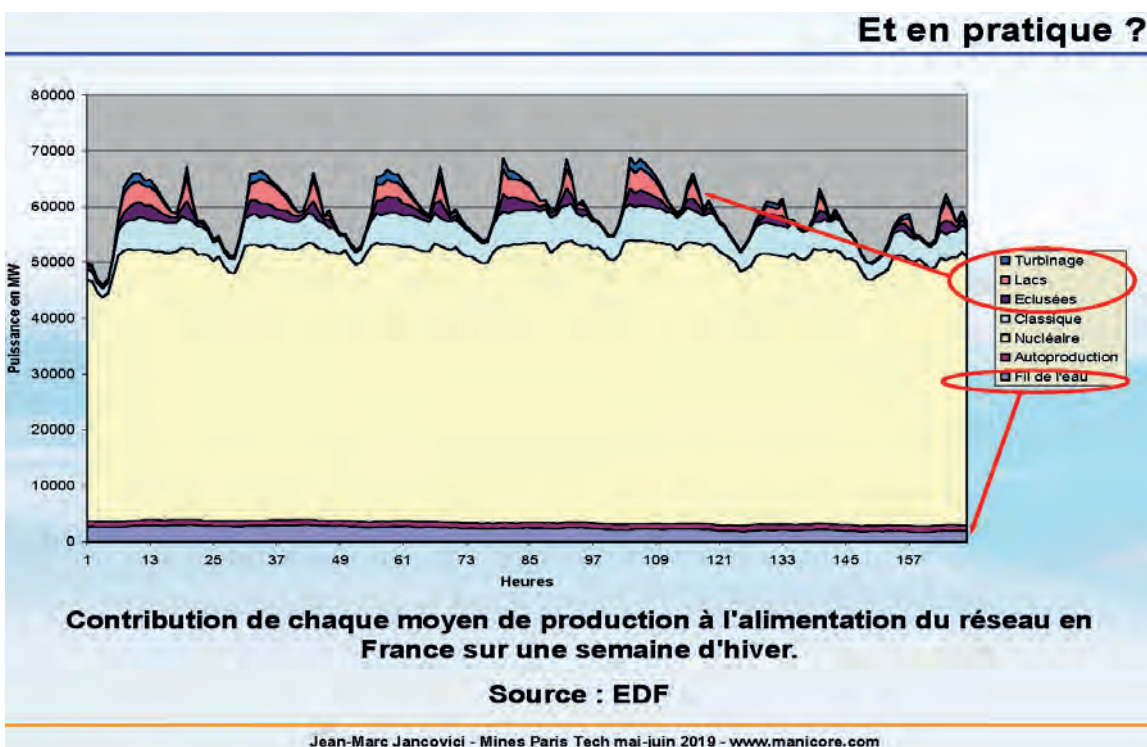
L'installation du barrage consiste à faire chuter l'eau en bas de vallée le plus souvent, via une canalisation aboutissant sur une turbine. Note : la hauteur de chute n'est pas toujours spectaculaire comme à Grand Maison, exemple pour le barrage de Serre Ponçon pour lequel la hauteur de chute est simplement celle du barrage.

En additionnant la puissance de tous les barrages situés dans les massifs montagneux d'Europe,

- le potentiel théorique qui peut provenir de l'hydroélectricité = 1525 TWh
- le rendement final = 1220 TWh

Les chiffres actuellement obtenus en Europe se situent entre 500 et 1000 TWh, c'est à dire que l'on a pratiquement déjà construits tous les barrages possibles sur le continent.

Les possibilités dans le secteur hydroélectrique sont désormais des bassins de rétention artificiels (par exemple construire des barrages dans les vallées qui alimentent le lac Léman). Quasiment toutes les possibilités reposant sur la collecte de l'eau de pluie / de la fonte des glaciers ont déjà été exploitées en Europe.



Contribution des différents moyens de production d'électricité

Les barrages est une des deux sources de production hydroélectrique. La seconde est la production électrique "au fil de l'eau".

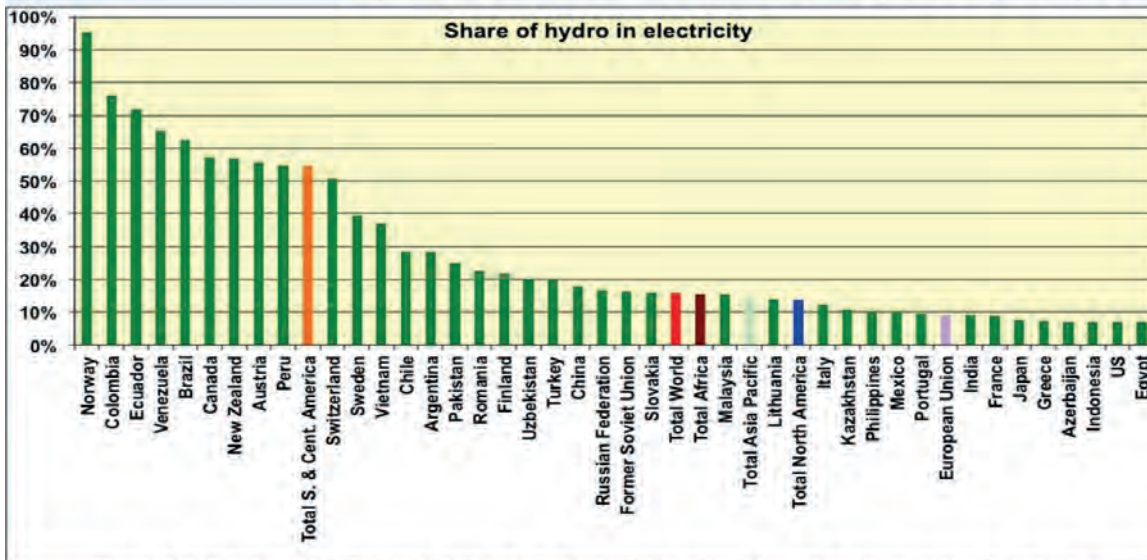
Contrairement aux barrages qui disposent de beaucoup de puissance / forte hauteur de chute mais ne peuvent pas produire toute l'année (sans quoi le lac de barrage se vide rapidement), la production électrique au fil de l'eau :

- consiste à dériver un fleuve (faible hauteur de chute)
- et peut tourner toute l'année (plus ou moins fortement selon les saisons, exemple le Rhône charrie 1000 m<sup>3</sup> / seconde au printemps mais seulement quelques centaines en été)

Limite au développement de la production au fil de l'eau : les fleuves doivent rester navigables + sécheresses (exemples du Doux, du Rhin ...)

Les barrages (de haute chute comme Grand Maison et de faible chute appelés les éclusées, comme Serre Ponçon) ont donc pour fonction de faire de la régulation de pointe.

## Hydroélectricité = montagnes, ou à peu près



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

Source des données : BP Statistical Review

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

Part de l'hydroélectricité dans la production des pays en 2017

- Norvège 95% (également le premier producteur en valeur absolue)
- Colombie et Equateur > 70%
- Venezuela et Brésil > 60%
- Canada, Nouvelle-Zélande, Autriche, Pérou, Suisse > 50%
- France < 10%

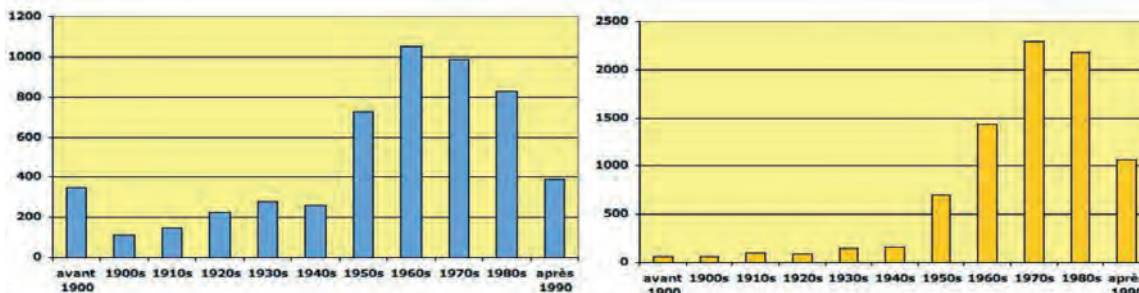
> l'hydroélectricité est présente massivement là où le relief le permet

> Amérique du Sud : le relief + fortes précipitations de l'équateur explique le nombre important de barrages installés

Moyennes :

- moyenne mondiale 15%
- Amérique du Sud et Centrale 55%
- Afrique 15%
- Asie Pacifique 12%
- Europe 9%

## Y'a du rab ?



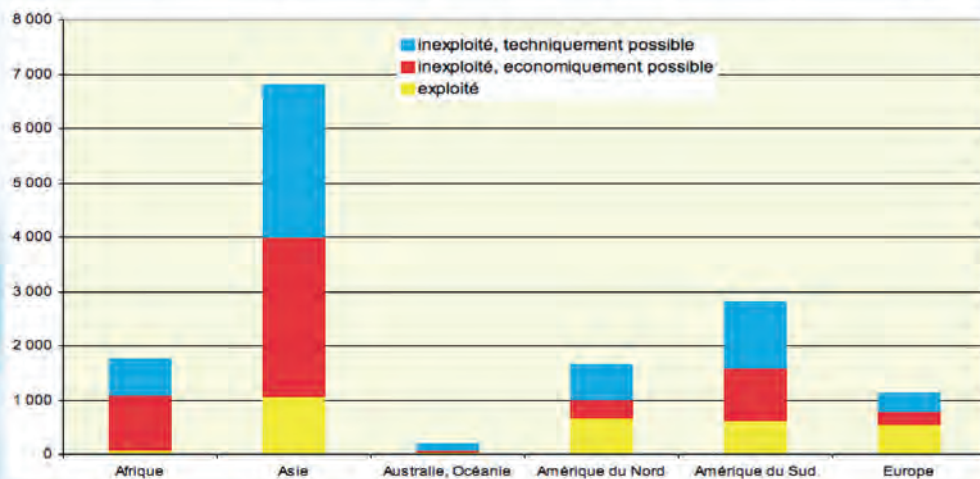
Nombre de barrages construits par décennie, Europe (à gauche) et Asie (à droite).

Source : World Commission on Dams, 2000

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

Sur le continent européen la construction de nouveaux barrages n'est plus vraiment possible, le continent plafonne à 600 TWh

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

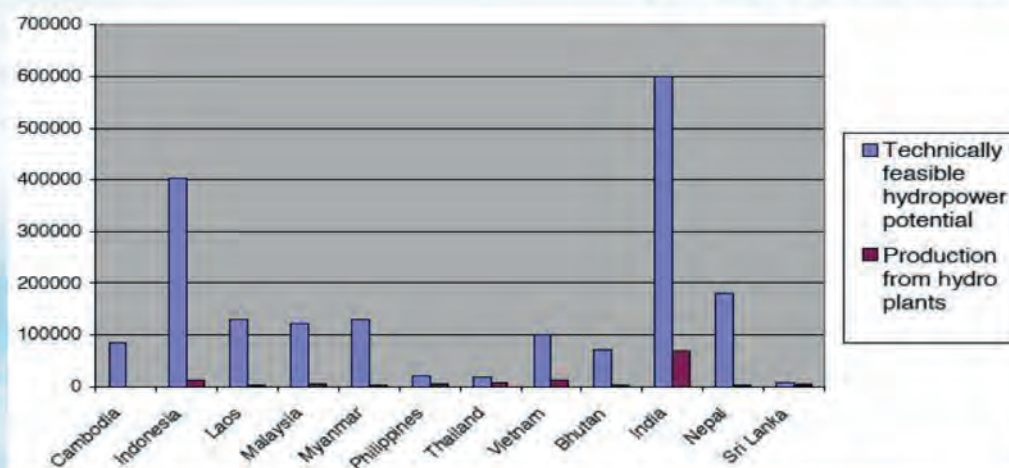


Potentiel hydroélectrique et production des barrages déjà installés par zone.

Source : Aqua Media International, 2007

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

## Qui peut avoir du rab ?



Potentiel hydroélectrique dans les pays d'Asie (hors Chine) et barrages déjà installés.

Source : World Commission on Dams, 2000

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

Ralentissement de la construction des barrages également en Asie même si le potentiel de construction de nouveaux barrages y reste le plus fort.

---

Note :

- l'essentiel des barrages dans le monde ne servent pas à produire de l'électricité mais servent à l'irrigation
- possibilité de conflits d'usage (agriculture, tourisme, souci du débit d'étiage / de l'assèchement des rivières qui à l'origine des lâchées d'eau des barrages servant à refroidir les centrales nucléaires, à maintenir / soutenir l'écosystème...)

## 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)**

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

Italie : accident de 1963, glissement de terrain a fait déborder le lac de barrage, 1900 morts.

France : accident de Fréjus Malpasset en 1959 (retenue d'eau à usage agricole), 400 morts

Chine : accident le plus meurtrier de l'industrie électrique, complexe de Barrages de Banqiao qui s'est rompu à la suite de pluies diluviennes en chine en 1975, 85 000 morts directs + 145 000 maladies (choléra) et famine

> technologie "propre" (10 gr de CO<sub>2</sub> au Kw/h), mais bien plus meurtrière historiquement que le nucléaire

--- Stations de pompage

Il est possible de créer des stations de pompage, c'est-à-dire des barrages réversibles :

- présence en aval d'une turbine qui permet de générer de l'électricité avec l'eau en provenance de la retenue
- l'eau ainsi turbinée, au lieu de la rejeter dans le fleuve, est stockée dans une nouvelle retenue en aval
- lorsqu'il y a de l'électricité en trop sur le réseau, on active une pompe qui permet de replacer l'eau de la retenue aval dans la retenue amont

Actuellement en France, les stations de pompage représente 5 GigaWatts. Toute petite partie de la consommation.

--- Durée de vie d'un barrage

Durée de vie du mur du barrage ne pose pas de problème.

Nécessite pour fonctionner normalement de purger la retenue d'eau à intervalles réguliers (pour éliminer les sédiments de l'eau qui ruisselle en amont vers la retenue). Sans quoi le lac de retenue du barrage devient inutilisable, ou alors seulement utilisable comme source d'énergie "au fil de l'eau".

L'entretien du barrage est crucial pour optimiser sa durée de vie. Pas de durée type fournie par EDF.

## Chapitre 39 - La photosynthèse / la biomasse et la géothermie

### La photosynthèse / la biomasse

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

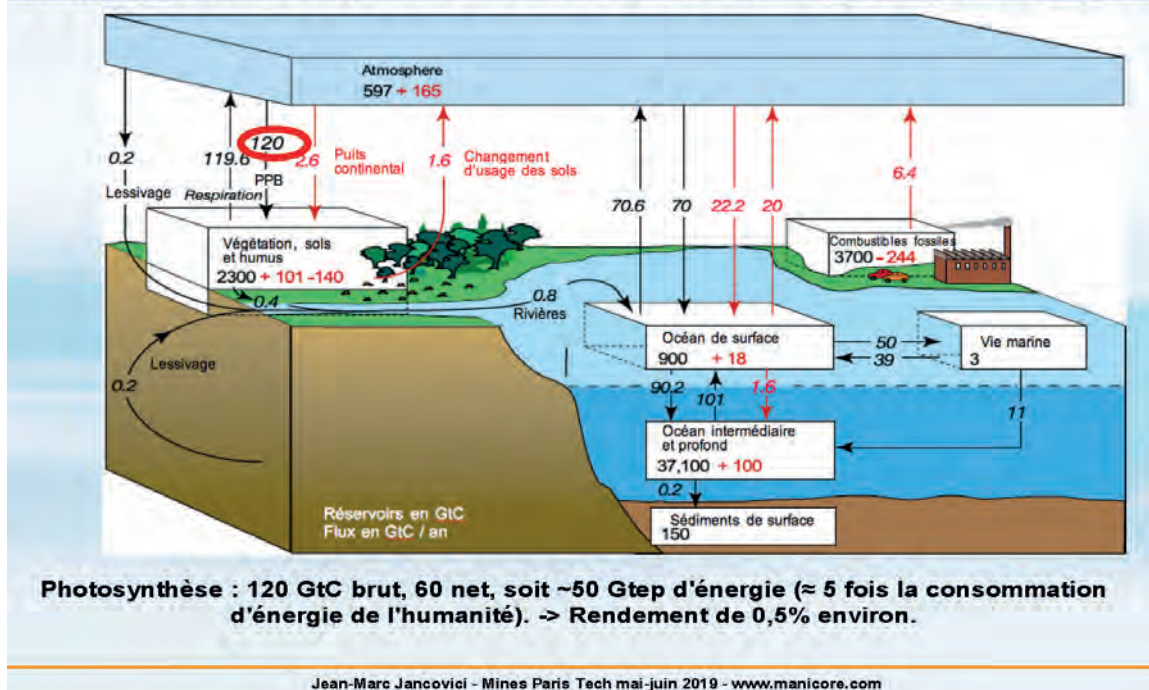


Schéma du cycle du carbone

- 120 milliards de tonnes de carbone séquestrées chaque année par les écosystèmes terrestres sous forme de photosynthèse
- ces écosystèmes terrestres "respirent" dans le même temps (les arbres respirent, tous comme les animaux ils ont un système d'oxydation)
- la productivité primaire nette, c'est-à-dire ce qui est séquestré par la photosynthèse moins ce qui est respiré par les plantes, équivaut à 60 milliards de tonnes de carbone par an

Comme le pétrole et le charbon sont essentiellement du carbone, 60 milliards de tonnes de carbone correspond grosso modo à 50 milliards de TeP (tonnes équivalent pétrole), soit 5 fois la consommation actuelle de l'humanité est (14 milliards de tonnes de carbone).

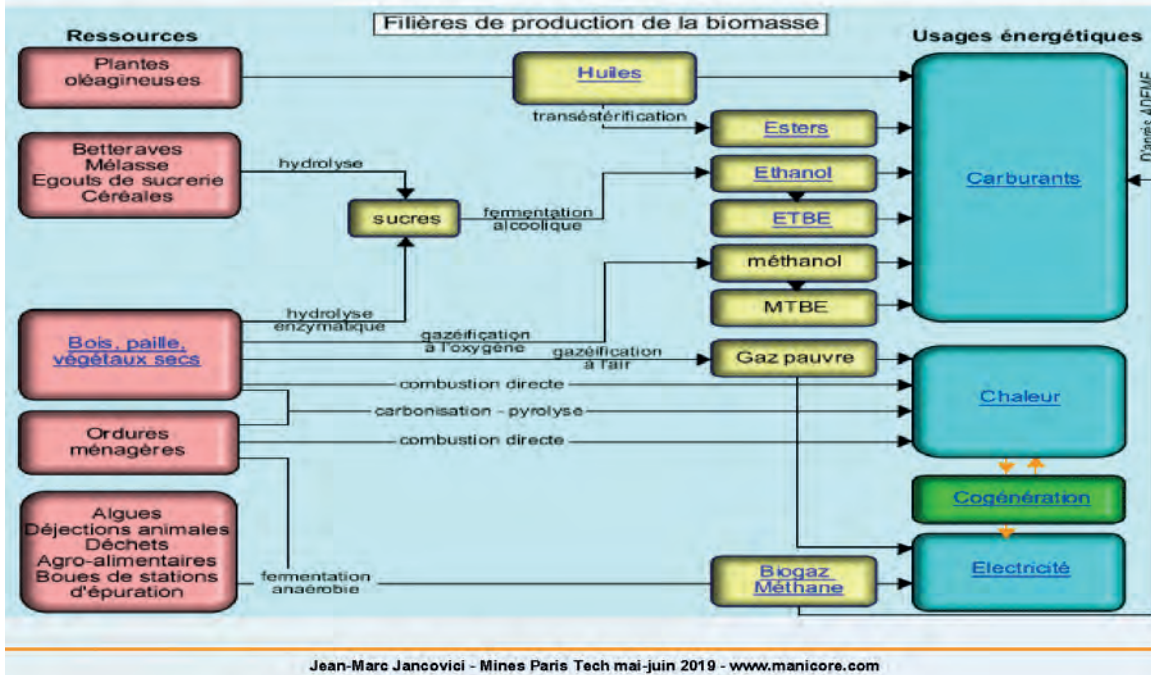
Cela ne signifie pas que la biomasse puisse être exploitée entièrement :

- altérer la biomasse c'est altérer les écosystèmes
- la photosynthèse sert à la production agricole, l'altérer c'est diminuer la production alimentaire (moins d'énergie à avaler par l'humanité. S'agissant de la photosynthèse, le convertisseur est l'homme et l'énergie l'alimentation : elle n'est pas prévue pour faire fonctionner des machines.

La fraction de la biomasse qui est disponible pour l'usage des hommes :

- non pas 60 milliards de tonnes par an
- mais quelques milliards seulement

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



### Exploitation de la biomasse

- combustion du bois (ou de tout ce brûle) pour produire de la chaleur
- fermentation alcoolique, transés térification, gazéification à l'oxygène pour produire des agrocarburants
- biogaz (algues, déjections animales, déchets agro-alimentaires, boues des stations d'épuration) pour produire de l'électricité
- cogénération chaleur / électricité

La biomasse peut être transformée en combustibles solides, liquides ou gazeux, exactement comme avec les combustibles fossiles, pour à peu près les mêmes usages.

Par exemple avec le bois il est possible de faire comme avec le charbon :

- de la chaleur domestique et de la chaleur industrielle
- ou de l'électricité

Même si les rendements sont inférieurs avec le bois qu'avec le charbon (car la température de combustion du bois est inférieure), il est possible d'utiliser le bois à la place du charbon pour à peu près tous les usages.

Possibilité d'utiliser les agrocarburants à la place des carburants fossiles liquides pour les voitures, les camions, ... Pour les avions convertir la flotte intégralement aux biocarburants sera impossible car

- le kérozène représente 10% du pétrole consommé sur terre
- l'ensemble des céréales cultivées représente si elles étaient transformées en agro-carburant, on atteint 25% du pétrole consommé

Le biogaz est un substitut au gaz naturel qui peut servir à produire de l'électricité, de la chaleur ou du carburant.



## 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)

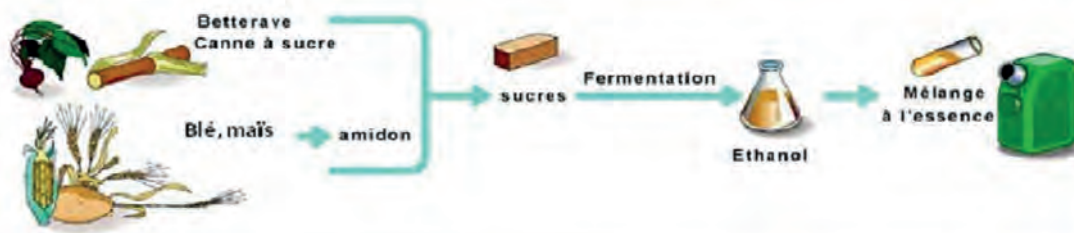
2 % chaleur dans le collectif/tertiaire avec ou sans réseau de chaleur (0,17Mtep)



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

Non traité

## Ah, sainte voiture, comment te conserver ?



### Les deux grandes filières d'agroc carburants de première génération

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

2 filières d'agroc carburants de première génération / de combustibles liquides issus de la biomasse

#### Fermentation

Cela consiste à obtenir de l'éthanol par fermentation (amidon des céréales, sucre de betterave ou de canne) puis distillation. Cette opération est très gourmande en chaleur donc en énergie, c'est la faiblesse du procédé qui au final a un très mauvais rendement.

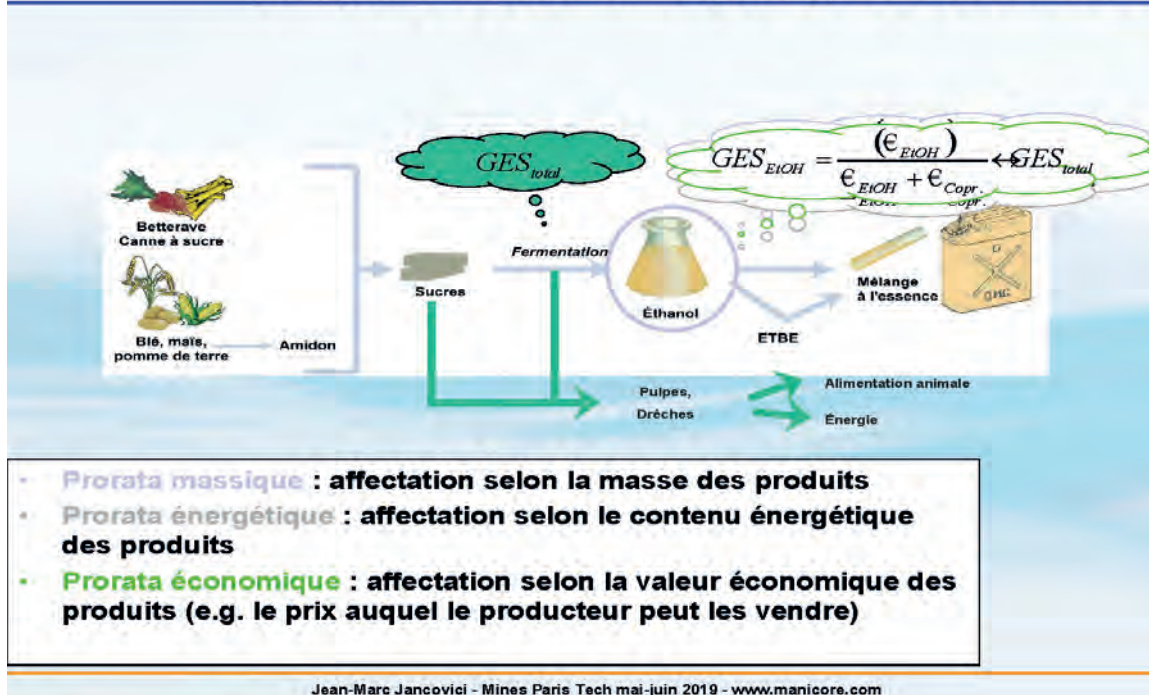
#### Transestérification

Utilisation d'oléagineux (colza, soja, huile de palme, tournesol, arachides, ...) qui permet de faire un substitut au diesel (mais pas à l'essence). Le processus d'extraction est purement mécanique donc avec un rendement de transformation bien supérieur. En revanche le rendement de production est moins bon :

- on peut récolter plusieurs dizaines de tonne de betteraves à l'hectare

- là où on ne récolte que quelques tonnes d'oléagineux comme le tournsol ou le colza à l'hectare, le rendement de culture est beaucoup moins bo

## Comptons les économies, donc, mais comment ?



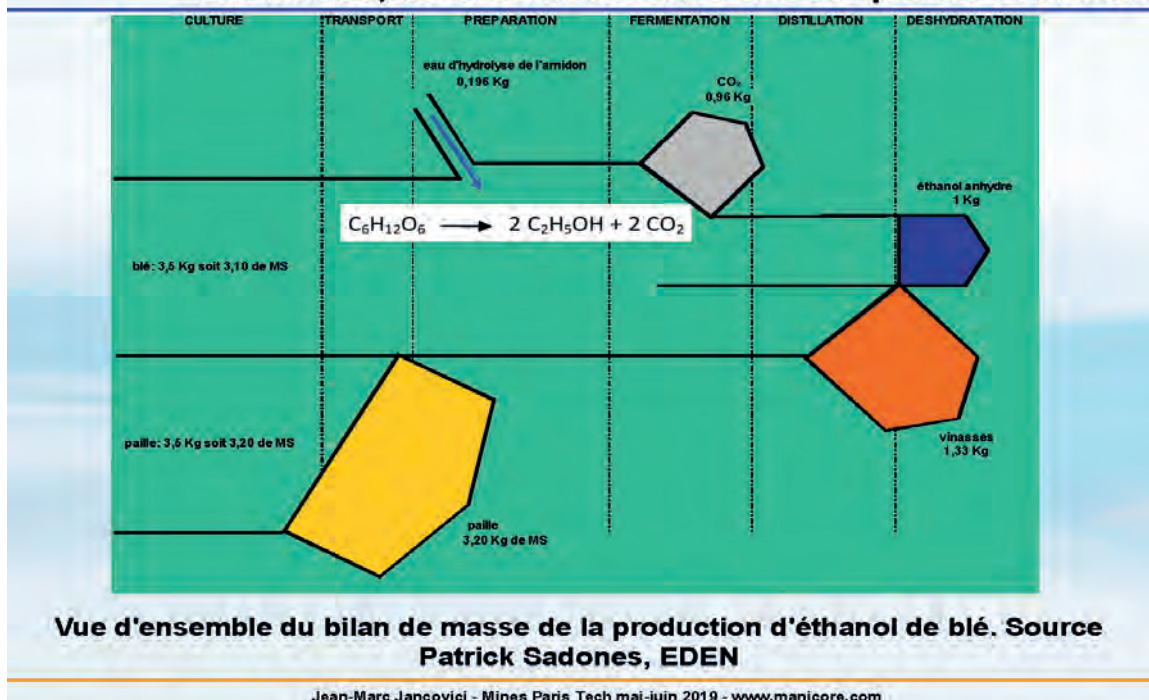
Quel est le bilan carbone des agro-carburants ? Réponse difficile car la production d'agro-carburant n'est jamais totalement isolée de la production alimentaire.

Plusieurs règles possibles pour calculer le bilan carbone :

- selon la masse du produit initial
- selon l'énergie de transformation qui a été nécessaire
- selon la valeur économique

Les résultats obtenus varient en fonction de la règle retenue.

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

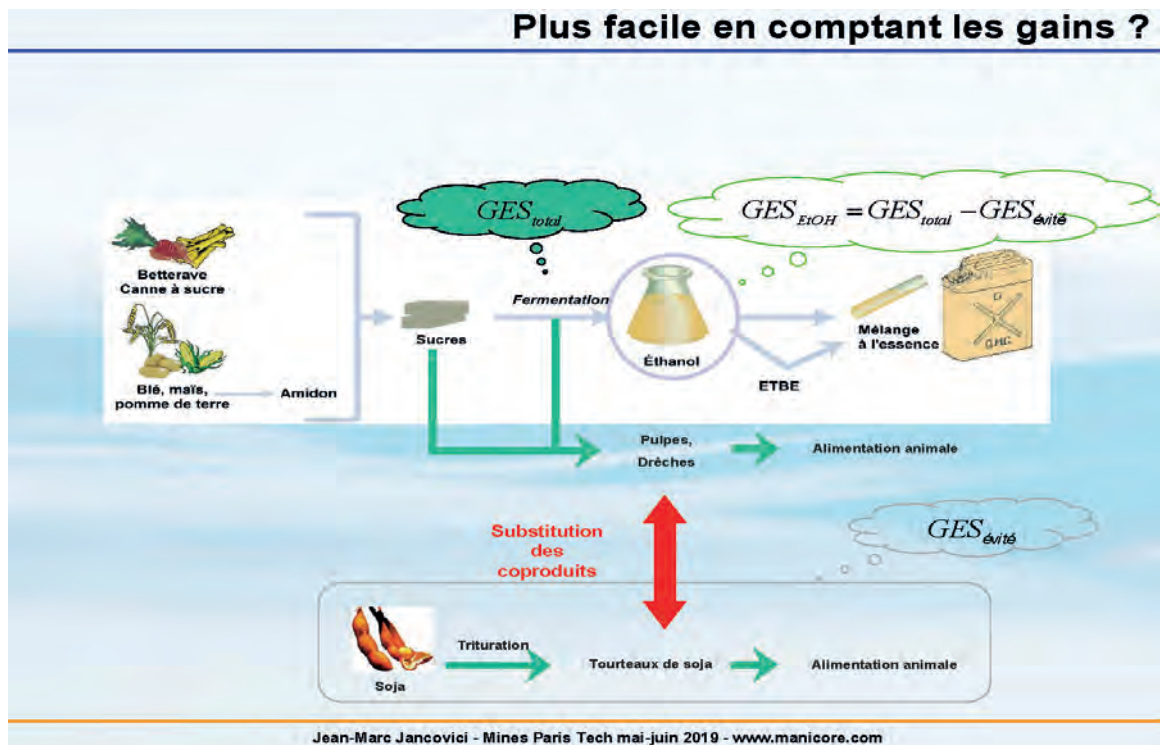


Exemple de l'éthanol de blé (idem pour betterave)

- Le grain et paille sont utilisés pour la production de l'éthanol : faut-il affecter dans le bilan carbone les intrants utilisés pour

faire pousser le blé ?

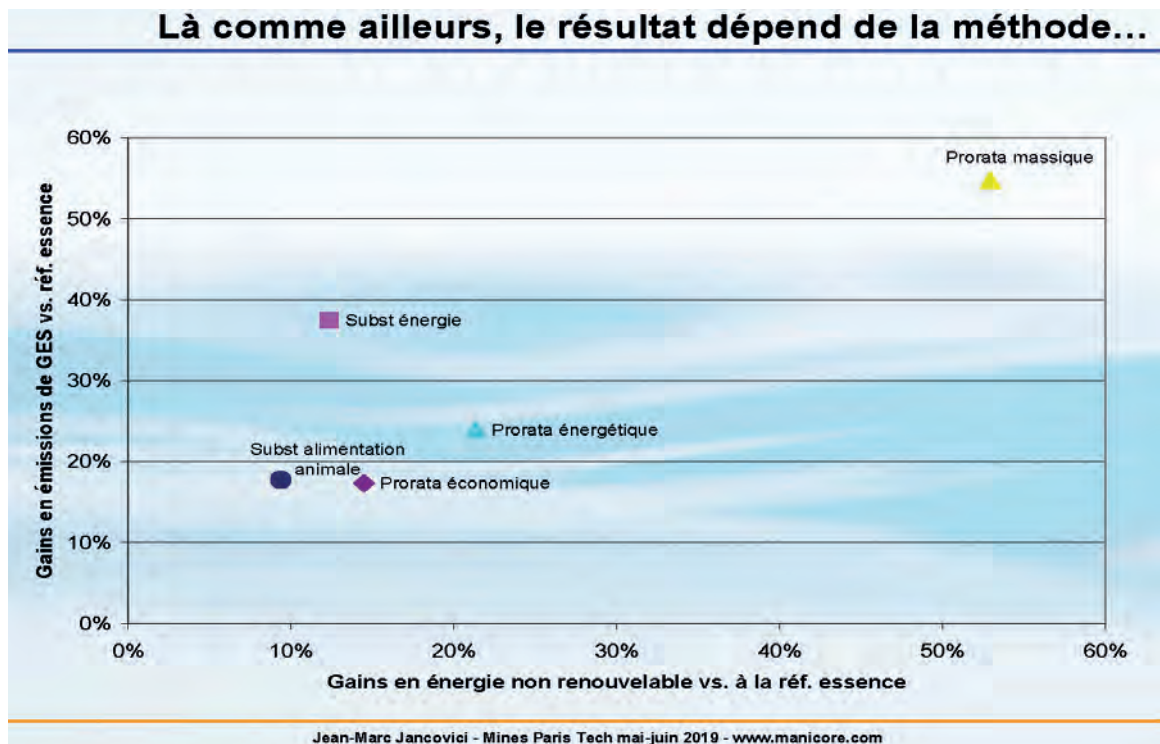
- Durant la phase de fermentation, faut-il prendre en compte le CO2 qui s'échappe ? Ainsi que l'eau ?



Lors du processus de production d'éthanol, on obtient des coproduits. S'agissant d'une production à partir de betterave, on sort des drèches (= résidus végétaux) utilisés dans l'alimentation animale.

Question : comment tenir compte des co-produits dans le calcul du bilan carbone de l'agro-carburant ?

- les intégrer dans le contenu énergétique de l'éthanol ?
- les valoriser dans la valeur économique de l'éthanol ?
- ...



Comparativement à 1 litre de pétrole, le gain de CO2 d'1 litre d'agro-carburant varie entre 10 et 60% ... selon la méthode de calcul.

Le cas des Etats-Unis où l'éthanol de maïs est très développé (40% du maïs cultivé) même si le rendement énergétique est

proche du 1 pour 1. Cela s'explique en partie :

- par la facilité d'accès au gaz et au charbon nécessaire à la distillation (énergie domestique)
- pour au final remplacer le pétrole importé par de l'éthanol

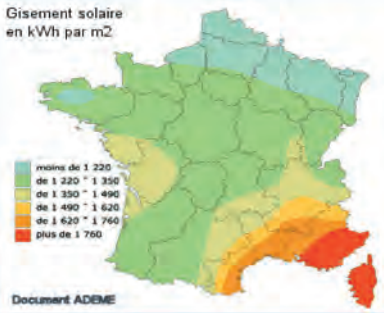
## A l'origine, toujours la même histoire : la photosynthèse

**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).**

Gisement solaire  
en kWh par m<sup>2</sup>



**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...**

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

Le potentiel de la photosynthèse. Exemple de la France.

Rendement de la photosynthèse = 0,5%

(les algues plus performantes car poussent plus vite mais le rendement de la photosynthèse reste faible quelque soit la plante)

Dit autrement l'énergie contenue dans le glucose que la plante va synthétiser à partir de l'énergie solaire correspond à 0,5% de l'énergie solaire reçue par la plante au cours de l'année.

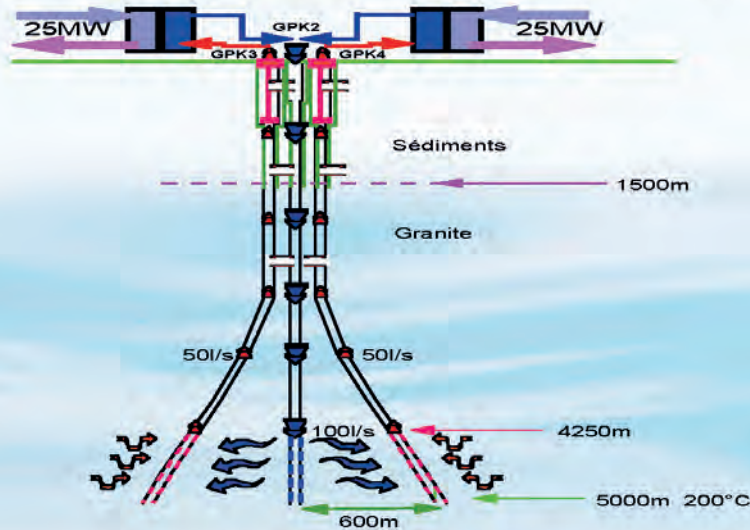
50 millions d'hectares cultivables en France métropolitaine

- c'est-à-dire grosso mode 50 millions TeP d'agro-carburant potentiellement par an
- la consommation actuelle de pétrole en France dépasse 70 Millions de tonnes par an
- et en énergie primaire 240 Millions de tonnes par an

Aujourd'hui on utilise environ 15 Mt de biomasse en France, le plafond doit se situer aux alentours de 30 Mt. Petit potentiel d'augmentation et en aucune manière capable de remplacer le gros de la consommation d'énergie primaire ou même de carburant.

## La géothermie

## La géothermie profonde, comment ça marche ?



### Schéma de principe d'une installation destinée à produire de l'électricité avec des roches chaudes fracturées

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

Géothermie profonde : production d'électricité avec des roches chaudes fracturées.

Équivaut à une machine de Carnot, avec une source froide transformée en source chaude et destinée à faire de l'électricité :

- un puits d'injection dans lequel est injectée de l'eau destinée à être chauffée en profondeur (4 à 5 km)
- l'eau chauffée et sous pression remonte par des puits de récupération

## Le chauffage par le sol, en somme



source : BRGM-im@gè

### Zones plus ou moins propices à la géothermie profonde. Flux géothermique annuel $\approx$ 2 fois la consommation de l'humanité.

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

Zones plus ou moins propices à la géothermie profonde, là où on trouve de grandes quantités de chaleur dans les profondeurs, c'est à dire dans les zones volcaniques / dans les failles de la croûte terrestre.

Difficulté en plus de l'implantation, le circuit est ouvert et donc l'eau injectée se charge en profondeur de matières indésirables et très corrosives. Les installations doivent résister / être blindées vis à vis des éléments remontés depuis le sous-sol.

Fort potentiel en théorie de la géothermie profonde : le flux géothermique annuel équivaut à 2 fois la consommation de l'humanité.

## La géothermie moins profonde, comment ça marche ?



### Schéma de principe d'une installation destinée à exploiter de la chaleur pour le chauffage urbain

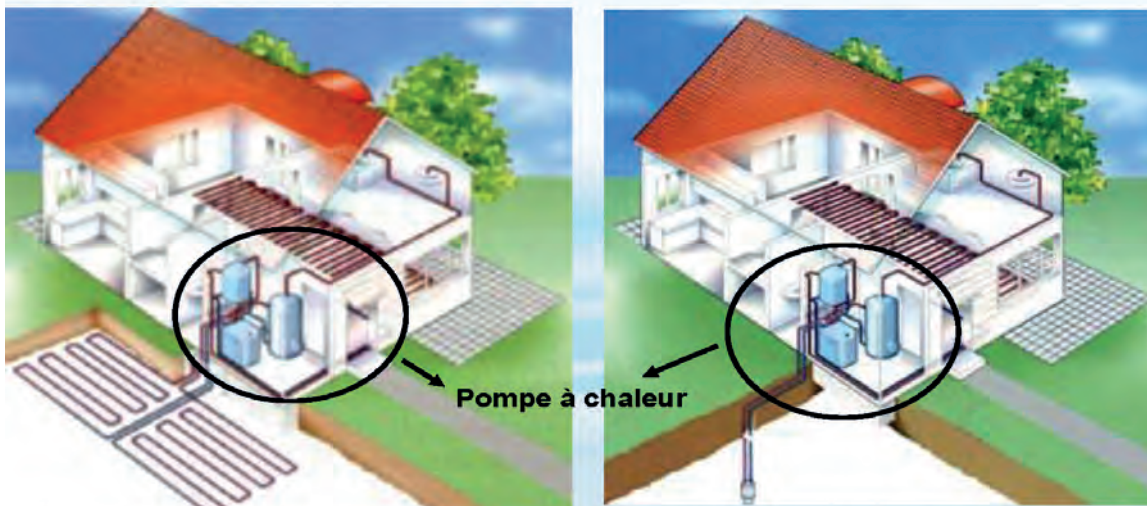
Jean-Marc Jancovici - Mines Paris Tech mai-juin 2019 - [www.manicore.com](http://www.manicore.com)

Dimension intermédiaire : les installations de géothermie pour le chauffage urbain (par exemple la Maison de la Radio à Paris). Impropre à fabriquer de l'électricité, la source chaude n'est pas assez.

- consiste à pomper de la chaleur dans une nappe intermédiaire (la nappe du Dogger, dont la chaleur se situe entre 57 et 85°)
- avec l'objectif de produire du chauffage urbain

Note : ré-injection d'eau froide dans la nappe chaude pourrait à terme la refroidir. Limite de cette technologie.

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



### Schéma de principe d'une installation destinée à exploiter de la chaleur pour le chauffage individuel

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

3e manière de se servir de la géothermie : les pompes à chaleur

Principe :

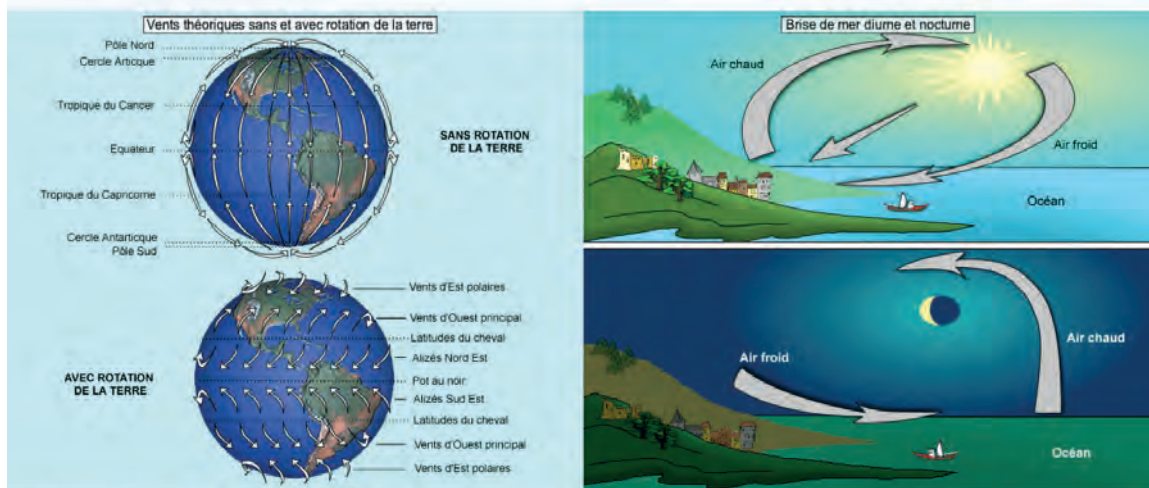
- un frigo inversé (au lieu de refroidir l'intérieur et réchauffer l'extérieur, la pompe à chaleur réchauffe l'intérieur et refroidit l'extérieur)
- extraire des calories provenant de l'air ou de l'eau

Possibilités :

- une pompe eau / eau : le circuit qui collecte les calories à l'extérieur de la maison est un circuit d'eau enfoui dans le sol
- une pompe air / eau : le circuit collecte les calories dans l'air et les transfère dans une boucle d'eau chaude située dans le logement
- air / air : collecte des calories dans l'air puis restituées dans l'air (c'est-à-dire un appareil à air conditionné réversible, qui ne fonctionne que pour 1 seule pièce du logement tandis que les pompes eau / air alimentent un chauffage central).

## Chapitre 41 - L'éolien

### L'éolien commence par cela...



**Principales circulations atmosphériques. Energie des vents & des courants  $\approx$  25 à 30 fois la consommation d'énergie de l'humanité.**

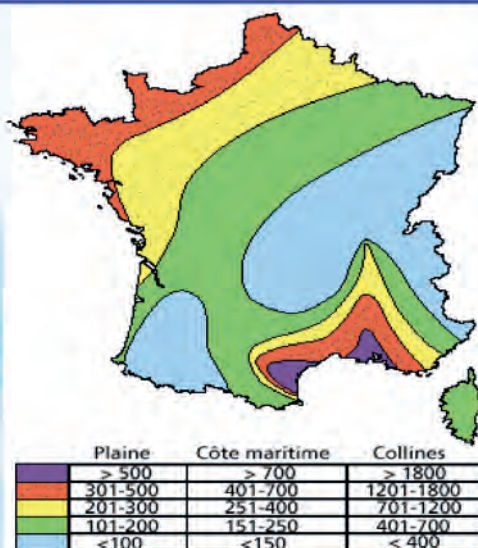
Jean-Marc Jancovici - Mines Paris Tech mai-juin 2019 - [www.manicore.com](http://www.manicore.com)

Potentiel théorique du vent et des courants = 25 à 30 fois la consommation d'énergie de l'humanité

Le vent provient des différences entre les pressions atmosphériques, avec des circulations

- chroniques, avec de grandes circulations (par exemple les alizés à l'équateur)
- conjoncturelles, les circulations thermiques

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

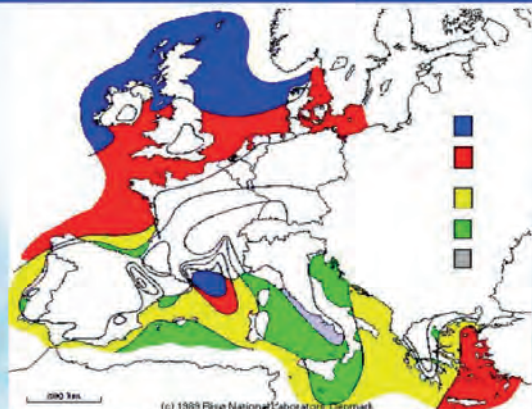


**Puissance moyenne du vent selon les zones, en W pour un m<sup>2</sup> de section verticale prise à 50 m du sol (perpendiculairement au sens du vent). Source ADEME**

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

Puissance moyenne du vent selon les zones du territoire française : deux grandes zones de vent : le couloir rhodanien et la façade atlantique

## Le vent, un caprice plus ou moins fréquent



	10 m		25 m		50 m		100 m		200 m	
	m/s	W/m <sup>2</sup>	m/s	W/m <sup>2</sup>	m/s	W/m <sup>2</sup>	m/s	W/m <sup>2</sup>	m/s	W/m <sup>2</sup>
■	> 8	> 600	> 8,5	> 700	> 9	> 800	> 10	> 1100	> 11	> 1500
■	7 à 8	350 à 600	7,5 à 8,5	450 à 700	8 à 9	600 à 800	8,5 à 10	650 à 1100	9,5 à 11	900 à 1500
■	6.0 à 7.0	250 à 300	6.5 à 7.5	300 à 450	7.0 à 8.0	400 à 600	7.5 à 8.5	450 à 650	8.0 à 9.5	600 à 900
■	4.5 à 6.0	100 à 250	5.0 à 6.5	150 à 300	5.5 à 7.0	200 à 400	6.0 à 7.5	250 à 450	6.5 à 8.0	300 à 600
■	< 4.5	< 100	< 5.0	< 150	< 5.5	< 200	< 6.0	< 250	< 6.5	< 300

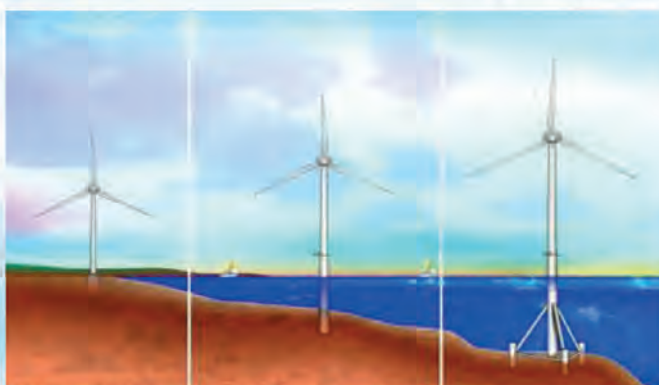
**Puissance moyenne du vent selon les zones, en W pour un m<sup>2</sup> de section verticale (perpendiculairement au sens du vent). Source ADEME**

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

A l'échelle européenne, mêmes zones ventées :

- la zone Nord de la façade atlantique
- le golfe du lion

## Quel piège pour Eole ?



1985 : Ø 15 m    1995 : Ø 70 m    2005 : Ø 110 m  
 P = 50 kW    P = 1500 kW    P = 4000 kW

**Puissance qui varie comme le cube de la vitesse**

$$P = \frac{1}{2} \cdot \text{masse} \cdot \text{vitesse}^2 \div \text{temps}$$

$$\text{masse} = \text{volume} \cdot \text{densité}$$

$$\text{volume} = \text{section} \cdot \text{vitesse} \cdot \text{temps}$$

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

Comment récupère-t-on l'énergie du vent ?

On fabrique un moulin à vent, dont la puissance dépend de la surface couverte par les pales de l'éolienne.

La puissance d'une éolienne varie comme le cube de la puissance du vent.

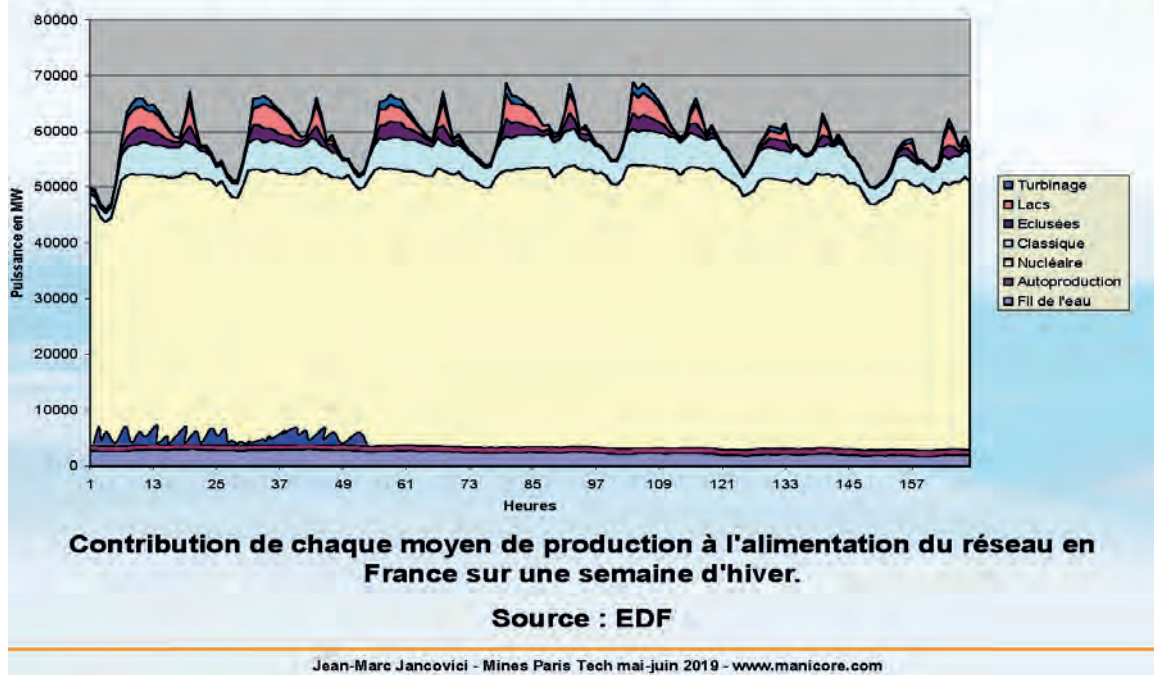
Ce qui signifie que dans le temps, la variation de puissance est très grande.

Par exemple en France : avec le passage de la tempête Miguel la puissance est passée de 10 Gigas Watt à moins de 1 Giga Watt en 24 heures (soit l'équivalent de 9 centrales nucléaires éteintes en moins d'une journée)



Technologie évoluée : ambition de développer les éoliennes en mer (flottantes), là où les vents sont plus réguliers car rencontrant moins de résistances. Production annuelle meilleure mais l'infrastructure (grande plateforme d'ancrage, ...) est beaucoup plus importante.

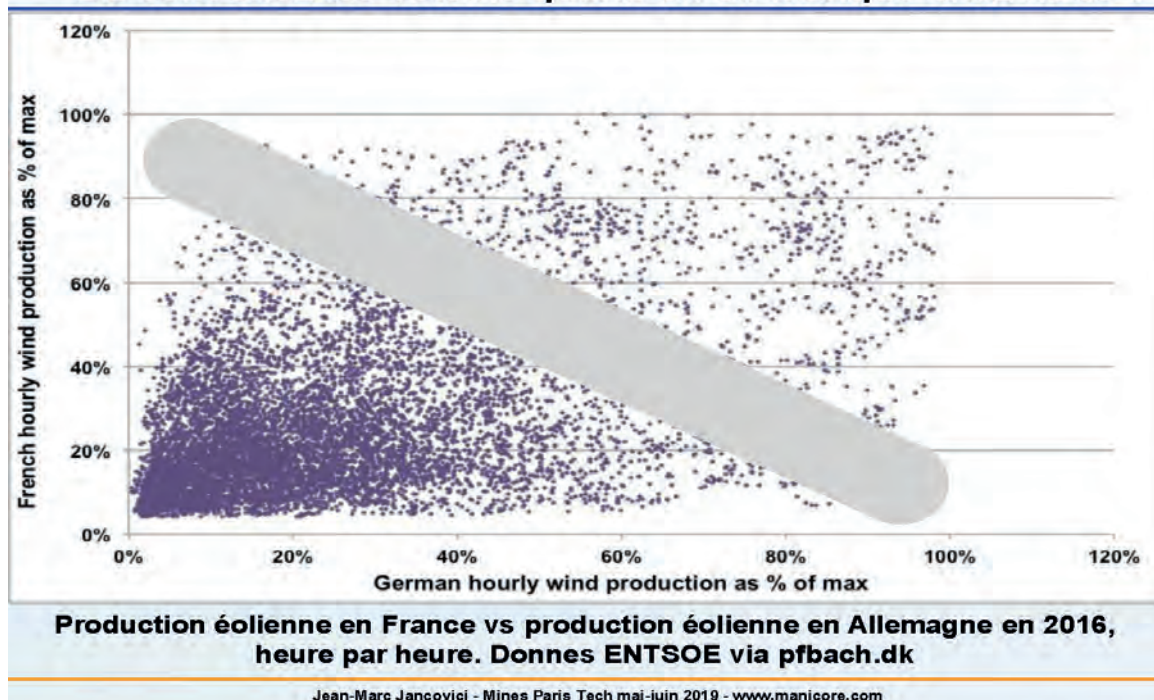
### Plus d'éolien = plus de pointe = plus de fossiles ?



Comme l'énergie photovoltaïque, l'énergie éolienne est intermittente : elle est disponible quand elle veut et non pas quand les usagers en ont besoin.

La production de ce type d'énergie vient nécessairement empiéter sur la production dite de base (celle disponible tout le temps). Lorsque la production intermittente occupe une part négligeable de la puissance électrique, pas de soucis majeurs. En revanche lorsque la production intermittente remplace significativement la production de base, cela devient difficilement gérable / pilotable.

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

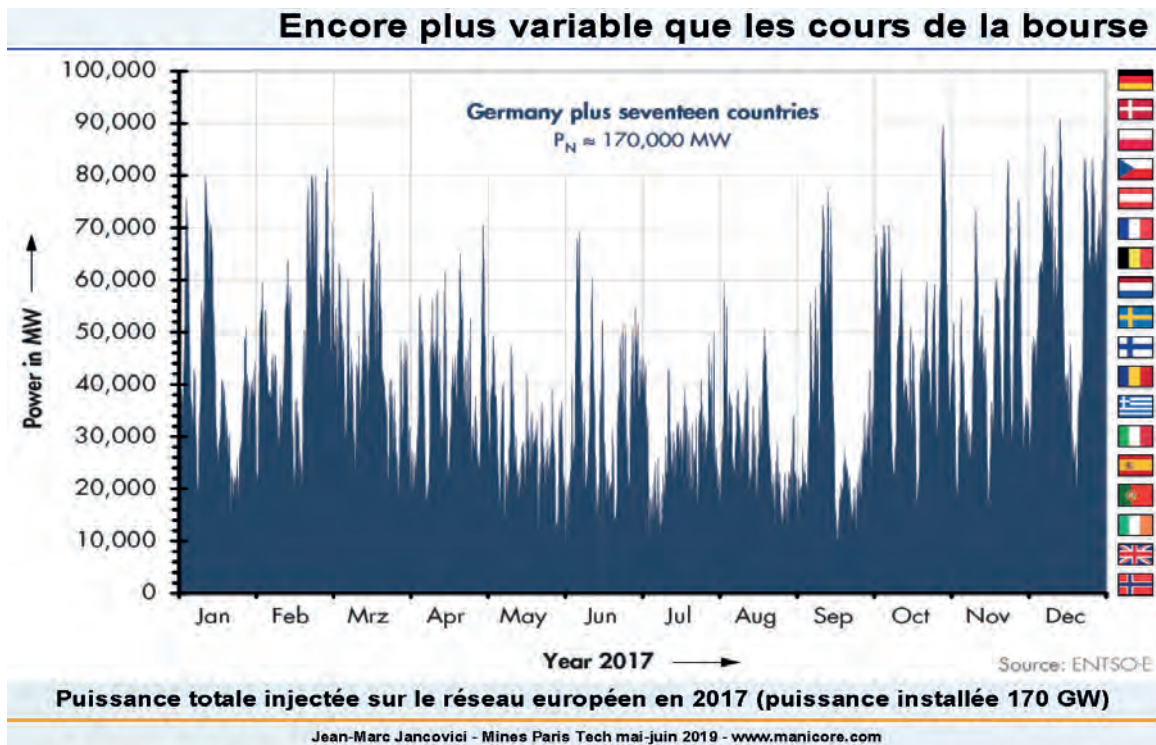


Hypothèse : il suffirait d'augmenter le parc d'éoliennes et diversifier son implantation géographique sur le continent européen pour s'assurer d'une production constante d'énergie ?

Empiriquement, en comparant la charge de puissance exploitée en par le parc en Allemagne et celui en France à un instant t, on constate que les dominantes de vent sont les mêmes : la probabilité de ne pas avoir de vent en Allemagne est maximale lorsqu'il

n'y a pas de vent en France.

La puissance garantie sur laquelle le réseau peut compter n'augmente pas significativement en diversifiant l'implantation géographique.

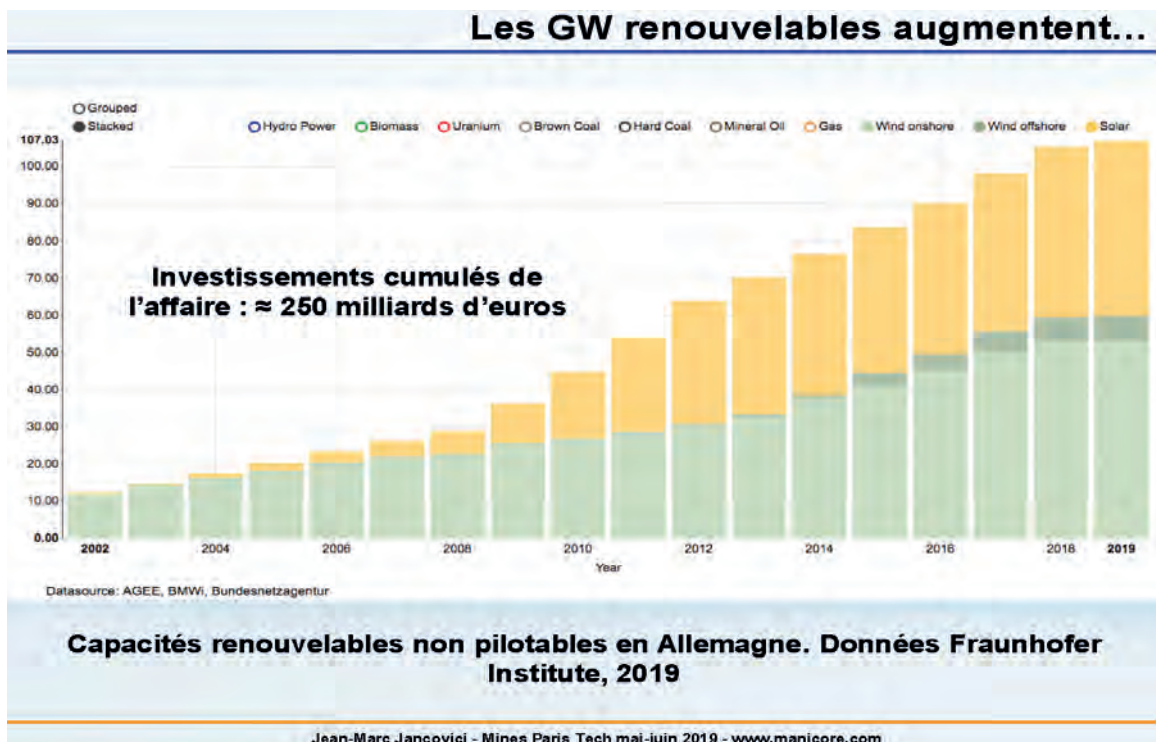


Puissance totale injectée sur le réseau européen par la production éolienne :

- extrême variabilité de puissance même à 27
- et peut descendre extrêmement bas

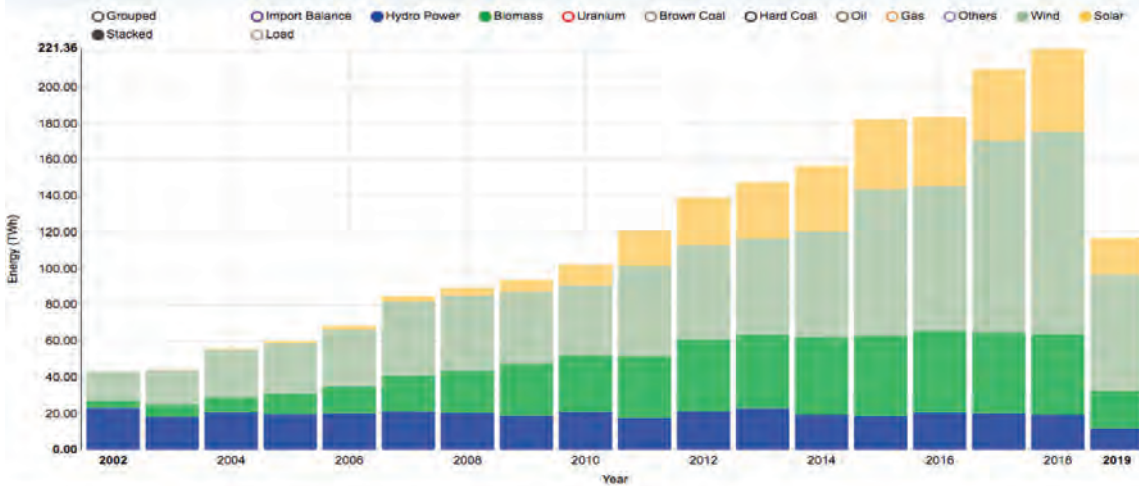
La puissance du parc éolien en Europe est de 170 gigas watts :

- elle ne dépasse jamais 100 GW
- à tout instant elle peut tomber à 10 GW voire plus bas



Capacité des énergies renouvelables non pilotables en Allemagne depuis 2002 forte augmentation, passage de 10 GW à plus de 100 GW en 2019, avec un investissement d'environ 250 milliards d'euros

## La production aussi...

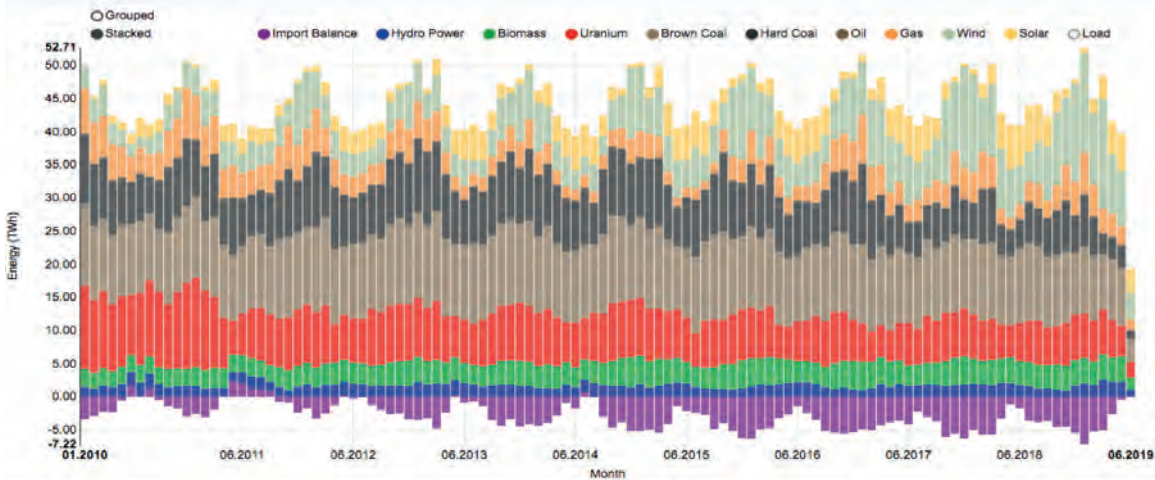


**Evolution de la production électrique renouvelable depuis 2002, en TWh**  
 Source 50 Hertz, Amprion, Tennet, TransnetBW, Destatis, EEX, 2019,  
 via <https://www.energy-charts.de>

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

Production électrique renouvelable depuis 2002 en Allemagne en forte augmentation (solaire, éolien à terre et offshore).

## 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>**

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

Consommation électrique en Allemagne depuis 2019 :

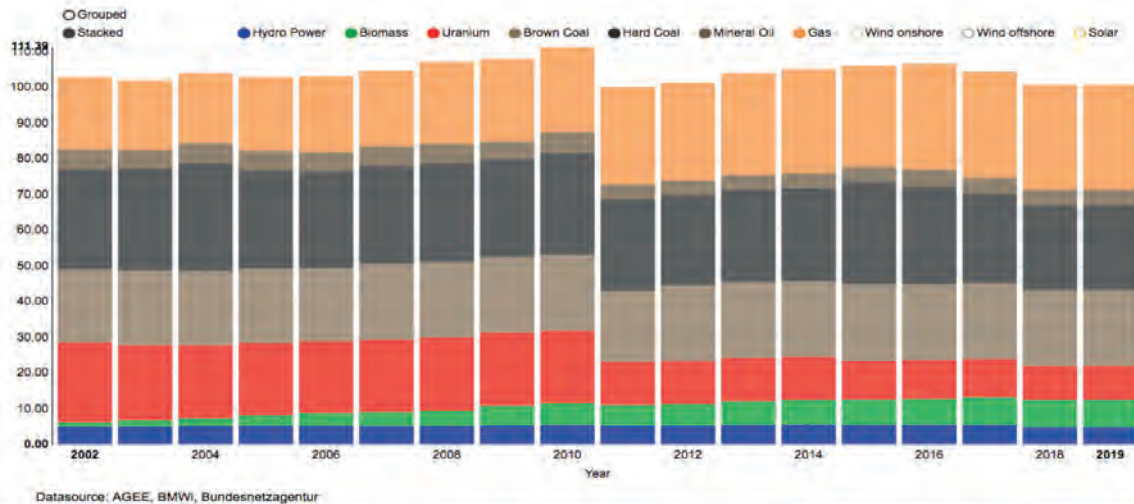
- stable globalement
- les exportations augmentent : l'accroissement de la production électrique allemande sert essentiellement à augmenter ses exportations. Il ne fait pas varier sa consommation domestique en quantité (fait baisser le facteur de charge sur les moyens conventionnels)

En Allemagne depuis 20 ans :

- de plus en plus de puissance installée au niveau des énergies renouvelables
- de plus en plus de production avec des énergies renouvelables
- une production globale stable

... et parallèlement la puissance installée dans les autres modes de production (= non ENR) n'a pas baissé.

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



**Puissance pilotable installée en Allemagne. Données AGEE, BMWi, Bundesnetzagentur via <https://www.energy-charts.de>**

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

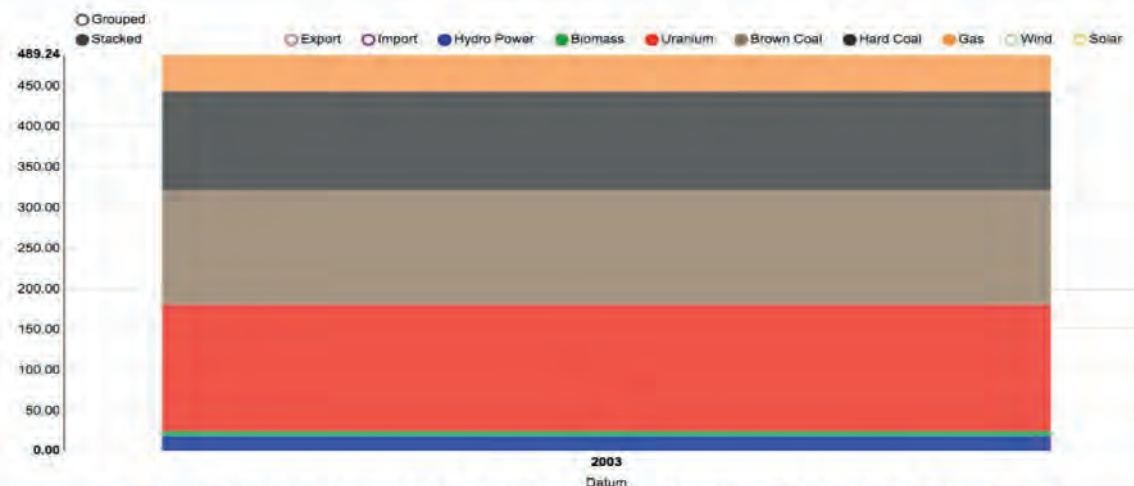
La production d'électricité non ENR

- au total en Allemagne en 2002 est de 100 GW, comme en 2019
- et ce, malgré la production supplémentaire d'électricité ENR (+ 100 GW de 2002 à 2019)

L'augmentation des moyens intermittents n'a pas conduit / ne permet pas de baisser la quantité des moyens pilotables déjà installés.

Comme la puissance installée n'a pas varié, cela signifie que l'Allemagne utilise moins ses moyens pilotables.

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

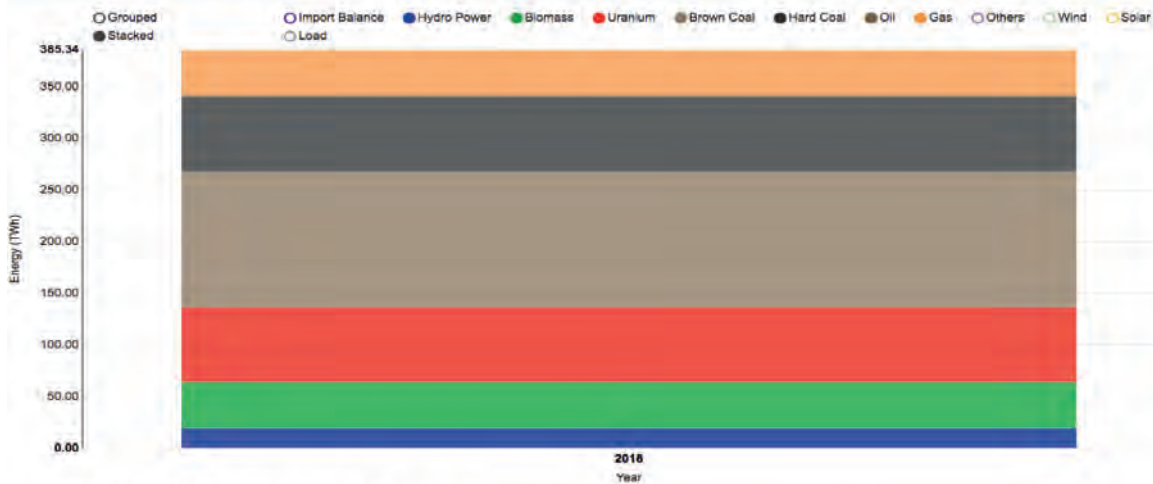


**Production des capacités pilotables en Allemagne en 2003. Données <https://www.energy-charts.de>**

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

En 2003 : 500 Tera Watts / heure d'électricité fournie par les moyens pilotables

## ...à un qui l'est moins



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

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

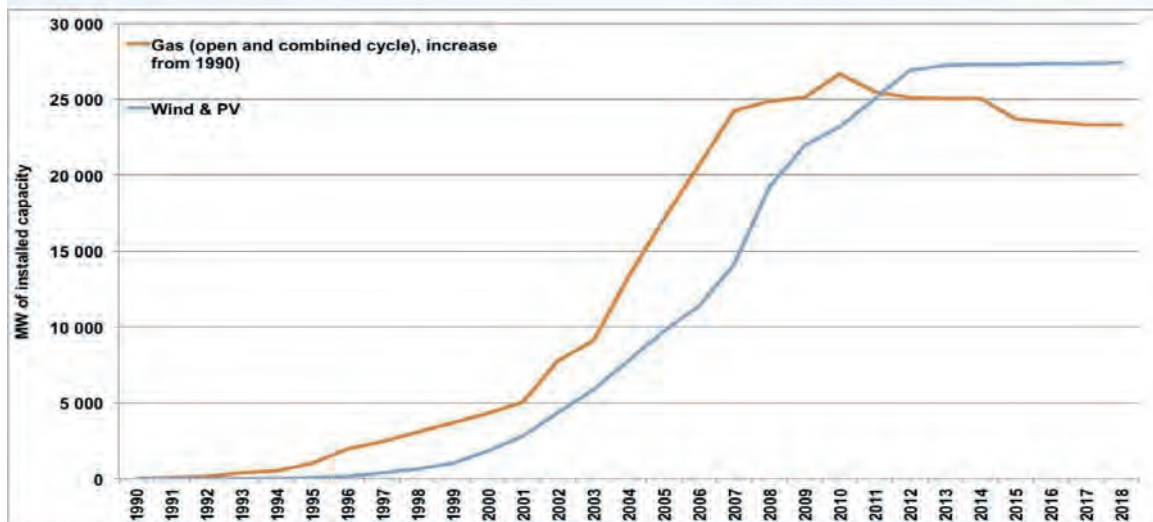
En 2018 : moins de 400 tera Watts / heure d'électricité fournie par les moyens pilotables

Baisse du facteur de charge sur les moyens pilotables = une conséquence de l'augmentation des ENR

Conséquence logique :

- les comptes d'exploitation des électriciens non-enr / aux moyens de production dits conventionnel, chutent
- difficultés des producteurs conventionnels = phénomène observable partout en Europe (y compris EDF)

## Et les espagnols ?

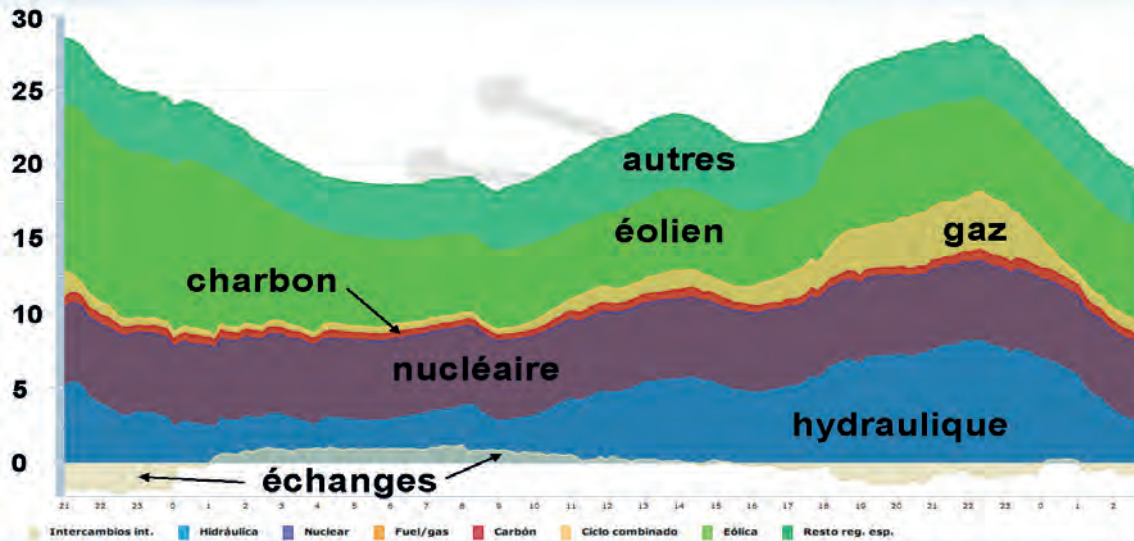


### Puissance installée en Espagne en éolien et en gaz. Données RES Electrica.

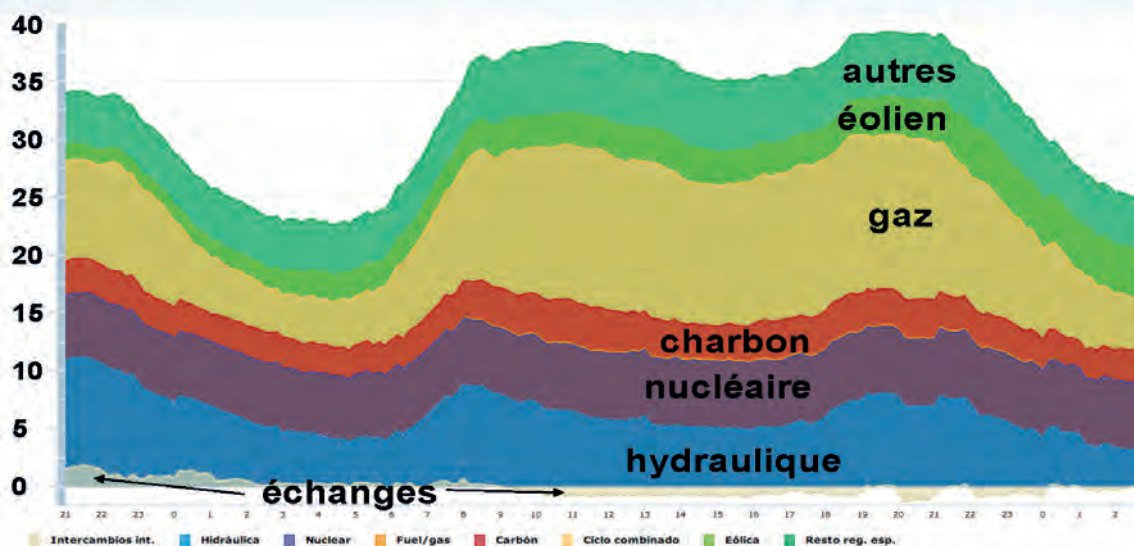
Jean-Marc Jancovici - Mines Paris Tech mai-juin 2019 - [www.manicore.com](http://www.manicore.com)

Puissance installée en Espagne pour l'éolien et le gaz : développement simultané et équivalent en puissance des modes pilotables (gaz) et non pilotables (éolien). C'est la preuve que les modes non pilotables sont insuffisants, ne peuvent pas être employés seuls.

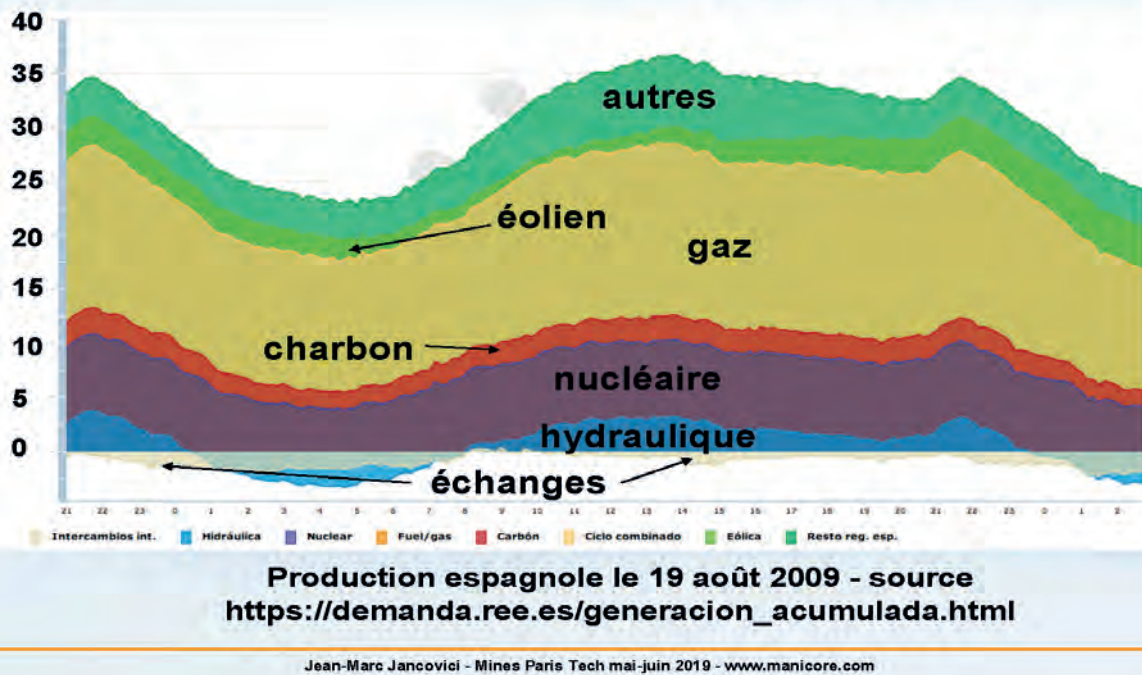
## Eolum und gazum



## Eolum und gazum, suite



## Eolum und gazum, suite



Moyens pilotables et non pilotables de la production électrique en Espagne :

- les jours de vent, utilisation de l'éolien
- les jours sans vent, utilisation du gaz

---

Pour la France

Dans l'hypothèse d'un fort développement des modes non pilotables éolien / solaire, il est très probable

- qu'on baisse le facteur de charge des réacteurs nucléaires
- plutôt que de les démonter

Avec une conséquence possible sur la sûreté du parc nucléaire ?

- obligation de garder un parc pour pouvoir fournir la puissance garantie
- mais qui tourne moins souvent et donc fait entrer moins d'argent pour entretenir le parc

Ou alors autre solution pour maintenir la rentabilité du parc :

- vendre plus cher le kiloW / h
- permet de conserver le même nombre de réacteurs, en intégrant dans le prix le coût des modes intermittants

Donc prévisible si on persiste dans la voie du 50% de production d'électricité nucléaire :

- baisse du facteur de charge du parc
- puis recapitalisation nécessaire avec impact sur la fixation des prix
- ou fermetures forcées de centrales dont la sécurité ne peut plus être assurée faute de moyens... blackouts

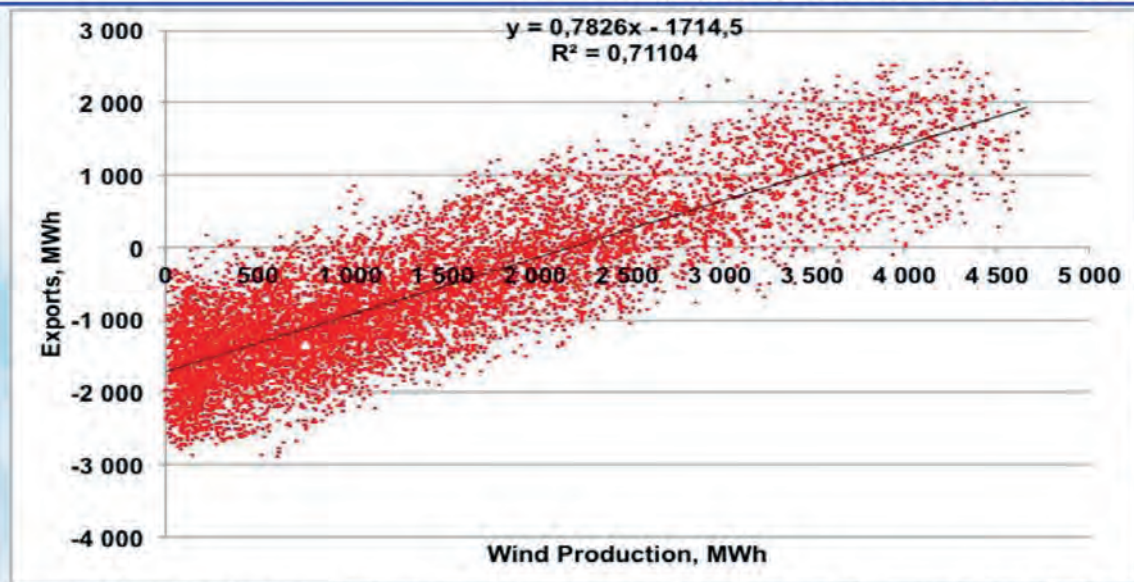
Le remplacement massif de moyens pilotables par non pilotables n'est peut-être pas possible, aucun pays ne parvient à le faire actuellement.

Agilité du nucléaire français :

- possibilité d'augmenter et de baisser sa puissance de 80% en 30 minutes
- soit 30 mega Watts par minute
- permet par exemple d'intervenir (à la baisse) lorsqu'il y a une tempête et qu'il faut compenser la "surproduction" allemande d'électricité éolienne.

Il s'agit d'une exception française (gros parc ultra-dominant dans la production nationale) : dans les pays où le parc nucléaire ne représente que 20% de la production d'électricité, les réacteurs tournent à 100% toute l'année.

## Et avec ça, que donne le résultat ?



**Production éolienne horaire vs exportations horaires au Danemark en 2016.**

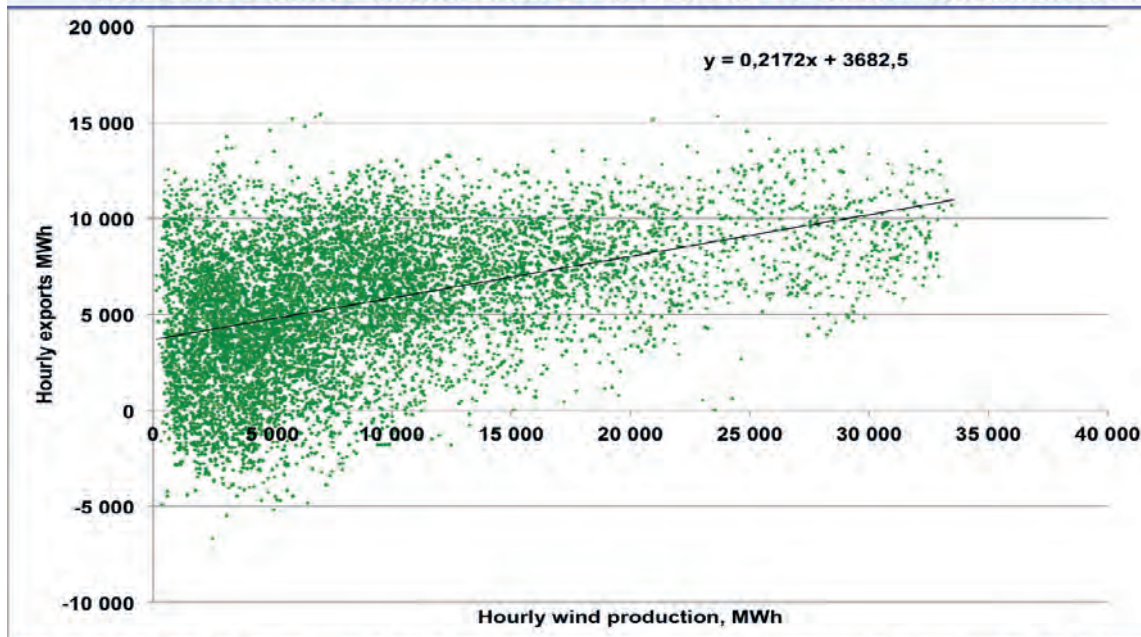
**Source des données : Paul-Frederik Bach ; <http://www.pfbach.dk/>**

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

Exemple du Danemark, à propos de ses exportations.

- lorsqu'il n'y a pas de vent le Danemark importe de l'électricité chez ses voisins (et puisque pas de vent, soit du charbon issu des centrales à charbon allemandes qui, avec ce type de météo, tournent alors à plein régime, soit des barrages scandinaves, très rentables)
- lorsqu'il y a du vent, il exporte... notamment vers les pays scandinaves qui doivent alors freiner la production de leurs barrages

## Qui consomme vraiment les électrons éoliens allemands ?



**Production éolienne horaire vs exportations horaires en Allemagne. Données ENTSOE**

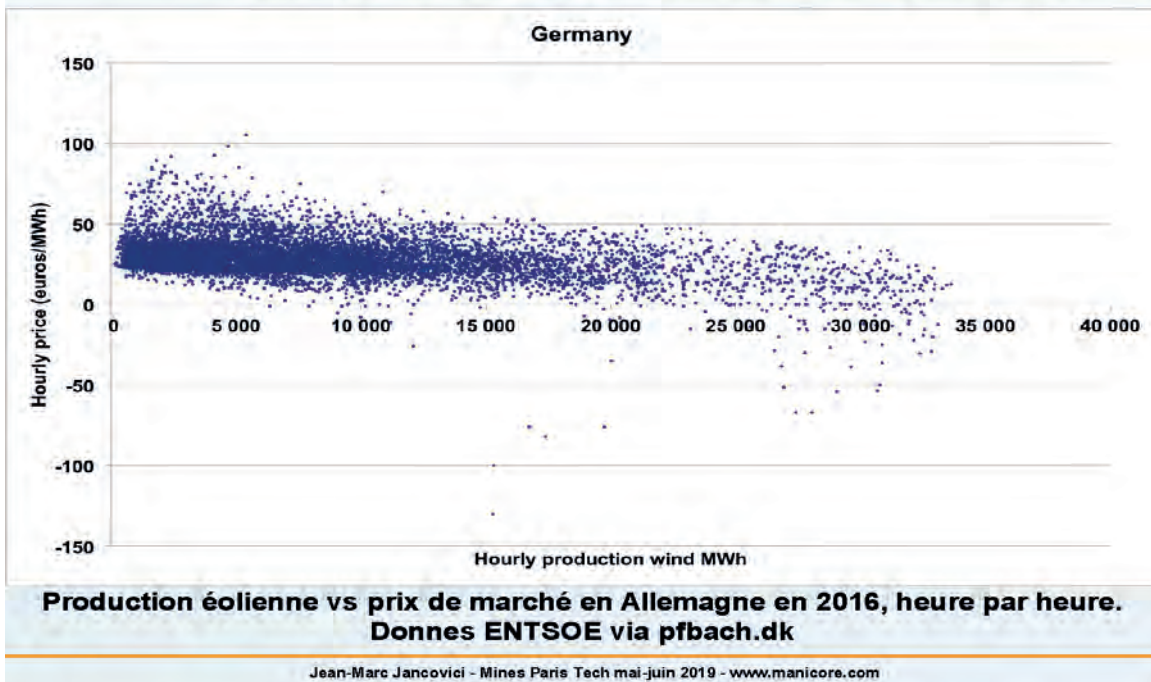
Jean-Marc Jancovici - Mines Paris Tech mai-juin 2019 - [www.manicore.com](http://www.manicore.com)

Exportation de l'électricité éolienne allemande.

Comme au Danemark, plus il y a de vent en Allemagne plus les exportations nettes sont élevées

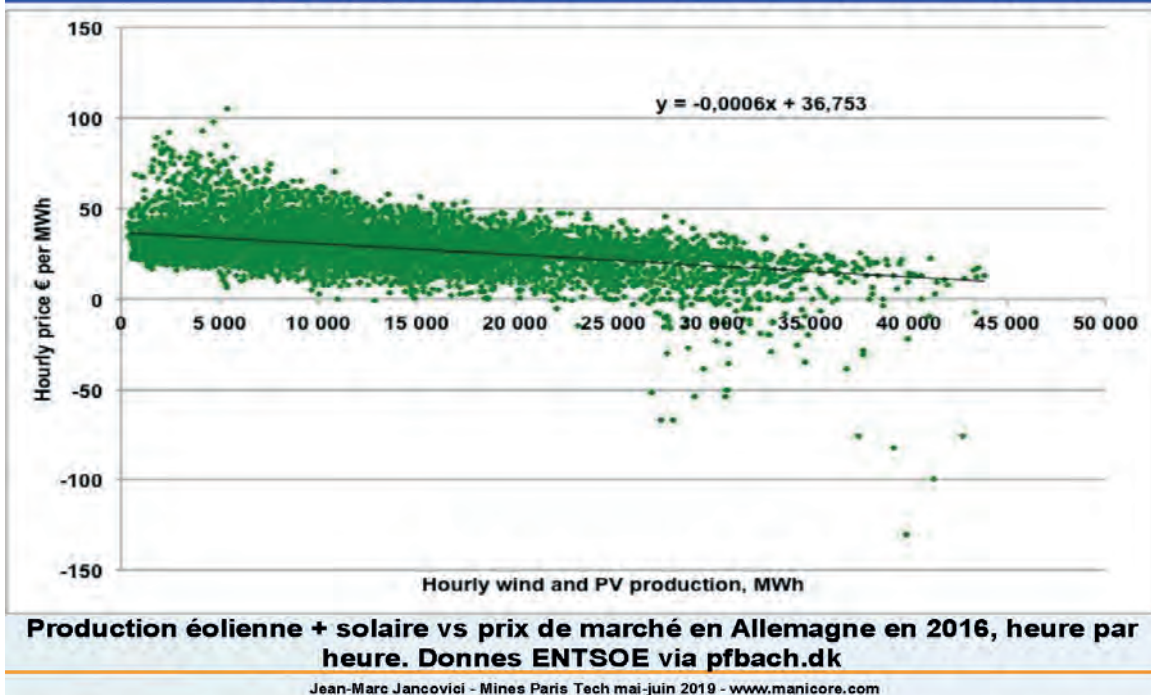


## Le prix de marché ? Il dépend... du sens du vent !



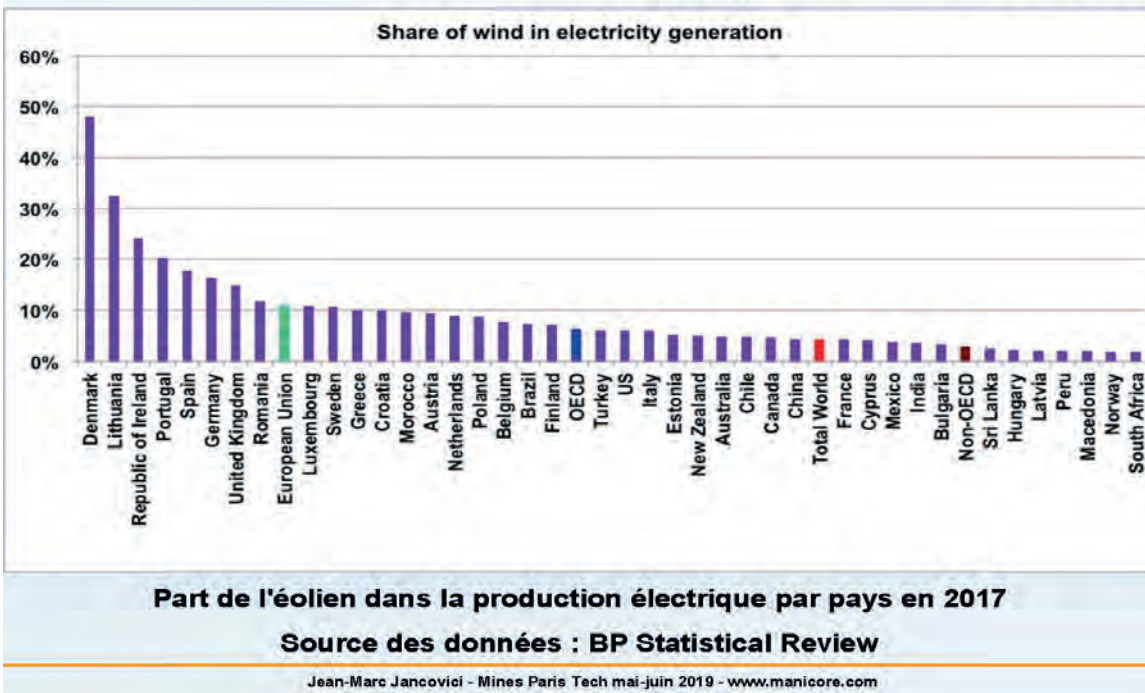
Plus il y a de vent en Allemagne, plus les prix de marché ont tendance à baisser.

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



A partir du tiers de la puissance installée issue de l'éolien, on commence à avoir des prix négatifs, c'est à dire que cela coûte moins cher au producteur de payer le consommateur pour prendre l'électricité plutôt que de débrancher l'éolienne.

## Et avec ça, que donne le résultat ?



Part de l'éolien dans la génération électrique en 2017 :

- Danemark proche des 50 % de sa production électrique (et pas de sa consommation car une bonne partie est exportée)
- UE 11 %, production qui permet de réduire en partie la production fossile
- France 4 %

## Parlons matériaux

**Table 10.4** Range of materials requirements (fuel excluded) for various electricity generation technologies<sup>22</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**

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

Quantité de matériaux nécessaires (notamment métaux) à la construction des différents modes de génération d'électricité, mesurée par MWh.

Constat :

- lorsque l'on passe des modes "concentrés" (centrales nucléaires, à charbon, ...)
- à des modes de production diffus (vent, photovoltaïque, géothermie...)

... il faut multiplier (par quelques dizaines voire centaines) la quantité de matériaux nécessaires. Exemples :

- cuivre : 850 pour le PV / 3 pour le nucléaire
- acier : 7900 pour le PV / 310 pour le charbon
- ...

Or ces matériaux sont aujourd'hui produits grâce à des énergies fossiles, ce qui ajoute au bilan extractiviste des ENR un lourd bilan carbone.

Si on voulait "boucler" la production des ENR via de l'énergie fournie par les ENR, le coût de production serait sensiblement plus élevé. L'éolien et le solaire sont relativement bon marché aujourd'hui car le dispositif de capture repose sur des énergies non renouvelables.

## 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 coûts :**

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

**Ou ajouter le coût 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.**

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

Comparaison des coûts entre l'énergie pilotable et l'énergie non pilotable (éolien / solaire)

On ne peut pas comparer directement 1 kWh sorti de centrale à 1 kWh sorti d'une éolienne / que lorsqu'il y a du vent, ce serait comparer "des choux et des carottes". 1 kWh qui permet au train de partir à l'heure prévue n'a pas la même valeur qu'1 kWh qui permet au train de partir lorsqu'il y a du vent.

La 1ère manière de comparer les énergies pilotables / non pilotables consiste à :

- considérer comme dans l'exemple allemand que le mode non pilotable ne permet pas d'éviter le mode pilotable
- mais permet seulement de vous servir moins du mode pilotable

Du coup, utiliser du mode non pilotable permet d'économiser le combustible qui aurait été utilisé à la place.

- exemple centrale à lignite allemande 10 € pour 1 MWh
- 20 € pour 1 MWh dans les centrales à charbon dans le monde
- 50 € pour 1 MWh pour le gaz
- 1 € pour 1 MWh pour le nucléaire

2nd manière de comparer les énergies pilotables / non pilotables consiste à :

- ne plus considérer le mode pilotable
- et donc ajouter le prix du stockage au mode non pilotable afin de le rendre pilotable

Cela consiste à multiplier le coût de production du mode non pilotable par 2 à 5. Cela change l'équation :

- 1 MWh en sortie d'éolienne coûte 50 €
- avec l'infrastructure permettant de le rendre pilotable, entre 2 à 3 fois plus.

Note : cette équation vaut pour un monde où on dispose en arrière plan d'énergies fossiles pour fabriquer les éoliennes et les infrastructures de stockage. La facture serait bien plus lourde dans une production 100% ENR.

## 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

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

Règles de trois pour calculer le coût de la technologie éolienne vs la technologie nucléaire

Hypothèse d'une production soit 100% nucléaire soit 100% éolien.

Paramètre facteur de charge

- le facteur de charge d'une électricité produite avec la technologie nucléaire est de 70%
- le facteur de charge pour l'éolien est de 20% (25% si on utilise de l'éolien off-shore)
- il faut une puissance installée 3 à 4 fois supérieure dans l'hypothèse d'une électricité produite avec le vent

Paramètre durée de vie

- le réseau nucléaire a une durée de vie de 60 ans
- 20 à 30 ans pour l'éolien
- surcoût

Paramètre Réseau

- nécessité de renforcer le réseau dans l'hypothèse d'une électricité éolienne car le réseau doit être capable de faire face aux montées de charge occasionnelles
- nécessité de développer pour raccorder ensemble les sources d'électricité, l'éolien est par définition une source diffuse / étalée dans l'espace
- surcoût

Stockage intersaisonnier

- dans l'hypothèse d'une électricité à base de vent, forte production l'hiver, moindre l'été
- dans l'hypothèse d'une électricité nucléaire, c'est l'inverse
- dans l'hypothèse d'un mélange des deux sources, lissage intersaisonnier demeure nécessaire
- hypothèse électricité éolienne engendre un surcoût (par exemple construction de stations de pompes en amont du Léman)

Coût au kW/h installé

- le nucléaire reste plus cher au kW/h installé (3000 € en Chine, 5000 € avec les normes françaises, 7000 € à Flamenville)
- environ 1000 ou 1500 € au kW/h installé
- gain de l'éolien

Au final,

- un système éolien pilotable nécessiterait un investissement entre 10 à 20 fois plus élevé qu'un système pilotable comme le nucléaire
- un système éolien non pilotable économiserait la question du stockage mais il faudrait alors prendre en compte les investissements que doivent faire les particuliers pour avoir du courant sans interruption (batteries, appareils programmables, ...)

Un système centralisé est nécessairement moins cher qu'un système diffu, c'est la raison d'être d'un réseau.

## Passons de sur l'eau à sous l'eau

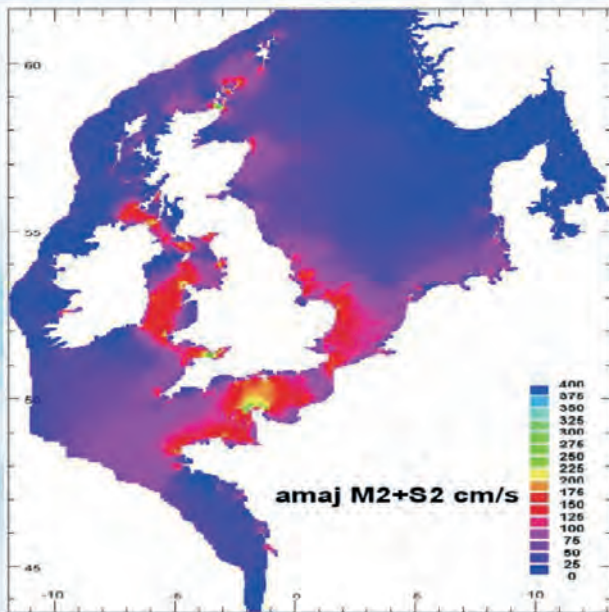


Un exemple d'hydrolienne

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

Une éolienne sous la surface de l'eau = une hydrolienne

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



Carte de la ressource hydrolienne en Europe (Vitesse maximale du courant en cm/s). Rappelons que la "puissance" du courant est proportionnel au cube de la vitesse.

Source : Groupe de Travail Énergies Alternatives d'ECRIN

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

Une hydrolienne capte les courants marins (particulièrement forts en Manche et sur le pourtour de la Grande-Bretagne)

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

Production bretonne des 3 sites majeurs  
(avec limites basse et hautes)

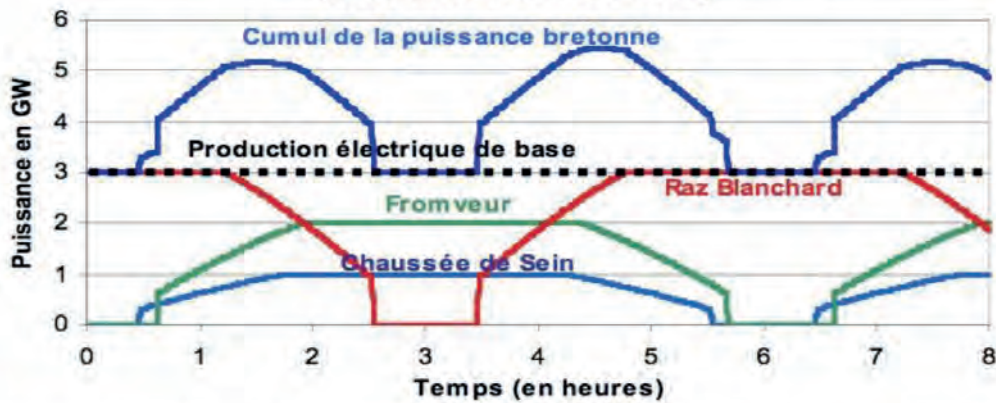


Illustration de l'effet de « foisonnement » sur l'hydrolien

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

Effet de foisonnement sur l'hydrolien

La grande différence de l'hydrolien par rapport à l'éolien et au solaire, c'est qu'il parfaitement prévisible :

- en puissance
- et dans le temps (à l'heure près et des années à l'avance)

... ce sont les coefficients de marée

Hydrolien a des inconvénients :

- environnement salé
- conflit d'usage avec la pêche
- beaucoup de matériaux nécessaires par mega watt de puissance installée

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



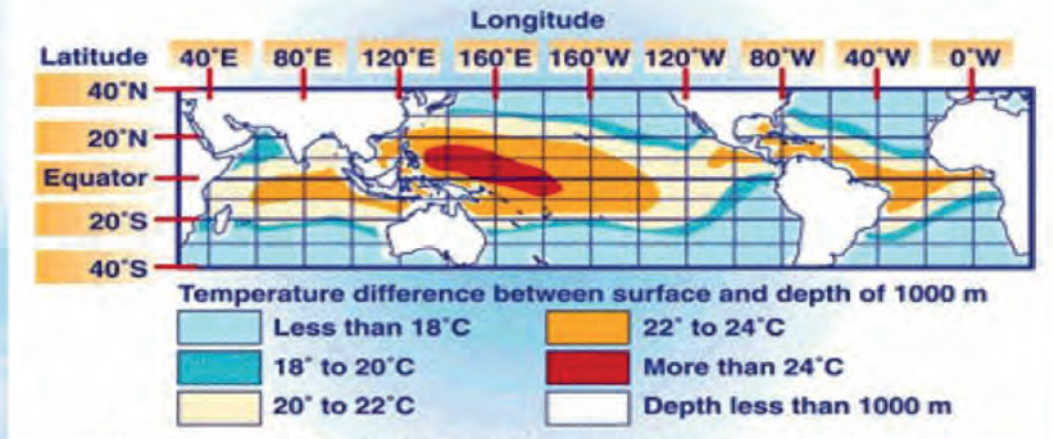
Un exemple de dispositif d'exploitation de l'énergie des vagues.  
Puissance = 750 kW, soit... 1/2000ème d'une grosse centrale électrique (et production fortement variable).

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

Exploitation du mouvement des vagues... plus gadget que véritable source d'énergie :

- 2000 fois moins de puissance qu'une grosse centrale électrique
- production fortement variable

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



**Zones propices à l'exploitation thermique des océans.**

**Refroidir l'océan de 1° C = 100.000 Gtep environ**

**20 ° C de différence -> rendement mécanique maximal de 6,7%**

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

Exploitation thermique des océans, consistant en une machine de Carnot exploitant :

- l'eau de surface aux alentours des 20° (source chaude)
- l'eau des profondeurs aux alentours des 4° (source froide)

Rendement très faible à 6,7%

Nécessite de déplacer de grands flux

## 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**

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

Question des coûts des différentes technologies

Tecnologies concentrées :

- gaz : 2 à 3 cts par kWh
- nucléaire : 3 à 10 cts
- charbon : 4 cts

Technologies diffuses / déconcentrées :

- éolien : 6 à 8 cts (hors coûts d'intermittence)
- photovoltaïque : 2 à 20 cts (hors coûts d'intermittence)

- solaire à concentration : 16 cts

Rappel : les technologies diffuses sont aujourd’hui construites / permises par les technologies concentrées. Elles n’ont rien d’autonome et leur tarif relativement bas actuellement est un effet de la mondialisation.

Note : une taxe carbone de 200 € la tonne = renchérissement de 20 cts pour le charbon / de 10 cts pour le gaz

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

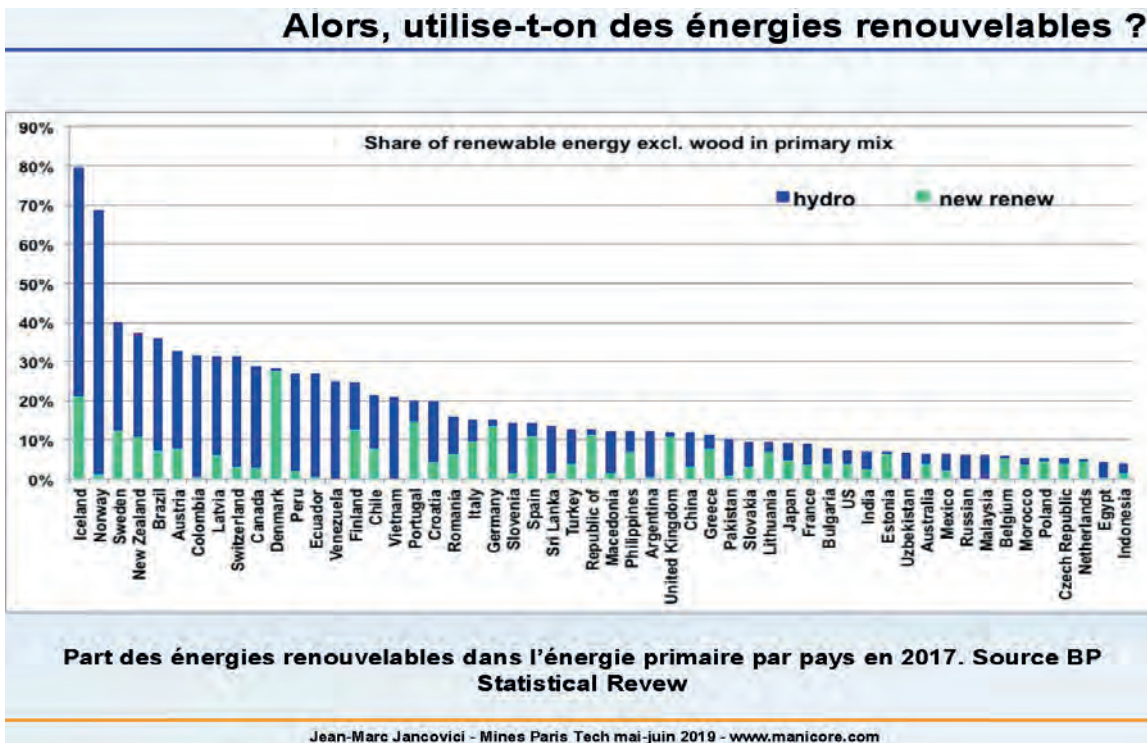
**Déplacement de l'onde de marée. Energie mise en œuvre  $\approx$  0,2 fois la consommation d'énergie de l'humanité.**

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

Utilisation des marées

Usine marémotrice de la Rance

## Chapitre 42 - L'état actuel des ENR



Part des énergies renouvelables dans l'énergie primaire par pays en 2017.

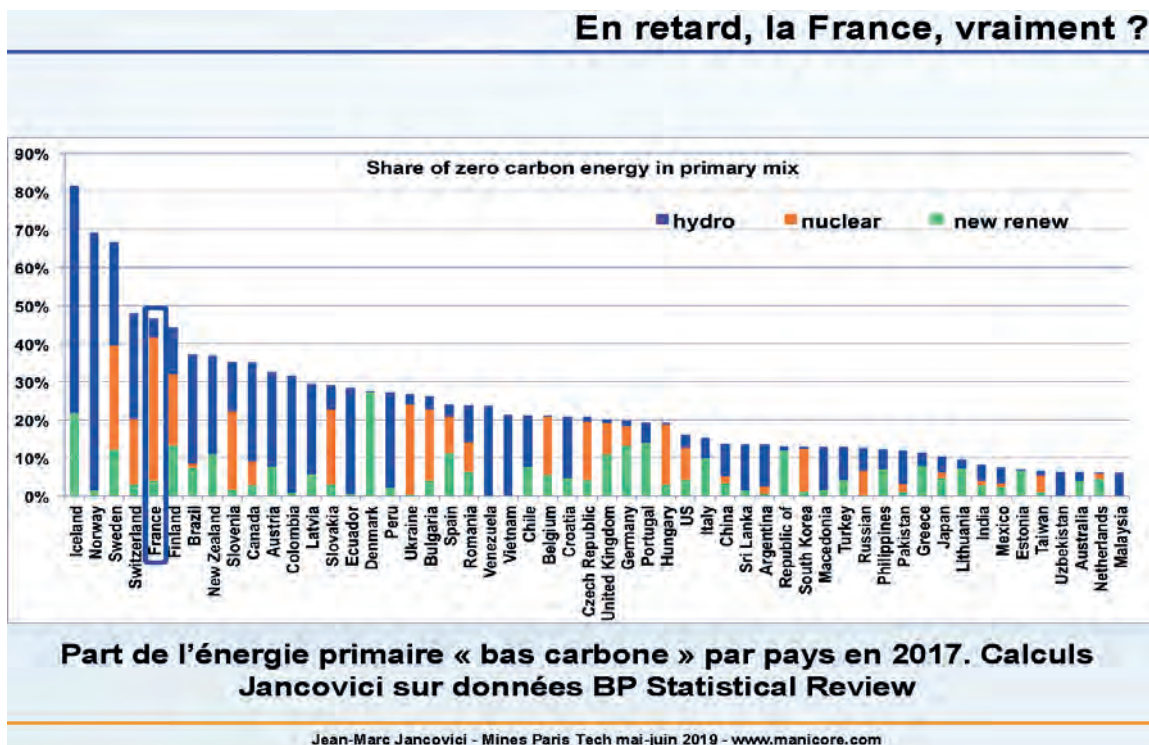


- L'Islande est le pays qui utilise le plus les énergies renouvelables dans sa production électrique nationale (80%) : très gros consommateur d'électricité par personne mais par chance le pays dispose d'importantes ressources géothermiques et d'hydroélectricité
- La Norvège est le deuxième pays avec 70%
- La France est à 10%

Dans la pays assez plats et assez densément peuplés (exemple Belgique, Pays-Bas), les énergies renouvelables ne sont pas adaptées, en tout cas pour une substitution rapide aux énergies conventionnelles, car les deux grandes énergies renouvelables (en tête car ont une fonction de stock / sont pilotables) sont l'hydroélectricité qui nécessite du relief et la biomasse qui nécessite de l'espace.

En Scandinavie, au Brésil, en Colombie, ... on trouve les conditions réunies pour une production électrique à partir des énergies renouvelables :

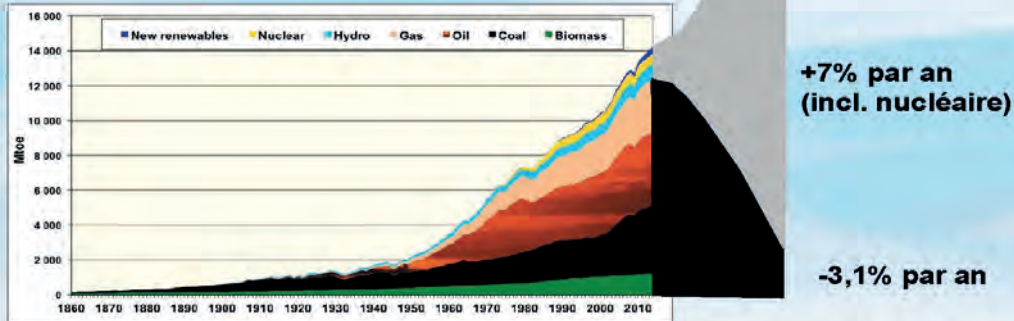
- du relief pour faire fonctionner de nombreux barrages
- de grandes forêts pour pouvoir exploiter la biomasse
- une population pas trop dense



Part de l'énergie primaire "bas carbone" par pays en 2017.

Si on considère non plus la distinction renouvelable / non renouvelable mais les émissions de CO2 de la production électrique nationale, on constate que la France se situe en 4e place du fait de son important parc nucléaire.

## Je vous rappelle le cahier des charges



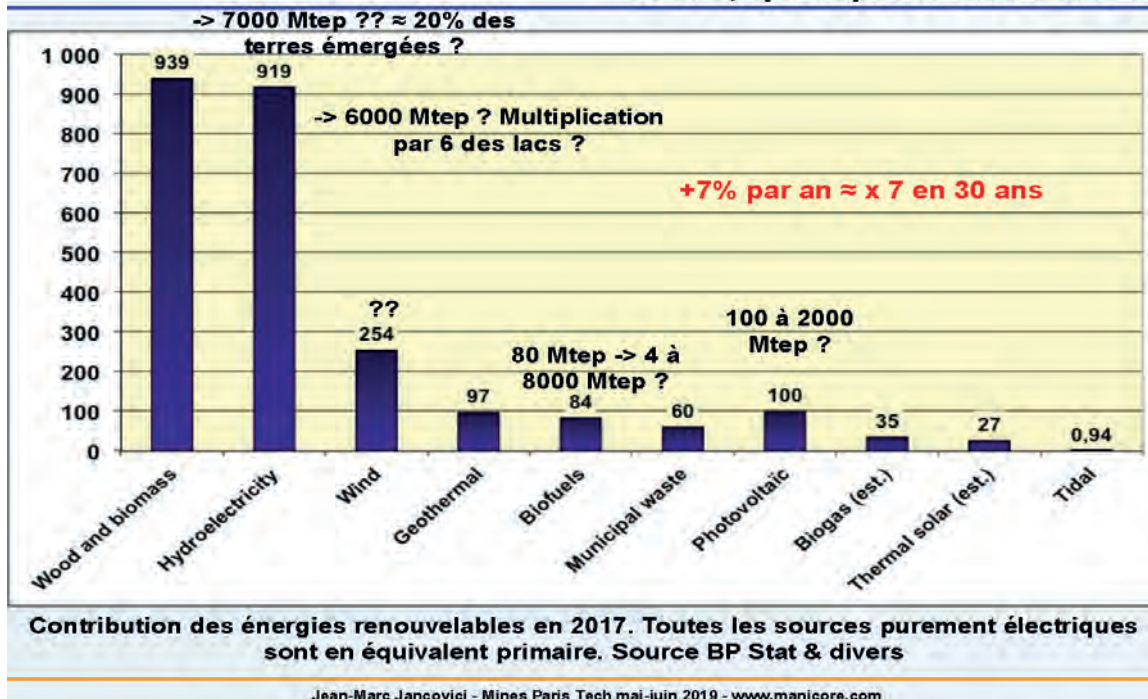
Jean-Marc Jancovici - Mines Paris Tech mai-juin 2019 - www.manicore.com

Cahier des charges de la COP21, devenir 100% renouvelable.

Scénario Négawatt considère que dans un contexte de croissance du PIB, donc d'augmentation de la production d'énergie, on doit :

- d'une part faire baisser la part des énergies fossiles (-3,1% par an)
- d'autre part, accroître la production d'électricité de +7% par an (en incluant l'énergie nucléaire), ou d'environ 10% des ENR si on sort également du nucléaire

## Alors, qu'espérer des ENR ?



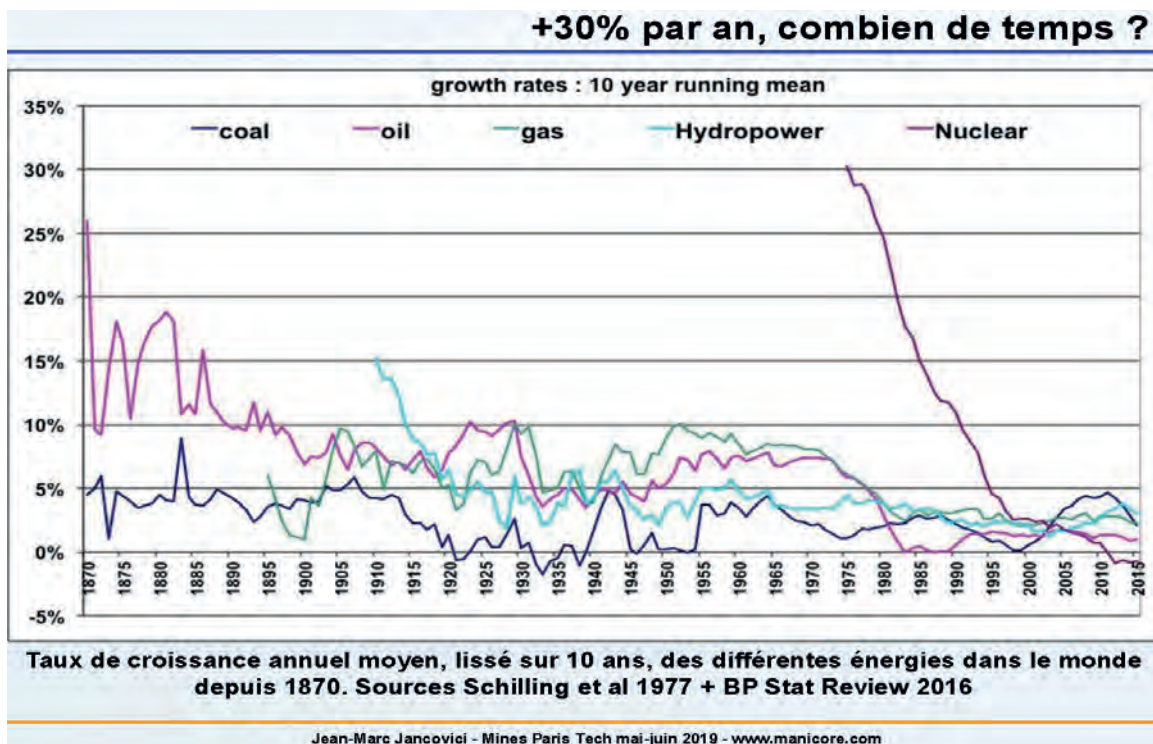
Contribution des énergies renouvelables en 2017

7% de croissance en 30 ans revient à multiplier par 7 :

- la production de la biomasse ? Cela reviendrait à utiliser 20% des terres émergées pour l'usage électrique, avec - comme c'était le cas avant la Révolution industrielle - une concurrence sur l'usage des sols (en l'occurrence entre l'agriculture qui devra produire pour plusieurs milliards d'humains sans apports fossiles et la forêt)
- et en même temps la production de l'hydroélectricité ? Impossible, plus de fleuves
- et en même temps la production des agro-carburants ? Aujourd'hui la production annuelle de pétrole est de 4,2 milliards de tonnes, il faudrait donc passer - pour conserver la mobilité de notre monde actuel - de 80 millions de Tep à plus de 4 milliards

- et en même temps multiplier par 20 la production du photovoltaïque
- etc.

Une simple règle de trois permet d'affirmer que l'objectif des 100% ENR sera très difficile à atteindre, voire irréaliste avec une perspective de croissance économique.



Taux de croissance annuel moyen - lissé sur 10 ans - des différentes énergies dans le monde depuis 1870

Fixer un objectif de 7% par an sur 30 ans revient à développer certaines technologies - en particulier l'éolien et le solaire - pour palier l'impossibilité d'autres ENR de croître. Dit autrement, l'éolien et le solaire doivent croître de plusieurs dizaines de % car l'hydroélectricité ne propose pas de croissance possible.

La longue durée permet de constater que dans le passé

- on n'a jamais constaté d'augmentation de plusieurs dizaines de % d'une énergie
- sur plusieurs décennies encore moins car la tendance est à la baisse tendancielle du taux de croissance

---

Les ENR :

- recouvrent des réalités très diverses
- les pays sont très inégalement pourvus du fait de leur démographie (espaces disponibles, ...), géographie (relief,..) et localisation (climat, ensoleillement, ...)

Considérer que partout dans le monde nous pourrions nous débarrasser des énergies fossiles alors qu'historiquement elles sont venues remplacer avantageusement les ENR utilisées pendant des millénaires... pari très risqué.

L'avenir sera fait d'un mélange :

- d'économies d'énergie et donc de contraction économique
- de nucléaire
- et d'énergies renouvelables

... qui dépendra des contextes géographiques, politique et sociaux des pays.