Energie

Perspectives et ordres de grandeur

<u>Episode 3 : L'électricité</u>

Ce document a été écrit pour répondre à plusieurs préoccupations. Il s'agit de disposer d'une compilation d'informations sur un sujet qui est à la fois très technique mais qui en même temps touche tout le monde, dans son quotidien mais aussi dans les conséquences que la quête permanente d'énergie entraine pour l'ensemble des pays de la planète. Il se veut donc à la fois vulgarisateur et s'attachera particulièrement à rappeler à tout moment les ordres de grandeurs dont nous parlons ici.
Compte tenu de la richesse du sujet, il est apparu pertinent de le découper en plusieurs épisodes:

- ✓ *Episode 1 : Notions de base*
- ✓ *Episode 2 : Les sources d'énergie*
- ✓ *Episode 3 : **Tout ce que vous avez toujours voulu savoir sur l'électricité***
- ✓ *Episode 4 : La dimension Geo-politique de l'énergie*
- ✓ *Episode 5 : Le nucléaire, histoire et perspectives.*

Table des Matières

Table des Matières 2
Glossaire 2
1. Production d'électricité 4
1.1. Généralités & Principes 4
1.2. Centrale thermique 6
1.3. Hydraulique 7
1.4. Eoliennes 8
1.5. Panneaux photovoltaïques 8
1.6. Piles à combustible (PAC) 9
2. Stockage, Transport et Distribution 10
2.1.Transport et distribution 10
2.2.Stockage 11
2.2.1. Batterie, hydrogène, bref, la chimie. 12
2.2.2. Stockage Gravitaire ou Énergie Potentielle 15
3. Et le transport aérien ? 17
4. La voiture électrique (VE) 18
5. Quel est le mix électrique idéal ? 21

Glossaire

SIGLE ou concept	Signification
ARENH	Accès Régulé à l'Electricité Nucléaire Historique
ASN	Autorité de Sureté Nucléaire française. Elle est garante de la sureté de fonctionnement des installations nucléaires, dont les centrales de production d'électricité. Elle donne les autorisation d'exploitation.
Backup	Solution Pilotable de production d'électricité pour pallier l'intermittence des ENRi
Effacement	Se dit quand une nouvelle source d'énergie permet, lors de sa mise en route, d'arrêter une source existante. Par exemple, le vent a permis à une ferme de 250 éoliennes d' « effacer » une centrale à charbon
ENRi	Energie Nouvelle Renouvelable intermittente

SIGLE ou concept	Signification
Facteur de charge	Pourcentage du temps pendant lequel un moyen de production fonctionne à sa puissance nominale. (Ex : Eolien terrestre = 22,6% en 2021)
Fission nucléaire	Consiste à « casser » un noyau lourd en récupérant au passage de l'énergie. Utilisé dans 100% des centrales nucléaires actuelles
Fusion Nucléaire	Consiste à fusionner des noyaux légers er récupérant entre plus d'énergie au passage. Objet de très grosses recherches (ITER) et d'espoirs pour la production d'énergie du futur. (XXIIe siècle au plus tôt)
Isotope	Variation du nombre de neutrons (donc de masse) dans un atome de même numéro atomique. Par exemple carbone 12 et carbone 14
KW, MW, GW, TW	Unité de **Puissance** . 1 KW = 1000 Watts, 1 GW= 1000 MW, 1TW= 1000 GW
KWh	Unité d'**Énergie** . Ce que consomme un appareil de 1 KW pendant 1 heure On utilise aussi MWh, GWh, TWh
Matériau supra conducteur	Matériau conduisant l'électricité sans y opposer aucune résistance. A ce jour cela ne fonctionne qu'à des températures très basses (proches du zéro absolu, -273°C). Mais des matériaux supra-conducteurs à température ambiante pourraient changer notre vision de la production et de la distribution de l'électricité.
NOME	La loi du 7 décembre 2010 relative à la « Nouvelle organisation du marché de l'électricité », dite loi Nome, prévoit la réorganisation et la régulation de ce marché sur la base d'un encouragement de la concurrence.
PAC Sens 1	Pile à Combustibe. Permet de transformer directement de l'hydrogène combiné à l'oxygène de l'air pour produire de l'électricité et rejeter de l'eau.
PAC Sens 2	Pompe à Chaleur. Permet de transférer de la chaleur d'un milieu à un autre (par exemple, un frigo ou une climatisation). Utilisé pour chauffer, la PAC affiche une efficacité thermique supérieure à sa consommation électrique. En quelque sorte, elle rafraîchit l'extérieur pour chauffer l'intérieur.
V2G	Vehicle-to-Grid. Dispositif permettant d'utiliser les voiture connectées à une borne spécifique de recharge pour servir de stockage temporaire d'électricité afin d'équilibrer le réseau.
VE	Véhicule Electrique

Dans le premier épisode, nous avons posé les concepts de base et défini quelques unités et ordres de grandeur.

Dans le second, nous avons pu comprendre que l'énergie peut prendre des formes très diverses

Dans cet épisode, nous allons nous concentrer sur l'électricité, objet de tant de débats passionnés mais pas toujours rationnels.

Bien que présente à l'état naturel (éphémère) sous la forme des éclairs orageux, elle n'est pas exploitée sous cette forme et reste donc une énergie secondaire, mais pas nécessairement finale, car à la fin, c'est sous forme mécanique (moteurs) Thermique (chauffage) ou de Rayonnement lumineux qu'on finit par l'utiliser.

Les tenants des énergies renouvelables, essentiellement éoliennes ou solaires, opposent généralement le fait que la décarbonation ne concerne pas que l'électricité. Et c'est tout à fait exact, particulièrement en France où notre électricité est parmi les moins carbonées de la planète et depuis très longtemps. L'argument CO2 est donc difficile à tenir pour notre production électrique. Mais les ENRi sont quasi exclusivement destinées à produire de l'électricité, d'où un chapitre spécifique sur ce sujet.

Si elle ne représente que 20% environ de la consommation totale d'énergie en France, on peut néanmoins s'attendre à une augmentation significative des besoins du fait de l'électrification des usages:

- Chauffage individuel, y compris pompes à chaleur
- Véhicules électriques
- Timides débuts de la chimie de l'hydrogène « vert »
- Etc

Cette augmentation des usages nous conduit donc à traiter successivement:

- De la production d'électricité
- Du stockage et de la distribution
- De l'hydrogène
- De la voiture électrique

Il reste donc un travail énorme à accomplir pour décarboner les 80% hors électricité.

1. Production d'électricité

1.1. Généralités & Principes

Chacun aura remarqué qu'en France et plus généralement en Europe, l'électricité nous arrive, du moins pour les particuliers, sous une tension de 220 Volts et une fréquence de 50 Hz.

C'est ce que l'on appelle du courant alternatif. Produire ce courant nécessite bien entendu d'être raccordé au réseau, mais aussi de s'y glisser délicatement, comme une voiture rejoignant une autoroute rapide et très chargée. Les organismes en charge de la gestion du réseau surveillent cette fréquence comme le « lait sur le feu » car le moindre écart peut mettre le réseau par terre (back out).

Tout ce préambule pour expliquer que la production d'électricité doit en permanence s'adapter à la demande. Une demande trop forte ou trop faible déséquilibre l'édifice et cela peut aller très vite[1]. On comprend donc pourquoi les gestionnaires de réseau préfèrent les productions « pilotables » qui produisent à la demande, lorsque c'est nécessaire.

Second concept important, le facteur de charge. Il représente sur une période longue, généralement une année, le pourcentage de temps pendant lequel un moyen de production aura la capacité de produire à sa puissance nominale. Il est à la fois représentatif de l'intermittence et du besoin d'effectuer des opérations de maintenance sur les installations.

Pour qu'un réseau de production (les anglos saxons disent « grid ») fonctionne et soit gérable, il faut disposer

- D'équipements de production utilisant des machines tournantes (les génératrices) qui vont donner le « LA » (la fameuse fréquence de 50 Hz)
- De capacités dont on peut faire varier la charge (suivi de charge)
- De capacités d'effacement des pics de charge et donc avec un temps très court de mobilisation.

Dans le tableau ci-dessous, on trouve un résumé des principales caractéristiques des moyens de production connus à ce jour. La dernière colonne caractérise de manière qualitative le gain obtenu (combustible, pollution) en arrêtant (effaçant) ce moyen de production.

	Pilotable	Facteur charge	Stabilisation réseau	CO2 (g/KWh)	Machine thermique	Bénéfice effacement
Centrale charbon	Oui	30 à 80%	Oui	1058	Oui	+++
Centrale fuel	Oui	30 à 80%	Oui	730	Oui	+++
Centrale gaz	Oui	30 à 80%	Oui	443	Oui	++
Centrale nucléaire	Oui	80 %	Oui	4	Oui	0
Éolienne terrestre	Non	22,6 %	Non	10	Non	0
Éolienne marine	Non	37 %	Non	9	Non	0
Panneaux PV	Non	14,3 %	Non	44	Non	0

[1] *Pour les adeptes de thriller, je recommande ce roman qui malgré quelques incohérences permet de comprendre ces mécanismes : Black-out de Marc ELSBERG.*

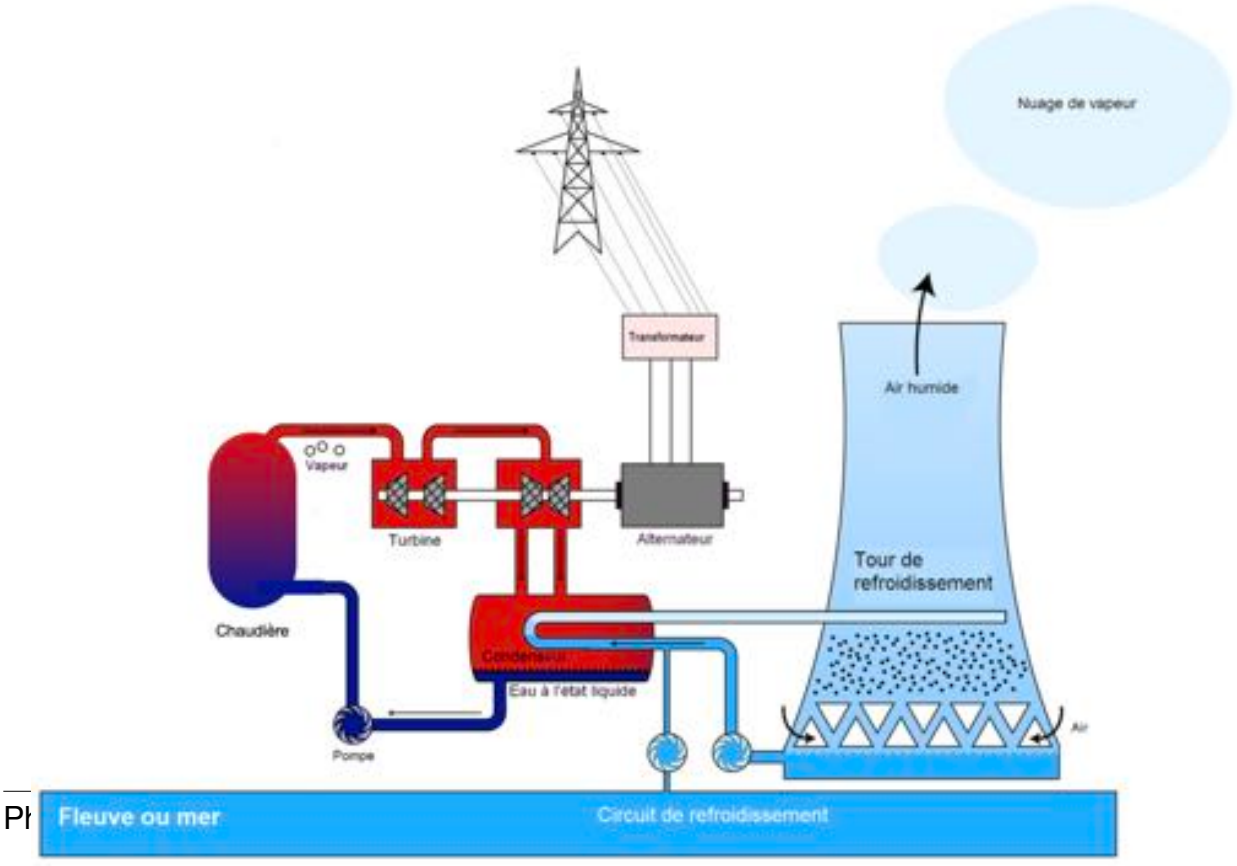
	Pilo-table	Facteur charge	Stabilisation réseau	CO2 (g/KWh)	Machine thermique	Bénéfice effacement
Usine hydroélectrique	Oui	30 %	Oui	10	Non	0
	NB : les fossiles ont un facteur de charge limité du fait de leur effacement au profit de solutions moins carbonées.					

L'analyse de ces donnés simples permet de comprendre la stratégie de planification à long terme et la tactique à déployer pour minimiser les émissions de CO_2 tout en maximisant la sécurité du réseau.

1.2. Centrale thermique

C'est de très loin la manière la plus répandue de produire de l'électricité. Que la centrale soit au charbon au fuel, au gaz, nucléaire ou alimentée par le soleil, le principe de base est toujours le même. Le système de propulsion de nos sous-marins ou de notre porte-avions est également basé sur ce principe.

On parle ici de « machine thermodynamique », qui est la lointaine descendante de la machine à vapeur de Mr Watt (ci-contre)



Pour fonctionner, il faut une source chaude (la chaudière, quelque soit le système qui la fait chauffer) et une sauce froide. La chaudiere chauffe de l'eau qui se transforme en vapeur, laquelle fait tourner une turbine[2] qui entraine un **alternateur** pour produire le courant. La vapeur se re-transforme en eau dans le condenseur qui doit être le plus froid possible afin d'augmenter le rendement de l'ensemble.

On dispose donc ici d'une production **pilotable**.

Le refroidissement au condenseur peut se faire directement dans la mer par exemple, mais aussi au moyen de ces grandes tours de refroidissement appelées aéroconden-seurs, que l'on associe souvent à tort au nucléaire seulement, mais qui est présent à chaque fois que le refroidissement pourrait avoir des conséquences néfastes pour le milieu ambiant.

Ce qui varie d'une centrale à l'autre c'est le dispositif permettant de chauffer la chau-dière:

- Rayons solaires concentrés par des miroirs
- Bruleurs au fuel ou au gaz
- Lit de charbon incandescent
- Réacteur nucléaire. Dans ce cas, la chaudière est appelée « Générateur de Vapeur » (GV) et un autre circuit d'eau pressurisée dit primaire vient réchauffer ce GV.

Mais **dans tous les cas**, seul 1/3 environ de l'énergie est transformé en électricité. Les 2/3 restant partent en chaleur dans le condenseur. Pour ceux qui se souviennent du premier épisode, nous avons déjà évoqué ce phénomène en constatant qu'en 2019, au niveau mondial, 74% de l'électricité était produite par des machines thermiques, quelque soit la source de chaleur utilisée.

Cette chaleur résiduelle est trop rarement récupérée par manque de proximité avec les centres urbains qui pourraient en bénéficier pour le chauffage ou l'eau chaude par exemple.

1.3. Hydraulique

La « houille blanche » comme on l'appelait naguère est l'extension moderne des moulins à eau qui existaient pour animer des activités mécaniques (papeteries, mi-noteries, etc) le long des cours d'eau. Elle consiste à faire chuter de l'eau sur une

[2] *E ui or al Electric par un homme politique inconséquent.*

roue, dite « roue pelton » que l'on voit ci-dessous à droite. Cette roue entraine ici aussi un alternateur permettant la production de courant. Comme déjà évoqué dans les épisodes précédents, on peut soit turbiner en permanence sur les grands fleuves comme le rhone, soit laisser se remplir une retenue, qui fait aussi office de stockage et de réserve hydrologique. Dans ce dernier cas, la production est déclenchée **à la demande** en cas de pic de demande.

On notera donc que l'hydraulique est un moyen de production **pilotable** mais pas nécessairement continu.

De plus, cette source d'énergie est particulièrement peu émettrice de CO2.

1.4. Eoliennes

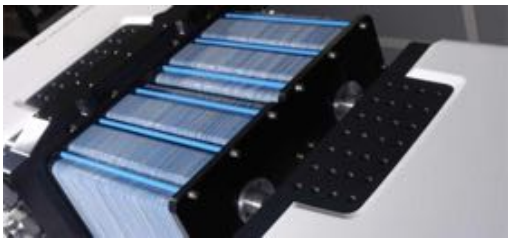
Dans le cas de l'éolienne la production est dépendante de la force du vent. Elle peut produire quand la vitesse du vent est de 15 à 90 km/h. Elle utilise un alternateur pour produire directement un courant alternatif. Plusieurs technologies existent pour assurer une production à 50 Hz, mais il faut garder à l'esprit que l'opérateur de l'éolienne ne peut pas anticiper (quelle sera la vitesse du vent dans 28 minutes ou dans 7 heures ?) les variations brutales de puissance de sa machine et que c'est donc au réseau de s'adapter. C'est pourquoi on parle ici de production **non pilotable**.

1.5. Panneaux photovoltaïques

Ces panneaux que l'on peut trouver un peu partout, sur des poteaux de signalisation isolés, sur le toit des maisons ou sur des surfaces dédiées plus importantes exploitent la capacité du silicium (mais aussi d'autres semi-conducteurs) à produire un courant continu sous l'effet d'un rayonnement. Il s'agit bien sûr, comme nous l'avons vu, d'une transformation de l'énergie lumineuse en énergie électrique. Un dispositif appelé « Onduleur » permet ensuite de convertir le courant continu en courant alternatif. Mais comme pour l'éolienne, les variations importantes ne sont pas nécessairement prévisibles (Passage de nuages par exemple) et nous avons donc à faire à une énergie intermittente non pilotable.

1.6. Piles à combustible (PAC)

Une pile à combustible (PAC) permet de convertir directement de l'énergie chimique de combustion (oxydo-réduction) en énergie électrique, en chaleur et en eau.



Le cœur d'une PAC est constitué de trois éléments, dont deux électrodes : une anode oxydante (émettrice d'électrons); une cathode réductrice (collectrice d'électrons) séparées par un électrolyte.

Ainsi, comme les panneaux solaires, la PAC produit du courant continu. Historiquement, cette technologie a été utilisée dans le domaine spatial (les plus anciens se souviennent certainement du programme Apollo). Aujourd'hui, certaines initiatives voient le jour pour utiliser des PAC pour le transport (Véhcules ou trains à hydrogène) mais nous y reviendrons. Les PAC ne sont en aucun cas une solution pour produire massivement de l'électricité pour le réseau.

En conclusion de cette revue des moyens à notre disposition pour produire de l'electricité, on retiendra que seules 2 méthodes sont à la fois pilotables et peu émettrices de CO2 : le nucléaire et l'hydraulique. Ce sont les choix qui avaient été faits par la France au milieu des années 70.

2. Stockage, Transport et Distribution

On rappelle que le réseau électrique doit être en permanence adapté à la demande. Cela signifie donc que si un moyen de production **non pilotable** est tout à coup très abondant, la seule solution consiste à ralentir ou arrêter un moyen de production **pilotable**. A l'inverse, si le vent ou le soleil viennent à manquer, il faut mettre en place une solution de secours immédiatement ou couper une partie des usagers. Pour permettre ces substitutions et pour permettre à tous de bénéficier de la « fée électricité », il faut donc transporter et distribuer, et parfois stocker…

2.1. Transport et distribution

Le transport se fait au moyen de lignes à très haute tension (400 000 Volts, ou 400 KV) pour limiter les pertes en lignes. Malgré cela, RTE annonce des pertes de 2 à 3% de la production (sous forme de chaleur) dans le transport de l'électricité.

Le courant passe ensuite au travers de postes de transformation pour être ensuite distribué aux consommateurs (entreprises et particuliers) en moyenne tension (20 KV) ou en basse tension (220/380 V).

Au passage, on pourra aussi tordre le coup à 2 idées farfelues que l'ont voit parfois dans la presse :

- **Produire de l'électricité au Sahara** dans d'immenses fermes solaires et la transporter jusqu'en Europe: Indépendamment des problèmes de sécurité d'approvisionnement, les couts de construction des infrastructures et les pertes en ligne seraient colossaux.
- **Produire de l'électricité en orbite** terrestre et l'envoyer par micro-ondes sur la terre: Encore une fois, en négligeant les impacts sécurité, les coûts seraient faramineux et le retour sur investissement énergétique (pas financier) plus que douteux.

Le transport et la distribution sont donc un facteur très important quand on parle de réseau électrique. Pour une note d'espoir des progrès significatifs sont fait dans la re-

cherche sur les matériaux supra conducteurs, et cela pourrait à long terme changer la donne sur ces sujets e permettant un transport sans pertes.

Il reste néanmoins extrêmement important de garder à l'esprit que les infrastructures de transport et de distribution font partie de l'équation. Et ces infrastructures s'étendent au travers de frontières européennes, permettant l'import et l'export de flux d'énergie électrique en fonction des circonstances et de la disponibilité des moyens de production. I est notable que la france, longtemps exportatrice d'une énergie particulièrement décarbonée est récemment, du fait de certains choix destructeurs, devenue importatrice.

2.2.Stockage

Les aficionados des ENRi savent que l'intermittence de ces sources est le point principal qui bloque (ou aurait dû bloquer) leur développement. Il est donc naturel qu'ils arguent immédiatement sur le stockage. Mais la physique a ses règles et se moque des dogmes…

L'électricité est un mouvement d'électrons dans un conducteur et, en tant que telle, **ne se stocke pas**. Il faut donc transformer ce flux d'énergie électrique en une autre forme stockable.

Si l'on revient aux types d'énergie décrits dans l'épisode 2, on peut stocker l'énergie :

- Sous forme de **chaleur**, mais les pertes sont colossales et la réutilisation très compliquée
- Sous forme **chimique** (batterie, combustible solide, gazeux ou liquide)
- Sous forme d'énergie **potentielle** (on rempli un barrage en altitude)
- Sous forme d'énergie **cinétique** (par exemple en faisant tourner une roue très lourde).

Je vous recommande cette excellente video qui traite de façon très pédagogique du stockage de l'électricité, en mettant en avant un point fondamental : la durée de stockage.

Le stockage sous forme de chaleur est typiquement ce que fait la nature en stockant le rayonnement solaire dans les océans pour le restituer dans les saisons froides, ce qui donne aux océans ce pouvoir de tempérer le climat. Mais à l'échelle qui nous intéresse ici, c'est en pratique inutilisable.

Les mécanismes de stockage par énergie cinétique ont un usage de courte durée, inutilisable au niveau du réseau d'un pays, mais qui ont été mis en oeuvre par certains constructeurs de bus de ville dès les années 50 (Gyrobus).

On va donc se concentrer sur les stockages chimique et gravitationnel

2.2.1. Batterie, hydrogène, bref, la chimie.

L'idée la plus évidente consiste à stocker notre surplus d'électricité dans des batteries. On le fait bien pour nos smartphones!

Prenons un exemple simple : un petit parc de 10 éoliennes terrestres de 20 MW au total, dont on veut stocker 3 jours (72 heures) de production grâce au vent d'Autan qui a rendu fous quelques toulousains ! Le coût d'investissement d'un tel parc serait de 26 M€ environ.

Nous devons donc stocker 20MW X 72h = **1 440 MWh.** (Ou 1,44 GWh)

Ceci est la Victorian Big Battery (Australie), la plus grande batterie au lithium au monde. Sa capacité est de 450 MWh. Dans notre exemple, cette giga batterie n'absorberait la production de nos 10 éoliennes que pendant 22h30 ! Et cette batterie coûte environ 160 M€, ce qui augmente significativement le coût de nos éoliennes !!!

Sans compter les équipement d'électronique de puissance couteux permettant de synchroniser en sortie cette électricité pour la réinjecter dans le réseau, ni la quantité faramineuse de lithium nécessaire pour construire cette batterie.

Je vous invite à consulter les nombreux articles sur l'extraction de lithium de l'Australie, à la chine, à l'Amérique du sud, et bientôt même en France, dans l'Allier. L'extraction du Lithium est énergivore et grande émettrice de CO2.

En bout de chaîne, ne pas oublier que l'on ne récupère que 70% de l'électricité injectée au départ. **Aucune solution de stockage n'a un rendement de 100%…**

Quoiqu'il en soit, et on verra plus loin une discussion sur la voiture électrique, une grande partie des ressources de Lithium va être captée pour les batteries des véhicules électriques, compte tenu des décisions de l'UE d'arrêter les véhicules thermiques à terme.

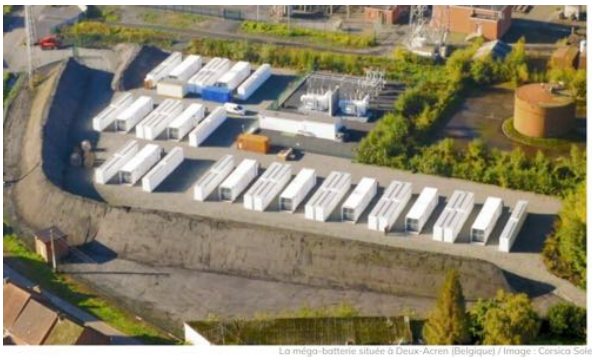
D'où l'idée qui peut paraitre saugrenue au départ d'utiliser les batteries de nos voitures pour stocker les surplus d'électricité et *effacer* ensuite les pics de demande. Cette solution s'appelle le V2G ou « Vehicle-to-Grid » littéralement véhicule vers le réseau. Elle nécessite une borne de recharge spécifique et une voiture compatible.

Sur la base d'une capacité mobilisable de 30 KWh par voiture le stockage de nos 10 éoliennes sur 10 heures nécessiterait quand même 6 600 voitures…

Quelques informations complémentaires sur le V2G chez Renault ou EDF. (Cliquez)

On aura néanmoins compris que. Dans tous les cas, le stockage par batterie ne peut concerner qu'un stockage de quelques heures, et en aucun cas, de quelques jours ou mois.

Mise à jour Janv 2023 : Cette plus grande batterie lithium-ion d'Europe coute 33 millions d'euros pour une capacité de stockage de 100 MWh. Or, la Belgique a produit 91,9 TWh en 2021, soit une moyenne de 2,92 MWh par seconde.



La méga-batterie située à Deux-Acren (Belgique) / Image : Corsica Sole

Cette méga batterie permet donc de stocker 34 secondes de la production électrique belge.

Pour avoir un système avec 100% d'énergies renouvelables, il faudrait disposer à minima de 2 semaines de stock d'électricité pour compenser l'intermittence de certaines de ces ENR (éolien et solaire), soit 3,5 TWh de stockage pour le cas précis de la Belgique.

⏩ 3,5 TWh de stockage, cela nécessiterait 35 000 batteries de ce type, à 33 millions d'euros l'unité, soit un cout global de 1 155 milliards d'euros, et ceci tous les 10 à 20 ans (en fonction de la durée de vie de la batterie).

⏩ 35 000 batteries nécessitant 7 000 m2 l'unité, cela occuperait 245 millions de m2, soit 245 km2. C'est-à-dire plus de 7 fois la surface de Bruxelles.

❌ Avec ces 2 ordres de grandeurs, on constate que ce type de solution n'est absolument pas sobre sur le plan des ressources financières, et de l'occupation des sols (et je ne parle même pas de la consommation de métaux et minéraux pour construire ces batteries, ni de l'empreinte carbone issue de leur construction, les articles de presse ne donnant aucun chiffre sur ces 2 points).

Enfin pour une perspective sur le futur des batteries, je vous invite à consulter cette page de SAFT Batteries, un constructeur français historique.

L'autre utilisation de la chimie en stockage consiste à produire avec de l'électricité un élément solide, liquide ou gazeux, donc plus facilement stockable, et qui contient de l'énergie.

On pense immédiatement à l'hydrogène, dont la combustion ne génère que de l'eau. La production d'hydrogène peut se faire de plusieurs façon, mais concentrons nous sur ces 2 méthodes :

- Le vaporeformage du méthane (l'hydrogène « gris »)

- L'électrolyse de l'eau (l'hydrogène « vert »)

Il est clair que le premier, largement (99%) le plus utilisé, n'est pas l'objet de ce propos sur le stockage. Un document spécifiquement dédié à l'hydrogène pourrait être écrit afin de comprendre ses usages, en particulier en substitution du charbon dans la sidérurgie ou du pétrole dans la pétrochimie.

Quand on parle de stocker de l'électricité, on pense donc au second. L'idée simple est la suivante :

- On a de l'électricité en entrée (nos éoliennes par exemple)
- On fabrique de l'hydrogène par électrolyse
- On stocke cet hydrogène à haute pression
- On le fait passer dans une « Pile à Combustible » (PAC) qui fabrique du courant électrique
- On utilise cette électricité en sortie.

Afin de calmer immédiatement les ardeurs, le schéma ci-dessous montre le rendement catastrophique obtenu pour l'ensemble de cette filière. Comparé aux 70% des batteries, le passage par la case hydrogène ramène ce rendement à environ 23%. On comprend donc que cela ne soit utilisé qu'en dernier recours.

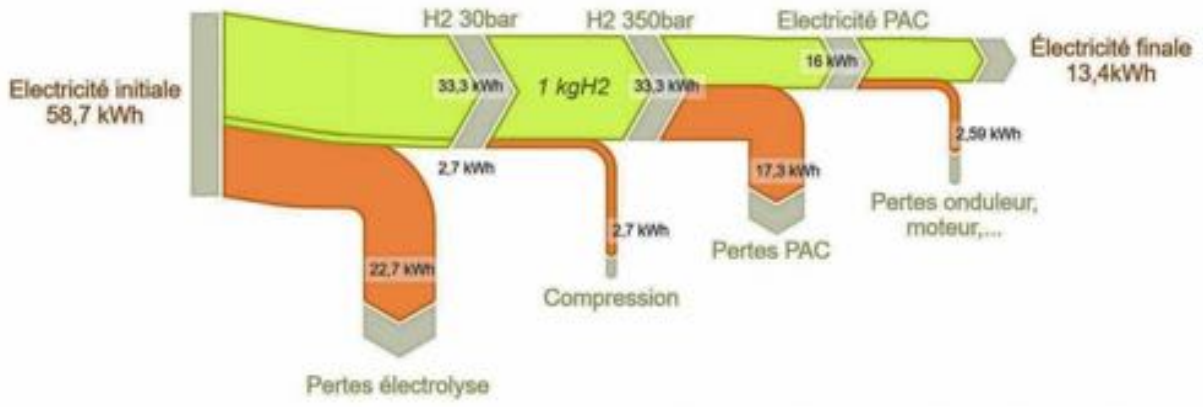


Figure 2 : Diagramme de Sankey, exprimant l'énergie nécessaire pour produire un kg d'hydrogène, ainsi que l'énergie électrique résultante.

On peut aussi utiliser directement l'hydrogène (H2) après stockage dans un moteur thermique fonctionnant à l'hydrogène, ce qui évite la seconde conversion électrique, mais nous ne sommes plus ici dans l'hypothèse du stockage et le rendement global ne sera pas nécessairement meilleur.

En revanche, toutes les solutions basées sur l'hydrogène sont confrontées au stockage de l'hydrogène lui même.

Quand on voit le tollé qui avait été levé lors de l'apparition des premiers véhicule GPL, ce Gaz de Pétrole Liquéfié étant utilisé depuis des lustres dans nos maisons sous la forme de bouteilles de butane ou de propane, on a du mal à imaginer un réel déploiement de l'hydrogène dans les voitures :

- Pression GPL : 7,5 bars. Technologie maitrisée depuis 100 ans
- Pression H2 : 700 bars. Toujours d'énormes problèmes de fuites.

En effet, l'hydrogène est un gaz extrêmement léger et dont l'étanchéité est un cauchemar. La molécule d'hydrogène est tellement petite qu'elle passe au travers de l'acier et du plastique!

L'autre solution consiste à stocker l'hydrogène sous forme liquide, mais cela requiert des températures extrêmes (-253 °C) inutilisables dans le Grand public.

Par conséquence, quelque soit la solution technique retenue, il faut réserver l'utilisation de l'hydrogène à des organisations industrielles rompues aux opérations de maintenance sévères et implacables, que l'on trouve dans l'aéronautique, le spatial, le nucléaire ou le militaire mais aussi dans la chimie lourde.

Je ne veux pas clore (provisoirement) ce chapitre de l'hydrogène sans réaffirmer ma conviction que la chimie de l'hydrogène remplacera progressivement celle du pétrole, que ce soit pour la fabrication de plastique que de combustibles liquides à température ambiante.

2.2.2. Stockage Gravitaire ou Énergie Potentielle

L'autre possibilité de stockage est donc l'utilisation de l'énergie potentielle. Si ma voiture est stationnée en haut d'un col, il me suffit de lâcher les freins pour descendre tranquillement jusque dans la vallée. Mais pour cela, il m'a fallu d'abord utiliser mon moteur et l'essence qu'il consomme pour arriver en haut du col. En faisant cela, j'ai accumulé de l'énergie potentielle, et cette énergie est stockée sans aucune perte, tant que ma voiture reste à cet endroit.

C'est le principe du stockage gravitaire qui, appliqué aux installations hydroélectriques, s'appelle en français une STEP (Station de Transfert d'Energie par Pompage). Cela consiste à mettre en oeuvre 2 réservoirs (un haut et un bas).

Le principe de la STEP (ci-contre celle de Montézic en Aveyron) est le suivant : lorsque le réseau a besoin d'électricité, la STEP utilise l'eau qui se trouve dans le bassin supérieur pour produire de l'électricité (mode turbine). C'est la force de l'eau qui fait tourner la turbine.

Aux heures de faible consommation, lorsque l'électricité est disponible sur le réseau, l'eau est pompée (mode pompe) de la retenue inférieure vers la retenue supérieure. C'est alors le réseau qui alimente des électro-pompes pour remonter l'eau vers la retenue supérieure. Le stock d'énergie potentielle est ainsi reconstitué pour un nouveau cycle de production et ce, indépendamment de l'eau venant du ciel et/ou des autres cours d'eau naturels.

Ce mécanisme présente de nombreux avantages:

- Il peut combiner des fonctions de stockage et de production (mais la production est souvent marginale, car dépendant du débit des cours d'eau alimentant naturellement le bassin supérieur.
- Il a un rendement excellent (75 à 80%)
- Ce sont des machines tournantes, donc contribuant à la stabilité du réseau

Son principal défaut est géographique. Il est indispensable de disposer d'une configuration de terrain permettant de créer ces 2 réservoirs avec le maximum de hauteur entre eux. En france, quelques STEP existent déjà, dont une à 2h de Toulouse en Aveyron, et certains barrages pourraient être reconfigurés à ce propos. La STEP est le meilleur allié des tenants des ENRi, mais les oppositions à toute nouvelle construction de ce genre proviennent bizarrement de ceux-là même qui promeuvent ces ENRi…

Des études sont également menées pour utiliser des STEPs entièrement souterraines…

Enfin quelques chiffres provenant de la STEP de Montezic (2ème de France) :

- Puissance maxi : 950 MW (autant qu'un réacteur type Fessenheim)
- Production annuelle : 1TWh (facteur de charge de 14%)
- Temps de mise en oeuvre: Moins de 2 minutes
- STEP pure, type hebdomadaire (40h de fonctionnement)
- Environ 36 GWh de stockage maxi. (360 fois plus que la batterie belge évoquée plus haut)

Mais attention, quand on dit que la puissance d'une STEP comme celle de Montézic est équivalente à une centrale nucléaire, c'est exact. Mais comme il faut remplir à nouveau le bassin supérieur après l'avoir utilisé, la production annuelle de la même STEP est moins de 1/5 de celle de nos 2 réacteurs de 900 MW (Fessenheim a produit 12 TWh lors de sa dernière année de fonctionnement)

Dernier calcul d'ordre de grandeur. En prenant l'hypothèse que les 6 STEPS françaises ont une capacité de stockage totale de 215 GWh, cela représente seulement 4h30 de notre production nationale.

Autre chiffre significatif, la puissance instantanée maximum de ces STEPs est de l'ordre de 5 GW, à comparer par exemple aux 75 GW d'une pointe de puissance en hiver.

Encore une fois, ces ordres de grandeur permettent de se remettre les idées en place.

3. Et le transport aérien ?

Si tous nos usages s'électrifient, comment ne pas penser à l'industrie toulousaine phare, les avions ?

La masse et la faible autonomie des batteries rend l'idée d'un avion électrique anecdotique, et probablement limité à des démonstrateurs et au mieux à des activités d'école de pilotage.

La combustion du carburant pour l'aviation correspond à environ 1 milliard de tonnes de CO2 sur une année, soit en ordre de grandeur l'équivalent des émissions du Japon (3ème puissance mondiale et 5ème pays le plus émetteur). C'est loin d'être négligeable.

Il convient de se placer dans une perspective sans pétrole, que ce soit parce que nous avons épuisé les réserves, ou parce que celles qui restent sont techniquement ou politiquement trop complexes à aller chercher.

A cette heure, la solution la plus réaliste consiste donc à orienter les recherches vers les combustibles liquides de synthèse.

Les carburants de synthèse, aussi appelés e-carburants (e-fuels) pour électro-carburants, sont des carburants produits sans pétrole ni biomasse, mais à partir de CO2 et d'hydrogène « vert ». Certes, la combustion des e-fuels rejette du CO2 mais sa fabrication a nécessité la capture préalable de ce CO2, ce qui en fait une solution quasi neutre en la matière. On a déjà évoqué ici la chimie de l'hydrogène, et voici un excellent exemple de ce que cela pourrait apporter. On peut donc imaginer dans le futur qu'une partie de nos raffineries soient consacrées à la production de cet e-fuel, ce qui permettrait de continuer à profiter du transport aérien sans révolutionner l'architecture de nos avions. On pourrait même imaginer que les moteurs puissent, selon les escales, digérer aussi bien le kérosène actuel que le e-kérosène du futur, dans une optique de transition douce et parce que les avions, par définition, se déplacent partout sur la planète.

Mais attention encore une fois aux ordres de grandeur. En l'absence totale de fuels fossiles pour l'aviation, il est extrêmement peu probable que le développement du transport aérien ne soit pas impacté par ces phénomènes.

Petit calcul : en première approximation l'aviation en france consomme 7,1 Millions de tonnes de kérosène par an. Cela représente environ 8,9 Milliard de litres. Un litre de e-fuel c'est 25KWh d'electricité. Il faudrait donc environ 221 TWh annuels pour produire le eFuel aviation pour la france. Cela représente environ la moitié de la production annuelle d'électricité en france, soit 25 à 30 réacteurs.

Pour les curieux, un article du CEA sur le sujet.

4. La voiture électrique (VE)

Le Parlement européen a voté récemment en faveur de l'interdiction, à partir de 2035, de la vente de véhicules neufs à moteur essence ou diesel. Sans présumer de la transposition dans la loi française de cette décision, il nous faut donc essayer d'en comprendre les implications.

Mais faisons d'abord un point sur l'automobile. Il est de notoriété publique que

- De nombreux français ne peuvent pas se passer de leur voiture, que ce soit pour aller travailler ou faire les courses,
- La voiture est pour certains un élément de statut social
- L'industrie allemande est très dépendante de ses voitures
- Les constructeurs français ont fait depuis 20 ans des progrès considérables sur les performances énergétiques et environnementales de leurs moteurs essence ET diesel
- Ces même constructeurs subissent la pression insensée des journalistes spécialisés qui tirent les performances vers le haut et tueraient tout véhicule minimaliste
- La très grande majorité des composants automobiles en particulier les batteries proviennent de chine
- Un nombre incroyable de dispositifs encombre dorénavant nos voitures qui sont devenues des tanks, fussent ils électriques.

Vous secouez le tout et vous obtenez une crise totalement stupide et un situation qui pourrait devenir dramatique. En effet, avant que les VE ne viennent percuter ce marché l'Europe avait une position schizophrène. D'un côté une volonté affichée de faire baisser les émissions de CO2 des voitures mais en parallèle, surtout côté allemand, des véhicules toujours plus puissants et plus lourd, bardés d'aide à la conduite pour se déplacer sereinement à 250 km/h sur les *autobahns*. Et ceci encouragé par les journalistes auto qui adorent passer du temps à essayer ces belles voitures et autres SUV.

Depuis la prise de conscience de la nocivité du CO2, qu'avons nous fait? Imposé l'affichage du CO2? Changé le thermomètre ?

Nous aurions pu réellement changer notre vision de l'auto. Abandonner le côté statutaire, tordre le bras aux allemands en réponse à leur diktat éolien en exigeant l'interdiction de commercialiser en Europe tout véhicule particulier dépassant une masse donnée et une puissance donnée.

Voiture légère, peu puissante, ne dépassant pas 130 km/h, elle n'aurait pas besoin de 15 airbags, d'ABS, d'ESP. Mais elle consommerait 2 ou 3 l/100 et couterait le tiers du prix.

Et voilà que l'on décide de passer à l'électrique. Dans un pays où l'électricité est l'une des plus décarbonée de la planète, cela fait sens. En effet, l'empreinte carbone de construction du VE ne s'amortit que sur un mix électrique très décarboné. Si vous

faites moins de 300 000 km et que vous habitez en Pologne, oubliez le VE. Mais en France, c'est pertinent, les courbes se croisant vers 70000 km.

Bien sûr la batterie reste un problème que nous avons déjà traité plus haut. Mais ce qui est dramatique est encore une fois la course aux performances qui se reporte maintenant sur les VE. Mais cette fois, le bénéficiaire n'est plus l'Allemagne mais la chine ! Pourquoi developer des VE de 2 tonnes et de 300 chevaux? Pour supporter la comparaison avec les bêtises automobiles précédentes!

Mais là encore, la physique reprend ses droits. On a voulu plaquer nos usages présents de la voiture sur les VE. Grossière erreur. On doit repenser le système. Électrifier oui, mais pas n'importe comment.

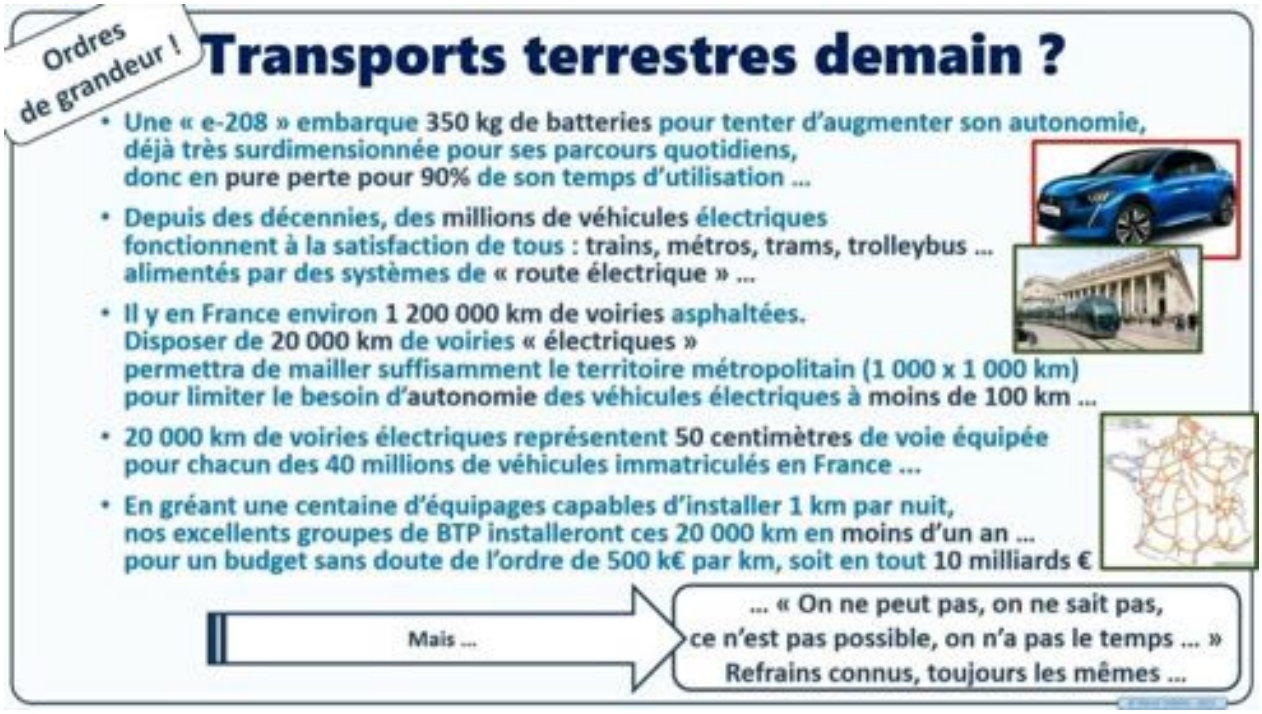
L'usage principal de la voiture électrique doit être pour des trajets courts et fréquents, typiquement pour travailler ou faire ses courses. Inutile s'acheter un véhicule lourd, rapide et de grosse autonomie. Inutile d'avoir des batteries de 350 kg sur une 208 qui ne pourra pourtant pas faire Toulouse-Paris sans recharger.

Mais quand bien même nous pourrions convertir tout le parc français en VE, nos usages devront changer.

Les meilleurs VE peuvent faire 500 km (à condition de ne pas utiliser clim ou chauffage). Si on imagine la transhumance estivale entre Paris et la Méditerranée en mode électrique, les pics de circulation ne seront plus possible

- Les bouchons de longue durée en plein soleil verront les VE en panne totale, la batterie ayant été sifflée par la clim,
- Avec aujourd'hui des pompes à essence par dizaines, et des voitures avec 800 km d'autonomie, les stations service saturent et la queue est importante alors que le plein prend moins de 5 mn. Imaginons 2 fois plus de voitures (pour cause d'autonomie plus faible) qui auront besoin de 30 min minimum…
- Et quid de l'alimentation électrique de ces stations? Pour un ordre de grandeur, avec une puissance de 75 KW par borne. Chaque station d'autoroute avec 40 postes de charge devra être alimentée avec un contrat de 3 MW. (C'est l'équivalent de 200 maisons en chauffage électrique)

Ci dessous une idée proposée par Pierre Tarissi, afin de penser différemment le véhicule électrique.



Il est donc essentiel d'adapter progressivement les usages et les moyens, quand on estime qu'un VE consommera environ 2 MWh/an. Si on dispose de 15 millions de VE, cela correspond à 30 TWh annuels, soit 3 tranches nucléaires type Fessenheim supplémentaires ou 2 EPR. L'adaptation du réseau de distribution vers les point de recharge sera également essentiel.

Au final, entre la tension sur le lithium et la dépendance à la chine, la structure du réseau et l'évolution du parc, la date de 2035 qui n'est que politique ne sera pas tenable car elle prend des hypothèses à la fois techniques (techno des batteries) et politiques (industrialisation) qui ne dépendent pas des oligarques Européens.

Par ailleurs, quand on sait que les carburants liquides sont taxés à 50%, n'est-il pas naïf d'imaginer que le gouvernement ne voudra pas récupérer cette manne également à terme sur les VE ?

Enfin, profitons de ce chapitre sur le VE pour introduire le concept de densité énergétique. En d'autres termes, combien mesure mon plein d'énergie dans ma voiture ? Pour faire un bilan simple :

1 litre essence = 9 kWh = 3000 l d'H2 (à P atm) = 7 litres H2 / 700 b = 4 litres H2 liquide / -253°C

Indépendamment du poids, mon réservoir d'Hydrogène sera 4 à 7 fois plus gros que mon réservoir d'essence à autonomie équivalente…

Compte tenu des fuites importantes d'H2 liquide et pour des raisons de coûts et d'utilisation courante, il semble préférable, aujourd'hui et dans un avenir « raisonnable », de choisir l'H2 comprimé à 700 bars utilisé directement dans un Moteur à Combustion Interne (sans pile à combustible et moteur électrique). Quant au poids, le réservoir d'hydrogène vide à 700 bars de ma voiture hydrogène, contenant 12kg

d'H2, pèse 240 Kg. A l'instar de la batterie, son poids est quasi le même qu'il soit vide ou plein.

5. Quel est le mix électrique idéal ?

Mais d'abord, que signifie ce terme barbare.

Le mix électrique d'un pays ou d'une région est la proportion respective de chaque moyen de production électrique, comme nous les avons vus au début de cet épisode.

Voila la question centrale que peuvent se poser tous les stratèges. Et c'est celle à laquelle Pompidou, Messmer puis Giscard ont répondu pour la France en 1974.

Pour la France, puissance nucléaire non dotée de ressources de pétrole ou de Gaz, la réponse était assez simple. A l'époque, l'argument principal était la limitation de la dépendance au pétrole, du fait de son coût, de sa raréfaction et des contraintes géopolitiques qu'il faisait peser sur le pays.

Aujourd'hui, le consensus sur la nécessité de décarboner les énergies permet juste de conforter cette décision qu'avait prise la france il y a 1/2 siècle.

Tout le monde peut trouver extrêmement pertinent de mettre en oeuvre les solutions éoliennes et solaires:

- La matière première (soleil, vent) est gratuite et inépuisable
- La pollution immédiate semble nulle
- Pas de risque de radiations ou d'accident genre Chernobyl

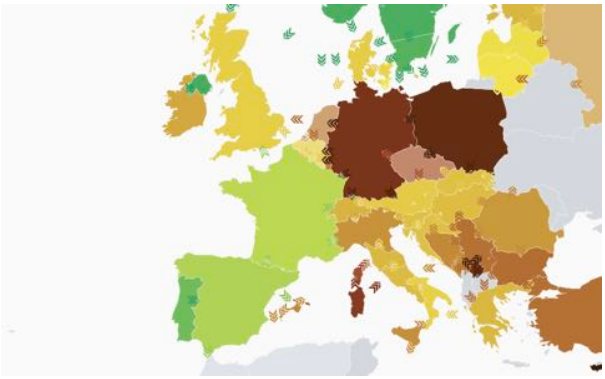
Mais ces solutions comportent **l'inconvénient majeur** d'être intermittentes, **non pilotables** et l'inconvénient supplémentaire d'être importées et extrêmement gourmandes en matériaux et en surface au sol. Concentrons nous sur le premier.

Si je dois électrifier un nouveau pays, qui n'avait rien avant (hypothèse théorique) ou augmenter significativement la production en prévision d'une grosse augmentation de la consommation (hypothèse plus réaliste), pour chaque MW de puissance ENRi installée je dois construire la même puissance « pilotable », c'est à dire une centrale fossile ou nucléaire. On appelle cela le « Backup » des ENRi. Et compte tenu du facteur de charge évoqué plus haut je dois accepter que 60 à 80% de mon électricité provienne de ce backup. La solution alternative consiste à expliquer aux usagers, par exemple, que *« malheureusement, du fait d'une quasi absence de vent et d'une couverture nuageuse importante, notre production d'électricité sera strictement réservée aux hôpitaux pour les 15 jours qui viennent. Vous devez prendre vos dispositions pour vous chauffer mais en limitant l'usage du bois car le taux de particule fines a dépassé les seuils… ».* Voila ce qui se passerait en l'absence de backup de nos solutions non pilotables, car je rappelle la très faible capacité de stockage dont nous disposons, rappelée plus haut dans ce document.

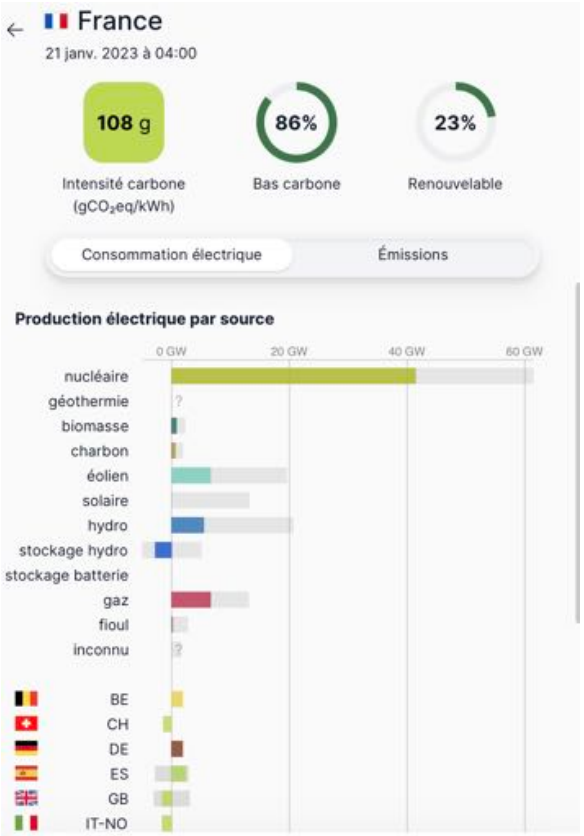
Maintenant, si je me contente d'une approche de « transition énergétique » comme les allemands ont poussé toute l'Europe à le faire, la situation est différente.

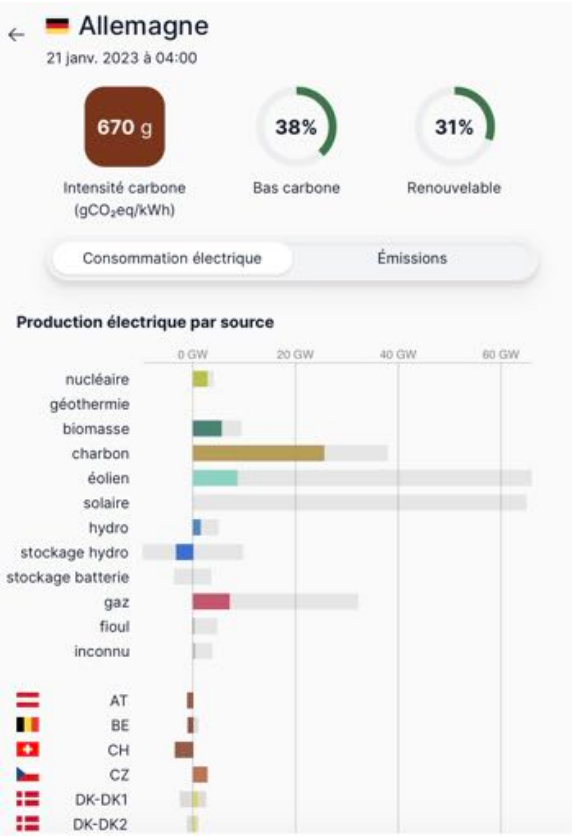
Si mon électricité est essentiellement produite par des moyens fossiles (Charbon très majoritairement), et que je construit un parc d'éoliennes, chaque MWh produit par le vent est un MWh que ne produit pas ma centrale à charbon. C'est de la consommation évitée, c'est du CO2 qui n'ira pas dans l'atmosphère. On dit là que l'on « efface » un moyen fossile avec un moyen ENRi. C'est ainsi que l'outre mer française, qui ne bénéficie pas de l'électricité nucléaire de la métropole, efface une centrale GAZ en multipliant les solutions solaires, particulièrement pertinentes sous les tropiques.

Les allemands ont décidé en 2011 d'arrêter les centrales nucléaires qu'ils avaient, encore une fois sur des pressions politiques exacerbées par l'accident de Fukushima. Il leur fallait donc disposer d'un backup car ils ont massivement investi dans l'éolien. Le pari consistait à remplacer un backup charbon par un backup Gaz beaucoup moins polluant (on divise le CO2 émis par 2,5). Et ce backup était très bon marché grâce au magnifique contrat avec les russe et le gazoduc NordStream 2. On connait la suite …



Ci-contre une carte et ci-dessous les tableaux comptant le mix électrique instantané en Allemagne et en France en ce début 2023 … (21 janvier 2023, 4:00)





On pourra noter avec intérêt que l'Allemagne a beaucoup plus de renouvelable que la France (la France est d'ailleurs à l'amende de Bruxelles pour cela) alors que l'électricité française est 6 fois moins carbonée que l'allemande…

Et la France alors?

Pour des raisons électorales et clientélistes, sans aucune vision stratégique les gouvernements des 25 dernières années ont passé une *énergie(!)* phénoménale à convaincre le peuple que les ENRi c'est mieux pour la planète. L'investissement public, bien que plus faible qu'en Allemagne, a été environ de 100 milliards d'euros (100 G€) dans les ENRi, essentiellement dans l'éolien. Mais reprenons notre raisonnement : Avec un parc de 58 réacteurs nucléaires **en service** chaque fois que l'on ralenti une centrale parce que le vent s'est mis à souffler, on remplace une énergie décarbonée par une autre, et on ne change pas pour autant la date de rechargement combustible de ladite centrale, donc on ne fait **aucune économie**. Pire, si on reprend le tableau plus haut, on remplace un moyen à 4g CO2/KWh par un moyen à 9 ou 10 g CO2/KWh.

Pour résumer :

- Les ENRi sont intermittentes.
- Les gens veulent quand même du courant les nuits sans vent. (Les trains roulent, les hôpitaux soignent, les usines produisent et les gens se chauffent)
- Le stockage à l'échelle du pays est une chimère. J'ajoute que du fait de l'intermittence des ENRi et de la nécessité de les adosser dans le meilleur du cas à du gaz et dans le pire à du charbon, le tableau du début de ce chapitre est donc à modifier. On parle ici d'une solution **pilotable** et donc de la carbonations de la production électrique.

	CO2 théorique (g/KWh)	Co2 backup gaz (g/KWh)	Co2 backup Charbon (g/KWh)
Centrale nucléaire	4	4	4
Usine hydroélectrique	10	10	10
Éolienne marine	9	282	670
Éolienne terrestre	10	345	821
Panneaux PV	44	386	913
Centrale Gaz	443	443	443
Centrale charbon	1058	1058	1058

C'est sur la base de ce tableau que je peux donc affirmer que les éoliennes marines **sont les moins carbonées des énergies fossiles**. (Tous les mots comptent !)

Donc, la puissance installée en ENRi doit être doublée par la même puissance en moyen pilotables. Les belges et les allemands remplacent leur centrales nucléaires

par des centrales au Gaz (russe). En fermant Fessenheim, nous nous sommes engagés dans la même direction.

Les ENRi en outre mer, seront pertinentes pour effacer nos centrales fossiles tant que les technologies de petits réacteurs nucléaires n'auront pas été développées.

L'hydraulique reste une excellente solution pour absorber des pics, car c'est une énergie pilotable et dont la disponibilité est de l'ordre de la minute.

Le mix électrique idéal est proche de celui dont disposait la france en 2000 et que nous nous sommes efforcé de détruire depuis.

Dans les pays dont la stabilité politique n'est pas certaine, la maitrise des technologies nucléaires civiles peut conduire à une extension nucléaire militaire ce qui peut freiner la mise en oeuvre de solutions nucléaires dans ces endroits. Ceci reste néanmoins limité en volume de production électrique au niveau planétaire, et peut être vu comme une opportunité pour l'industrie nucléaire française, si elle sort de son marasme. La récente décision polonaise de développer une filière de production d'électricité nucléaire sur techno américaine est un autre camouflet pour notre pays, qui paye là encore 25 ans de renoncements.

Ainsi se termine le troisième épisode de notre saga énergétique, sur une touche plus politique qui permet d'introduire le prochain épisode qui sera consacré aux impacts géo-politiques en particulier en Europe.