

# Energie

## *Perspectives et ordres de grandeur*

Auteurs	Philippe Barbarin	
Version	2	Restructuré
Date d'édition	Avril 2023	



*Ce document a été écrit pour répondre à plusieurs préoccupations. Il s'agissait 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 entraîne pour l'ensemble des pays de la planète. Il se veut donc 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 a d'abord été diffusé sous forme d'un feuillet de 5 épisodes, diffusés de novembre 2022 à Avril 2023.*

*Ce document en est la compilation exhaustive.*

*Nous nous gardons la possibilité de le faire encore évoluer et nous ne manquerons pas de vous prévenir si tel était le cas.*

---

## Table des Matières

Table des Matières	2
Glossaire	3
1. Préambule	5
2. Définition de l'énergie	5
2.1. Concept de base	5
2.2. Quelques unités pertinentes	6
2.3. Quelques ordres de grandeur	7
2.4. Les types connus d'énergie	11
3. Les sources d'énergie	13
3.1. Préambule	13
3.1.1. Énergie primaire	13
3.1.2. Énergie secondaire	13
3.1.3. La fin de l'histoire	13
3.2. Différentes sources d'énergie	14
3.2.1. Énergie Solaire	14
3.2.2. Énergie Éolienne	15
3.2.3. Énergie de l'eau	15
3.2.4. Énergie de la biomasse	16
3.2.5. Énergie Géothermique	17
3.2.6. Énergie des marées	18
3.2.7. Charbon	19
3.2.8. Pétrole	20
3.2.9. Gaz	20
3.2.10. Uranium	21
3.3. Le tribut payé par l'humanité aux sources d'énergie	23
4. Electricité	23
4.1. Production d'électricité	24
4.1.1. Généralités & Principes	24
4.1.2. Centrale thermique	25
4.1.3. Hydraulique	27

---

4.1.4. Eoliennes	28
4.1.5. Panneaux photovoltaïques	28
4.1.6. Piles à combustible (PAC)	28
4.2. Stockage, Transport et Distribution	29
4.2.1. Transport et distribution	29
4.2.2. Stockage	30
4.2.2.1. Batterie, hydrogène, bref, la chimie.	31
4.2.2.2. Stockage Gravitaire ou Énergie Potentielle	34
4.3. Et le transport aérien ?	36
4.4. La voiture électrique (VE)	37
4.5. Quel est le mix électrique idéal ?	40
5. La France, L'Europe et la politique Energétique	44
5.1. Historique	45
5.2. Dogme Energétique Européen	48
5.3. Indépendance nationale et fermeture du cycle	52
5.3.1. Pourquoi le nucléaire en France ?	52
5.3.2. Fermeture du cycle - Neutrons lents et rapides	53
5.3.3. Conclusion	56
6. L'Energie Nucléaire	57
6.1. Un peu de physique (et d'étymologie)	57
6.2. La production d'énergie par fission	58
6.2.1. Réacteurs classiques	58
6.2.2. Le cycle du « combustible »	60
6.2.3. Surgénération	61
6.2.4. Réacteurs de 4ème génération	61
6.2.5. SMR	64
6.3. La Fusion Nucléaire	65
7. Conclusion	66

## 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
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 et récupérer entre plus d'énergie au passage. Objet de très grosses recherches (ITER) et d'espoirs pour la production d'énergie du futur. (XXIe 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 <b>Puissance</b> . 1 KW = 1000 Watts, 1 GW= 1000 MW, 1TW= 1000 GW
KWh	Unité d' <b>Énergie</b> . 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 Combustible. 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 voitures connectées à une borne spécifique de recharge pour servir de stockage temporaire d'électricité afin d'équilibrer le réseau.
VE	Véhicule Electrique

## 1. Préambule

Quand on parle énergie, on parle d'une grandeur physique, qui est régie par des lois que les hommes ont affinées au cours des 3 derniers millénaires. En conséquence, tout ce qui touche à ce sujet est assez simple à comprendre et surtout, ne relève pas d'une opinion. En la matière, des gens sans la culture scientifique minimum, qu'ils soient politiques ou journalistes (parfois les deux) ont essayé et malheureusement souvent réussi à convaincre leurs électeurs que ces lois physiques pouvaient être contraintes par des décisions politiques.

Cette naïveté, si c'en est une, se heurte parfois au réel. C'est ce que les français commencent à découvrir depuis quelques mois s'agissant d'énergie. Et quand on se heurte au réel, cela peut faire très mal.

Enfin, beaucoup de discussions autour de ce sujet tournent autour de l'empreinte carbone (CO2) et de la notion de réchauffement climatique. Ce n'est pas le propos de ce document. On part ici du principe que la limitation des combustibles fossiles et de l'émission de gaz à effet de serre est nécessaire, et même contrainte dans la perspective d'une pénurie naturelle ou géo-politique de ces combustibles.

## 2. Définition de l'énergie

Le mot « énergie » vient du Grec Ancien « énergeia », qui signifie « La force en action ». Ce concept scientifique est apparu avec Aristote et a fortement évolué au cours du temps. Aujourd'hui, l'énergie désigne « la capacité à effectuer des transformations ». Par exemple, l'énergie c'est ce qui permet de fournir du travail, de produire un mouvement, de modifier la température ou de changer l'état de la matière. Toute action humaine requiert de l'énergie : le fait de se déplacer, de se chauffer, de fabriquer des objets et même de vivre.

### 2.1. Concept de base

Pour les puristes, l'unité internationale pour quantifier l'énergie est le **joule**. Mais cela représente une quantité si faible que cette unité ne serait ni pratique, ni « parlante » pour chacun d'entre nous. On verra juste un peu plus loin que les gens, pour des raisons le plus souvent historiques, utilisent des unités différentes selon la forme sous laquelle ils achètent ou consomment l'énergie.

Pour mieux comprendre cette notion très importante, et pour éviter des confusions encore très fréquentes dans les journaux ou à la télévision, il est temps d'introduire la notion de **Puissance**, qui est souvent confondue avec l'**Energie**. Et comme chaque fois ici, on s'efforcera de rapporter ces concepts à la vie de tous les jours:

Prenons l'exemple d'une voiture. Plus votre moteur est **puissant**, plus votre voiture sera capable d'accélérer fort et par exemple, moins de temps elle mettra pour aller de zéro à 100 km/h. On a longtemps utilisé le « cheval » comme unité de puissance des voitures (et certains l'utilisent encore) mais on lui substitue de plus en plus le KW (KiloWatt). Exemple ci-contre extrait d'une revue automobile. On oublie la puissance fiscale, qui comme on s'en doute ne sert qu'à taxer les contribuables, mais on voit clairement la puissance maximum du moteur exprimée en chevaux (85) ou en KW (63).

MOTORISATION	
Moteur	1.5 blue dci 85
Cylindrée	1461 cm3
Puissance Fiscale	4 cv
Puissance Max	85 ch / 63 kw à 3750 tr/min

Pour produire cette puissance pendant un certain temps il faut de l'énergie. Dans cet exemple, ce sera sous forme de gazole contenu dans le réservoir de la voiture. Si on doit doubler ce temps, il faut doubler l'énergie nécessaire.

Autre exemple, domestique, le fer à repasser. Cet appareil a une puissance de 1000 à 2000 watts ou de 1 à 2 KW. Tout le monde comprendra que l'énergie (électrique dans ce cas) nécessaire pour utiliser le fer dépend de sa puissance, mais aussi du temps pendant lequel on le fait fonctionner.

Ce document n'étant pas un cours de physique, nous n'utiliserons aucune formule compliquée, mais nous devons juste retenir ceci :

## ENERGIE = Puissance X Temps

Et cela devrait nous suffire à débusquer un nombre immense de bêtises qu'on lit ou que l'on entend sur ces sujets.

Donc, pour une quantité d'énergie donnée, plus on la libère rapidement plus grande est la puissance. Une explosion est la libération d'une énergie en un temps extrêmement court et donne donc une grande puissance.

Si je reprends l'exemple de mon fer à repasser de **2 KW de PUISSANCE**, et que je le laisse fonctionner 1 heure, j'aurai consommé **2 KWh d'énergie** (électrique en l'occurrence).

Le KiloWatt x Heure (et non pas le KW par heure ce qui n'a pas de sens) que l'on note KWh est une unité d'Energie. C'est d'ailleurs dans cette unité que EDF (ou ceux qui prétendent concurrencer EDF) vous facturent votre consommation. Et pour les puristes, le joule, que je décrivais plus haut, est l'énergie correspondant à une puissance de 1 Watt pendant 1 seconde, et on a donc 3 600 000 joules dans 1 KWh, ce qui explique pourquoi on ne l'utilise pas sur vos factures...

## 2.2. Quelques unités pertinentes

On a donc vu qu'il existe historiquement de nombreuses unités différentes en fonction du type d'énergie. Comme il est de plus en plus pertinent de considérer les pro-

blèmes d'énergie globalement, il est de plus en plus fréquent de tout consolider sur la base d'unités simples à appréhender.

Pour l'anecdote, on va en citer quelques unes qui devraient être familières :

- Le stère de bois de chauffage
- La tonne de charbon
- Le litre d'essence ou de gazole
- La bouteille de butane
- Le m<sup>3</sup> de gaz naturel
- Le Baril de pétrole
- Le KWh d'électricité
- Etc...

La difficulté est de comparer toutes ces unités. Comme le pétrole a été l'étalon pour toute la seconde moitié du XXe siècle l'unité a souvent été la Tep (Tonne Equivalent Pétrole). Aujourd'hui les déclinaisons du Wh semblent prendre le pas.

	KWh	MWh	GWh
<b>1 Tonne Charbon</b>	7 233	7,233	0,007
<b>1 Tonne Pétrole brut</b>	11 666	11,666	0,012
<b>1000 m<sup>3</sup> gaz naturel</b>	9 998	9,998	0,010
<b>1 Tonne Uranium naturel</b>	116 660 000	116 660	117

Rappel pour les distraits ayant oublié leur grec :

Kilo - 1 000 (mille)

Mega - 1 000 000 (1 million)

Giga - 1 000 000 000 (1 milliard)

Tera - 1 000 000 000 000 (1 million de millions ou 1000 milliards)

On parlera donc souvent de MWh, de GWh ou même de TWh dans la suite de ce document.

## 2.3. Quelques ordres de grandeur

Alors quand on parle d'énergie, ou de systèmes de « production » d'énergie, il est toujours important de garder quelques ordres de grandeur en tête. On va ici s'attacher à utiliser des unités comparables entre elles, car c'est en utilisant justement des choses incomparables que l'on brouille le débat. Dans le tableau ci-dessous, on parlera de PUISSANCE maximum, et de quantité d'énergie (produite ou consommée) sur une période donnée (1 an sauf indication contraire)

	Puissance max	Consommation Annuelle	Production annuelle
<b>Cafetiere Electrique</b>	700 W		
<b>Sèche Linge</b>	2000 W		
<b>TV en veille 20h/jour</b>	2 W	14,6 KWh	
<b>Radiateur soufflant Salle de Bain 1h/jour 100 J/an</b>	2000 W	200 KWh	
<b>Résidence principale France métropolitaine</b>	15 KW	14,5 MWh	
<b>Eolienne terrestre</b>	2 MW		4 GWh
<b>Eolienne Marine</b>	6 MW		21 GWh
<b>Panneau Solaire 100 m2</b>	20 KW		21 MWh
<b>Centrale nucléaire type Fessenheim</b>	2 X 900 MW		10 TWh
<b>Centrale nucléaire type EPR</b>	2X 1600 MW		20 TWh
<b>Voiture compacte, 20000 Km (Essence)</b>	65 KW	15 MWh	
<b>SUV 4X4, 20000 km (Gazole)</b>	200 KW	25 MWh	
<b>Consommation Annuelle <u>Electrique</u> France métropolitaine (Chiffre 2019)</b>		473 TWh	

Profitons de ces ordres de grandeur pour tordre le coup à certaines affirmations des promoteurs des ENRi reprises sans aucune vérification par les médias complaisants. Exemple ci-dessous avec le très récent parc Eolien en mer de Saint Nazaire.



Les données de base sont fournies par les promoteurs du projet lui même : [https://parc-eolien-en-mer-de-saint-nazaire.fr/wp-content/uploads/2013/09/SNA\\_Synthese.pdf](https://parc-eolien-en-mer-de-saint-nazaire.fr/wp-content/uploads/2013/09/SNA_Synthese.pdf)

- Puissance Installée : 480 MW
- Production annuelle : 1 735 GWh, ce qui prend pour hypothèse optimiste le fait que ces 80 éoliennes fonctionnent 41,2% du temps

Mais le même organisme communique à la presse, qui le reprend à l'envi, le fait que cela correspond à la consommation de 700 000 foyers soit 20% du département de Loire Atlantique. Faisons un petit calcul : 1735 GWh pour 700 000 foyers, cela fait 2,47 MWh par foyer et par an... Très loin des 14,5 MWh constatés. Parce que **ces informations sont systématiquement données « hors chauffage »** ce qui représente l'immense part de la consommation d'énergie d'un foyer !!!

On peut raisonnablement parler ici de manipulation de l'opinion car le chiffre réaliste, mais nous y reviendrons, serait plutôt 120 000 foyers.

Voir article de Ouest France ci-dessous.

Accueil > Pays de la Loire > Saint-Nazaire



**La Turballe. Le champ éolien marin en mode productif**

Réservé aux abonnés

Les 80 éoliennes sont raccordées à la sous-station. Le champ marin qui sera pleinement exploité d'ici la fin décembre par EDF Renewelables injectera dans le réseau 20 % des besoins en électricité de la Loire-Atlantique.

**Presse Océan**  
Franck LABARRÉ.  
Publié le 02/10/2022 à 10h41

Abonnez-vous

 ÉCOUTER

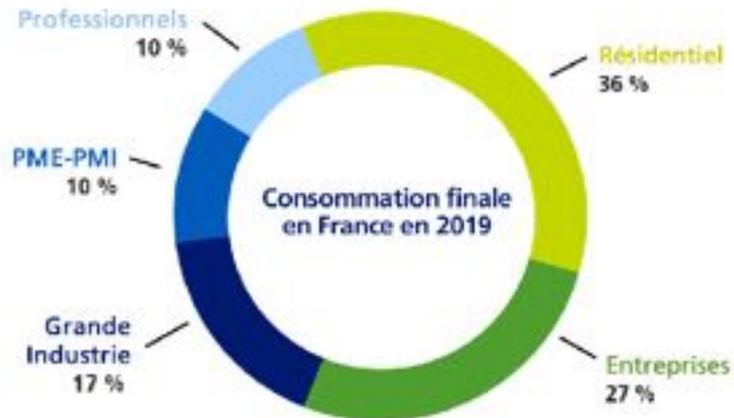
 LIRE PLUS TARD

 PARTAGER



La sous-station électrique, sorte de gros transformateur construit par les Chantiers de l'Atlantique, est installée au beau milieu d'un champ de 80 éoliennes espacées chacune d'1 km | PRESSE Océan-SIMON TORLCTIN

Enfin, pour clore temporairement ce chapitre des ordres de grandeur, deux graphiques : L'un indique la répartition de la consommation électrique finale en France par secteur et l'autre la répartition des grands postes énergétiques par logement.

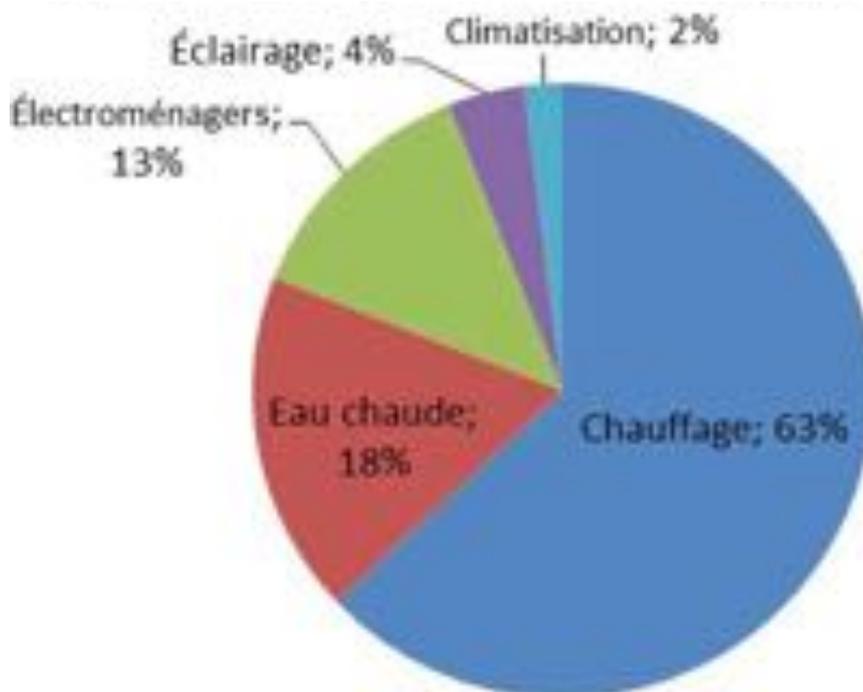


La consommation d'électricité par typologie de consommateurs en France en 2019

Source RTE - bilan électrique 2019

© EDF

### Répartition de la consommation énergétique résidentielle en France



On voit ci-dessus l'importance de travailler sur les postes les plus lourds (Eau Chaude et Chauffage) plutôt que sur les gadgets comme les appareils en veille (Rappel: TV en veille = 0,1% de la consommation annuelle) ...

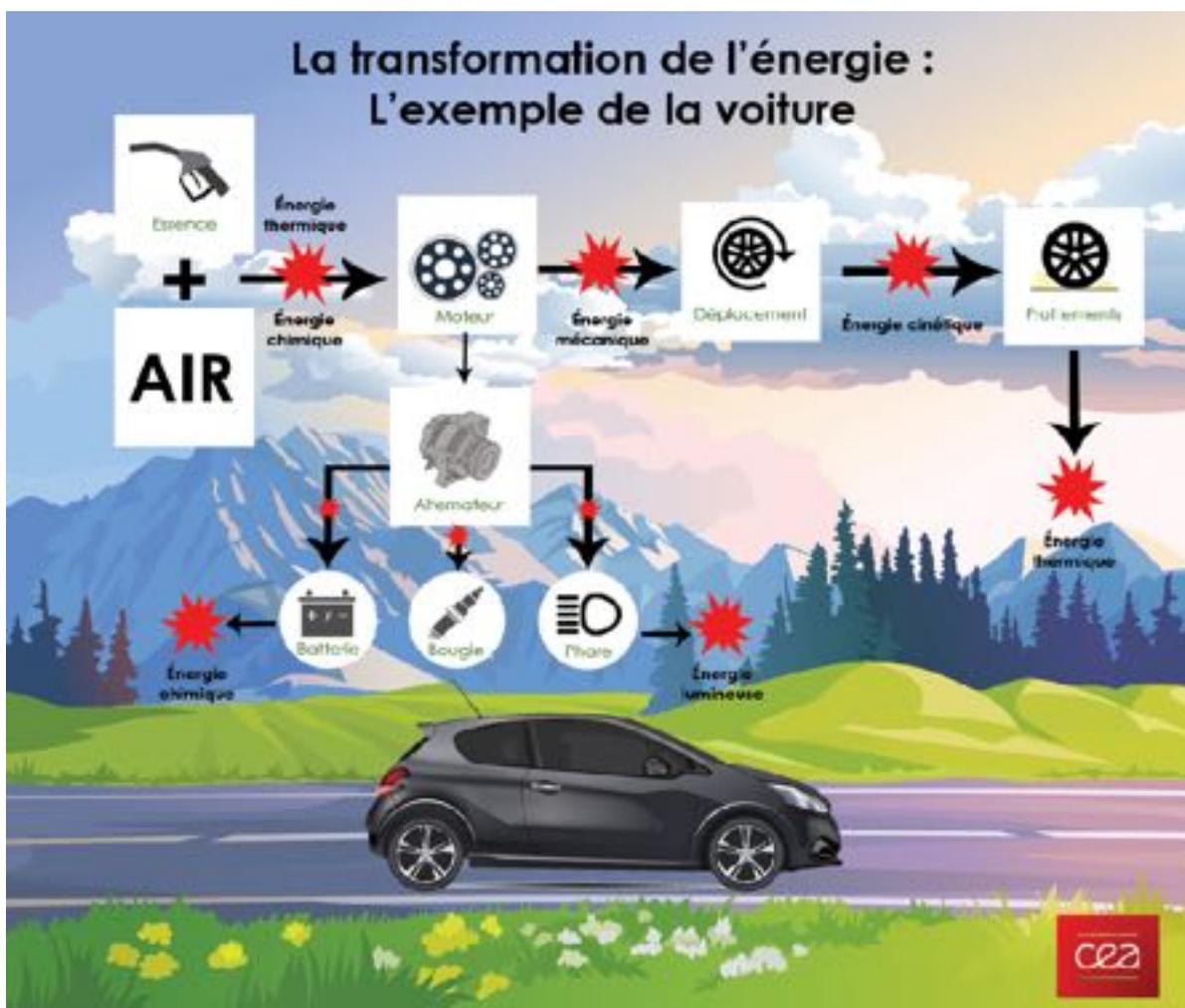
## 2.4. Les types connus d'énergie

Il convient ici de distinguer les formes que prend l'énergie des moyens permettant de la produire, sur lesquels nous reviendrons plus tard.

Il est aussi important de comprendre que l'on ne « crée » pas de l'énergie, mais qu'on la transforme, et que cette transformation se fait toujours avec des pertes.

L'énergie peut exister sous plusieurs formes. Parmi les principales :

- L'énergie thermique, qui génère de la chaleur ;
- L'énergie électrique ou électricité, qui fait circuler les particules – électrons - dans les fils électriques ;
- L'énergie mécanique, qui permet de déplacer des objets ;
- L'énergie cinétique, due à la vitesse
- L'énergie chimique, qui lie les atomes dans les molécules ;
- L'énergie Nucléaire, qui lie les particules subatomiques
- L'énergie de rayonnement ou énergie lumineuse, qui génère de la lumière ;
- L'énergie musculaire qui fait bouger les muscles.



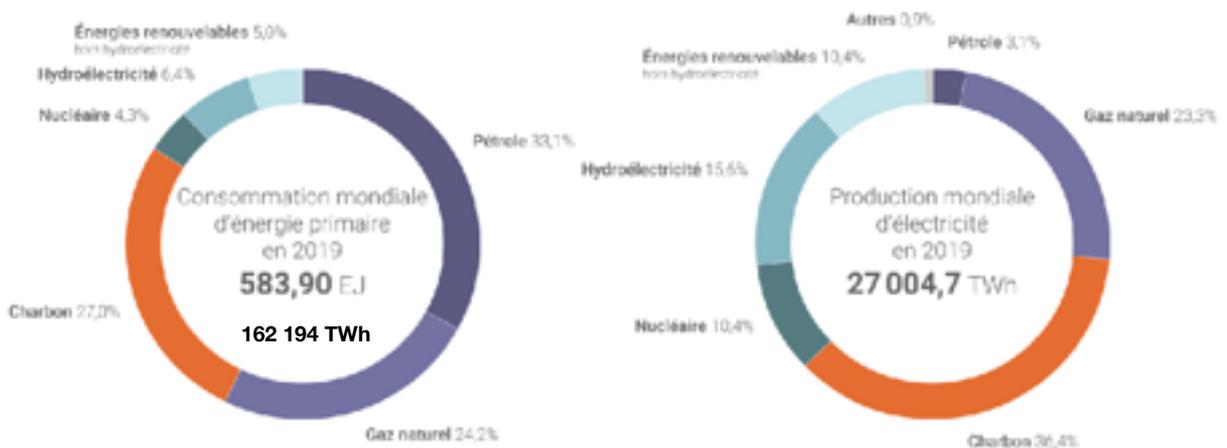
Si on revient aux débuts de l'humanité et jusqu'au début de la révolution industrielle au XVIII<sup>e</sup> siècle, l'homme a surtout utilisé la chaleur (Soleil, feu) et l'énergie musculaire (la sienne, celle de ses esclaves ou de ses animaux) pour subvenir à ses besoins.

Mais déjà, sans le savoir, il procédait à des transformations : Le bois ne pousse que si la forêt reçoit la lumière et la chaleur du soleil. Au passage, précisons que pour que le bois puisse se développer, encore faut-il que le taux de CO<sub>2</sub> dans l'atmosphère soit suffisamment important, ce qui exclu bien entendu de ramener ce taux à zéro. Le bois devient ensuite un combustible (énergie chimique). On peut aussi décliner la démonstration sur l'énergie musculaire qui devient une énergie mécanique.

L'homme sait aussi que si il frotte fort et longtemps certains matériaux l'un contre l'autre (action mécanique) cela dégage de la chaleur (énergie thermique) et cela peut s'enflammer (Energie Chimique)...

On commence donc à entrevoir le besoin et les possibilités de transformer l'énergie sous une forme qui est plus adaptée à telle ou telle activité.

#### Monde La consommation d'énergie totale et la production d'électricité en 2019



Source: BP Statistical Review of World Energy, juin 2020

Attention, ces chiffres sont à regarder plus en détail : 74% de la production électrique provient de centrales (nucléaires ou fossiles) dont le rendement énergétique est de l'ordre de 35%. La consommation d'énergie primaire liée à la production électrique de 27 000 TWh est donc plus près de 64 000 TWh, soit **40% environ du total**. Le reste est transports, industrie, chauffage & climatisation.

Pour conclure ce chapitre, il est important de toujours garder l'esprit critique quand on nous communique des chiffres liés à l'énergie. J'espère que les quelques ordres de grandeur évoqués ici vous permettront de mettre en œuvre vous-même cette démarche salutaire.

Dans la suite, nous passerons en revue les différents types d'énergie primaire, et les transformations qu'elles subissent.

---

## 3. Les sources d'énergie

### 3.1. Préambule

Il convient d'abord de distinguer les énergies primaires et secondaires.

#### 3.1.1.Énergie primaire

Une énergie primaire est une énergie brute n'ayant pas subi de transformation, dont la source se trouve à l'état pur dans l'environnement. Le vent, le Soleil, l'eau, la biomasse, la géothermie, le pétrole, le charbon, le gaz ou l'uranium sont des sources d'énergies primaires.

Quand on parle d'énergie primaire, le soleil est une réelle énergie primaire, qui au passage est une énergie de **Fusion Nucléaire** au sein de notre étoile. On lui doit indirectement le vent, la biomasse, l'eau, le pétrole, le charbon et le gaz.

#### 3.1.2.Énergie secondaire

On appelle « énergie secondaire » une énergie qui est obtenue par la transformation d'une énergie primaire.

Par exemple, l'électricité est une énergie secondaire qu'on obtient à partir de plusieurs énergies primaires : l'énergie solaire avec des panneaux, l'énergie nucléaire avec des réacteurs, l'énergie hydraulique avec des barrages ou encore l'énergie du vent avec des éoliennes. Il n'existe pas d'électricité à l'état naturel, sauf peut-être les orages.

L'essence, le gasoil et les biocarburants sont également des énergies secondaires ; on les obtient par la transformation du pétrole brut ou de la biomasse. L'hydrogène, qui n'existe quasiment pas à l'état gazeux naturel sur terre, est également une énergie chimique secondaire car il faut le produire.

#### 3.1.3.La fin de l'histoire

On verra plus tard que plus l'énergie se transforme, plus elle se dégrade. Même si la quantité d'énergie reste la même, certaines formes sont plus avantageuses que d'autres. A la fin, cela se termine généralement en chaleur. Et plus la température est élevée, plus facile en sera l'utilisation.

Exemple : Avec un litre d'eau bouillante, vous pouvez faire cuire un oeuf. Si vous versez ce litre dans 9 litres d'eau froide, vous obtiendrez 10 litres d'eau tiède, contenant la même énergie, mais dégradée au point que vous ne pourrez rien en faire...

Pour ceux qui veulent aller plus loin, ceci touche à ce que les physiciens appellent l'entropie. Elle caractérise en quelque sorte la « qualité » de l'énergie. S'agissant des

transformations de l'énergie, elle permet de quantifier aussi la « réversibilité » d'une transformation ou le désordre d'un système.

## 3.2. Différentes sources d'énergie

Dans la suite de ce chapitre, on va répertorier les énergies primaires disponibles sur notre planète et, pour chacune d'entre elles, définir les transformations directes qui sont appliquées pour déterminer l'usage ultérieur qui peut en être fait.

### 3.2.1. Énergie Solaire

A tout seigneur tout honneur, commençons par notre étoile, dont l'usage se décline au delà de ses effets indirects évoqués plus haut. Bien évidemment, cette énergie primaire de type **rayonnement** est renouvelable, du moins tant que le soleil brillera, mais intermittente et difficile à prévoir (ensoleillement). Elle fait donc partie des ENRi.

Transformation	Illustration
<p>Les panneaux photo-voltaïques visent à convertir directement le rayonnement solaire en <b>électricité</b>. On notera que ces panneaux produisent un courant continu.</p> <p>On admet que le rayonnement sur terre représente environ 1KW/m2 et que de tels panneaux peuvent en récupérer environ 10 à 20 %.</p>	
<p>Production <b>thermique</b> directe et individuelle d'eau chaude. Ce type de chauffe-eau, particulièrement adapté au côté intermittent de l'énergie solaire, est très répandu en outre-mer, mais pourrait parfaitement se développer sur une grande partie du territoire.</p> <p>Rappelons que ce poste représente 12% de la consommation énergétique totale d'un ménage français, soit 50 TWh annuel. En excluant le logement collectif pour lequel on peut trouver d'autres solutions, remplacer toute la production d'eau chaude par ce type de chauffe eau en france représenterait une économie de 30TWh annuelle, soit la quasi totalité de la production de nos 8000 éoliennes terrestres...</p>	
<p>Centrale solaire <b>thermique</b>. Cette technique consiste à chauffer une enceinte en concentrant les rayons du soleil. On peut ensuite faire bouillir de l'eau et produire de la vapeur (Voir chapitre sur les centrales thermiques)</p>	

### 3.2.2.Énergie Éolienne

On a vu plus haut que le vent est indirectement dû au soleil, mais il est convenu de le considérer comme une source primaire évidemment **mécanique**. Ici aussi, on dispose d'une ENRi car personne ne met en doute le coté intermittent du vent, doublé d'une prédictibilité très faible sur le moyen/long terme. Le vent est, après le feu et les muscles des animaux, la première énergie utilisée par les hommes.

Transformation	Illustration
<p>Historiquement, les moulins à vent permettaient de disposer d'une énergie <b>mécanique</b>, utile pour faire tourner les meules et fabriquer la farine. Dans certains pays, cette énergie du vent était aussi utilisée à d'autres usages mécaniques.</p>	
<p>L'usage le plus répandu aujourd'hui est évidemment la production <b>d'électricité</b>, par transformation de l'énergie mécanique en énergie électrique au travers de génératrices. Les éoliennes ont des puissances unitaires maximum de 2MW environ pour leur version terrestres et de 6 MW pour les versions marines.</p>	
<p>Jadis usage le plus répandu de l'énergie du vent, et au delà de son usage ludique et touristique pour la propulsion des bateaux, plusieurs initiatives visant à soulager les systèmes de propulsions des navires par des dispositifs de type voiles se développent. Cet usage est encore du domaine anecdotique, et c'est un ingénieur du Génie Maritime qui vous le dit.</p>	

### 3.2.3.Énergie de l'eau

Jadis nommée « houille blanche » l'énergie de l'eau vise à utiliser en réalité celle de la gravité, avec l'aide du soleil qui permet à la pluie de remplir les points les plus hauts et de laisser l'eau se déverser dans les points les plus bas.

Dans des conditions météorologiques normales, c'est une énergie disponible très rapidement, renouvelable, prévisible et quasi constante.

Transformation	Illustration
<p>Historiquement, les moulins à eau permettaient de disposer d'une énergie <b>mécanique</b>, utile pour faire tourner les meules et fabriquer la farine, mais aussi faire fonctionner toute sorte de dispositifs mécaniques et ayant participé aux débuts de l'industrialisation.</p>	
<p>Barrage de retenue. On produit ici de <b>l'électricité</b> par a-coups. Ce type de barrage, très répandu, dispose d'un réservoir (lac de retenue) qui se remplit progressivement en fonction des cours d'eau qui l'alimentent. Il présente l'avantage de pouvoir produire quasi instantanément une grosse quantité d'électricité en cas de pic de demande. Il est utilisé pour « effacer les pics de charge ». Malheureusement, les sites disponibles se raréfient et des associations sont souvent opposées à la construction de nouveaux barrages. On reparlera de ces technologies au chapitre stockage de ce document.</p>	
<p>Barrage au fil de l'eau. La encore, on produit de <b>l'électricité</b> au moyen de génératrices. Ce type de barrage, comme celui de Genissiat ci-contre aux confins de l'Ain et de la Haute Savoie, assure une production permanente en turbinant en permanence l'eau du Rhône. Les sites permettant la mise en place de telles installations sont extrêmement rares en France.</p>	

### 3.2.4. Énergie de la biomasse

Voilà encore un énergie renouvelable, et ancestrale. On parle ici essentiellement de production de combustible par les moyens naturels. Mais encore une fois, méfions nous des ordres de grandeurs. En effet, la totalité de l'humanité cuisinait et se chauffait ainsi jusqu'au milieu du XVIIIe siècle, quand nous avions encore beaucoup de forêts et que nous étions à peine 1 milliard (contre 8 aujourd'hui).

Transformation	Illustration
<p>Plus vieux combustible de l'humanité, en brûlant du bois, on transforme l'énergie <b>chimique</b> du bois en énergie <b>thermique</b>. On restitue au passage à l'atmosphère le CO<sub>2</sub> que les arbres ont capté en poussant. Cet usage se répand à nouveau sans pour autant que la capacité de l'environnement à supporter ces nouveaux usages soit clairement évalué et contrôlé.</p>	

Transformation	Illustration
<p>Avec les bio carburants, on est dans une pure transformation <b>chimique</b>, visant à produire un combustible liquide, facilement utilisable par les moteur thermiques, à partir de plantes spécifiquement plantées à cet effet. On évaluera plus tard le bilan carbone total de ce type d'énergie, dont les effets pervers sur l'agriculture et l'alimentation de la population mondiale ne sont pas anodins.</p>	
<p>Production de bio-gaz. Nouvel avatar de transformation Chimique qui vise à récupérer le méthane (CH<sub>4</sub> ou gaz naturel) dégagé par la fermentation de bio déchets (excréments de bovins, etc). Selon l'ADEME, en 2020, la production d'énergie par biogaz est de 7,5 TWh annuels, dont 34% convertis en électricité. (À rapporter aux 473 TWh de consommation totale électrique en France)</p>	

### 3.2.5. Énergie Géothermique

Chacun sait que la terre dispose d'un noyau constitué de magma en fusion et qui se manifeste à la fois par les mouvements de plaques (tremblements de terre) et les éruptions volcaniques. La géothermie consiste à exploiter cette chaleur.

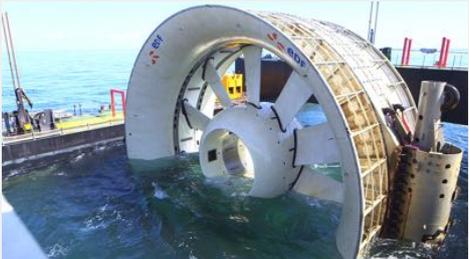
Transformation	Illustration
<p>La géothermie de faible énergie concerne le secteur domestique ou industriel et s'applique à utiliser la chaleur ou la douceur du sous-sol pour chauffer, refroidir et produire de l'eau chaude pour des habitations uniques, des immeubles ou encore des bâtiments tertiaires. En Île-de-France, de nombreux doublets géothermiques sont installés dans le but d'alimenter des réseaux de chauffage urbains en utilisant un aquifère profond situé entre 1,5 et 2 km de profondeur, à une température moyenne comprise entre 60 et 85 °C.</p> <p>Un usage systématique couplé à une pompe à chaleur dans toutes les maisons individuelles nouvellement construites permettrait une économie significative sur une poste qui représente 60% de la consommation d'énergie résidentielle.</p>	
<p>La géothermie de moyenne énergie concerne des projets plus profonds et des températures généralement supérieures à 90 °C. Le but de cette géothermie est d'utiliser la forte température des profondeurs pour produire de la chaleur, ou de l'électricité (dans une moindre mesure), voire les deux en même temps. Les usages principaux de ce type de géothermie sont industriels et comprennent l'extraction de produits chimiques, le séchage de produits industriels ou encore la récupération de métaux.</p>	

Transformation	Illustration
<p>La géothermie de haute énergie cherche quant à elle à capter l'eau à des températures supérieures à 120 °C, sous forme de vapeur, qui servira à produire de l'électricité grâce à des turbines. Ce type de géothermie est développé dans des contextes géologiques spécifiques, impliquant la présence de corps chauds apportant la source de chaleur : il peut s'agir de la proximité du manteau terrestre ou de corps magmatiques, comme on peut en trouver par exemple en Islande (ci-contre)</p>	

### 3.2.6. Énergie des marées

Voilà une application quasi directe de l'énergie de gravitation, puisque les marées sont dues à l'attraction exercée par le Soleil et la Lune sur nos océans.

Il en résulte des mouvements qui, selon la géographie, peuvent être très importants et qui sont surtout parfaitement prévisibles sur le long terme. Du côté du mont saint Michel, les amplitudes peuvent atteindre 12m. Cette énergie est à la fois renouvelable, intermittente, mais surtout **prédictible**.

Transformation	Illustration
<p>Barrage marémoteur : Le plus célèbre en France est le barrage sur la Rance. Malheureusement, il n'existe pas de nombreux sites permettant de répliquer cette installation, dont la production annuelle n'est que de 500 GWh (0,5 TWh). On garde ici le principe d'un barrage de retenue, qui turbine l'eau éventuellement dans les 2 sens en fonction de la marée.</p>	
<p>L'hydrolienne est encore au stade du développement. La maintenance de telles installations sous marines reste malgré tout un très gros défi. Naval Energies a un temps tenté de se mettre sur ce marché avant de jeter l'éponge en 2018. Le principe consiste à poser l'équipement sur le fond, et de laisser tourner la roue au gré des courants de marée.</p>	

### 3.2.7. Charbon

Le **charbon** est une **roche sédimentaire** combustible, riche en carbone, de couleur noire ou marron foncé, formée à partir de la dégradation partielle de la **matière organique** des **végétaux**. Il constitue une énergie dite **fossile** car résultant de la biomasse présente il y a environ 350 millions d'années.

Le charbon n'est pas renouvelable à l'échelle humaine. A l'échelle géologique, on peut imaginer que les mêmes causes puissent reproduire les mêmes effets dans 500 millions d'années ...

Le charbon a réellement commencé à être utilisé en Angleterre au XVIIIe siècle, même si Marco Polo rapporte que les chinois faisaient brûler « d'étrange pierres noires »... C'est donc avec la révolution industrielle et l'invention de la machine à vapeur que le charbon a vu son développement exploser. On a vu plus haut qu'il représente 27% de toute l'énergie primaire de la planète et qu'il est N°1 pour la production d'électricité avec 36,4% du total.

Transformation	Illustration
<p>L'extraction du charbon et de la lignite reste une activité minière extrêmement lourde, polluante et destructrice de l'environnement.</p>	
<p>On développera plus loin le fonctionnement générique de la plupart des centrales, mais notons que les centrales électrique au charbon sont de très loin les plus polluantes</p>	
<p>La carbochimie, naguère importante, a laissé la place à la pétrochimie</p>	

### 3.2.8. Pétrole

Issu comme le charbon de la décomposition des végétaux, dans des conditions de température et de pressions différents, le pétrole est encore aujourd'hui la première énergie primaire utilisée dans le monde.

Et comme le charbon, on a ici une énergie fossile non renouvelable, dont les réserves sont nécessairement limitées, sans qu'on sache précisément où est la limite.

**A ce jour, l'humanité ne sait pas se passer de pétrole.**

Le pétrole est le produit roi de la seconde moitié du XXe siècle. Après l'avoir trouvé facilement dans certains endroits, l'homme a appris à aller le chercher de plus en plus profondément sous la surface mais aussi au fond des mers et même sous la glace.

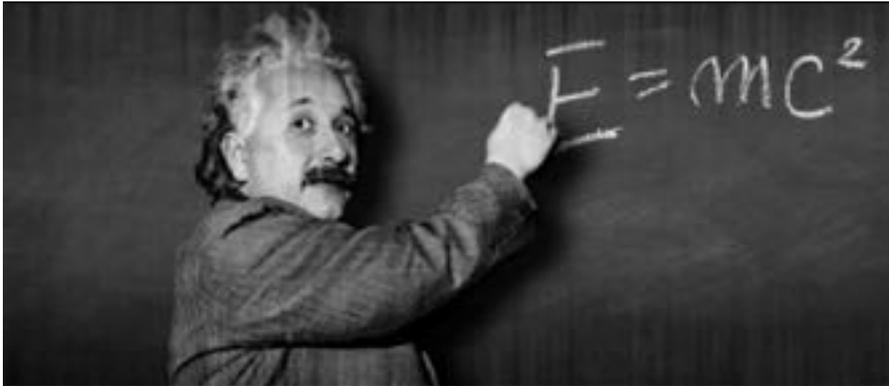
L'utilisation du pétrole comme combustible est une insulte au futur car les applications de la pétrochimie sont trop précieuses pour qu'on se contente de brûler le pétrole.

Quoiqu'il en soit, du baril de brut au réservoir d'essence ou de kérosène, encore faut-il passer par le raffinage, opération au cours de laquelle on extrait aussi tous les produits de la pétrochimie dont les fameux plastiques.

Transformation	Illustration
Raffinerie, ou l'on transforme par des procédés physico-chimiques le pétrole brut en combustibles divers et autres sous-produits	
Centrale électrique au fuel, selon l'immuable principe de toutes les centrales thermiques	

### 3.2.9. Gaz

Le gaz naturel ou méthane est un combustible fossile, issu de la décomposition d'organismes vivants microscopiques (plancton, algues), emprisonné dans des roches poreuses du sous-sol, terrestre ou marin. Il se présente naturellement sous forme gazeuse, d'où son appellation « gaz naturel ». Il présente l'avantage majeur d'être utilisable directement, sans raffinage, et l'inconvénient d'être difficile à transporter. Le transport de gaz se fait soit par des gazoducs, dont les célèbres « Nord Stream », soit



au moyen de navire dit « méthaniers » transportant le gaz à basse température, et liquéfié d'où l'appellation GNL. Donc toutes les appellations (gaz de ville, gaz de Lacq, Gaz Naturel, GNL, etc) portent sur le même produit, le méthane (CH<sub>4</sub>).

Transformation	Illustration
Transport de gaz naturel liquéfié à -160°C ou GNL	
<p>Centrale gaz. Autre avatar des centrales thermiques de production d'électricité, ces centrales sont souvent construites pour pallier l'intermittence des ENRi, dégradant considérablement l'empreinte carbone promise par ces dernières, au point que certains considèrent aujourd'hui que <b><u>l'énergie Eolienne est une énergie fossile légèrement moins carbonée que le gaz.</u></b></p> <p>Je vous promets une magnifique histoire sur le sujet dans un prochain épisode...</p>	

### 3.2.10.Uranium

Comme les 3 dernières énergies primaires que nous avons explorées dans ce document, l'Uranium est un produit que l'on extrait du sous sol. Mais, en revanche, il ne s'agit pas d'une énergie fossile, car l'Uranium ne provient pas de la décomposition de matières organiques animales ou végétales. C'est un métal très, très lourd. Un litre d'Uranium représente une masse de 19,1 Kg contre 11,4 pour le plomb, 7,8 pour le fer et 2,7 pour l'aluminium. La croûte terrestre contient en moyenne 2 à 3 grammes d'uranium par tonne. Cet élément est bien plus abondant que les métaux rares comme l'or ou l'argent. L'eau de mer en contient environ 3,3 milligrammes par tonne.

L'uranium naturel est constitué de deux isotopes<sup>1</sup> principaux :

- U238 à 99,3%
- U235 à 0,7%

<sup>1</sup> pensez à consulter le glossaire en tête de document

Pour être utilisé dans une centrale à fission, il faut modifier ces proportions (enrichissement) jusqu'à disposer de 3 à 5% d'U235. C'est l'objet des usines d'enrichissement. En France cette opération est réalisée dans l'usine du Tricastin dans la Drôme.

Dans les installations nucléaires, l'énergie est générée par transformation directe de la matière, aujourd'hui par fission, selon la très célèbre formule d'Albert Einstein

En cassant le noyau d'U235 on obtient une masse totale des parties restantes légèrement inférieure à la masse initiale. La différence a été transformée en énergie, essentiellement **thermique**, mais aussi de rayonnement.

NB: Si on savait transformer en énergie toute sorte de matière, il suffirait de 19t de n'importe quelle matière pour assurer la totalité des besoins électriques français sur une année!

Transformation	Illustration
Usine ORANO d'enrichissement du Tricastin. Augmentation de la concentration en Uranium 235	
Centrale Nucléaire de Penly (2 X 1300 MW) Refroidissement direct par la mer.	
Centrale nucléaire de Golfech (2 X 1300 MW) Refroidissement par aérocondenseurs	

Dans une centrale nucléaire, le terme de « combustible » utilisé est en fait un abus de langage, car on aura compris qu'il n'y a aucune combustion.

En fin de document, un chapitre spécifique à l'énergie nucléaire fera le point sur les solutions présentes et futures de production d'électricité avec cette énergie.

### 3.3. Le tribut payé par l'humanité aux sources d'énergie

Tout le monde a en tête les accidents fréquents et souvent catastrophiques dans les mines de charbon, mais aussi dans les exploitations pétrolières sur terre ou en mer. Ou encore les trop nombreuses victimes tuées lors de la construction de barrages. Ou en-

Énergie	Décès provoqués par TWh produit
Charbon	100
Pétrole	36
Biomasse et biocarburant	24
Gaz	4
Hydroélectricité	1,4
Solaire (sur toit)	0,44
Éolien	0,15
Nucléaire	0,04

fin les nombreuses victimes de l'accident de Chernobyl. Toutes les sources d'énergie ont fait payer un tribut plus ou moins élevé à l'humanité. Mais un petit tableau (données OMS 2014) vaut mieux qu'un long discours. Il est intéressant de noter ici deux choses: D'une part le charbon est 2500 fois plus dangereux que le nucléaire, et même le solaire sur toit est encore 11 fois plus dangereux. Contrairement à une idée très répandue, l'accident de Fukushima n'a fait aucune victime liée à la centrale du même nom. Les nombreux morts de cette tragédie l'ont été du fait du tsunami.

A ces morts directs, on admet aujourd'hui que les énergies fossiles (Charbon, pétrole, gaz) tuent par pollution environ 8,7 millions de personnes par an. Juste pour le charbon, ce sont 23 000 morts/an en Europe dont 1 200 en France.

## 4. Electricité

Dans le premier chapitre, 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 ce chapitre, 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 », bien que d'autres méthodes de production d'Hydrogène ne nécessitent pas le passage par l'électricité
- 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.

## 4.1. Production d'électricité

### 4.1.1. 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<sup>2</sup>. On comprend donc pourquoi les gestionnaires de réseau préfèrent les productions « pilotables » qui produisent à la demande, lorsque c'est nécessaire.

---

<sup>2</sup> Pour les adeptes de thriller, je recommande ce roman qui malgré quelques incohérences permet de comprendre ces mécanismes : *Black-out* de Marc ELSBERG.

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.

	Pilo- table	Facteur charge	Stabilisation réseau	CO2 (g/KWh)	Machine thermique	Bénéfice effacement
<b>Centrale charbon</b>	Oui	30 à 80%	Oui	1058	Oui	+++
<b>Centrale fuel</b>	Oui	30 à 80%	Oui	730	Oui	+++
<b>Centrale gaz</b>	Oui	30 à 80%	Oui	443	Oui	++
<b>Centrale nucléaire</b>	Oui	80 %	Oui	4	Oui	0
<b>Éolienne terrestre</b>	Non	22,6 %	Non	10	Non	0
<b>Éolienne marine</b>	Non	37 %	Non	9	Non	0
<b>Panneaux PV</b>	Non	14,3 %	Non	44	Non	0
<b>Usine hydroélec- trique</b>	Oui	30 %	Oui	10	Non	0
<i>NB : les fossiles ont un facteur de charge limité du fait de leur effacement au profit de solutions moins carbonées.</i>						

L'analyse de ces données simples permet de comprendre la stratégie de planification à long terme et la tactique à déployer pour minimiser les émissions de CO<sub>2</sub> tout en maximisant la sécurité du réseau.

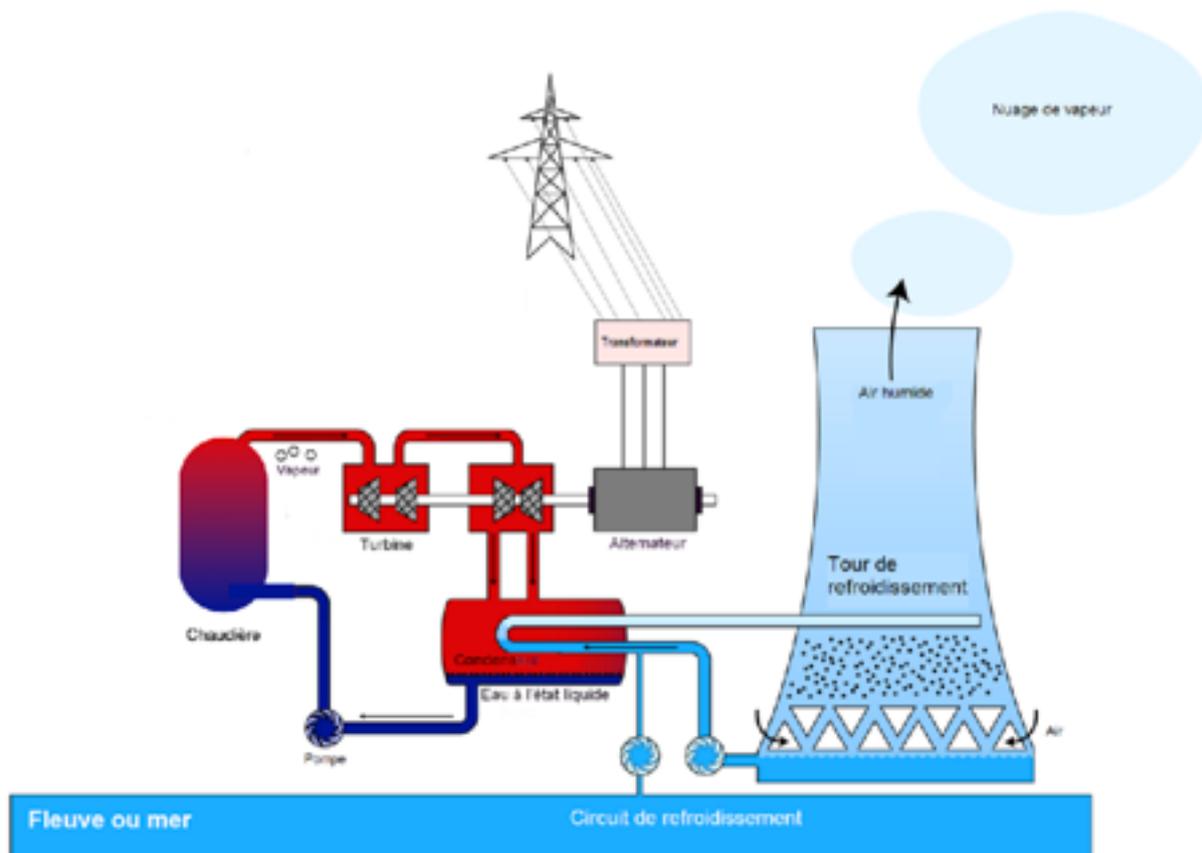
#### 4.1.2. Centrale thermique



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 source froide. La chaudière chauffe de l'eau qui se transforme en



vapeur, laquelle fait tourner une turbine<sup>3</sup> qui entraîne 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**.

<sup>3</sup> En France ce sont les fameuses turbines Arabelle qui ont été malencontreusement cédées à General Electric par un homme politique inconséquent.

Le refroidissement au condenseur peut se faire directement dans la mer par exemple, mais aussi au moyen de ces grandes tours de refroidissement appelées aérocondenseurs, 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 (augmentation trop grande de la température d'une rivière).

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

- 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 chapitre, 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.

### 4.1.3. 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, minoteries, etc) le long des cours d'eau. Elle consiste à faire chuter de l'eau sur une



roue, dite « roue pelton » que l'on voit ci-dessous à droite. Cette roue entraîne 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 CO<sub>2</sub>.

#### 4.1.4. 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**.

#### 4.1.5. Panneaux photovoltaïques

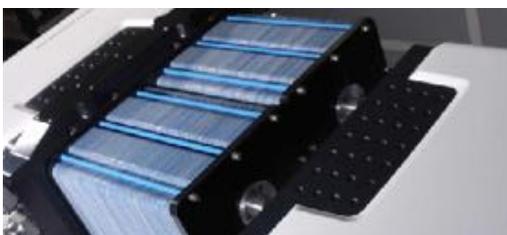


Ces panneaux que l'on peut trouver un peu partout, sur des poteaux de signalisation isolés, sur le toit des maisons ou sur des surfaces dédiées plus importantes exploitent la capacité du silicium (mais aussi d'autres semi-conducteurs) à produire un courant continu sous l'effet d'un rayonnement. Il s'agit 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.

#### 4.1.6. 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 (Véhicules 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'électricité, on retiendra que seules 2 méthodes sont à la fois pilotables et peu émettrices de CO<sub>2</sub> : le nucléaire et l'hydraulique. Ce sont les choix qui avaient été faits par la France au milieu des années 70.

## 4.2. 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

### 4.2.1. 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 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'on 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 coûts 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 recherche 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. Il est notable que la France, longtemps exportatrice d'une énergie particulièrement décarbonée est récemment, du fait de certains choix destructeurs, devenue importatrice.

## 4.2.2. 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 le chapitre 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 remplit un barrage en altitude)
- Sous forme d'énergie **cinétique** (par exemple en faisant tourner une roue très lourde).



tal : 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 (Gyrobuss).

On va donc se concentrer sur les stockages chimique et gravitationnel

#### 4.2.2.1. 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  $20\text{MW} \times 72\text{h} = \mathbf{1\ 440\ MWh}$ . (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 significative-

ment le coût de nos éoliennes !!!

Sans compter les équipements d'électronique de puissance coûteux 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 paraître 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.

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 cer-

taines 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 m<sup>2</sup> l'unité, cela occuperait 245 millions de m<sup>2</sup>, soit 245 km<sup>2</sup>. 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.

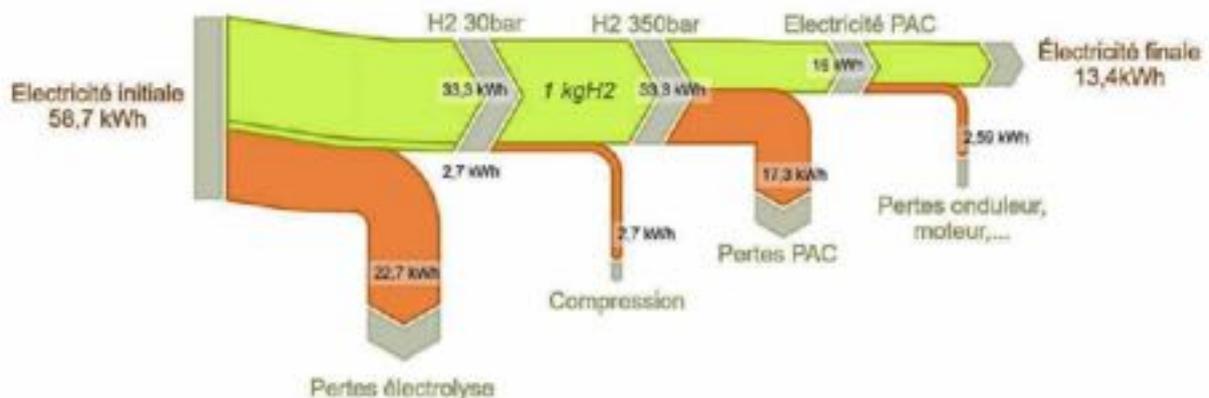


Figure 2 : Diagramme de Sankey, exprimant l'énergie nécessaire pour produire un kg d'hydrogène, ainsi que l'énergie électrique résultante.

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 maîtrisée depuis 100 ans
- Pression H<sub>2</sub> : 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 conséquent, 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.

Le cracking de l'eau à haute température peut également être envisagé dès lors que nous disposerons de source bas carbone de chaleur, et nous en reparlerons dans les chapitres futurs.

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.

#### **4.2.2.2. 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'Énergie 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 Montezic 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.

### 4.3. 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 CO<sub>2</sub> 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 CO<sub>2</sub> et d'hydrogène « vert ». Certes, la combustion des e-fuels rejette du CO<sub>2</sub> mais sa fabrication a nécessité la capture préalable de ce CO<sub>2</sub>, 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'électricité. 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.](#)

## 4.4. 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 mêmes 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 une 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 CO<sub>2</sub> des voitures mais en parallèle, surtout côté allemand, des véhicules toujours plus puissants et plus lourds, 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 CO<sub>2</sub>, qu'avons-nous fait? Imposé l'affichage du CO<sub>2</sub>? 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 coûterait 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 développer 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.

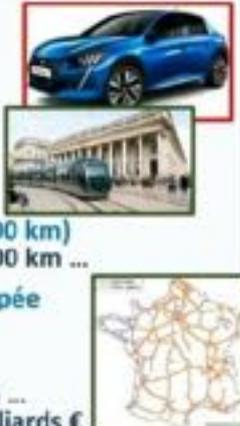
**Ordres de grandeur !**

## Transports terrestres demain ?

- Une « e-208 » embarque 350 kg de batteries pour tenter d'augmenter son autonomie, déjà très surdimensionnée pour ses parcours quotidiens, donc en pure perte pour 90% de son temps d'utilisation ...
- Depuis des décennies, des millions de véhicules électriques fonctionnent à la satisfaction de tous : trains, métros, trams, trolleybus ... alimentés par des systèmes de « route électrique » ...
- Il y en France environ 1 200 000 km de voiries asphaltées. Disposer de 20 000 km de voiries « électriques » permettra de mailler suffisamment le territoire métropolitain (1 000 x 1 000 km) pour limiter le besoin d'autonomie des véhicules électriques à moins de 100 km ...
- 20 000 km de voiries électriques représentent 50 centimètres de voie équipée pour chacun des 40 millions de véhicules immatriculés en France ...
- En créant une centaine d'équipages capables d'installer 1 km par nuit, nos excellents groupes de BTP installeront ces 20 000 km en moins d'un an ... pour un budget sans doute de l'ordre de 500 k€ par km, soit en tout 10 milliards €

Mais ...

... « On ne peut pas, on ne sait pas, ce n'est pas possible, on n'a pas le temps ... »  
Refrains connus, toujours les mêmes ...



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 points 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'H<sub>2</sub> (à P atm) = 7 litres H<sub>2</sub> / 700 b = 4 litres H<sub>2</sub> 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'H<sub>2</sub> liquide et pour des raisons de coûts et d'utilisation courante, il semble préférable, aujourd'hui et dans un avenir « raisonnable », de choisir l'H<sub>2</sub> 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'H<sub>2</sub>, pèse 240 Kg. A l'instar de la batterie, son poids est quasi le même qu'il soit vide ou plein.

## 4.5. 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.

Voilà 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...* ». Voilà 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.

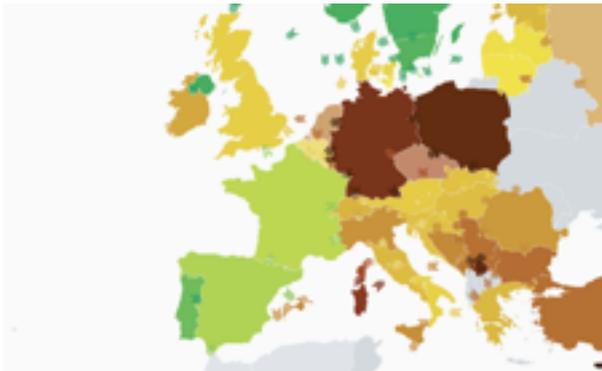
Maintenant, si je me contente d'une approche de « transition énergétique » comme les allemands ont poussé toute l'Europe à le faire, la situation est différente.

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

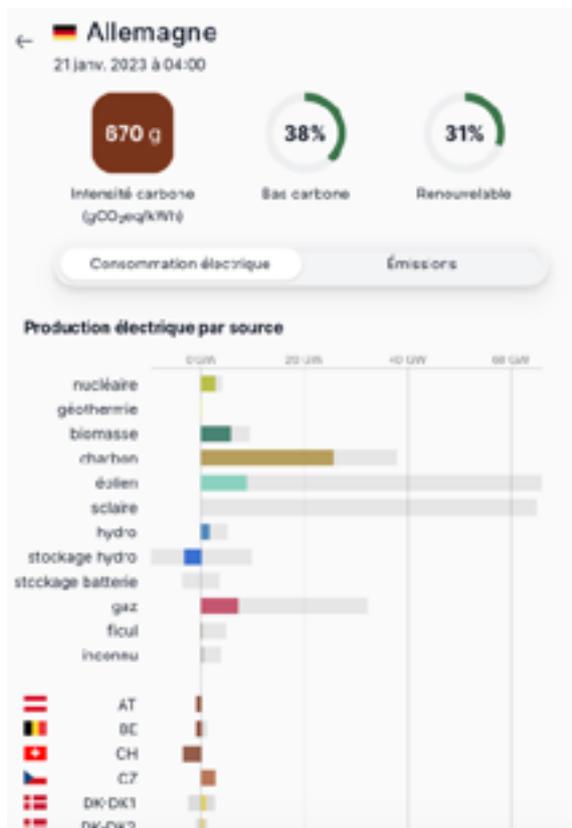
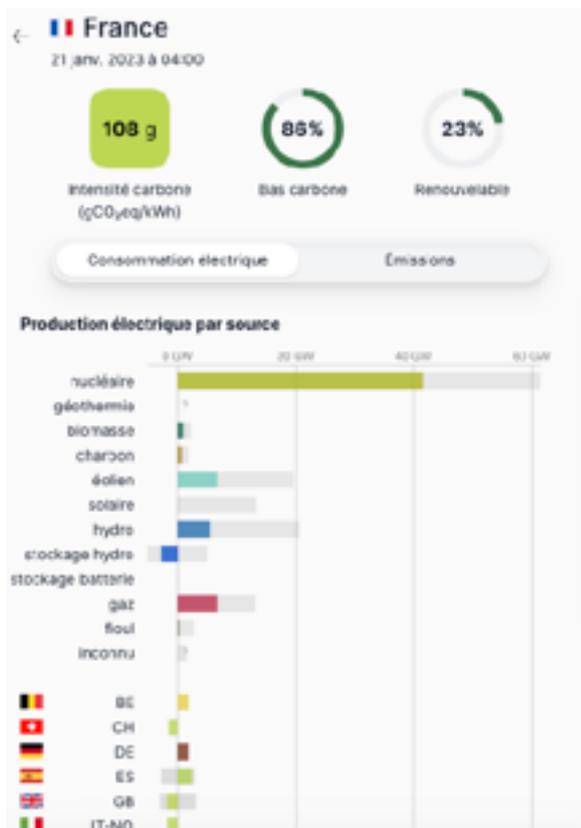
consommation évitée, c'est du CO2 qui n'ira pas dans l'atmosphère. On dit là que l'on « efface » un moyen fossile avec un moyen ENRi. C'est ainsi que l'outre mer française, qui ne bénéficie pas de l'électricité nucléaire de la métropole, efface une centrale GAZ en multipliant les solutions solaires, 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 CO<sub>2</sub>/KWh par un moyen à 9 ou 10 g CO<sub>2</sub>/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.

	CO <sub>2</sub> théorique (g/KWh)	Co <sub>2</sub> backup gaz (g/KWh)	Co <sub>2</sub> backup Charbon (g/KWh)
Centrale nucléaire	4	N/A	N/A
Usine hydroélectrique	10	N/A	N/A
Éolienne marine	9	282	670
Éolienne terrestre	10	345	821
Panneaux PV	44	386	913
Centrale Gaz	443	N/A	N/A
Centrale charbon	1058	N/A	N/A

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.

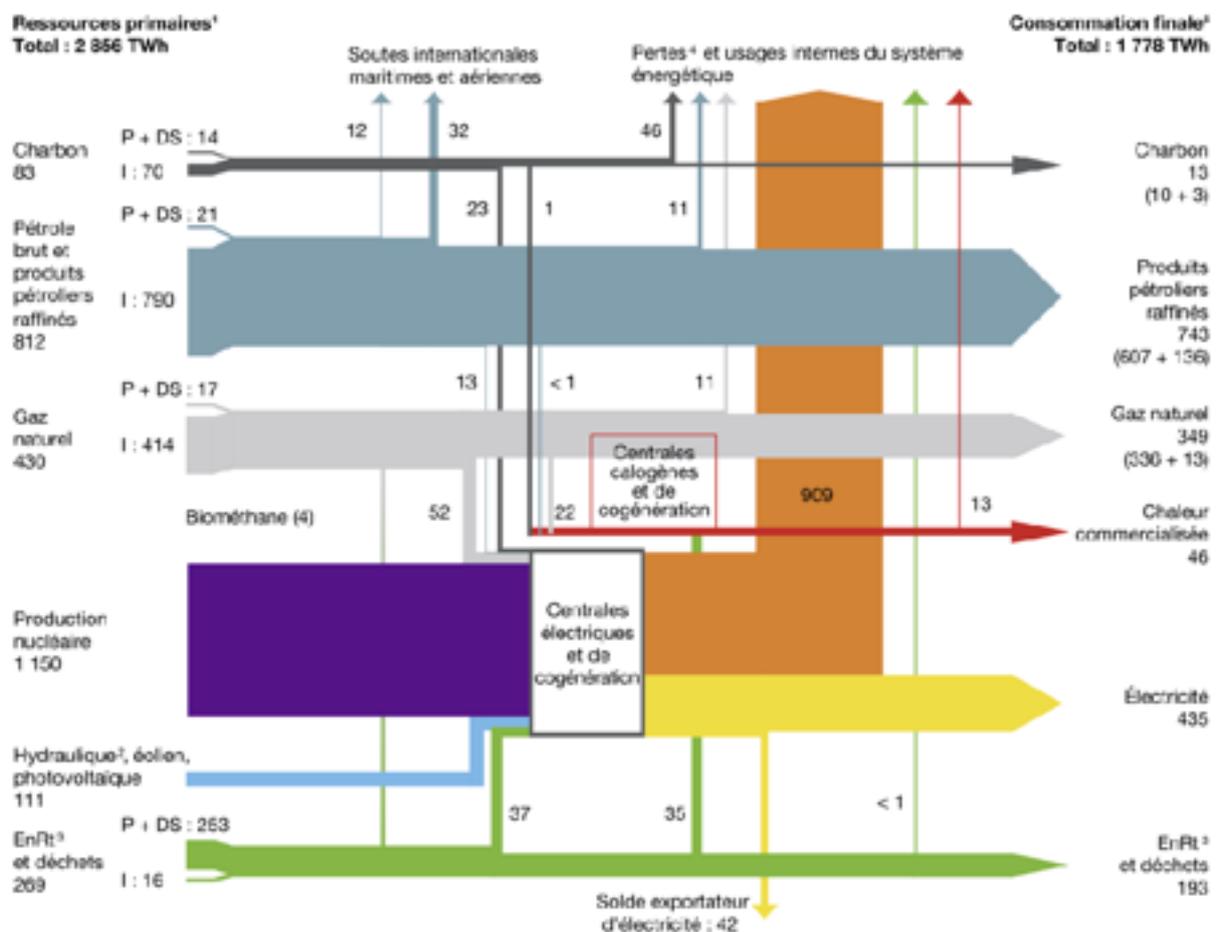
L'hydraulique reste une excellente solution pour absorber des pics, car c'est une énergie pilotable et dont la disponibilité est de l'ordre de la minute.

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 maîtrise 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.

## ENSEMBLE DES ÉNERGIES - BILAN ÉNERGÉTIQUE DE LA FRANCE

En TWh, en 2021 (données non corrigées des variations climatiques)



En conclusion de ce chapitre, ne perdons pas de vue que l'objectif est de décarboner toutes les activités humaines, et pas seulement la production d'électricité. Le

schéma ci-dessus, publié par le Ministère de la Transition Énergétique, illustre parfaitement cet état de fait.

La France fut pionnière dans la mise en oeuvre d'une électricité décarbonée et dans l'augmentation de cette dernière dans le mix énergétique. (Environ 1/4 aujourd'hui).

A l'heure où la tendance est partout à l'électrification des usages, la plupart des pays investissent des fortunes pour tenter de décarboner d'abord leur électricité.

C'est chose faite en France, du moins ça l'était avant que certains politiques se chargent de tuer notre industrie nucléaire. Quoiqu'il en soit, notre préoccupation aujourd'hui doit être de renforcer encore la part électrique dans le mix et de trouver les solutions « propres » pour les quasi 3/4 de nos dépenses énergétiques non électriques.

## 5. La France, L'Europe et la politique Énergétique

Dans le premier chapitre, 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 le troisième, nous nous sommes concentrés sur la production et la distribution de l'électricité.

Dans ce chapitre, nous allons creuser et chercher à comprendre la logique Geo-politique qui se niche derrière les décisions des uns ou les comportements des autres, plus particulièrement au niveau de la France et de L'Europe.



La période est particulièrement propice car à l'heure où nous écrivons ces lignes, la « **Commission d'enquête visant à établir les raisons de la perte de souveraineté et d'indépendance énergétique de la France** » poursuit ses travaux. ([Lien vers le site de l'assemblée nationale](#)). Cette commission est présidée par Raphaël Schellenberger (député LR de la circonscription où se situe FESSENHEIM).

Nous reviendrons plus loin dans ce document sur quelques auditions, en particulier celle d'Yves Brechet et celle de Henri Proglio. (Cliquez les images).

Mise à jour Avril 2023 : La commission a rendu son rapport et ce dernier est disponible en cliquant [sur ce lien](#).

## 5.1. Historique

On ne peut pas échapper à un retour en arrière pour comprendre la situation dans laquelle la France se retrouve aujourd'hui.

Le général de Gaulle a eu dès 1945 une idée très lucide sur l'importance stratégique de la maîtrise des filières énergétiques. Il a su s'appuyer sur des hommes brillants et en particulier Pierre Guillaumat (décédé en 1991) qui a doté la France de capacités pétrolières indépendantes des Etats Unis, mais aussi des capacités militaires puis civiles offrant à la France une indépendance geo-politique au travers de sa dissuasion, maîtrisée de bout en bout :

- CEA (commissariat à l'Energie Atomique)
- Armes
- Avions (du Mirage IV au RAFALE en passant par les Mirage 2000 N)
- Missiles intercontinentaux
- SNLE (Sous marins Nucléaires, ce qui sous entend une propulsion nucléaire)
- Moyens de calcul

Sur tous ces sujets, de Gaulle exigeait que la France ne soit dépendante de personne.



Il est juste de reconnaître qu'à la sortie de la seconde guerre mondiale, l'atome était surtout vu sous un angle militaire. Le génie de de Gaulle a été de vouloir très tôt le décliner également sur la **production d'énergie**, et plusieurs réacteurs ont été développés au cours des années 50 et 60. Dès 1955 le CEA et EDF collaborent au développement du premier réacteur à Marcoule. Ce réacteur, de technologie « uranium naturel graphite gaz » est suivi du premier réacteur raccordé au réseau électrique en 1963 à

Chinon, avec le réacteur Chinon A1, la fameuse « boule », avec une puissance de seulement 70 MW !

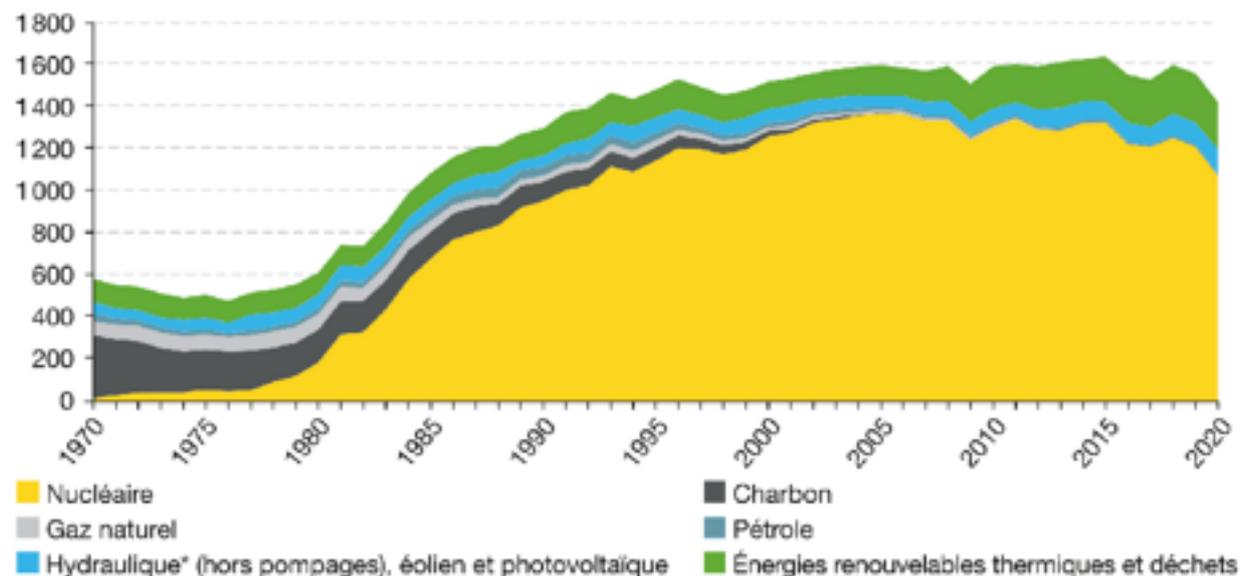
Au total, 9 réacteurs de cette filière seront construits en France, le dernier mis en service à Bugey en 1972 (540 MW). A la veille du premier choc pétrolier, 8% de l'électricité française est déjà produite par nos centrales nucléaires. (2 084 MW), mais 65% de notre électricité d'alors est encore fossile.

- 1973 : Guerre du Kippour et premier choc pétrolier. La crainte d'une crise majeure de l'énergie est prise très au sérieux.
- 1974 : Pierre Messmer, premier ministre de Pompidou, annonce la construction de 13 réacteurs de 900 MW (technologie Westinghouse dite PWR (REP en français) entre 1974 et 1980 (puissions-nous être aussi rapides aujourd'hui !)
- 1976 : Chirac, premier ministre de Giscard, décide de construire SuperPhenix
- 1977 : Mise en service de Fessenheim 1, premier réacteur (PWR) de l'ère nucléaire moderne.
- Giscard a maintenu le rythme de mise en service des réacteurs de 900 puis 1300 MW.
- Mitterrand n'a lancé aucun nouveau programme il s'est contenté de ralentir le rythme de construction à 1 réacteur par an.
- Les tranches N4 de 1500 MW ( Chooz B 1 et 2, et Civaux 1 et 2) dont les études avaient commencé en 1977 seront les derniers mis en service dans les années 96-99.

## PRODUCTION D'ÉNERGIE PRIMAIRE PAR ÉNERGIE

Total : 1 423 TWh en 2020

En TWh



A cette date, la France compte alors 58 réacteurs nucléaires, complétés essentiellement par de l'hydraulique, fournissant l'électricité la plus décarbonatée du monde et assurant un avantage industriel majeur au pays, comme le montre le graphique ci-dessus. (Source Gvt Français).



Mais tout au long de ce processus, les oppositions au nucléaire, dans la foulée des verts allemands, se sont faites de plus en plus violentes et exigeantes.

- 1998 : Poussés par des considérations électorales, décision de Jospin et Voynet d'arrêter SuperPhenix, centrale de Creys-Malville alors que cette centrale de toute nouvelle technologie dite à « Neutrons rapides » avait enfin atteint son plein potentiel avec une disponibilité de 96% l'année précédente cette décision.
- 2007 : Autorisation de lancement des travaux de l'EPR de Flamanville
- 2012 : Avec un prétexte fallacieux et la réalité d'un accord électoral PS EELV, Hollande décide la fermeture de Fessenheim
- 2015 : Le gouvernement de Hollande décide de réduire en 2025 la part du nucléaire à 50%.

- 2019 : Report à 2035 de la réduction du nucléaire à 50%. Il est confirmé que 14 réacteurs devront fermer avant cette date.
- 2020 : Les 2 réacteurs de Fessenheim sont successivement fermés, privant instantanément la France de plus 10 TWh annuels d'électricité décarbonée.

A l'heure où ce document est écrit, la PPE (Programmation Pluriannuelle de l'Energie) prévoyant la fermeture de 14 réacteurs supplémentaires est toujours en vigueur, même si le sénat a déjà voté la suppression de cette disposition.

Par ailleurs, alors que les américains et d'autres pays envisagent de porter la durée de leurs centrales de même technologie à 60 voire 80 ans, et sans tenir compte des avis de l'ASN, de nombreuses voix à gauche exigent l'arrêt des réacteurs après 40 ans, sans aucune justification technique, mais en s'appuyant simplement sur les documents administratifs de l'époque (fin des années 70).

## 5.2. Dogme Energétique Européen

Je cite Henri Proglio, président d'honneur et ancien Président d'EDF, déclarant sous serment devant la commission d'enquête :

« En 2009, EDF est exportateur d'énergie, a les prix les moins chers d'Europe et donne à la France un atout formidable. **Il n'y avait plus qu'à tout détruire** : c'est chose faite... Il a fallu définir un prix du marché, puisqu'il n'y avait pas de prix du marché, qui a été indexé sur le gaz (...) Parce que les Allemands utilisent le gaz. **Toute la démarche est allemande** et toute la réglementation européenne est allemande. »

Si on revient à la situation d'avant 2007, la France était alors dans une situation privilégiée par rapport aux autres pays européens du point de vue de l'énergie électrique. EDF en situation de monopole et à la tête d'un parc de 58 réacteurs complétés par quelques barrages était exportatrice d'électricité, à des prix très compétitifs et, qui plus est, la plus décarbonée du continent. Ceci conférait aux industriels français un avantage compétitif et améliorerait un peu la balance extérieure française.

Dans le contexte d'un marché européen de l'énergie, la position d'EDF était considérée comme anti concurrentielle, comme l'avait été auparavant celle de France Telecom dans le téléphone. L'UE a donc décrété, **et la France l'a accepté**, de briser ce monopole et de créer un « marché de l'électricité ».

Arrêtons nous un peu sur ce concept de marché. A quoi sert un tel marché pour une denrée quelconque ? Si plusieurs producteurs de pommes se font concurrence sur un territoire donné, on peut imaginer que chaque jour, les revendeurs du marché de gros, en fonction de la demande de leurs clients, viennent acheter des pommes. Le prix est donc fonction de la demande des clients et de la capacité des producteurs à proposer des pommes avec la qualité et la quantité requises. Et parfois, le producteur trouve les prix un peu bas, et décide de stocker ses pommes pour pouvoir les revendre lorsque les prix seront au plus haut. Pour résumer, plusieurs producteurs, plusieurs distributeurs et revendeurs et des stocks ça et là pour pallier les à coups.

Des technocrates de Bruxelles, par dogmatisme libéral mal placé, mais surtout par ignorance des réalités physiques, ont décidé de créer un tel marché alors que :

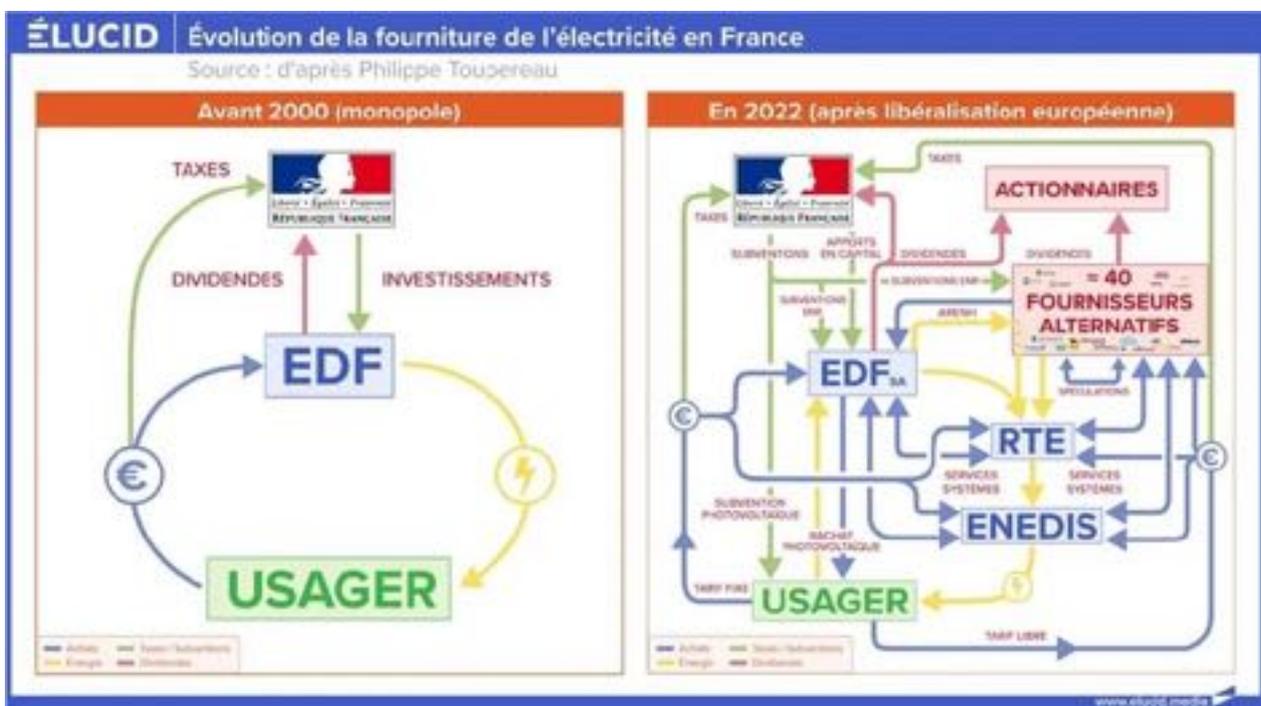
1. La production d'électricité est une activité stratégique, quasi régaliennne, avec des investissements énormes sur des temps très longs.
2. Le transport et la distribution sont par définition monopolistiques
3. L'électricité ne se STOCKE PAS ! On a vu dans l'épisode précédent que le stockage pour parer l'intermittence est un cauchemar et reste anecdotique, alors imaginez un stockage spéculatif !!!

Donc pour permettre à ce marché de fonctionner immédiatement, il fallait prendre plusieurs mesures.

D'abord, il a fallu séparer production, transport et distribution car on imagine mal de multiplier les lignes électriques entre celles d'EDF et celles de ses concurrents, d'où la naissance de RTE (transport) et ENEDIS (distribution), EDF conservant la production.

Comme il eut été trop long d'attendre que des opérateurs alternatifs disposent de leurs propres moyens de production, EDF a été contraint de vendre à prix préférentiel une partie de sa production nucléaire à ses propres concurrents : c'est le fameux ARENH (Accès Régulé à l'Electricité Nucléaire Historique) mis en place par la loi NOME (**Christine Lagarde & Eric Besson**).

En temps normal, c'est 100 TWh à 42€/MWh que EDF doit fournir à ses concurrents chaque année. Ces chiffres ont respectivement été portés à 120 TWh pour 46,5€/MWh en 2022.



Par ailleurs, les subventions pour construire de nouveaux moyens de production étant fléchées essentiellement sur les ENRi, le complément des intermittences (backup) devait aussi être couvert par l'électricité ARENH.

L'idée était que cela allait créer une saine concurrence, comme dans les télécoms, pour offrir aux français un KWh moins cher. Mais la réalité est que ce mécanisme a étranglé EDF et a surtout permis à des tiers de profiter de la manne ainsi offerte, jusqu'à GAZPROM, fournisseur russe de gaz, qui se retrouve bénéficiaire de l'ARENH!

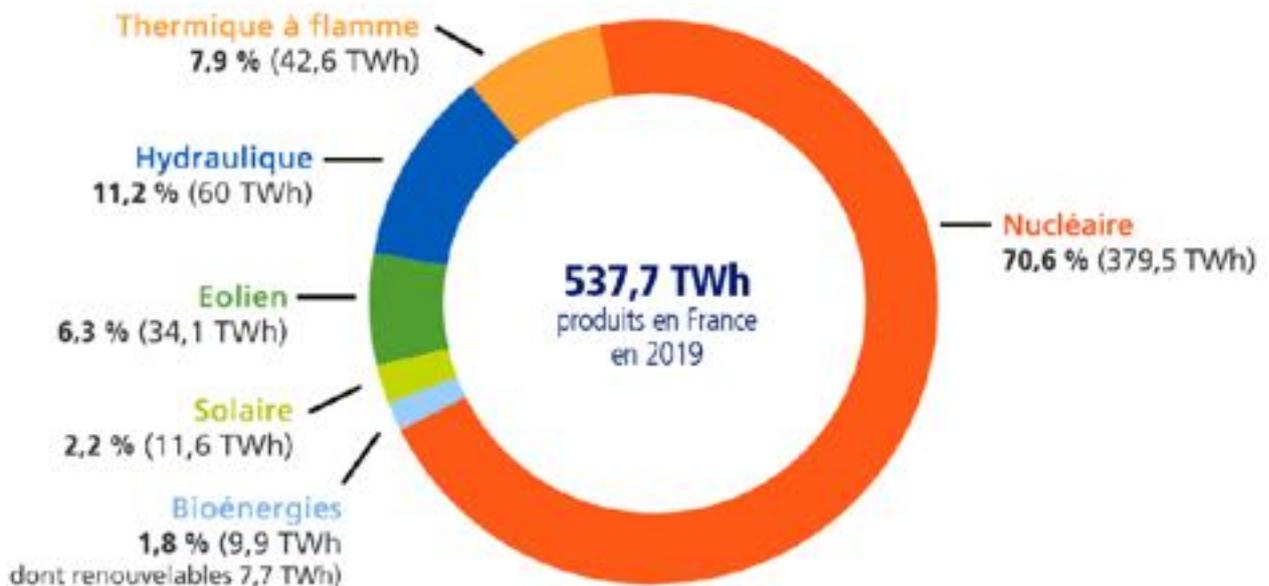
Le schéma ci-dessus résume les « bénéfiques » de la libéralisation européenne.

L'histoire ne s'arrête pas là, car actuellement, des projets de démantèlement encore plus important d'EDF sont toujours dans les cartons européens. Le projet dit « Hercule » étant remis en cause, nous pourrions revenir dessus dans une mise à jour future de ce document.

Mais revenons à la situation actuelle. Avec un MWh au prix ARENH de 42€, les fournisseurs alternatifs peu scrupuleux affichent au printemps des tarifs excitants pour leurs clients, ce qui permet de négocier un volume ARENH important.

A l'automne, on augmente les prix violemment, les clients repartent vers EDF, et notre fournisseur alternatif se retrouve avec un surplus d'électricité acheté à 42€ qu'il revend 10 fois plus cher sur le marché SPOT. Il gagne donc des fortunes sur le dos d'EDF... [Détails ici.](#)

Sur le calcul des prix, on touche au sublime. Afin de favoriser les constructeurs d'ENRi de toute taille, les moyens intermittents sont donc appelés prioritairement sur le réseau. Quand il y a du vent, les centrales nucléaires sont priées de baisser leur production, sans d'ailleurs que cela baisse en aucune façon leur coût. Mais si la demande monte, et que l'on doive faire appel au fossile en dernier recours, c'est le



### La production française d'électricité en 2019

Source RTE - bilan électrique 2019

© EDF

prix de la dernière source appelée qui fixe le prix de l'électricité pour quasiment tout le continent ! Donc quand le prix du gaz monte, les français qui ont 8% de leur énergie basée sur les fossiles voient leurs factures exploser. Mais également,

comme le vent et le soleil ne sont pas pilotables et que les producteurs d'ENRi ont construit des capacités importantes, il arrive qu'ils doivent « se débarrasser » de leur électricité et les prix peuvent même devenir négatifs !! Comment avons nous pu en arriver là?

On aura compris que l'ensemble de cette mécanique coïncide avec la présence dominatrice au pouvoir en Allemagne de Angéla Merkel et de sa coalition incluant les verts allemands. La chancelière a très vite compris que la situation française en matière d'énergie pouvait impacter la compétitivité allemande vis à vis de la France. Il fallait donc pour elle à la fois donner des gages de « vertitude » à ses alliés politiques et aider l'industrie allemande.

Comme le rappelait plus haut Henri Proglio, les stratèges industriels allemands ont parfaitement manipulé leurs politiques pour qu'ils influencent les décisions de l'UE dans ce sens.

Le conflit ukrainien apporte néanmoins un éclairage particulier, en mettant en évidence une fragilité européenne particulièrement critique car majoritairement appuyée sur le gaz et donc très dépendante de la Russie. Aujourd'hui malheureusement l'Allemagne a du relancer massivement la production d'électricité par le pire des charbons : la lignite. En détruisant des villages pour agrandir ses mines à ciel ouvert.



En détruisant des villages pour agrandir ses mines à ciel ouvert.

Napoléon disait que la couardise a des limites que la bêtise ne connaît pas. Einstein lui même prétendait que deux

choses sont infinies : L'univers et la bêtise humaine, bien que pour l'univers, il avait des doutes...

Ce que l'audition de Yves Bréchet dans la récente commission d'enquête parlementaire met en évidence :

*« ...Ces dysfonctionnements ont des causes profondes.*

*La première est **l'inculture scientifique et technique de notre classe politique.** Dans la génération qui a reconstruit le pays, les élèves de l'ENA recevaient un cours de Louis Armand sur les sciences et les technologies de la France industrielle. Cela ne faisait pas d'eux des ingénieurs, mais cela leur donnait la mesure du problème. Et cette connaissance les rendait beaucoup plus efficaces que ne peuvent l'être des ingénieurs n'ayant d'ingénieurs que le titre.*

*La seconde est le **rôle des « conseillers techniques »** dans les cabinets ministériels. Quel que soit le prestige de leur diplôme, ils se retrouvent à conseiller sur des sujets qu'ils ne maîtrisent généralement pas un ministre qui ne se pose même pas la question. Leur premier souci sera trop souvent de ne dire à leur ministre que ce qu'il*

*a envie d'entendre pour ne pas nuire à leur carrière à venir. Il n'est guère surprenant que lesdits conseillers n'aient qu'un enthousiasme limité à réunir un comité à l'énergie atomique qui aurait tôt fait de mettre à jour leur lacunes. »*

Texte complet de son audition [ICI](#) et video de cette dernière [LA](#)

## 5.3. Indépendance nationale et fermeture du cycle

### 5.3.1. Pourquoi le nucléaire en France ?

La richesse d'un pays et la production de richesse du monde a toujours été étroitement liée à l'énergie qu'il pouvait mettre en oeuvre.



Le charbon a fait de l'Angleterre la première puissance mondiale dès le milieu du XVIIIe siècle. Le pétrole a permis l'essor des USA 100 ans plus tard, et fait la fortune des pays du golfe après 1945. Sans énergie, pas de confort, pas d'agri-

culture, pas de santé, pas d'industrie, pas de tourisme. Bref pas de richesse.

**Le Général de Gaulle** avait parfaitement intégré cette dimension, et a très tôt couplé notre capacité à développer notre force de dissuasion et notre capacité à gagner une indépendance énergétique. La posture des russes face à la fourniture en gaz de l'Europe montre à quel point il est capital de ne dépendre de personne sur ce sujet essentiel de l'énergie.



Ayant perdu son empire colonial, et en l'absence de réserves significatives de charbon, pétrole et gaz sur le sol hexagonal, la France a fait le choix du nucléaire pour son électricité, **bien avant que les préoccupations de gaz à effet de serre** nous soient familières. Il est vrai que les mines principales d'uranium ne sont pas en France, mais grâce aux recherches et aux décisions politiques françaises (Chirac, 1976), la France a pu concevoir et démontrer une technologie permettant d'augmenter fabuleusement nos réserves en combustibles nucléaires, grâce à la technologie de la **surgénération**. « Les déchets nucléaires ne sont des déchets que si on les jette »

Mais c'était sans compter avec un certain nombre de saboteurs (je pèse mes mots) qui se sont évertués à détruire ce concept. Il est donc nécessaire de donner un peu de contexte technico-politique à ce sujet.

## 5.3.2. Fermeture du cycle - Neutrons lents et rapides

### **Neutrons lents**

Dans un réacteur nucléaire conventionnel à neutrons lents (RNL), l'énergie vient de la fission des noyaux d'uranium 235 ( $^{235}\text{U}$ ), seul atome fissile existant à l'état naturel. Comme on l'a déjà vu, l'uranium 235 se trouve à très faible teneur (0,7%) dans l'uranium naturel constitué principalement (99,3%) d'uranium 238 non-fissile.

La fission de l'uranium 235 est obtenue par des neutrons lents, c'est-à-dire ralentis par un modérateur (eau ou graphite) jusqu'à une énergie de l'ordre de l'électron-volt (eV). Pour qu'une réaction de fission s'auto-entretienne, il faut enrichir l'uranium naturel au moins jusqu'à une teneur de 3 à 5% en uranium 235. Près de 435 réacteurs de ce type sont actuellement en fonctionnement dans le monde (dont 58 56 en France<sup>4</sup>).

Il existe sur le carreau de Pierrelatte et à Bessines près de **300 000 tonnes** d'uranium appauvri (uranium 238) issu des usines d'enrichissement en uranium 235, matériau nécessaire au fonctionnement des réacteurs actuels, et des EPR dans un futur proche.

Cet uranium 238 « restant » peut être fissionné dans un réacteur surgénérateur (dit aussi RNR pour « réacteur à neutrons rapides »). Il a un potentiel énergétique équivalent à **500 milliards de tonnes de pétrole**, soit plus de deux fois les réserves mondiales actuelles de pétrole et sans émission de gaz à effet de serre !

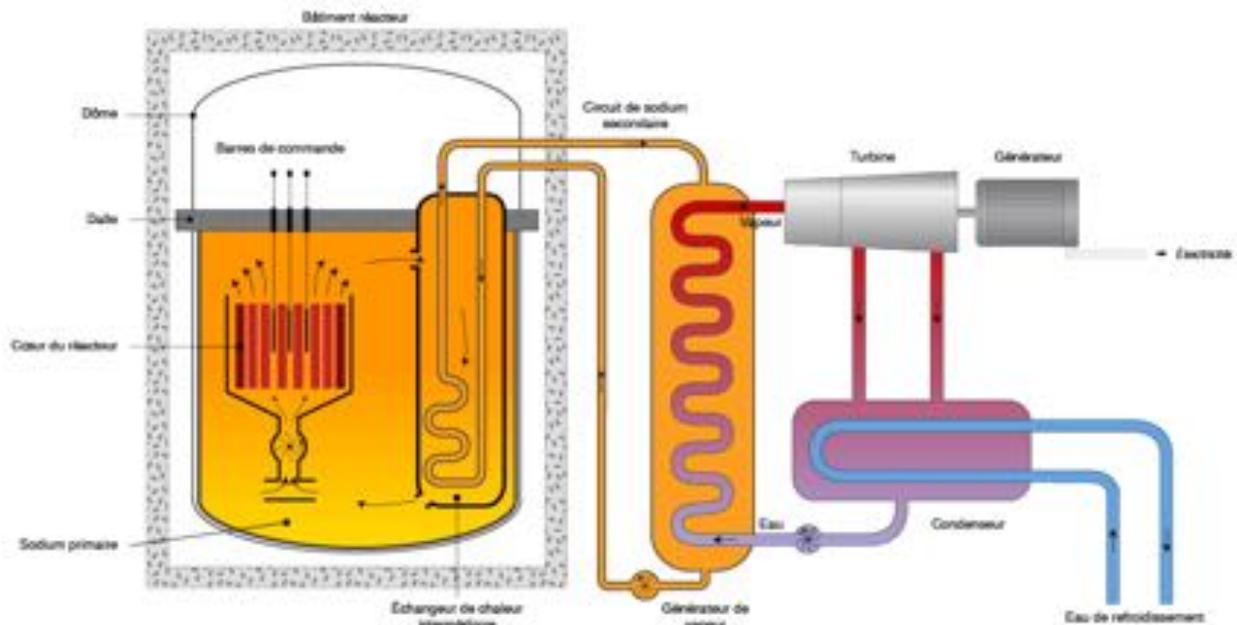
### **Réacteur nucléaire à neutrons rapides**

Dans un réacteur nucléaire à neutrons rapides (RNR), le combustible de base est l'uranium 238. Cet isotope est dit « fertile » car il a la propriété d'absorber un neutron rapide (énergie d'environ 1 MeV) pour se transformer en plutonium 239 ( $^{239}\text{Pu}$ ), lequel est lui-même fissile sous l'impact d'un autre neutron rapide. La fission du plutonium 239 dégage trois neutrons ainsi qu'une énergie considérable transformable en chaleur. Sur ces trois neutrons, statistiquement, l'un provoque une nouvelle fertilisation (régénération), le second une nouvelle fission énergétique (de plutonium 239), et le troisième, s'il survit à une capture stérile (probabilité de 50%), peut « surgénérer » un second atome de plutonium s'il est en présence d'atomes d'uranium 238 en excédent.

Les RNR consomment donc, sans enrichissement préalable ni modérateur, une ressource « inépuisable » (l'uranium 238) qu'ils transforment transitoirement en plutonium 239 pour en extraire l'énergie de fission, et qu'ils peuvent même surgénérer. De cette manière, les RNR peuvent obtenir des rendements près de 100 fois supérieurs à ceux des réacteurs (principalement de type REP/REB) actuels.

À ce titre, les RNR sont l'objet de recherches soutenues depuis leur découverte, dans les années 1950. En France, **SuperPhenix** succédant à Phénix, avait pour mission de démontrer la faisabilité d'un RNR, produisant industriellement de l'énergie électrique à un prix compétitif.

<sup>4</sup> 58 moins les 2 réacteurs de Fessenheim



Il faut donc bien comprendre qu'un RNR type Superphenix

1. Produit de l'énergie
2. Recycle les combustibles usagés des autres centrales
3. Utilise les 99% d'U238 stockés sur notre sol
4. Produit plus de matière fissile (Plutonium 239) qu'il n'en consomme

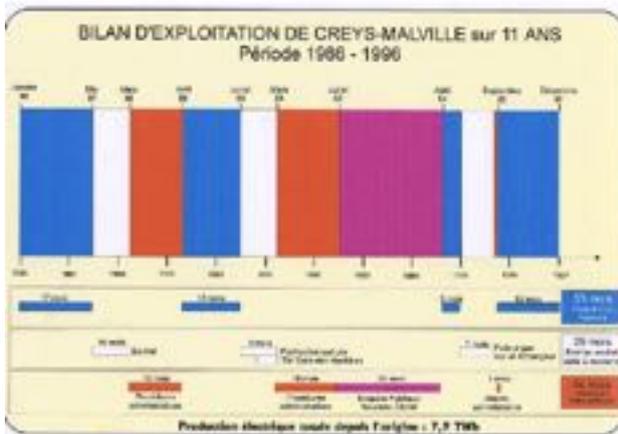
Nous avons donc prouvé avec SuperPhenix la pertinence d'une technologie de RNR qui permet avec les seuls ressources et « déchets » actuellement présents sur notre sol une **autonomie électrique de plus 2000 ans**, largement assez pour attendre la mise au point des réacteurs à Fusion.

### **Mais pourquoi avons nous arrêté et qui l'a décidé ?**

SuperPhenix était un prototype de RNR de 1240 MW hérité de Phenix, dont le développement a été demandé en 76 par Chirac, alors Premier Ministre de Giscard.

Mise en service et couplée au réseau en 1986, elle présentait de nombreuses innovations et en particulier comme indiqué dans le schéma ci-dessus une grande quantité de Sodium liquide comme fluide caloporteur (permettant de transporter la chaleur entre le cœur du réacteur et le générateur de vapeur) alors que nos autres réacteurs utilisent de l'eau pressurisée. Ce type de réacteur présente en outre 2 avantages majeurs en terme de sûreté : pas de circuit primaire sous pression car le sodium est à pression ambiante, et arrêt de la réaction dès que l'on coupe le flux neutronique.

Le sodium liquide, bien que très largement utilisé dans l'industrie, est un produit délicat à manipuler et un incident mineur en 1990 et parfaitement maîtrisé (fuite d'air ayant oxydé ce sodium) a tout déclenché. La fuite a été réparée sans encombre, mais le réacteur, empêtré par les recours publics incessants pilotés par les verts an-



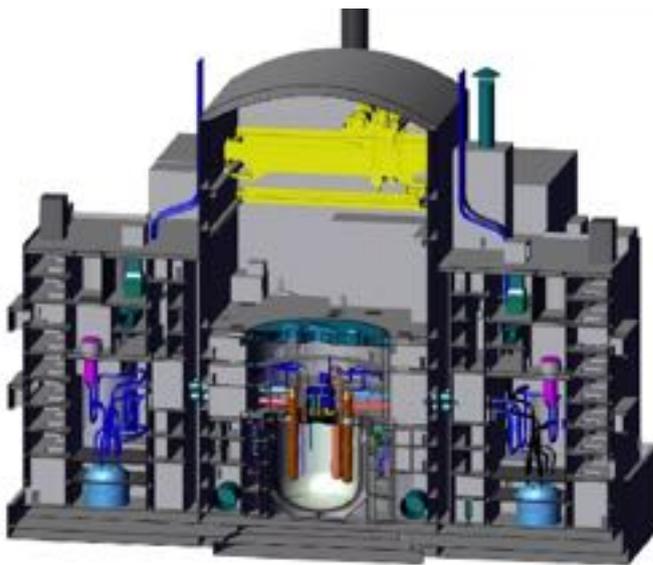
tinucléaires de Mme Lepage et de Mme Voynet, a fini par être arrêté par Lionel Jospin en 1997.

En 1996, l'année précédant la funeste décision de Jospin, le réacteur affichait 95% de disponibilité hors arrêts programmés et produisait 3,392 TWh d'électricité non carbonée. Je rappelle qu'il s'agissait d'un prototype !

Je vous renvoie également vers cet excellent article de CONFLITS

## Projet ASTRID

**ASTRID** (Advanced Sodium Technological Reactor for Industrial Demonstration)



était un projet français de démonstrateur industriel de réacteur à neutrons rapides refroidi au sodium de quatrième génération. En gros, il s'agissait de relancer une filière RNR relativement proche de SuperPhenix sur les concepts et la finalité. Disposant d'un meilleur rendement que le parc nucléaire actuel, il avait également pour vocation de démontrer la capacité à gérer de façon durable les déchets hautement radioactifs en réutilisant le combustible usé provenant du parc actuel. En raison de l'importance de l'investissement nécessaire à son développement,

de **blocages politiques** et de questions entourant sa rentabilité de ré-emploi des combustibles usés par rapport à leur stockage, le projet a été abandonné **par Emmanuel MACRON** en 2019, malgré une levée de bouclier d'une partie de la communauté scientifique.

Résultat : les gens sérieux sur le sujet, USA et Chine en tête, continuent d'avancer sur cette voie sans nous, alors que nous avons, dans les années 90, 30 ans d'avance sur tout le monde.

---

### 5.3.3. Conclusion

Même causes et mêmes effets: **SuperPhenix, Fessenheim, Astrid, Baisse du nucléaire** dans le mix électrique à 50%, toutes ces décisions sans aucun fondement scientifique ont été prises par une succession d'individus<sup>5</sup> ayant comme point commun de conclure des accords électoraux avec les prétendus écologistes et vrai gauchistes du moment. Et la dernière décision a été prise en 2019 par ceux-là même qui nous dirigent aujourd'hui : **Elisabeth Borne**, alors Ministre de la transition énergétique et **Emmanuel Macron**, sous le prétexte fallacieux qu'on pouvait attendre le milieu du siècle pour s'occuper de fermer le cycle. Ceci démontre cette incapacité à réfléchir sur le temps long qui caractérise les politiques français depuis 40 ans.

Au delà de considérations militaires qui sont hors sujet de cet exposé, la choix du nucléaire est donc aussi un **choix d'indépendance nationale**. Notre pays a connu des hommes d'état qui avaient ce souci chevillé au corps et qui ont lancé ce programme nucléaire, et quelques aventuriers de passage, qui n'ont cessé de le détruire, en particulier ces 25 dernières années. Formons le vœu qu'une nouvelle génération politique inverse rapidement cette tendance funeste.

---

<sup>5</sup> Parmi les autres saboteurs : L. Jospin, D. Voynet, F. Hollande, S. Royal, N. Hulot, B. Pompilli, etc

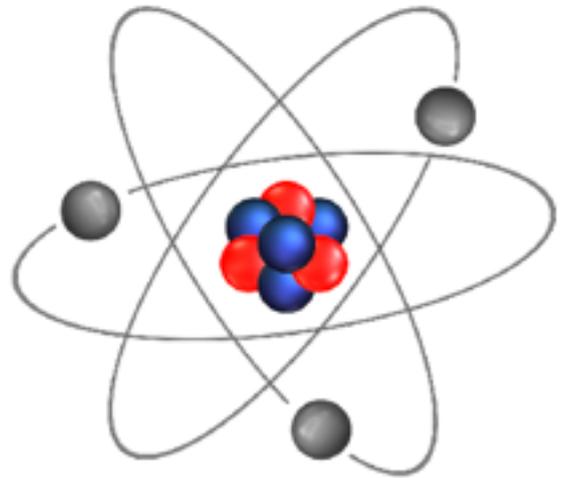
## 6. L'Énergie Nucléaire

Dans ce dernier chapitre, nous tenterons de comprendre un peu mieux ce qu'est l'énergie nucléaire, pourquoi elle déclenche tant de passions et pourquoi elle est devenue un marqueur reconnu dans le monde entier de l'innovation et de l'excellence françaises.

### 6.1. Un peu de physique (et d'étymologie)

Je sais, nous avons promis d'éviter les concepts compliqués, mais il est quand même utile de comprendre de quoi nous parlons.

Dans les années 50 ou même avant, on parlait de l'énergie atomique. Puis on a commencé à utiliser le terme « nucléaire ». En fait tout cela relève juste d'un effet sémantique. A la base, et pour faire extrêmement simple, voire simpliste, il faut comprendre que tout ce qui nous entoure est composé d'éléments différents, qui peuvent exister seuls ou composés à d'autre. Par exemple, l'hydrogène et l'oxygène sont des éléments dont la combinaison peut créer de l'eau. A chaque élément, correspond **un atome** qui a des caractéristiques bien précises. Comme illustré ci-contre l'atome se compose d'un **noyau**, autour duquel gravitent un ou plusieurs **électrons**. Quand on fait de la chimie, on combine entre eux des éléments différents pour constituer par exemple des molécules (comme l'eau dans notre exemple). Mais quand on fait de la physique atomique, on vient modifier la composition des noyaux. C'est pour cela qu'on l'appelle aussi la physique **nucléaire**.



Le noyau est un assemblage de protons et de neutrons, que l'on appelle génériquement des nucléons, autour duquel « gravitent » des électrons. Chaque élément que nous connaissons comporte un nombre précis de protons et de neutrons. Ainsi le noyau d'hydrogène comporte juste un proton, alors que le carbone comporte 6 protons et 6 neutrons et que l'uranium naturel (U238) comporte 92 protons et 146 neutrons.

Certains éléments peuvent avoir une variation de leur nombre de neutrons. On appelle cela des isotopes, qui sont parfois instables (radioactifs). Le carbone 14 (2 neutrons de plus que le carbone 12) est un exemple connu d'isotope du carbone que l'on utilise en archéologie pour effectuer des datations.

On aura compris qu'en fonction de l'élément, le nombre de nucléons de son noyau peut être très petit (noyaux « légers ») ou très important (noyaux « lourds »).

Si on « casse » un noyau lourd pour en faire 2 plus légers, on dégage une énergie considérable. C'est la **FISSION Nucléaire**.  
De même si on « réunit » deux noyaux légers pour en faire un plus lourd, on dégage également une énergie considérable. C'est la **FUSION Nucléaire**

Historiquement, les premières applications de cette énergie phénoménale furent bien entendu militaires. On ne discutera pas ici de l'intérêt géo-politique des armes atomiques, qui ne furent réellement utilisées que par les USA pour terminer la guerre avec le Japon. Mais pour comprendre, les premières « bombes atomiques » comme celles qui ont été utilisées en 1945, étaient des bombes à fission : elle utilisaient la capacité à casser des noyaux lourds dans une réaction qui s'emballe jusqu'à l'explosion. On les a appelées « Bombes A ».

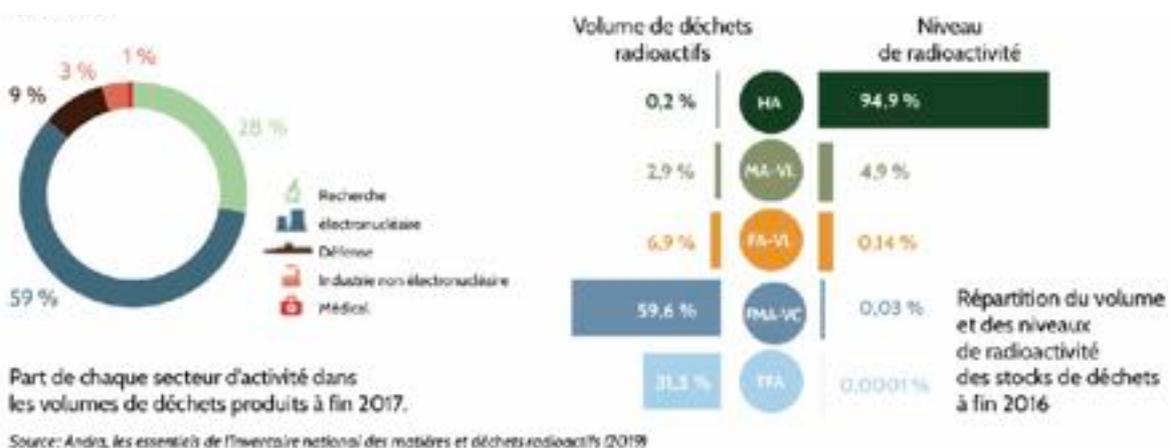
Puis l'industrie militaire des deux blocs, aiguillonnée par la guerre froide, a mis au point des bombes utilisant la fusion de noyaux d'hydrogène qui ont été nommées « Bombes H ». Au passage, la bombe H nécessite une « allumette » qui est en fait une bombe A. On aura compris que ces armes, dites « thermo-nucléaires » sont dévastatrices et beaucoup plus puissantes que les bombes A. On va voir dans la suite de ce document que l'usage pour la production d'énergie de ces deux mécanismes n'a pas progressé au même rythme.

## 6.2. La production d'énergie par fission

### 6.2.1. Réacteurs classiques

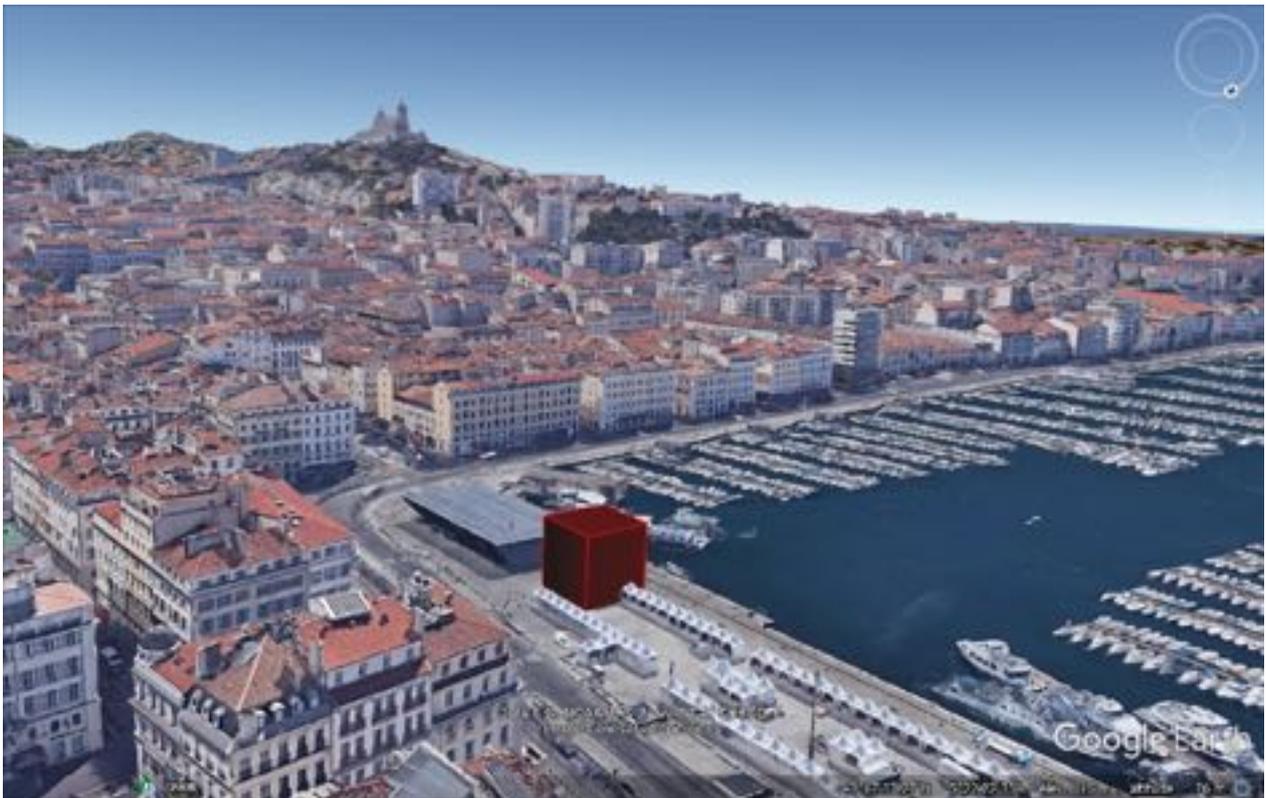
Alors que le premier réacteur produisant de l'électricité et connecté au réseau a vu le jour en Russie en 1954, la première réaction nucléaire produisant de l'énergie non militaire a été réalisée aux Etats Unis 3 ans plus tôt. Dans les deux cas, il s'agit bien sûr de fission.

Tous les réacteurs actuellement en service ou en chantier dans le monde utilisent la fission pour produire de l'énergie. L'inconvénient majeur de cette technologie est d'utiliser des métaux lourds (Uranium, Plutonium), radioactifs, et dont les déchets doivent être gérés de manière sérieuse et sur le temps long. Cette contrainte de re-



cyclage et de gestion des déchets est d'ailleurs l'un des principaux freins au développement plus large de cette énergie, et en tout cas le principal prétexte mis en avant par ses opposants.

On voit dans le graphique ci-dessus que les déchets nucléaires ne proviennent pas tous de la production d'énergie. Pour autant, la totalité des déchets de haute activité (HA) que la France a produit depuis 40 ans tiennent dans le volume d'une piscine olympique, soit le cube rouge posé ci-dessus dans le vieux port de Marseille.



Dans le même temps, les « déchets » des énergies fossiles se comptent par milliards de tonnes de CO<sub>2</sub> jetés dans l'atmosphère tous les ans, ainsi que par millions de tonnes pour les autres polluants.

Autre image, la totalité des déchets nucléaires d'un individu pour l'ensemble de sa vie si toute son énergie était de fission nucléaire conventionnelle tient dans le volume d'une canette de soda. Je précise « de fission conventionnelle » car nous verrons plus loin que des techniques permettent justement de mieux réutiliser ces « déchets ».

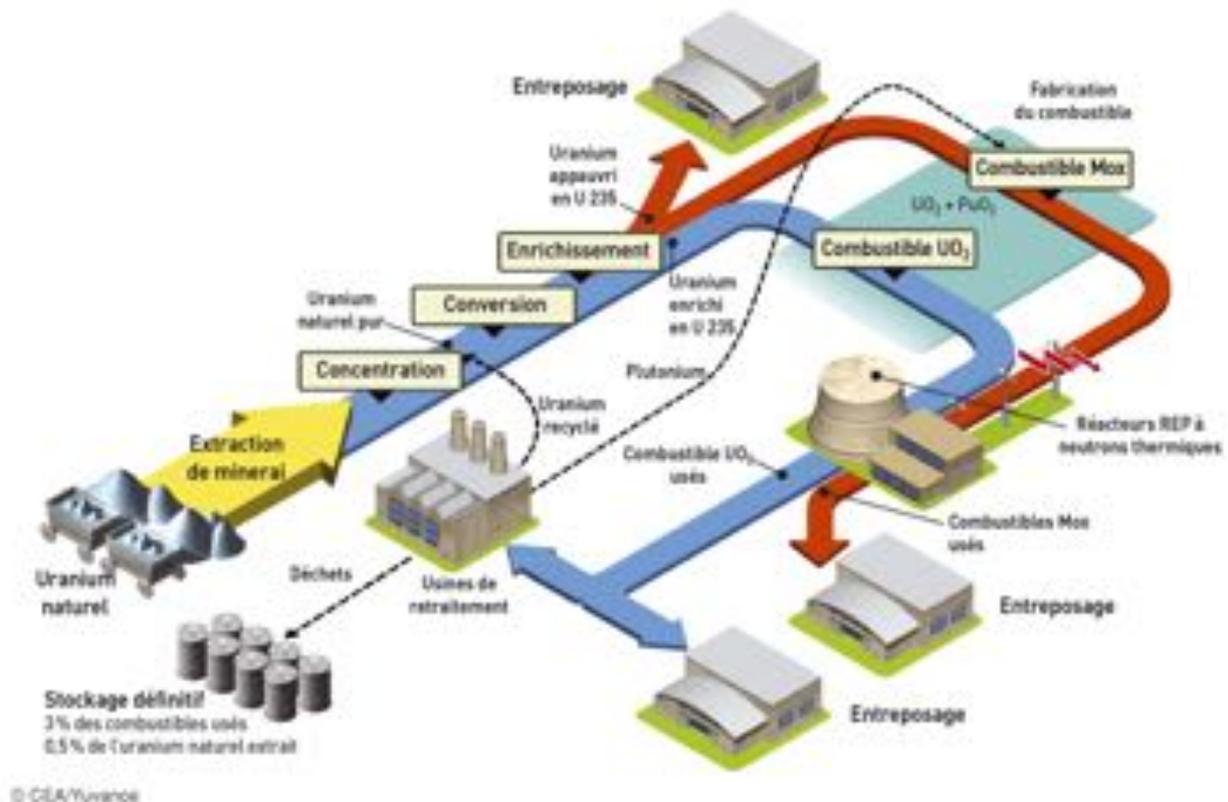
En France, les 56 réacteurs encore en service sont par ailleurs tous à « Eau Pressurisée » ce qui signifie que c'est de l'eau sous pression qui circule dans le coeur du réacteur et qui vient réchauffer le circuit secondaire.

La suite est la même que pour toute centrale thermique, comme expliqué dans l'épisode 3.

## 6.2.2. Le cycle du « combustible »

Il est bon de rappeler que le terme « combustible » est un abus de langage puisqu'il n'est pas question de « brûler » quoi que ce soit ici. Mais c'est un terme consacré (les anglophones disent « *nuclear fuel* »).

On se souvient dans l'épisode 2 de cette série que nous avons évoqué les usines d'enrichissement d'Uranium dont dispose la France. Les activités d'enrichissement et de recyclage du combustible sont réalisées par la société ORANO (Ex COGEMA et ex AREVA). Le schéma ci-dessous résume les différentes phases de ce cycle, dans l'état actuel des choses.



Tout d'abord, il faut noter que la France est le seul pays au monde avec la Russie à maîtriser la totalité du processus depuis l'extraction, l'enrichissement jusqu'au retraitement et à la réutilisation du combustible. On voit ici que les déchets ultimes sont extrêmement réduits. (0,5% de l'uranium extrait)

Il faut bien comprendre que l'élément essentiel se situe tout en haut du graphique. Nous disposons de plusieurs centaines de milliers de tonnes **d'uranium appauvri**, inutilisable aujourd'hui, mais « fertile ». Et c'est pourquoi, dès les années 70, la France a voulu travailler sur cette capacité à utiliser cet uranium.

### 6.2.3. Surgénération

« Nuclear waste : It's only waste if you waste it »<sup>6</sup>

Ces quelques mots résument la totalité des problèmes et les raisons de la surgénération. Comme cela a déjà été évoqué dans le chapitre 3.2 de l'épisode 4, cette technologie vise à permettre une utilisation beaucoup plus large des matériaux dont nous disposons pour faire fonctionner nos réacteurs à fission. Concrètement, ce type de réacteur permet d'obtenir plus de matériaux fissiles à la sortie qu'en entrée. Alors que seul l'U235 est consommable dans les réacteurs classiques, soit moins de 1% de l'Uranium Naturel, un surgénérateur va transformer l'U238 (plus de 99% de l'uranium naturel) en un matériau fissile, lequel pourra à nouveau être utilisé comme combustible.

**En d'autres termes un tel réacteur permet de « brûler » non seulement les déchets des autres, mais aussi l'Uranium appauvri dont nous disposons en grande quantité. (Encore une fois, plusieurs milliers d'années de consommation déjà disponible chez nous). Rappel :**

*Il existe sur le carreau de Pierrelatte et à Bessines près de **300 000 tonnes** d'uranium appauvri (uranium 238) issu des usines d'enrichissement en uranium 235, matériau nécessaire au fonctionnement des réacteurs actuels, et des EPR dans un futur proche. Cet uranium 238 « restant » peut être fissionné dans un réacteur surgénérateur (dit aussi RNR pour « réacteur à neutrons rapides »). Il a un potentiel énergétique équivalent à **500 milliards de tonnes de pétrole**, soit plus de deux fois les réserves mondiales actuelles de pétrole et sans émission de gaz à effet de serre !*

Superphenix était un Surgénérateur, de type RNR (Réacteur à Neutrons Rapides) dont le fluide caloporteur était le Sodium liquide. Nous avons vu dans l'épisode précédent comment les politiques français se sont acharnés, par ignorance des enjeux et par dogmatisme et clientélisme, à détruire cette avance incroyable dont disposait notre pays.

### 6.2.4. Réacteurs de 4<sup>ème</sup> génération

Avant de parler de la 4<sup>ème</sup> génération, encore faudrait-il comprendre quelles sont les 4 premières (source CEA).

**La 1<sup>ère</sup> génération** de réacteurs nucléaires comprend les prototypes et les premiers réacteurs de taille industrielle à usage commercial mis au point dans les années 1950 et 1960 et entrés en service avant les années 1970. On y trouve surtout des réacteurs dits « graphite gaz » qui ont permis de démontrer qu'il était possible de produire de l'électricité avec l'énergie nucléaire. Le réacteur « boule » de Chinon évoqué avant est un réacteur de première génération.

**Les réacteurs de 2<sup>ème</sup> génération** sont entrés en service à partir des années 1970. Ils correspondaient à la nécessité d'une meilleure compétitivité de l'énergie nucléaire

<sup>6</sup> Les déchets nucléaires ne sont des déchets que si vous les jetez.

et d'une amélioration de l'indépendance énergétique, dans un contexte de fortes tensions sur le cours des énergies fossiles (choc pétrolier). La majorité des réacteurs actuellement en exploitation dans le monde sont des réacteurs de génération 2. En France, il s'agit principalement de filière à eau sous pression, une technologie américaine adaptée par EDF.

**La 3<sup>ème</sup> génération de réacteurs** nucléaires, qui s'apprête aujourd'hui à prendre progressivement le relais, met l'accent sur les impératifs liés à la sûreté et à la sécurité (résistance renforcée aux agressions externes, type chute d'avion). Ces réacteurs tirent les enseignements du retour d'expérience de l'exploitation des réacteurs de génération 2, des accidents de Three Miles Island et de Tchernobyl ainsi que des attentats du 11 septembre 2001. Trois réacteurs répondent à ces critères : l'EPR français, l'AP1000 (advanced pressurized de 1 000 MWe) américano-japonais et l'AES 2006, dernier modèle de 1 200 MWe du VVER russe. Les chinois furent les premiers à mettre en service en 2018 l'AP1000 et les américains viennent de démarrer leur premier AP1000 les 14 mars 2023. Les chinois encore furent les premiers à démarrer un EPR, puis les finlandais, en attente de la mise en service de Flamanville.

**La 4<sup>ème</sup> génération** correspond aux réacteurs, actuellement en conception, qui pourraient voir un déploiement industriel dans la seconde moitié du XXI<sup>e</sup> siècle. Ils reposent sur des concepts de neutrons dits « rapides » et fonctionnent à plus haute température, des conditions qui leur permettraient une optimisation de l'utilisation du combustible nucléaire. Les recherches sur ces systèmes du futur sont menées dans le cadre du Forum international Génération IV qui a établi les quatre critères auxquels ils devront répondre : **la durabilité, la sûreté, la compétitivité économique et la résistance à la prolifération nucléaire**. En 2006, le CEA a été mandaté par l'Etat pour étudier la conception d'un réacteur de 4<sup>ème</sup> génération. Deux sociétés issues du CEA commencent leurs travaux en ce moment:

- Hexana, compte développer deux réacteurs modulaires de 4<sup>ème</sup> génération, à neutrons rapides de 400 MW et refroidis au sodium.
- Stellaria quant à elle s'inscrit également dans la technologie 4<sup>ème</sup> génération, en produisant de l'électricité et de la chaleur à proximité de sites industriels, avec un réacteur à sels fondus : un concept moins répandu.

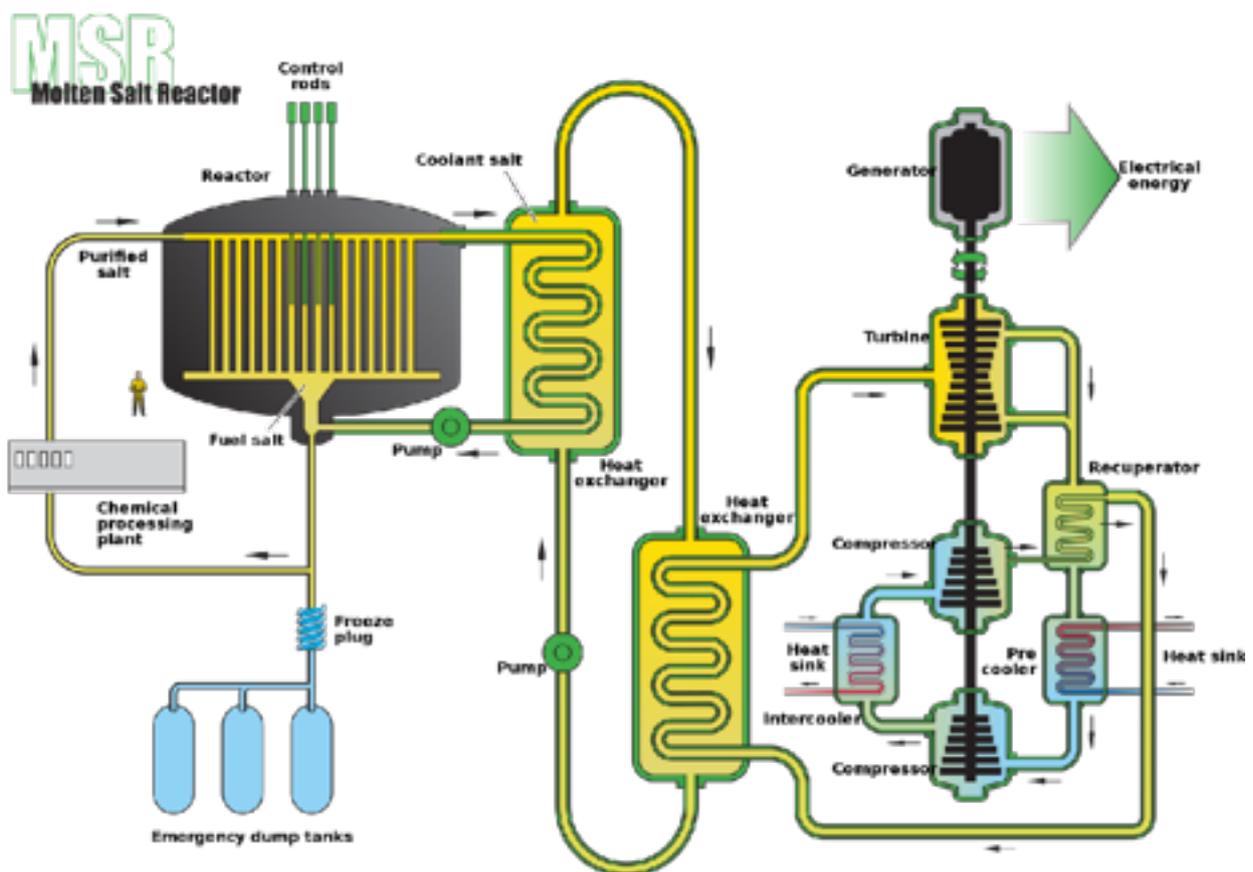
L'utilisation directe de réacteurs à très haute température pour produire de l'hydrogène permettrait d'éviter de passer par l'énergie mécanique puis électrique pour ensuite utiliser l'électricité pour faire l'électrolyse de l'eau. Au lieu de cela, on peut directement utiliser la chaleur pour « casser » la molécule d'eau et extraire l'oxygène et l'hydrogène qu'elle contient. On attend des gains extrêmement importants sur les rendements. Et on comprend mieux pourquoi il est tellement important que l'UE reconnaisse la production d'hydrogène par le nucléaire aussi vertueux et donc finançable que les ENRi.

Plusieurs programmes de recherche sont donc en cours pour améliorer la technologie des réacteurs à fission. Superphenix, qui était opérationnel en 1996 lors de la

décision politique d'arrêt par Lionel Jospin, avait donc 25 ans d'avance car les surgénérateurs à Neutrons rapides refroidis au sodium font partie de ces réacteurs.

Chirac a relancé cette filière sur un réacteur de 600 MW en lançant le projet ASTRID, démonstrateur technologique qui visait à industrialiser le retour d'expérience de SuperPhenix, sur une technologie comparable, que Macron a arrêté pour plaire aux écolos allemands !!

Autre technologie notable, l'utilisation du Thorium 232, qui dans un surgénérateur peut être transmuté en U233. Le thorium est 4 fois plus abondant que l'uranium, ses déchets sont plus simples à manipuler. Les réacteurs à Sel Fondus (RSF) utilisant le thorium présenteraient aussi l'avantage de ne pas être détournables en technologie militaire.



Les réacteurs à sels fondus (RSF ou MSR en anglais) présentent en outre la caractéristique spécifique de dissoudre le combustible dans le fluide caloporteur. On pourrait espérer que les arrêts pour rechargement soient supprimés ou au moins extrêmement réduits. En outre les RSF peuvent être à Neutrons Rapide et assurer ainsi un principe de surgénération.

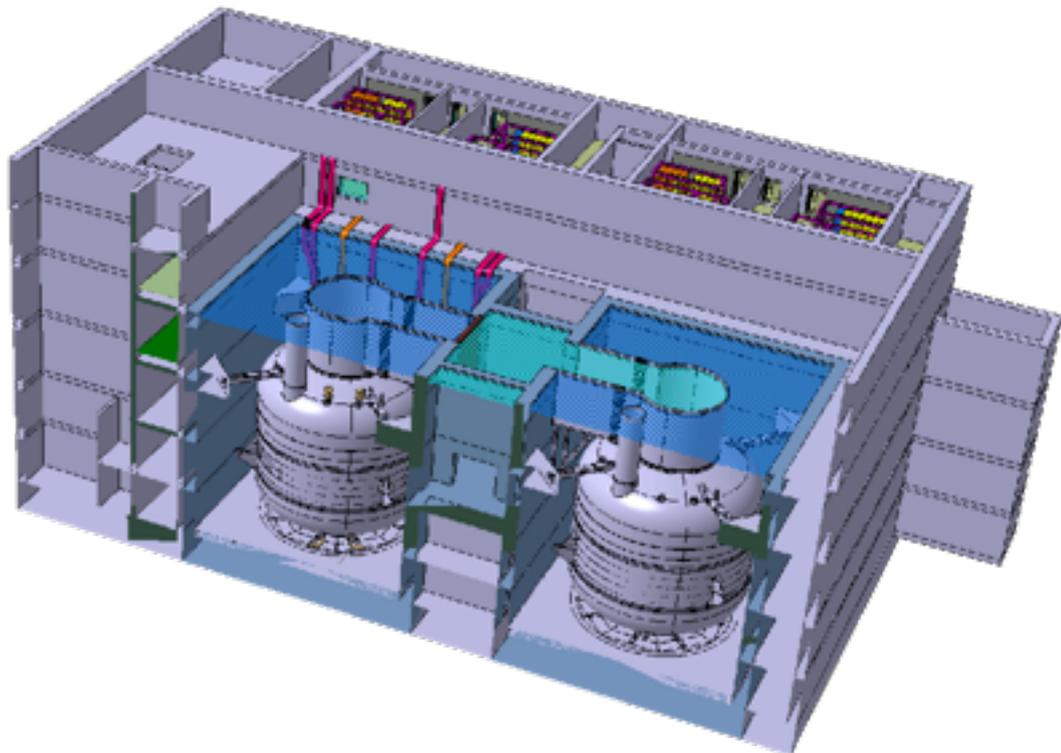
## 6.2.5.SMR

Les SMR ou Small & Medium Reactors sont des réacteurs de type « Eau pressurisée » de « petite » puissance (de l'ordre de 75 à 250 MW) et très compacts. Ils sont industrialisables facilement pour viser une production en série. De manière non surprenante ce sont les industriels en charge de la conception des réacteurs de propulsion navale (Rolls Royce au Royaume Uni ou Technicatome en France) qui sont en pointe sur ces sujets.

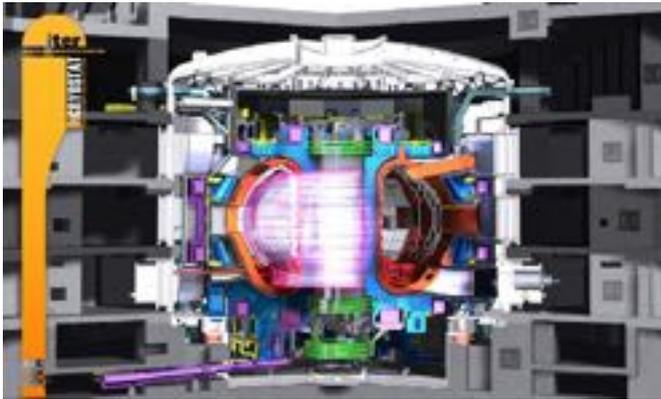


Voici le NUWARD de Technicatome disposant de 2 réacteurs de 170 MW chacun.

Cette approche permettrait d'une part l'exportation plus facile de ces technologies, et son usage sur des sites distants comme nos territoires ultramarins et d'autre part c'est une opportunité de récupérer des infrastructures, parfois récentes, de production d'énergie fossile en remplaçant la chaudière (Gaz, fuel ou charbon) par un SMR de puissance comparable, mais en conservant la salle des machines et les infrastructures de distribution d'électricité.



### 6.3. La Fusion Nucléaire



Comme on l'a vu plus haut, l'autre manière de récupérer l'énergie de la matière est de **fusionner** des noyaux légers. De nombreux projets et expériences cherchent à créer cette réaction de fusion contrôlée, de telle sorte que nous puissions en tirer cette énergie propre et quasiment illimitée. La France a la grande chance d'héberger sur son site de CADARACHE le projet international ITER qui vise à ouvrir la voie à un réacteur de fusion contrôlée utilisant le confinement magnétique de plasma. Mais les pays membres ont pour certains déjà lancé leur propres recherches s'appuyant sur les avancées d'ITER afin d'entrer les premiers sur ce marché planétaire de l'énergie propre et quasi inépuisable. La France ne devrait pas se permettre d'être à la

traîne...

Parmi les autres approches permettant de mettre en oeuvre ce graal des énergéticiens, on trouve le confinement de plasma par laser. Les outils permettant de mettre en oeuvre cette technologie sont très complexes et colossaux. Les Etats-Unis ont développé le NIF (National Ignition Facility) avec 192 lasers et les français le LMJ (Laser Mega Joule) avec 240 lasers, au sud de Bordeaux. Ces dispositifs étaient initialement, pour les deux pays, d'abord conçus pour valider les modèles de simulation numériques des armes, dans le contexte de l'arrêt des essais nucléaires. Mais les scientifiques les ont aussi vu comme des outils d'étude de la physique des plasmas et de leur confinement. Le but étant de récupérer plus d'énergie après fusion qu'il n'en a été injecté sous forme de rayonnement laser à l'initialisation.



Le 5 décembre 2022, alors que les premiers épisodes de ce document étaient déjà diffusés, les ingénieurs et chercheurs du NIF ont réussi la première expérience positive de fusion contrôlée au monde. Mais cela ne veut pas dire que cette technique est la meilleure et qu'il faille abandonner les autres approches. La route pour une industrialisation

sation sera longue pour développer un réacteur susceptible de fournir de l'électricité au réseau.

Parmi les scientifiques, les plus optimistes n'envisagent pas une utilisation **généralisée** de ce type de réacteur pour produire de l'énergie avant le XXI<sup>e</sup> siècle. Il nous faut donc envisager les 80 prochaines années avec ce que nous connaissons aujourd'hui.

Néanmoins, la recherche se poursuit sur différents fronts, pour permettre un jour d'offrir au monde une énergie propre et abondante, sans laquelle aucune politique ne pourra offrir aux déshérités de cette planète la richesse ou le confort qu'ils cherchent à aller chercher ailleurs.

## 7. Conclusion



Ainsi se termine ce document consacré à l'énergie, sur une image de la défunte centrale nucléaire de Fessenheim, sacrifiée sur l'autel de la bêtise politique et de l'ignorantisme écolo. Merci encore de l'avoir suivi. N'hésitez pas à nous faire part de vos remarques ou questions.