



attac

Pays Malouin-Jersey

Énergie, électricité et transition énergétique



Auteur : Rémy Locuratolo
Vérificateur : Jean-François Vacher
16/12/2021

Ce document est mis à disposition selon les termes de la [Licence Creative Commons Attribution - Pas d'Utilisation Commerciale 4.0 International](https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/).



Introduction

Le but de cette présentation est de permettre au lecteur d'appréhender les ordres de grandeur des ressources primaires nécessaires à la production et à la consommation d'énergie en France (produits pétroliers, gaz, nucléaire, éolien, photovoltaïque, géothermie etc..) et notamment la très forte dépendance de la France aux énergies fossiles.

Cette présentation doit permettre également de lever les ambiguïtés entre les différentes formes d'énergie dont l'électricité est la plus facile à utiliser.

Sera-t-il possible de produire des énergies décarbonées compatibles avec la limitation du réchauffement climatique, avec les directives européennes et avec l'abandon (diminution selon la COP 26 !!) de l'utilisation des énergies fossiles ainsi que de l'uranium ?

Et dans quels délais ?

Les éléments présentés dans cette étude sont indispensables pour comprendre les enjeux techniques, économiques et sociaux liés à la Transition Énergétique et au combat contre le réchauffement climatique.

Sommaire

1 La diversité des mesures de l'énergie.....	3
1.1 Le Joule.....	3
1.2 L'électron-volt.....	3
1.3 La TEP : Tonne Équivalent Pétrole.....	3
1.4 Watt crête (Wc).....	3
1.5 Puissance installée.....	3
1.6 Consommation électrique.....	4
2 Définition des énergies.....	4
2.1 Matières premières.....	4
2.2 Énergie primaire.....	4
2.3 Énergie secondaire.....	4
2.4 Énergie finale.....	5
2.5 Énergies renouvelables (EnR).....	5
2.6 Énergies renouvelables thermiques (EnRt).....	5
2.7 Énergies intermittentes.....	5
2.8 Indépendance énergétique.....	5
3 La diversité des modes de production et leur rendement.....	5
3.1 Moteur.....	5
3.2 Moteur thermique.....	5
3.3 Moteur électrique.....	5
3.4 Alternateur.....	5
3.5 Rendement énergétique.....	5
3.6 Facteur de charge.....	6
3.7 Taux de retour énergétique.....	6

4 Types de production électrique.....	7
4.1 Électricité thermique.....	7
4.2 Électricité hydraulique.....	7
4.3 Électricité éolienne.....	7
4.4 Électricité solaire photovoltaïque.....	7
4.5 STEP (Station de transfert d'énergie par pompage).....	7
5 Transport de l'électricité.....	8
6 Coûts des énergies.....	8
7 Les étapes de la Transition Énergétique Européenne.....	9
8 Durée des ressources.....	10
9 Tableau comparatif par type d'énergie.....	11
10 Gaz à effet de serre.....	15
10.1 Émission de gaz à effet de serre.....	15
10.2 Différents gaz à effet de serre.....	15
11 Bilan énergétique de la France par type d'énergie.....	16
11.1 Tableau récapitulatif en Mtep (Méga tonne équivalent pétrole).....	16
11.2 Analyse du bilan énergétique 2019.....	17
12 Consommation finale énergétique par filière.....	17
12.1 Tableau CFE 2019 (Mtep).....	17
12.2 Analyse du tableau.....	18
13 Production électrique française (Source EDF : 2019.).....	18
13.1 Tableau production électrique 2019.....	18
13.2 Analyse du tableau de production électrique 2019.....	19
14 Consommation finale par filière (Source EDF : 2019).....	20
14.1 Tableau consommation finale électrique 2019.....	20
14.2 Analyse du tableau de la consommation finale électrique 2019.....	20
15 Consommation et Production mondiale 2019.....	20
15.1 Consommation mondiale d'énergie 2019.....	20
15.2 Répartition de la consommation mondiale d'énergie 2019 par habitant.....	21
15.3 Production mondiale d'électricité 2019.....	21
15.4 Production d'électricité en Allemagne 2019.....	21
16 Conclusion et débats.....	21
16.1 L'intégration de l'éolien et du solaire photovoltaïque dans le système électrique français et européen.....	21
16.2 Quelle production d'électricité pour répondre aux nouvelles réglementations et aux décisions du pouvoir politico-financier ?.....	22
16.3 Le combat contre le réchauffement climatique et la production énergétique.....	22

1 La diversité des mesures de l'énergie

Il existe des unités physiques comme le Joule, ses unités utilisées par les physiciens comme l'électron-volt, des unités utilisées dans les bilans énergétiques (Tep et TWh) et des unités utilisées dans l'industrie comme le kW, le cheval Vapeur (HP – Horse power).

1.1 Le Joule

Dans le système international d'unités, le joule constitue l'unité de référence de mesure de l'énergie.

1 joule = 1 Watt pensant 1 seconde

Les Kilo Watt, Téra Watt étant utilisés pour les quantités importantes.

Sachant que 1 kWh équivaut à 3 600 000 J)

1.2 L'électron-volt

Unité utilisée par les physiciens :

1 ev = $1,6 \cdot 10^{-19}$ Joule

1.3 La TEP : Tonne Équivalent Pétrole

Cette unité est utilisée dans les bilans énergétiques : Mtep (Méga tep = 10^6 tep)

Une « Tep » ou « tonne d'équivalent pétrole » équivaut à l'énergie calorifique résultant de la combustion d'une tonne de pétrole brut « moyen ».

Nota :

Pour les filières renouvelables (hydroélectricité, éolien, photovoltaïque, énergies marines) produisant de l'électricité autrement qu'à partir de chaleur dégagée par réaction nucléaire ou thermique, la correspondance « arithmétique » 1 GWh \approx 86 tep (sachant que 1 Wh = 3 600 J) est utilisée pour toute conversion en énergie primaire dans les bilans énergétiques.

Pour la filière nucléaire, 1 GWh d'origine nucléaire est ainsi comptabilisé en énergie primaire comme 86 tep / 0,33 \approx 260 tep (33 % ont été retenu par les statisticiens pour la conversion de l'énergie nucléaire).

1.4 Watt crête (Wc)

Unité de mesure représentant la puissance maximale d'un dispositif. Dans les installations intermittentes (éoliens et solaire photovoltaïque) on qualifie l'installation par sa puissance crête même si cette puissance n'est pas disponible tout le temps.

1.5 Puissance installée

Elle s'exprime en Watt et en kW pour les petites puissances et en méga Watt (MW) téra Watt (TW) ou giga Watt (GW) pour les grosses puissances.

Elle représente la capacité de production électrique nominale (maximale) d'un appareil.

1 kW = 10^3 Watt

1 MW = 10^6 Watt

1 GW = 10^9 Watt

1 TGW = 10^{12} Watt

Cette notion est importante car souvent confondue avec la consommation électrique qui est exprimée en Watt – heure, kWh (kilo Watt heure), MWh (Méga Watt heure) ou TWh (Téra Watt heure).

Exemples :

- Sèche cheveu : 500 W
- Lave-linge : 2 kW
- Moteur de la Zoe : 100 kW (135 ch.)
- Moteur Tesla : 400 à 750 kW
- Turbine du barrage de la Rance : 10 MW
- Turbine hydrolienne : 10 MW
- Éolienne : 2 – 3 MW
- Turbine barrage des 3 Gorges (Chine) : 550 MW
- Réacteur nucléaire : 900 MW à 1,3 GW et 1,6 GW pour l'EPR.

1.6 Consommation électrique

La consommation s'exprime en Watt-heure, kWh ou Téra Watt heure (TWh) pour les installations électriques.

Dans les bilans énergétiques c'est le Téra Watt heure (TWh) qui est utilisé (1 TWh = 10^6 Wh)

Consommation d'un réfrigérateur et d'un lave - linge : 500 kWh / an

Consommation électricité d'une famille de 4 personnes éclairage et électroménager (hors chauffage) : 4000 kWh / an.

Capacité : Puissance installée fonctionnant en continu sur un période donnée.

2 Définition des énergies

2.1 Matières premières

Les principales matières premières sont des ressources à l'état brut :

- Pétrole
- Gaz
- Charbon
- Bois
- Uranium.

Celles-ci sont transformées en énergie via un processus industriel.

Elles peuvent être également utilisées directement dans certaines industries comme la chimie, la cosmétique et la métallurgie (aciéries).

2.2 Énergie primaire

Énergie non transformée contenue dans les ressources naturelles qui se trouvent dans l'environnement (bois, charbon, gaz, pétrole, uranium) ainsi que le vent, le soleil, les fleuves, la géothermie et la biomasse.

La consommation d'énergie primaire est la somme de la consommation finale, des pertes et de la consommation des producteurs et des transformateurs d'énergie.

2.3 Énergie secondaire

Énergie obtenue par la transformation d'une énergie primaire :

- Fabrication de produits pétroliers à partir de pétrole brut
- Fabrication de coke à partir de charbon
- Fabrication d'électricité à partir de gaz

2.4 Énergie finale

L'énergie finale est issue de la transformation de l'énergie primaire par l'industrie qui la rend utilisable pour la consommation.

L'énergie finale est consommée et facturée aux utilisateurs en tenant compte des pertes lors de la production, du transport et de la transformation du combustible.

2.5 Énergies renouvelables (EnR)

Les énergies renouvelables comprennent :

- L'hydraulique
- L'éolien
- L'énergie marémotrice
- Le solaire photovoltaïque

On parle aussi de nouvelles énergies renouvelables (éolien et solaire photovoltaïque)

2.6 Énergies renouvelables thermiques (EnRt)

Les énergies renouvelables thermiques comprennent la biomasse solide (bois de chauffage, résidus agricoles et agro-alimentaires), les déchets urbains et industriels d'origine biologique incinérés, le biogaz, les agrocarburants, le solaire thermique, la géothermie valorisée sous forme de chaleur ou d'électricité et les pompes à chaleur.

2.7 Énergies intermittentes

Énergie correspondant à des flux naturels, qui ne sont pas disponibles en permanence et dont la disponibilité varie fortement sans possibilité de contrôle. Certaines de ces sources d'énergie ont des variations régulières, comme l'énergie marémotrice et (partiellement) l'énergie solaire, d'autres sont moins régulières, comme l'énergie éolienne.

2.8 Indépendance énergétique

La totalité de notre énergie primaire est importée, à l'exception de l'hydroélectricité, de la biomasse, du vent et du soleil. Mais même pour le vent et le soleil, leur exploitation demande l'importation de panneaux solaires ou de matériaux rares pour assembler les systèmes.

3 La diversité des modes de production et leur rendement

3.1 Moteur

Machine qui transforme une énergie en une autre.

3.2 Moteur thermique

Transforme de l'énergie thermique (combustion de pétrole) en énergie mécanique.

3.3 Moteur électrique

Transforme de l'énergie électrique en énergie mécanique.

3.4 Alternateur

Transforme l'énergie mécanique ou hydraulique en électricité.

3.5 Rendement énergétique

C'est le rapport entre l'énergie reçue par un système à celle utilisable pour l'utilisation (électrique, mécanique, thermique).

Lorsqu'un panneau photovoltaïque reçoit 1000 W de rayonnement solaire et en restitue 150 W sous forme électrique, son rendement est de 15%.

Ordres de grandeur de rendement énergétique :

- Moteur thermique : 35 – 40 %
- Moteur électrique : 70 – 85%
- Centrale gaz : 35 – 60%
- Centrale nucléaire : 30 – 35 %
- Centrale hydraulique : 80%
- Éolien terrestre 20 – 25%
- Éolien en mer : 30 – 35%
- Solaire photovoltaïque : 0 – 20%

3.6 Facteur de charge

Le facteur de charge d'une centrale électrique est le rapport entre l'énergie électrique produite sur une période donnée et l'énergie qu'elle aurait produite si elle avait fonctionné à sa puissance nominale (puissance installée) durant la même période.

Voir tableau 12 - CFE : consommation finale électricité

Cet indicateur est intéressant pour comparer des installations pouvant fonctionner en permanences (centrales nucléaires et /ou thermique fioul/gaz/charbon,) et les installations intermittentes (éolien, solaire).

3.7 Taux de retour énergétique

Rapport entre l'énergie produite par un dispositif et l'énergie nécessaire à sa réalisation. Cette valeur tient compte de la quantité d'énergie requise (extraction pétrole, raffinage, construction des usines thermiques, barrages, éoliennes, panneaux solaires etc..), des infrastructures requises à leur mise en œuvre et du stockage.

C'est un indicateur qui mesure la difficulté à extraire l'énergie de son environnement.

Lorsque le TRE = 1 toute l'énergie produite est utilisée pour fabriquer le système de production d'énergie. Donc il ne sert à rien. C'est le cas des agrocarburants et de l'hydrogène produit par électrolyse de l'eau.

La croissance économique issue de la révolution industrielle s'est effectuée grâce à de l'énergie abondante et très bon marché (charbon, gaz, pétrole) disposant d'un TRE très élevé.

Aujourd'hui, les nouvelles énergies renouvelables (éolien et photovoltaïque) ont un TRE très faible dû à l'intermittence et aux systèmes à mettre en œuvre quand elles ne fonctionnent pas.

Au début du 20^{ème} siècle le TRE du pétrole était de 100 (100 MW produits avec 1 MW) selon toutes les sources d'information.

À ce jour, Il est impossible de donner une valeur unique au TRE pour chaque filière, car beaucoup de facteurs influencent la valeur finale ; il ne s'agit donc ici que de présenter un ordre de grandeur (source Wikipédia) :

- Centrales hydroélectriques : 10 – 100
- Éolien : 5 – 80
- Photovoltaïque : 1 – 10
- Pétrole : 8 – 15
- Charbon : 40 – 80
- Nucléaire : 5 – 100
- Sables bitumeux : 1 – 10
- Gaz de schistes : 3
- Agrocarburants : 0,5 – 1,7

Pour assurer un développement économique positif, il est généralement considéré que le TRE doit être supérieur à 10.

4 Types de production électrique

La production électrique en France est effectuée principalement par les centrales nucléaires, centrales thermiques, usines hydro-électriques, parcs éoliens, parcs solaires thermiques ou photovoltaïques.

- Parc éolien : environ 6500 éoliennes
- Parc Photovoltaïque : environ 456 000 installations
- 19 usines nucléaires (56 réacteurs - 2 réacteurs arrêtés en 2020)
- 4 centrales charbon
- 4 centrales fioul
- 16 centrales à gaz
- 447 barrages

Délai de démarrage des installations :

- Centrale à gaz : 2 – 5 mn
- Nucléaire : 2 à 3 jours
- Hydraulique : 1 – 5 mn
- Éolien et solaire : instantané

4.1 Électricité thermique

Ces quatre sources de chaleur produisent de la vapeur d'eau destinée à faire tourner des turbines qui transforment l'énergie mécanique en énergie électrique.

- Électricité thermique au fioul, gaz, charbon
- Électricité thermique nucléaire (Uranium)
- Électricité thermique solaire (Solaire, Chaleur, électricité)
- Électricité géothermique.

4.2 Électricité hydraulique

La puissance de la chute d'eau, le débit des fleuves ou des marées sont transformées en énergie mécanique (turbines) laquelle est ensuite transformée en énergie électrique (alternateur).

4.3 Électricité éolienne

Les moulins à vent sont les ancêtres de nos éoliennes.

L'éolienne fait tourner un générateur électrique (alternateur).

4.4 Électricité solaire photovoltaïque

L'effet voltaïque découvert par le physicien Becquerel en 1839 permet la conversion directe du rayonnement solaire en électricité.

4.5 STEP (Station de transfert d'énergie par pompage)

Avec le développement des énergies intermittentes (éolien et solaire photovoltaïque) et la diminution de l'utilisation des énergies fossiles, les besoins de stockage de l'électricité vont croître.

Les stations de transfert d'énergie par pompage (STEP) sont un type particulier d'installations hydroélectriques. Composées de deux bassins situés à des altitudes différentes, elles permettent de stocker de l'énergie en pompant l'eau du bassin inférieur vers le bassin supérieur lorsque la demande électrique est faible (et le prix de l'électricité peu élevé). Lorsque la demande électrique augmente (tout comme le prix de l'électricité), elles restituent de l'électricité sur le réseau en turbinant l'eau du bassin supérieur.

En Allemagne, la Nord Link inaugurée 27 mai 2021 est un câble de 623 km (1400 MW de puissance transportée) de long reliant l'Allemagne à la Norvège. L'énergie éolienne allemande en

surplus alimente les stations de pompage norvégiennes qui restituent de l'énergie électrique à la demande vers l'Allemagne en phase turbinage.

Grâce à leur fonction de stockage, ces installations contribuent à maintenir l'équilibre entre production et consommation sur le réseau électrique, tout en limitant les coûts de production lors des pics de consommation. À l'heure actuelle, le transfert d'énergie par pompage hydraulique est la technique la plus mature de stockage stationnaire de l'énergie.

Le problème est de trouver les sites adéquats.



5 Transport de l'électricité

L'électricité produite par les centrales est d'abord acheminée sur de longues distances dans des lignes à très haute et à haute tension (dites « THT » et « HT », entre 400 000 et 63 000 volts) gérées par EDF-RTE.

L'électricité est ensuite « transformée » (modification des niveaux de tension et d'intensité) dans des postes de transformation placés à l'interconnexion des réseaux de transport et de distribution.

Elle est enfin distribuée dans des lignes à moyenne et à basse tension (dites « MT » et « BT », entre 20 000 et 230 volts) appartenant aux communes et gérées par le réseau de distribution Enedis (ex ERDF RTE) en délégation de service public.

6 Coûts des énergies

Toutes les énergies primaires sont gratuites. Leur coût en est le prix du travail humain nécessaire à l'extraction.

Quelles sont les dépenses d'investissement, les dépenses d'exploitation, qui subventionne, qui finance, le consommateur paye-t-il le prix réel, le prix du marché ou le prix réglementé avec les taxes.

Pour comparer les coûts de chaque filière de production, il faut comparer les kWh produits à partir de la puissance installée, de la durée de vie de fonctionnement de l'installation, du coût de stockage, du coût de la redondance, des coûts d'installation et d'exploitation, de transport de l'énergie, de sécurité, de démantèlement.

L'amortissement des équipements, la rémunération du capital de l'exploitant ainsi que les subventions liées aux tarifs d'achat sur une longue durée doivent être également pris en compte.

Tout le monde est d'accord pour dire que le coût du démantèlement du nucléaire n'est que partiellement pris en compte dans le prix de revient ou de vente de l'électricité nucléaire, que le coût prédictif du risque nucléaire (ou collatéral comme Fukushima) n'est pas inclus dans les prix. En est-il de même pour d'autres types de production ?

Les chiffres donnés seront indiqués uniquement à titre d'ordre de grandeur pour le territoire français :

- Centrales nucléaires existantes : 49,50 € / MWh
- Nouvelles centrales nucléaires (EPR) : 70 – 120 € / MWh
- Centrales thermiques gaz / fuel : 70 – 100 € MWh
- Centrale thermiques charbon : 60 – 70 € MWh
- Solaire photovoltaïque : 140 € /MWh
- Éolien terrestre : 70 – 90 € / MWh
- Éolien en mer : 120 – 180 € / MWh
- Hydraulique : 35 – 80 € / MWh

7 Les étapes de la Transition Énergétique Européenne

C'est la politique européenne de réalisation d'un changement de système énergétique et aussi d'une transformation profonde de la société comparable à celle provoqué par la révolution industrielle.

L'objectif européen de la transition énergétique est de substituer aux structures de production centralisées contrôlées par de grandes sociétés capitalistiques (état ou privé) un système décentralisé de petites structures de production qui appartiendrait au citoyen.

1980 – Suède : sortie du nucléaire en 2010

1984 – Espagne : Moratoire sur le nucléaire

1986 – Italie : Référendum sur la sortie du nucléaire.

1990 – Suisse : Vote sur la construction de nouvelles centrales nucléaires

1994 – **Traité sur la charte de l'énergie (TCE)** qui sécurise les approvisionnements de pétrole et de gaz des pays de l'Union Européenne (UE) en provenance de l'Europe de l'est (ex URSS) et qui dissuade les états de prendre des décisions sur les effets des investissements dans le secteur énergétique.

Le TCE est une arme juridique puissante aux mains des pollueurs. Le TCE instaure des règles et des instruments qui ont un pouvoir redoutable aujourd'hui : paralyser la transition énergétique.

1995 – **Union Européenne : Livre vert et Livre blanc**

- Livre blanc : politique de l'énergie de l'Union Européenne
- Livre vert : énergie pour l'avenir – doublement des ENR en 2010 (12 % de la consommation énergétique intérieure brute) et de 24 % d'électricité « verte » contre 12% en 1995.

2000 - **Loi sur les ENR** : Favoriser les territoires ruraux et développement de systèmes permettant la décentralisation de la production.

Transposition en France de la directive européenne : création de 2 filiales d'EDF- RTE (réseau transport électricité de 63 000 volts à 400 000 Volts) et Enedis (ex ERDF RTE) réseau transport électricité de 400 volts à 20 000 Volts appartenant aux communes).

2007 - **Grenelle de l'environnement** – Plan national ENR (2009 – 2020)

2007- Loi des 3 x 20 (Union Européenne) :

- 20 % d'émission de gaz à effet de serre
- 20% de consommation énergétique
- + 20% d'énergie renouvelable

2009 – Directive 2009/28 : 23 % d'ENR pour la France dans la consommation finale d'énergie.

2010 – **Grenelle II** – Les éoliennes terrestres sont soumises à la norme ICPE (Installation

classée pour l'environnement)

2010 - Loi NOME (nouvelle organisation du marché de l'électricité) et ARENH (Accès Régulé à l'Électricité Nucléaire Historique) : obligation pour EDF de céder à ses concurrents européens 25% de sa production électronucléaire (100 TWh) au prix de 42 € le MWh. Cela permet aux concurrents d'EDF d'échapper au prix du marché et de bénéficier d'une électricité à prix coutant sans avoir investi un centime dans la construction des centrales.

2010 – Allemagne : sortie du nucléaire pour 2022

2011 – Suisse : arrêt du nucléaire en 2034

2012 – France : suite à un audit OPESCT (Office Parlementaire d'Evaluation des Choix Scientifiques et Techniques) en 2011 sur la sûreté des installations nucléaires, le président Sarkozy défend une « trajectoire raisonnée » : 60% de nucléaire en 2050 et 30% en 2100 en tenant compte de la maturité des énergies renouvelables.

Pour réaliser ce programme, 1 réacteur sur 2 sera remplacé par des réacteurs EPR (1650 MW - +22% de production avec la même quantité de combustible) soit 20 réacteurs en 2036 et 30 en 2050 versus 56 réacteurs en 2021.

8 Durée des ressources

Il s'agit des ressources connues à un moment donné ! Depuis 100 ans les estimations du montant des stocks ont pratiquement doublé tous les 20 ans, et pour le pétrole par exemple les extractions de gaz de schiste bitumineux ont permis d'augmenter considérablement les réserves connues.

RESSOURCES	DURÉE	DISPONIBILITÉS
Pétrole	30 – 60 ans	En augmentation avec les techniques de fracturation hydraulique qui provoquent des désastres environnementaux.
Gaz	60 – 120 ans	
Uranium	60 – 200 ans	Plus en cas de changement de technologie comme l'EPR nouvelle génération et des technologies d'enrichissement de l'uranium.
Énergie solaire	Infinie	340 W / m2 en moyenne annuelle
Énergie Éolienne	Infinie	.

9 Tableau comparatif par type d'énergie

ÉNERGIE	AVANTAGES	INCONVÉNIENTS
Nucléaire	<ul style="list-style-type: none"> - Officiellement : moins cher - Pas de production de gaz à effet de serre. - 10% de l'électricité est produite avec du MOX (Plutonium issu du retraitement de l'Uranium) - 8700 heures de production /an. <p>Pour approvisionner 58 réacteurs qui produisent 440 TWh, il suffit de 10500 tonnes d'uranium soit 250 camions. Pour produire la même quantité d'électricité avec des combustibles fossiles il faudrait 100 millions de tonnes de pétrole soit le double des importations actuelles. Ou encore 180 millions de tonnes de charbon.</p>	<ul style="list-style-type: none"> - Dépendance fourniture uranium Niger, Canada, Australie et Kazakhstan. (Areva est producteur d'uranium via les sociétés basées au Niger et Canada) - Stockage des déchets. - Problème politique lié à l'arme nucléaire et risques terroristes - Coûts de démantèlement non maîtrisés. - Coût du risque social et environnemental des accidents graves non inclus dans le calcul prix de l'électricité nucléaire.
Gaz et charbon	<ul style="list-style-type: none"> - Production à la demande - Énergie stockable (charbon) - En France : substitut au nucléaire en cas de forte demande. 	<ul style="list-style-type: none"> - Variation du prix en fonction en fonction du cours du pétrole - Charbon : premier producteur mondial de gaz à effet de serre - Les 2/3 du charbon mondial sont utilisés pour les centrales électriques. Dans le 1/3 restant : 10% métallurgie et le reste pour le chauffage et le réseau de chaleur. - Réchauffement climatique.
Gaz de schistes	<ul style="list-style-type: none"> - Remplace à court termes les hydrocarbures classiques 	<ul style="list-style-type: none"> - Industrie polluante. Technique de fracturation hydraulique provoque des dégâts environnementaux.
Pétrole	<ul style="list-style-type: none"> - Énergie bon marché - Rendement élevé : 1kg de pétrole produit 11,6 kWh - 1/3 des réserves mondiales connues - Meilleur ratio énergie transportée par unité de volume. 	<ul style="list-style-type: none"> - Non renouvelable - Ressource limitée - Nocif pour les milieux aquatiques - Transport dépendant à 98 % du pétrole dans le monde ! Tout ce qui roule, vole ou navigue. - L'énergie fossile domine l'approvisionnement mondial en énergie. - Les USA consomment 1/5 du pétrole mondial pour 5% de la population.

ÉNERGIE	AVANTAGES	INCONVÉNIENTS
Hydraulique fleuves et rivières	<ul style="list-style-type: none"> - Énergie stockable (STEP). - Essentiel pour assurer les pointes de consommation hivernales. - Réponse à l’intermittence solaire et éolienne. - Sécurité des centrales nucléaires : en cas de canicule refroidissement des réacteurs. - Hypothèse de potentiel économiquement exploitable de 9000 TWh (production mondiale d’électricité 22 000 TWh) essentiellement en Amérique du sud et Asie. 	<ul style="list-style-type: none"> - Potentiel existant utilisé sauf en Asie. - Technique non extensible-ne permet pas de remplacer les énergies fossiles. - Impact écologique sur la géologie des sols, la faune et la flore - Déplacement et hostilité des populations (Chine, Patagonie, Amazonie)
Hydroliennes énergie des océans	<ul style="list-style-type: none"> - Hélices ou turbines entrainées par des courants marins- projets à Aurigny, Ouessant et Bréhat. 	<ul style="list-style-type: none"> -Faibles puissance - turbine de 10 MW installée
Usine marée motrice	<ul style="list-style-type: none"> - Grande longévité 	<ul style="list-style-type: none"> - Peu de sites appropriés - sol rocheux nécessaire. - 3700 heures de fonctionnement contre 6000 heures pour une centrale fluviale. - Moins de 10 usines dans le monde.
Éolien	<ul style="list-style-type: none"> - Complémentaire avec énergie solaire. Développement en mer important en manche et sur cote languedocienne. (deuxième d’Europe après la Grande Bretagne) – environ 2000 h / an en terrestre et 3000 h / an en mer. 	<ul style="list-style-type: none"> - Énergie non pilotable et nécessite de la redondance avec une autre filière de production. - Industrie subventionnée – Fabrication hors France - Intermittence : 1500 à 2000 heures de production / an selon les sites - Coût élevé – faible rendement - Nuisances sonores et réticence des populations et des professionnels de la mer. - Recyclage des pales difficile - Nécessite du pétrole, du cuivre, de la bauxite, du fer et du béton pour la fabrication.

ÉNERGIE	AVANTAGES	INCONVÉNIENTS
Centrales Solaire Thermoélectriques	<ul style="list-style-type: none"> - Intérêt réduit en France (ensoleillement faible) - Technique de concentration de miroir 	<ul style="list-style-type: none"> - Faire coïncider les zones de production et les zones de consommation, ainsi que la production et les moments de consommation. Exemple projet DESERTEC . - Transport de l'électricité sur de longue distance. - En concurrence avec le solaire photovoltaïque.
Photovoltaïque	<ul style="list-style-type: none"> - Fort développement depuis 2000 grâce aux subventions et crédit d'impôts - Potentiel important en Méditerranée (2500 h/ an contre 1800 h / an dans le Nord) 	<ul style="list-style-type: none"> - Coûts élevés - Problème de recyclage - Intermittence : énergie non pilotable et nécessite de la redondance avec une autre filière de production. - Rendement faible
Hydrogène	<ul style="list-style-type: none"> - Applications locales possibles à faible échelle pour le transport urbain. - Seul le procédé par électrolyse de l'eau ne produit pas de CO2 	<ul style="list-style-type: none"> - Pas adapté au stockage de l'énergie électrique à grande échelle. (pertes et sécurité) - Consomme autant d'électricité qu'il en crée. TRE = 1 - En France, pour remplacer tous nos carburants par de l'hydrogène obtenu par électrolyse à partir d'électricité éolienne, il faudrait multiplier par 15 la puissance installée dans l'Hexagone et doubler la production électrique totale...
Biomasse ou houille verte	<ul style="list-style-type: none"> - Fabrication de l'électricité grâce à la chaleur dégagée par la combustion du bois, des déchets agricoles, organiques et ordures ménagères - Potentiel de création d'emplois localisés. 	<ul style="list-style-type: none"> - Émission de CO2 – Déforestation et impact sur la captation carbone.
Biogaz	<ul style="list-style-type: none"> - Moyen de stockage - Énergie obtenue à partir de la fermentation de matières organiques privées d'oxygène (méthanisation) - Potentiel de création d'emploi localisés. 	<ul style="list-style-type: none"> - Émission de CH4 (méthane)
Agrocarburants	<ul style="list-style-type: none"> - Indépendance énergétique 	<ul style="list-style-type: none"> - Aberration de brûler des denrées alimentaires pour les véhicules des pays développés alors qu'une partie de la population souffre de malnutrition. Pas de diminution des GES. TRE = 1

ÉNERGIE	AVANTAGES	INCONVÉNIENTS
Bois	<ul style="list-style-type: none">- Ressource illimitée- Énergie pas chère- Seulement 1/3 de la quantité de bois produite est exploitée.- Création d'emploi	
Géothermie	<ul style="list-style-type: none">- Fabrication de l'électricité grâce à l'eau très chaude des nappes dans le sous-sol de la terre.- Pas d'émission de CO2- Potentiel dans les zones volcaniques- Le site de Bouillante en Guadeloupe de 15 MW a produit 110 GWh en 2019	<ul style="list-style-type: none">- Risque sismique et affaissement de terrain.

10 Gaz à effet de serre

10.1 Émission de gaz à effet de serre

ÉNERGIE	Gramme/KWh
Charbon	750 - 1100
Gaz	400 - 500
Solaire voltaïque	50 - 150
Eolien	5- 22
Nucléaire	10
Essence	329
Diesel	317
Gaz naturel	223 - 317
Bioéthanol	70 - 90
Biodiesel	140 - 200
Hydraulique	4
Biomasse	13 - 350 sans replantation

10.2 Différents gaz à effet de serre

DÉSIGNATION		APPLICATIONS
CO2	Dioxyde de carbone	Combustion des produits pétroliers raffinés. Procédés industriels-transport automobile.
CH4	Méthane	Lieux d'enfouissement-Pétrole-Gaz-élevage du bétail. Potentiel de réchauffement nettement supérieur au CO2.
N2O	Oxyde nitreux	Agriculture.
SF6	Hexafluorure de soufre	Production électrique- composants électriques - magnésium.
NF3	Trifluorure d'azote	Semi-conducteurs-panneaux solaires - Télévision.
HFC /PFC	Hydrofluocarbone et Perfluocarbone	Appareil de climatisation et de réfrigération.

11 Bilan énergétique de la France par type d'énergie

Source : SDES : Service statistique du ministère de la transition écologique et solidaire (méthode de calcul ERE (Equilibre Ressource Emploi).

11.1 Tableau récapitulatif en Mtep (Méga tonne équivalent pétrole)

Bilan énergétique	Charbon	Pétrole	Gaz	Nucléaire	EnR Elec : Hydro - Eolien-PV	EnR thermique	Électricité	Chaleur vendue	Ensemble
Approvisionnement									
Production d'énergie primaire	-	1	-	104	9	20,1	-		134,1
Importations	7,3	95,3	48,9	-	-	2,1	1,3		154,9
Exportations		-17,5	-9,7			-0,9	-6,3		-34,4
Variation de stocks		0,3	-1,7						-1,4
Soutes maritimes et aériennes internationales		-7,8							-7,8
Total des disponibilités	7,3	71,3	37,5	104	9	21,3	-5		245,4
Taux d'indépendance énergétique (en %)		1,40%		100,00%	100,00%	94,37%			54,65%

Emplois	Charbon	Pétrole	Gaz	Nucléaire	EnR elec : Hydro - Eolien-PV	EnR thermique	Électricité	Chaleur vendue	Ensemble
Consommation de la branche énergie	6,1	5,3	8,1	104	9	6	-42,1	-3,7	92,7
Consommation finale énergétique	1	54	28,3			15,3	37,1	3,7	139,4
Agriculture, Industrie (y c. construction)	0,9	5,8	10,7			2,2	10,7	1,6	31,9
Résidentiel, tertiaire	0,1	7,2	17,4			9,9	25,6	2,1	62,3
Transports		41	0,2			3,2	0,9		45,3
Consommation finale non énergétique	0,3	12	1,2						13,5
Consommation totale d'énergie primaire	7,4	71,3	37,6	104	9	21,3	-5	0	245,6

11.2 Analyse du bilan énergétique 2019

Les **Ressources** énergétiques appelées « *Approvisionnements* ») sont sous des formes primaires ou brutes après leur *extraction*.

Les **Emplois** correspondent à l'utilisation (ou consommation) intermédiaire ou finale du produit *transformé*.

On a produit en France en 2019 pour 134 Mtep d'énergie primaire.

Les produits bruts importés s'élèvent à 154,9 Mtep.

Les produits bruts exportés s'élèvent à 34,4 Mtep.

Les **énergies renouvelables (hydraulique, éolien, photovoltaïque, thermique)**, qui se présentent souvent sous forme électrique, pèsent d'un **pooids non négligeable** (29,1 Mtep) sur la production totale d'énergie primaire (134,0 Mtep, soit 21,7 %).

En 2019, notre pays dispose de **245,3 Mtep** (qu'on appelle aussi « *disponibilités* »)

Le **taux d'indépendance énergétique** qui est faible (54,6 %), en grande partie en raison des fortes importations d'hydrocarbures (pétrole et gaz pour 144,2 Mtep).

La **consommation finale énergétique** (CFE) qui s'établit à 139,4 Mtep. Autrement dit, pour facturer 139,4 Mtep d'énergie, il faut dépenser 92,7 Mtep de ressources primaires.

L'électricité représente 37,1 Mtep de la consommation finale énergétique (CFE) soit 27%. Cela montre que le débat énergies renouvelables Vs énergie nucléaire n'est qu'un des débats de la transition énergétique par rapport à notre dépendance aux énergies fossiles en France (pétrole et gaz) et par rapport au charbon dans le reste du monde.

La **consommation finale non énergétique** est de 13,4 Mtep. Cette catégorie regroupe des utilisations classiques d'énergies fossiles en qualité de **matières premières** pour les industries chimiques et pharmaceutiques.

La **consommation intermédiaire** (CI) de la branche énergie est significative (**92,7 Mtep**) et représente 37,7 % des emplois.

12 Consommation finale énergétique par filière

12.1 Tableau CFE 2019 (Mtep)

CONSOMMATION FINALE ÉNERGÉTIQUE PAR FILIÈRE (Mtep)			
Source : bilan énergétique 2019 - ministère de l'environnement	% filière	Mtep	Commentaires
TOTAL CONSOMMATION FINALE ÉNERGÉTIQUE		139,40	
Transport	32,40%	45,2	Produits pétroliers : 90%
Industrie	20,00%	28	électricité : 39% - Gaz : 36%
Résidentiel	28,70%	40	électricité : 34% - Gaz : 27 % - bois : 24%
Tertiaire	16,00%	22,3	électricité : 49% - Gaz : 31%
Agriculture	2,90%	3,9	pétrole : 73% - électricité : 16%
	100,00%		

12.2 Analyse du tableau

La **Consommation finale énergétique** (CFE) se répartit entre 3 grands secteurs économiques : l'agriculture et l'industrie, le résidentiel et le tertiaire (inclus le chauffage urbain), et les transports.

C'est le Résidentiel -Tertiaire qui domine avec 62,3 Mtep (soit 44,7 % de la CFE), alors que les Transports consomment 45,2 Mtep (32,4 %) dont 33,3 Mtep pour le gazole routier

On notera que le poids élevé des services (inclus dans le poste tertiaire) reflète la très forte **désindustrialisation** de la France.

Quelle énergie sera capable de se substituer au pétrole pour permettre la production de 45,2 Mtep utilisé pour les transports ?

Sachant que 1000 TWh sont équivalents à 96 tep, il faudrait produire 470 MTWh d'électricité pour effacer l'équivalent de la consommation finale de pétrole du poste transport. Cette production est équivalente à la production électrique déjà existante. (Voir tableau 13).

Entre 1990 – 2012, la forte croissance de la consommation électrique - 305 TWh en 1990 à 437 TWh en 2012 – Augmentation de 43 % du au chauffage électrique qui a supplanté le pétrole dans le résidentiel tertiaire.

Dans le même temps la part de la consommation électrique dans l'industrie n'a cessé de diminuer de 34% à 24 % (1990 – 2012). Elle atteint 20% en 2019.

13 Production électrique française (Source EDF : 2019.)

13.1 Tableau production électrique 2019

FILIÈRES	P Installée	% installation	Capacité / an	Prod / an	% / filière	Facteur de charge
Unités	GW		TWh	TWh		
	2019		2019			
Nucléaire	63,13	46,79%	553,02	380	70,66%	68,62%
Charbon	2,9	2,15%	25,40	1,6	0,30%	6,30%
Fioul	3,4	2,52%	29,78	2,3	0,43%	7,72%
Gaz	12,1	8,97%	106,00	38,6	7,19%	36,42%
Hydraulique	25,5	18,90%	223,38	60	11,17%	26,86%
Éolien	16,4	12,15%	143,66	34,1	6,35%	23,74%
Photovoltaïque	9,4	6,97%	82,34	11,6	2,16%	14,09%
Bioénergie	2,1	1,56%	18,40	9,4	1,75%	51,10%
Sous totaux	134,93	100,00%	1181,99	537		

13.2 Analyse du tableau de production électrique 2019

Nota sur les unités :

GW : giga Watt = 10^9 W

TWh : téra Watt heure = 10^{12} Wh

Capacité : Puissance installée fonctionnant en continu sur un période donnée.

Ce tableau montre le poids du nucléaire dans la production d'électricité (70, 66 %) qui est à 68,62% de sa capacité.

La capacité de production installée du nucléaire (553 TWh /an) dépasse la consommation électrique Française (537 TWh).

La puissance installée en énergie fossiles (18,4 GW) est équivalente à la puissance éolienne installée (16,4 GW).

L'ensemble des ENR (hydraulique, éolien, photovoltaïque et biomasse) représente 40% de la puissance installée pour 21,5% de la production.

Les énergies renouvelables (hors hydraulique) représentent moins de 8,5 % de la production avec 25 % de la puissance installée et les 8,5 % de production d'éolien et de photovoltaïque ont une capacité de 20%.

La France produit moins de 8% d'électricité d'origine fossile.

Les centrales (fioul, gaz, charbon et hydraulique) sont utilisées pour piloter les pics de demande ainsi que l'appoint afin de lisser l'intermittence des énergies éoliennes et photovoltaïques.

L'énergie stockée par les barrages sert également à la sécurité des centrales nucléaires pour assurer le refroidissement des réacteurs en cas de canicule.

La seule énergie opérationnelle en stockage de l'électricité est l'hydraulique. Sur ses 25,5 GW de puissance installée, la France dispose de 5GW de barrage STEP (voir paragraphe 4.5) permettant de fournir 50 heures de production.

En 2013 la production des ENR (photovoltaïque + éolien) était de 27 TWh. Avec une augmentation de 3TWh / an de 2006 à 2013.

En 2019 la production des ENR (photovoltaïque + éolien) s'élève à 45,7 TWh. Soit une augmentation de 3TWh / an de 2013 à 2019.

Pour atteindre les 50% de nucléaire en 2025 (hors diminution de la consommation), il faudrait produire 112 TWh en ENR (photovoltaïque + éolien) en 5 ans... soit l'installation d'une capacité de 22 TWh / an.

Pour l'éolien cela correspondrait à 84 TWh soit la mise en service de 16 000 éoliennes en 5 ans... Soit plus de 7 fois la mise en service des systèmes actuels ainsi que l'équivalent en puissance installée dans la construction de nouvelles centrales thermiques pour assurer le pilotage de la demande en cas d'intermittence.

14 Consommation finale par filière (Source EDF : 2019)

14.1 Tableau consommation finale électrique 2019

CONSOMMATION FINALE PAR FILIÈRE (source RTE)		
	% filière	TWh
TOTAL CONSOMMATION FINALE ÉLECTRICITÉ		473,00
Résidentiel	36,00%	170,28
Entreprises	27,00%	127,71
Grande industrie	17,00%	80,41
PME / PMI	10,00%	47,3
Professionnel	10,00%	47,3
	100,00%	473

14.2 Analyse du tableau de la consommation finale électrique 2019

Ce tableau montre le poids du résidentiel dans la consommation électrique (36%) ainsi que le tertiaire entreprise soit 63% de la consommation.

Le poste transport ne figure pas dans le tableau EDF n'utilisant que très peu l'électricité hormis dans le transport ferroviaire.

La production s'élève à 537 TWh pour 473 TWh de consommation facturée. Soit un socle d'exportation moyen sur l'année de 64 TWh d'électricité.

Si l'on voulait stocker cette énergie, il faudrait doubler le parc des ouvrages hydrauliques dont la capacité de production actuelle est de 60 TWh en 2019. De plus la montée en puissance d'un parc Eolien et photovoltaïque de grande capacité devrait amplifier fortement les variations de capacités de charge avec la nécessité de disposer d'un parc de centrales thermiques de réserve plus important que celui existant actuellement.

63% de la production électrique est utilisée pour alimenter le résidentiel et le tertiaire (entreprise).

Depuis 2008 la consommation est stable en lien avec la crise du système économique.

15 Consommation et Production mondiale 2019

15.1 Consommation mondiale d'énergie 2019

Consommation mondiale d'énergie : 13 972 Mtep dont :

- **Pétrole : 34,2%**
- **Charbon : 27,6%**
- **Gaz naturel : 23,4%**
- Hydro-électricité : 6,8%
- Nucléaire : 4,5% (multiplié par 2,4 en 40 ans)
- Renouvelables : 3,5%

Soit 81,3% en énergie fossiles et 3 milliards de tonnes de carburant consommés en 2019 dans le monde.

15.2 Répartition de la consommation mondiale d'énergie 2019 par habitant

- USA : 5 tep / habitant
- France : 2,3 tep / habitant
- Allemagne : 2,75 tep / habitant
- Chine : 1,44 tep / habitant
- Corée du sud : 3,56 tep / habitant
- Russie : 3,38 tep / habitant
- Brésil : 1,39 tep / habitant
- Afrique : 0,47 tep / habitant
- Inde : 0,44 tep / habitant

15.3 Production mondiale d'électricité 2019

Production électricité : 26 606 TWh soit 19% de la consommation mondiale d'énergie finale en 2017 dont :

- **38,5% de charbon**
- 23% de gaz naturel
- 16% d'hydroélectricité
- 10% de nucléaire
- 9% d'ENR (hors hydro- électricité et déchets)
- 3,3 % de pétrole

15.4 Production d'électricité en Allemagne 2019

Production Électricité : 604 TWh dont 43% d'électricité d'origine fossile :

- **28% de charbon**
- 15% de gaz naturel
- 3% d'hydroélectricité
- 12% de nucléaire
- 29% d'ENR (éolien et photovoltaïque)
- 1 % de pétrole
- 9% biomasse et déchets
- 3% divers

16 Conclusion et débats

16.1 L'intégration de l'éolien et du solaire photovoltaïque dans le système électrique français et européen

Le mode de développement actuel de capacités supplémentaires de production en éolien et solaire en Europe pose des problèmes importants d'intégration dans le système électrique français et européen et ne permet en aucun cas de faire face aux pointes de consommation hivernales (8 janvier 2021). Il est nécessaire de disposer de moyens de production modulables (gaz et hydraulique) pour compenser la baisse de puissance quand le vent faiblit.

Un système de production électrique doit pouvoir suivre la demande. Seules les centrales thermiques (Fioul, gaz et charbon) et centrales hydrauliques peuvent répondre à des fluctuations de la demande.

Contrairement à l'idée que les ENR favoriseraient la production décentralisée, c'est l'inverse qui se produit. Le courant est exporté sur de longue distance (voir paragraphe 4.5 Nord Link).

Les variations de charge difficilement prévisibles de cette technologie entraînent des perturbations dans les systèmes de transport et de pilotage de la distribution de l'électricité.

Cela impose la connexion / déconnexion des centrales thermiques fioul, gaz pour fournir la demande... et la construction de nouvelles centrale thermiques pour pallier à l'intermittence des énergies renouvelables.

En l'absence de moyen de stockage, le rachat de l'électricité par l'étranger est la technique la plus utilisée pour parer à la surproduction en période creuse.

Le développement des ENR (photovoltaïque et éolien) ne pourra se faire que si on développe des capacités de stockage de l'électricité et des infrastructures réseaux. Il faudrait donc adapter le système de transport européen.

16.2 Quelle production d'électricité pour répondre aux nouvelles réglementations et aux décisions du pouvoir politico-financier ?

- Transport effectué avec un parc électrique
- Chauffage et climatisation électrique (suppression fioul et gaz)
- Réindustrialisation de production en France
- Sécurité des installations nucléaires.

16.3 Le combat contre le réchauffement climatique et la production énergétique

Les objectifs de remplacement des énergies fossiles et d'une partie du parc nucléaire pour s'engager dans ce que les politiques appellent la « Transition Énergétique » et pour qu'ils soient compatibles avec la réduction des gaz à effet de serre sont-ils réalisables sans investissement considérable compte tenu :

- De l'incertitude sur le rythme de développement ?
- De l'intermittence des nouvelles ENR et donc difficultés à se substituer à des sources de production capable de répondre à la variation de la demande ?
- Du stockage hydraulique supplémentaire nécessaire ?
- De la nécessité d'une reconfiguration du réseau de transport au niveau européen ?
- De l'acceptabilité par les populations de l'installation de l'éolien qui gâche la vue des particuliers, du voltaïque sur des territoires classés, de l'éolien en mer qui décime les oiseaux de mer et qui nuit à la pêche côtière etc. ?
- De la définition et de la validation des priorités à mettre en œuvre pour réduire les productions les plus polluantes ?
- De la définition des besoins indispensables à produire et des priorités à mettre en œuvre pour réduire la consommation et le gaspillage énergétique ?

Combien de dizaines d'années va durer cette transition ?

Documents utilisés pour cette étude :

- Les énergies renouvelables – Jacques Vernier – PUF- 1997
- Mutations des systèmes productifs en France – Gabriel Wakermann – Ellipse 2014
- La transition énergétique – Philippe Murer – Mille et une nuit – 2014
- Essai sur l'énergie de demain – Laurent Kopp et Marine Champon. -2013
- Vers un Mix 100% renouvelable en 2050 – ADEME 2015
- Dossier de synthèse - scénario Néga Watt 2017-2050
- Bilan énergétique 2019 – ministère de l'environnement
- Éléments de base sur l'énergie de 21^{ème} siècle – Jean Marc Jancovici - 2019
- Bilan énergétique EDF et RTE - 2019
- Bilan énergétique INSEE 2020
- Chiffres clés de l'énergie 2020 – ministère de l'environnement

Remerciements :

À mes anciens collègues de travail Charles P, Jean-Marie L, Louis Z, pour leurs commentaires, Jean-François Vacher pour les analyses des documents de l'INSEE et pour la structuration du dossier et enfin Jean Rohel pour la relecture et les corrections.

Crédits photographiques

Couverture :

Composition : J. Rohel. Licence Creative Commons Attribution - Pas d'Utilisation
Commerciale - Pas de Modification 4.0 International ([CC BY-NC-ND 4.0](https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/))
composée d'images libres d'utilisation (CC0) issues de pxhere.com et pixnio.com.

Chapitre 4.5 :

STEP : Hans Blossey, scanpix.no. Licence Creative Commons Attribution - Pas d'Utilisation
Commerciale 4.0 International ([CC BY-NC 4.0](https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/))