

# LA SOCIÉTÉ CIVILE FRANÇAISE

L'avenir énergétique et industriel de la France

Devenir le premier producteur mondial  
d'hydrogène et d'électricité

Hydrogène et électricité produits  
en cogénération grâce au nucléaire

Julien IRONDELLE

## Table des matières

<b><i>La fin de l'utilisation de l'énergie fossile.....</i></b>	<b>3</b>
Les émissions CO2, responsables de la hausse des températures et du dérèglement climatique.....	3
<b><i>Prévision des hausses de températures 2050-2100 .....</i></b>	<b>5</b>
Le pic de production du pétrole .....	7
La dépendance pétrolière vis-à-vis de puissances étrangères.....	8
Le pétrole dans la balance commerciale française.....	9
<b><i>Le dilemme CO2 versus le nucléaire.....</i></b>	<b>9</b>
Les enjeux.....	9
L'exemple énergétique allemand .....	11
<b>La bonne approche sur l'énergie nucléaire : l'analyse risque -gravité.....</b>	<b>14</b>
L'expérience de Fukushima en 2011 .....	15
De nouvelles exigences en terme sûreté nucléaire .....	16
La gestion des déchets.....	17
L'EPR de Flamanville .....	20
<b>Conclusion.....</b>	<b>22</b>
<b><i>Un monde sans énergie fossile.....</i></b>	<b>23</b>
<b>L'hydrogène est le complément indispensable de l'électricité.....</b>	<b>23</b>
<b>La production de H2 décarboné.....</b>	<b>26</b>
Production de H2 par électrolyse.....	26
H2 est complémentaire des énergies renouvelables .....	26
<b>Le couple gagnant co generation H2 / nucléaire.....</b>	<b>27</b>
Électrolyse à haute température augmente le rendement .....	27
Co génération d'Hydrogène - Nucléaire.....	27
<b><i>Conclusion : La France peut devenir le leader mondial de l'énergie Hydrogène et électrique.....</i></b>	<b>28</b>
<b><i>Notes et Références.....</i></b>	<b>29</b>

## La fin de l'utilisation de l'énergie fossile

Les raisons pour sortir notre monde de l'énergie fossile sont multiples et impérieuses.

Les émissions CO<sub>2</sub>, responsables de la hausse des températures et du dérèglement climat

Les émissions de CO2 anthropiques sont responsables de la hausse des températures au niveau mondial. Ces émissions additionnelles de CO2 sont dues à la combustion d'hydrocarbures par l'homme.

L'utilisation massive du charbon et de pétrole ont provoqué de fortes augmentations d'émissions de CO2. Notamment à partir des années 1900-1910, lorsque l'utilisation du charbon a dépassé celle de la biomasse, puis surtout à partir des années 1960-1970 lorsque l'utilisation du pétrole a dépassé celle du charbon<sup>i</sup>.

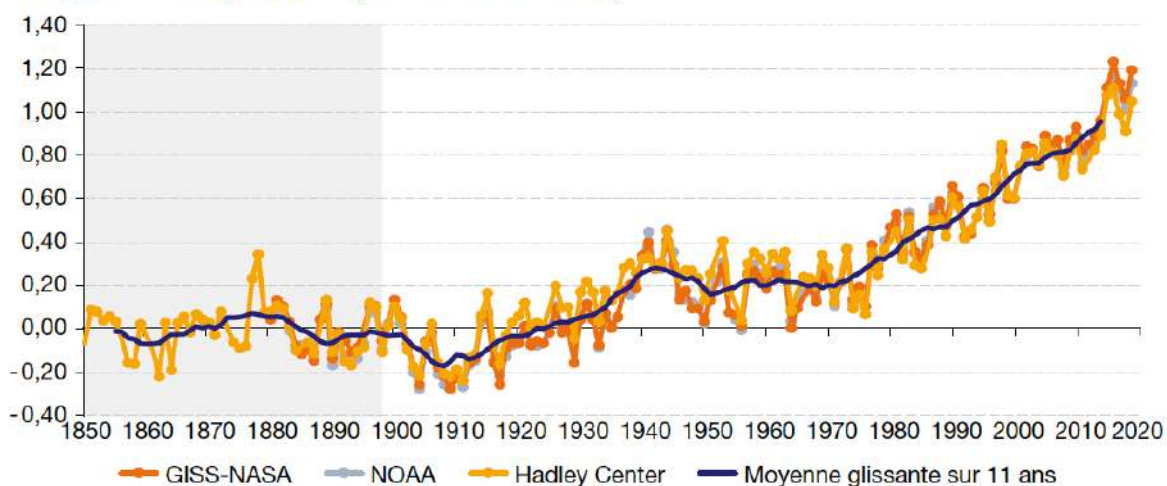
Le cumul des consommations de pétrole, charbon et gaz sont à la source d'une augmentation croissante des températures à partir des années 1980

## Évolutions des températures de 1800 à 2019<sup>ii</sup>

### ÉVOLUTION DE LA TEMPÉRATURE MOYENNE ANNUELLE MONDIALE DE 1850 À 2019

En °C

Anomalie des températures (référence 1850-1900)



Note : en grisé la période préindustrielle 1850-1900.

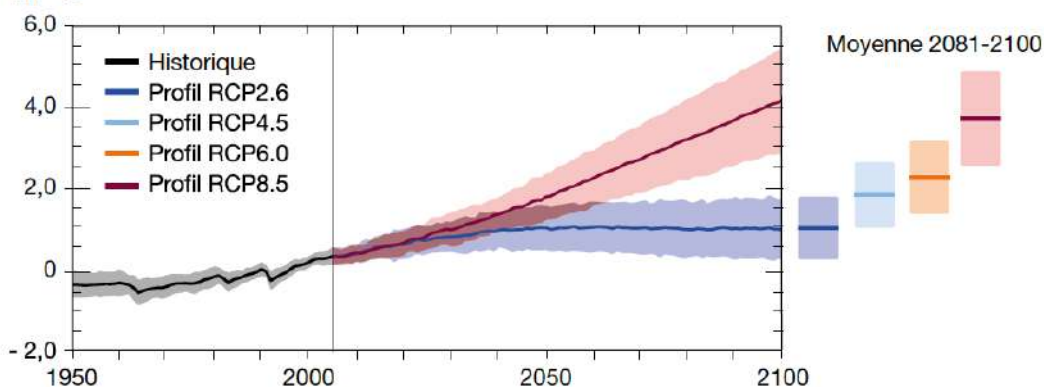
Sources : NASA ; NOAA ; Hadley Center

## Prévision des hausses de températures 2050-2100<sup>iii</sup>

### ÉVOLUTION DES TEMPÉRATURES ET NIVEAU DES MERS SUIVANT LES SCÉNARIOS DU GIEC

#### Projection de la variation de température moyenne mondiale suivant différents scénarios

En °C



Note : variation de la température par rapport à la période 1986-2005.

Source : Giec, 1<sup>er</sup> groupe de travail, 2013

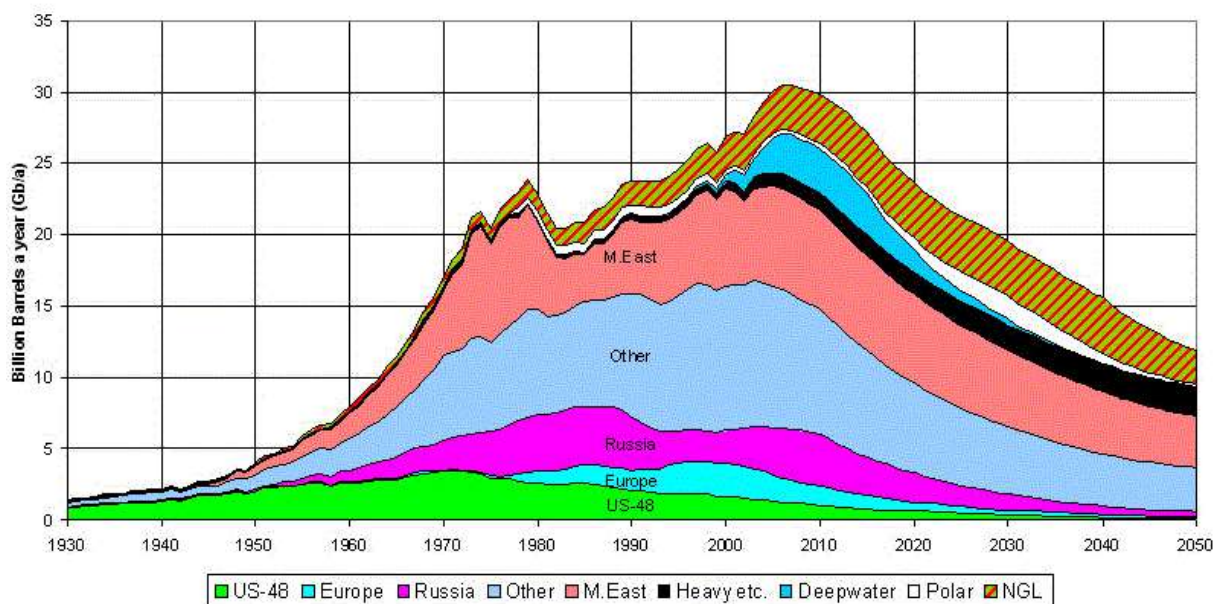
Selon le rapport Breakthrough du National Centre for Climate Restoration de mai 2019<sup>iv</sup>, au-delà de 3 °C de hausse de température en 2050, le dérèglement climatique aura des conséquences irrémédiables sur le climat et les conditions de vie de la population mondiale. Certains experts tablent plutôt sur 2100 au lieu de 2050. Mais si rien n'est entrepris dans les 10 années qui viennent les conséquences seront apocalyptiques

"La planète et l'humanité auront atteint un 'point de non-retour' à la moitié du siècle, dans laquelle la perspective d'une Terre largement inhabitable entraînerait l'effondrement des nations et de l'ordre mondial", avancent les auteurs, David Spratt, directeur de recherche à Breakthrough, et Ian Dunlop, ancien cadre de l'industrie des énergies fossiles. Selon eux, il existe "une forte probabilité que la civilisation humaine touche à sa fin" dans trois décennies.

Plus de la moitié de la population mondiale sera exposée à des chaleurs létales au moins 20 jours par an. Et cette météo mortelle persistera plus de 100 jours par an en Afrique de l'Ouest, au Moyen-Orient, en Amérique du Sud et en Asie du Sud-Est. Deux milliards d'habitants seront affectés par le manque d'eau.

## Le pic de production du pétrole

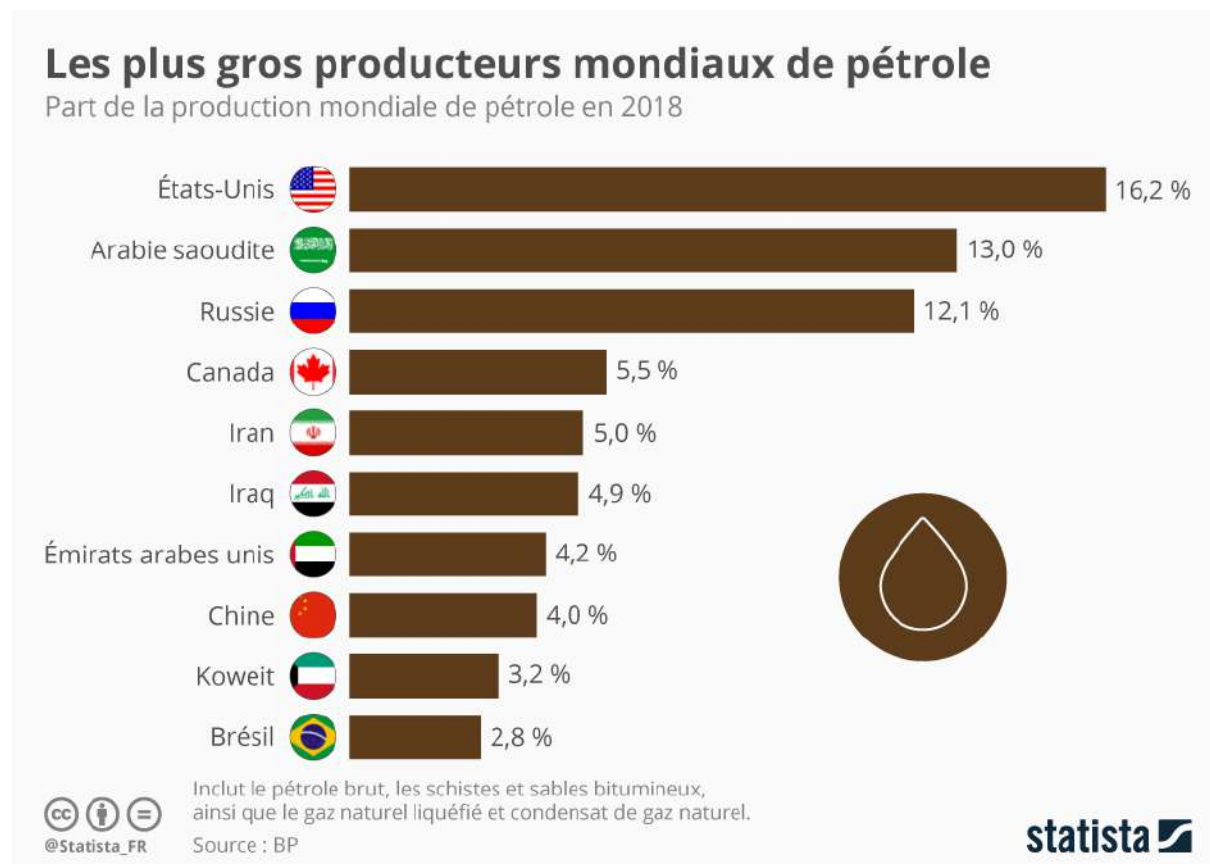
En 2010 selon l'AIE (Agence Internationale de l'Energie), le pic pétrolier mondial devait être atteint en 2006. La découverte de nouvelles techniques d'exploitation de pétrole de schiste a repoussé ce pic pétrolier à 2025.<sup>v</sup>



Graphique source Wikipedia<sup>vi</sup>

Avec le fort déclin des réserves de pétrole en mer du Nord<sup>vii</sup>, en 2035 la France et l'Union Européenne couvriront leurs besoins énergétiques à 70 % par des produits importés contre 50 % actuellement.<sup>viii</sup>

## La dépendance pétrolière vis-à-vis de puissances étrangères



Source Statista<sup>ix</sup>

La facture pétrolière de la France s'est élevée en 2019 à 35,1 milliards €<sup>x</sup>

La France importe son pétrole principalement :

- D'Afrique pour 33,3 %, dont Nigéria 12,2 % et Algérie 11,7%
- De l'Ex URSS pour 29,4 % dont Russie 12,7 %
- Du Moyen Orient pour 20,9 % dont Arabie Saoudite 14,9 %
- De Mer du Nord pour 7,7 %
- D'autres pour 8,7 %

Source INSEE 2019 <sup>xi</sup>

La majorité de ces pays ne sont pas démocratiques (ici on peut prendre comme critère l'index démocratique que l'on pourra consulter sur le site : <http://democracyranking.org/wordpress/>). Cela induit une relation diplomatique ambiguë entre la France patrie des droits de l'homme et ces dictatures que l'on ménage car elles possèdent les hydrocarbures dont nous avons besoin.



## Le pétrole dans la balance commerciale française

En 2019, la facture des importations en pétrole brut de la France s'est élevée à 21,8 milliards d'euros, auxquels s'ajoutent 13,3 milliards d'euros liés aux produits raffinés, soit un total de 35,1 milliards d'euros. Les importations pétrolières représentent 79,4 % de la facture énergétique française : 44,2 milliards d'euros en 2019<sup>xii</sup>. Elles représentent 58,7 % des 59,8 milliards d'euros du déficit commercial global français en 2019.<sup>xiii</sup>

## Le dilemme CO2 versus le nucléaire

Face aux problèmes évoqués ci-dessus, nous ne pouvons pas en rester à faire de l'incantation.

La vraie question n'est pas si nous aimons ou nous n'aimons pas l'énergie nucléaire. La véritable question est si nous pouvons avoir un monde décarboné, sans recourir à l'énergie nucléaire.

## Les enjeux

Il ne s'agit pas de voir comment nous pourrions produire autant d'énergie issue de notre parc de centrales nucléaire avec des énergies renouvelables. Il s'agit de remplacer la part de l'énergie fossile que nous consommons par de l'énergie produite avec le nucléaire.

De plus, la question n'est pas uniquement de savoir si nous pouvons produire ou non autant d'électricité avec les énergies renouvelables, mais de savoir si on est capable de piloter la production d'électricité en fonction de la demande.

Les énergies renouvelables sont dans l'incapacité de répondre à ce pilotage sauf à construire des capacités de production en surnombre. Augmenter le taux d'énergie produite par les énergies renouvelables impose le renforcement des contraintes à gérer par les autres moyens de production, sauf à trouver de nouveaux utilisateurs à même d'utiliser cette énergie disponible à faible coût.

La question d'une facturation du prix de l'électricité en fonction du prix du KWh et de sa modularité devra se poser.

En outre il faut éviter le risque majeur des coupures de courant généralisées et préjudiciables au fonctionnement de services tels que hôpitaux, ....

A plusieurs reprises, des délestages récents ont été indispensables pour éviter une perte du réseau sur une région voire une partie d'un pays. Les coupures de courants en août 2020 en Californie ont marqué les esprits, avec plus de 2 millions de personnes impactées.<sup>xiv</sup>

La consommation d'énergie finale (au niveau des consommateurs) de 2018 se répartissait comme suit par source primaire d'énergie :

- combustibles fossiles : 67,4 % (charbon 1,9 %, pétrole 44,0 %, gaz naturel 21,5 %) ;
- nucléaire : 17,7 % ;
- énergies renouvelables : 14,9 % (biomasse-déchets 9,8 %, hydraulique 3,0 %, éolien 1,2 %, solaire 0,5 % (essentiellement photovoltaïque), autres 0,3 %).

L'électricité ne représentait que 25 % de la consommation finale d'énergie en France en 2018. Elle provenait en 2019 pour 69,9 % du nucléaire, pour 21,1 % de sources d'énergies renouvelables (production hydroélectrique : 10,9 %, éolien : 6,1 %, solaire : 2,0 %, bioénergies : 2,0 %) et pour 9 % de centrales thermiques fossiles (surtout gaz : 6,7 %).<sup>xv</sup>

C'est donc 75% de l'énergie consommée qu'il faut aussi décarboner. Affronter le double challenge de remplacer à la fois les énergies fossiles et le nucléaire est un pari non raisonnable.

## L'exemple énergétique allemand

L'Allemagne est un pays comparable à la France. L'Allemagne a une superficie comparable : 357 386 km<sup>2</sup> versus 643 801 km<sup>2</sup>, avec une population comparable 83 millions d'habitants versus 67 millions d'habitants.

Nous ne pouvons pas comparer la France avec un petit pays qui aurait des ressources naturelles importantes par rapport à la population comme la Suisse et la Norvège avec leur réserve hydro électrique ou le Danemark avec sa réserve éolienne.

la région de la Ruhr ou celle de l'Île-de-France sont d'immenses conurbations, énergivores n'ayant pas de ressources naturelles à proximité.

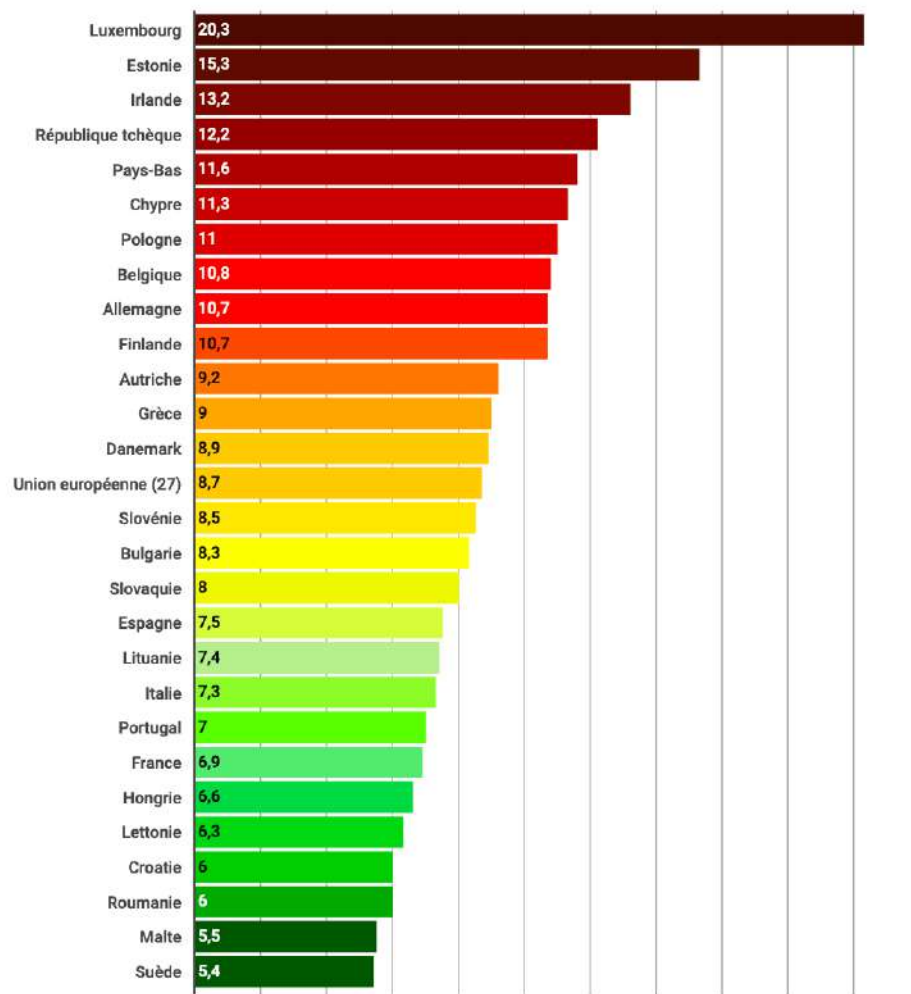
Regardons le bilan énergétique de l'Allemagne sur les dernières années. En 2011, suite à l'accident de Fukushima l'Allemagne a fait le choix de sortir du nucléaire. 10 ans après il est temps de faire un bilan, après le soutien massif des énergies renouvelables 408 milliards € de 2000 à 2025<sup>xvi</sup>

Le bilan carbone est sans appel :

- Pays sans nucléaire Allemagne 10,7 t CO<sub>2</sub> / habitant, Pays-bas 11,6 t CO<sub>2</sub> / habitant
- Pays avec nucléaire France 6,9 t CO<sub>2</sub> / habitant, Suède 5,4 t CO<sub>2</sub> / habitant

## Émissions de gaz à effet de serre dans l'Union européenne (2018, en tCO2e/habitant)<sup>xvii</sup>

Emissions de gaz à effet de serre dans l'Union européenne (2018, en tCO2e/habitant)



L'indicateur mesure les émissions de gaz à effet de serre dans chaque Etat membre en tonnes équivalent CO2 (tCO2e), incluant l'aviation et excluant l'utilisation des terres (LULUCF), qui fait l'objet d'une comptabilité à part.

Source : Eurostat, Agence européenne de l'environnement

toute  
l'europe  
Comprendre l'Europe

Le constat est simple: si les pays européens avaient copié la France et avaient suivi son exemple, ils auraient pu diviser par deux leurs émissions de CO2.

La réalité est cynique : en sortant du nucléaire les allemands ont basculé sur le charbon pour produire de l'électricité et maintenant ils disent faire des efforts en le remplaçant par le gaz, avec la construction pipeline Nord Stream et en augmentant leur dépendance de la Russie. Mais in fine, l'Allemagne émet quasiment deux fois plus de CO2 par habitant que la France.

En conclusion, il faut remarquer le pragmatisme du Royaume-Uni qui lancé un grand programme de construction de centrales nucléaire : Hinkley Point et le projet de centrale nucléaire de Sizewell.<sup>xviii</sup>  
Le pragmatisme est identique en Chine avec mise en service de 19 GW nucléaires d'ici 2026, pour atteindre une capacité de 70 GW.

## La bonne approche sur l'énergie nucléaire : l'analyse risque -gravité

Dans le domaine de la gestion des risques, nucléaire ou non, l'évaluation des risques est l'ensemble des méthodes consistant à calculer la criticité (pertinence et gravité) des dangers.<sup>xix</sup>

Elle vise outre à les quantifier, à qualifier les dangers (qui doivent donc préalablement avoir été identifiés). Elle se base sur « ...l'utilisation de faits scientifiques pour définir les effets sur la santé d'une exposition d'individus ou de populations à des matériaux ou à des situations dangereuses »

Dans ce domaine, on se restreint à l'étude du risque aryétique, c'est-à-dire en ne considérant que les événements à conséquences négatives.

Dans la mesure du possible on s'attache à obtenir des indices de risque (ou quotient de risque) traduits en valeurs chiffrées, pour classer en les hiérarchisant les risques afin de pouvoir prioriser les mesures à prendre pour réduire les risques et/ou atténuer leurs conséquences ou rendre le risque acceptable. On parle d'évaluation chiffrée du risque, ou en anglais quantitative risk assesment (QRA).

La criticité est cette valeur chiffrée, souvent décomposée en plusieurs paramètres :

- fréquence ;
- effectif exposé ;
- gravité ;
- niveau de maîtrise ;

La criticité est alors le produit des valeurs de ces paramètres.

## L'expérience de Fukushima en 2011

Si nous avons une approche non émotionnelle de cette catastrophe, nous en tirons deux leçons :

- 1<sup>ière</sup> leçon : le risque d'une catastrophe nucléaire n'est pas nul même dans un pays maîtrisant la technologie occidentale.
- 2<sup>ième</sup> leçon : ce n'est qu'un accident, qui n'a pas plongé le Japon dans un hiver nucléaire ou dans un paysage d'Hiroshima
- 

Si le risque n'est peut-être pas de zéro, la gravité n'est pas l'infini non plus.

Tout décès est insupportable, mais nous avons le droit de comparer les morts du nucléaire avec ceux du charbon.

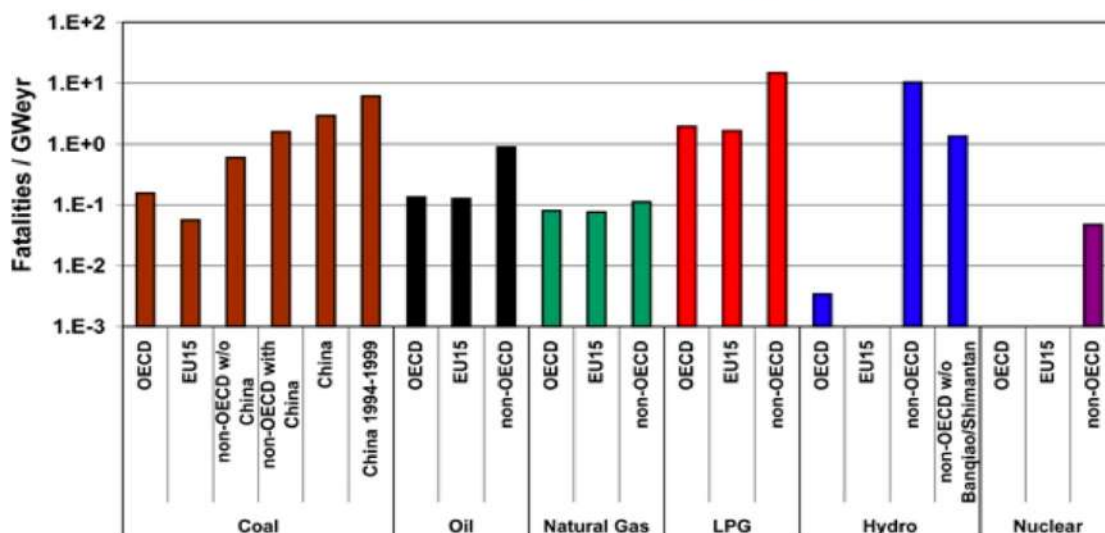
Sur cette infographie, vous pouvez constater que l'ensemble des décès par GW d'électricité produite du charbon, gaz et barrage hydraulique dépasse largement ceux du nucléaire.<sup>xx</sup>

*B.W. Brook et al. / Sustainable Materials and Technologies 1-2 (2014) 8-16*

Table 5

Comparison of energy-related damage (fatalities per gigawatt year), based on historical experience of severe accidents that occurred in OECD countries, non-OECD countries and EU-15 (fifteen European countries).

Source: Paul Scherrer Institut, Technology Assessment, Risk Assessment, <http://gabe.web.psi.ch/research/ra>.



## De nouvelles exigences en terme sûreté nucléaire

La probabilité et les conséquences d'un accident nucléaire sont limitées par le renforcement des exigences à respecter, en termes de sûreté pour le nucléaire :

- Une analyse permanente des écarts, incidents et accidents survenus sur l'ensemble des sites nucléaires conduites par les exploitants et par les Autorités de Sûreté. Ainsi de nouvelles exigences ont été imposées suites aux accidents de Tchernobyl et de Fukushima. Elles ont été mises en œuvre ou sont en voie de l'être. Ce type d'exigences contribuent au coût du grand carénage des tranches en exploitation et aux difficultés de construction de l'EPR de Flamanville.
- La prise en compte d'un risque d'accident résiduel tant dans les études que dans l'exploitation des tranches (type plan ORSEC) pour lequel des moyens spécifiques sont prévus.
- L'étude des situations accidentelles avec la mise en œuvre de méthodes et de moyens spécifiques, ainsi que la formation des exploitants sur simulateurs
- Une organisation (type plan ORSEC) regroupant toutes les compétences disponibles tant au niveau national que local et dont l'efficacité est mise à l'épreuve par des exercices opérationnels mensuels.
- La mise en œuvre d'un "commando" du nucléaire (FARN Force d'Action Rapide du Nucléaire) dont la mission est d'apporter un appui externe à un site en difficulté pour retrouver les appoints en eau et en électricité. Ces appoints sont fondamentaux dans la maîtrise des conséquences d'un accident nucléaire au-delà de 24h (délais pendant lequel, les moyens internes au site sont suffisants). Ce sont eux qui ont fait défaut à Fukushima en moins de 24h. Cette force est pleinement disponible en moins de 24h, quelles que soient les circonstances. Une technique dont l'efficacité est mise à l'épreuve par des exercices opérationnels.
- Un atout avec une Autorité de Sûreté indépendante qui fait autorité et qui contrôle des Sites de production et des Bureaux d'Ingénierie



## La gestion des déchets

La question des déchets est aussi utilisée pour disqualifier la filière nucléaire avec un raccourci que nous allons expliquer.

La question n'est pas d'éluider le problème mais de le qualifier pour voir s'il est gérable ou pas.

Il s'agit d'analyser l'impact vis-à-vis d'autres problèmes créés par notre mode de vie comme le CO2 mais aussi le recyclage des batterie Lithium Ion pour nos voitures électriques.

Le postulat de départ de ceux qui veulent disqualifier le nucléaire :  
 Le nucléaire produit des déchets fortement radioactif et radioactif pendant des millions d'année. Cela est vrai mais pas en même temps. Ce qui est fortement radioactif ne l'est pas sur une longue durée  
 Il faut rentrer dans le détail des différents types de déchets <sup>xxi</sup>

		PÉRIODE		
		Vie très courte (Période < 100 jours)	Vie courte (Période ≤ 31 ans)	Vie longue (Période > 31 ans)
ACTIVITÉ	Très faible activité (TFA)	<b>Gestion par décroissance radioactive sur le site de production</b> puis évacuation dans les filières conventionnelles	<b>Stockage de surface</b> (Centre industriel de regroupement, d'entreposage et de stockage - Cires)	
	Faible activité (FA)		<b>Stockage de surface</b> (Centre de stockage de l'Aube - CSA)	<b>Stockage à faible profondeur</b> (à l'étude dans le cadre de la loi du 28 juin 2006)
	Moyenne activité (MA)			
	Haute activité (HA)		<b>Stockage réversible profond</b> (à l'étude dans le cadre de la loi du 28 juin 2006)	

**Bilan et évolution des volumes (m<sup>3</sup>) de déchets déjà stockés ou destinés à être pris en charge par l'Andra**

Catégorie de déchets radioactifs	Stock à fin 2019	Évolution 2019-2018
HA	4 090	+ 200
MA-VL	42 700	- 200
FA-VL	93 600	- 100
FMA-VC	961 000	+ 17 000
TFA	570 000	+ 13 000
DSF	620	- 725
Total	~ 1 670 000	~ + 30 000

Il existe une multitude de types de déchets radioactif

Ces déchets sont traités de manière à réduire leur volume et à les 'stabiliser' si nécessaire puis de les conditionner pour pouvoir ensuite les stocker définitivement dans un centre de stockage.

Il faut donc distinguer :

- Les déchets de faible ou moyenne activité à vie courte (FMA-VC), stockés de façon rigoureuse dans un site de stockage de surface, comme le centre de stockage de l'Aube ouvert en 1992.
- 
- Les déchets de haute activité à vie longue qui se subdivisent en deux catégories : ceux qui sont de moyenne activité, les MA-VL et ceux qui sont de haute activité, les HA. Pour ces déchets, un stockage réversible en formation géologique profonde est à l'étude (projet CIGEO, dans un milieu argileux).

Après études de toutes les options envisageables pour l'élimination définitive de ces déchets à haute activité la seule solution parfaitement sûre est celle d'un stockage définitif dans une formation géologique profonde (stabilité prouvée sur des échelles géologiques, absence ou circulation d'eau très limitée, éloignement de toute ressource naturelle potentielle, etc.).

Un tel site ouvert en 1999 est opérationnel aux États Unis : le WIPP (pour « Waste Isolation Pilot Plant »). Les déchets y sont stockés définitivement dans des galeries percées à 650 m de profondeur dans une formation géologique qui n'a pas bougé depuis 225 millions d'années

Les déchets radioactifs à haute activité à vie longue sont conditionnés dans des « colis standards de déchets vitrifiés » (CSDV). Le volume de ces colis pour l'ensemble des centrales en exploitation est de l'ordre de 140m<sup>3</sup>/an et de l'ordre de 3650m<sup>3</sup> depuis le démarrage des tranches nucléaires.

Les déchets radioactifs sont-ils dangereux et pour combien de temps ? la radioactivité d'un élément est divisée par 2 à l'issue de sa demi-vie radioactive : ainsi la radioactivité du césium dont la demi vie est de 30 ans voit sa radioactivité divisée par mille au bout de 1000 ans.

Ainsi, la radiotoxicité potentielle des déchets nucléaires de haute activité (qui rassemblent 95 % de la totalité de la radioactivité des déchets nucléaires en France) devient inférieure à celle de l'uranium naturel après environ 10 000 ans

Cas particulier du plutonium pour lequel la demi-vie radioactive est de plusieurs millions d'années mais qui est recyclé dans les tranches en exploitation

Il existe aussi des zones radioactives « naturelles », dont les habitants subissent des doses acceptables, comparable à celles que subissent les habitants qui vivent près de gisement d'uranium.

## L'EPR de Flamanville

Les retards et les surcoûts constatés lors de la construction de l'EPR de Flamanville ne remettent pas en cause le bien-fondé de cette nouvelle filière : 2 tranches EPR construites en collaboration entre EDF et la Chine ont démarré en 2018 à Taishan bien que leur construction ait commencé 2 ans après celle de l'EPR de Flamanville.

Pourquoi une telle durée de construction ?

Le rapport<sup>xxii</sup> de Jean-Martin Folz, ancien PDG de Peugeot, sur Flamanville conclut :

- Les délais annoncés initialement (54 mois) étaient totalement irréalistes eu égard aux durées de construction constatées pour la 1ère tranche de Paluel (100 mois), et de la 1ère tranche N4 de Chooz (142 mois) et de la dernière tranche N4 (98 mois). Ces délais étaient d'autant plus irréalistes que la complexité de la conception (liées essentiellement à la prise en compte des nouvelles exigences de sûreté), et partant de la réalisation, était grandement renforcée pour intégrer les nouvelles exigences de sûreté.
- Une organisation et un pilotage du projet insuffisamment maîtrisée de part la complexité du projet, de la multiplicité des acteurs et du partenariat avec Siemens et de la volonté d'EDF de vouloir maîtriser les rôles de maître d'ouvrage et de maître d'œuvre
- De pertes généralisées de compétences tant pour la gestion de grands projets, la fabrication de matériels nucléaires voire de leur contrôle.

Pendant la vingtaine d'années depuis la réalisation des dernières centrales, les spécialistes, pour ceux qui ne sont partis en retraite, se sont réorientés vers d'autres branches d'activité. C'est particulièrement marqué pour les ressources en technique et réalisation de soudage qui nécessitent d'anticiper les longues formations nécessaires à leur qualification. Il faut noter que la Chine a construit régulièrement des réacteurs depuis 20 ans et le contexte industriel a été présent pour assurer les fournitures et la main d'œuvre qualifiée

- L'impact de la modification de la réglementation sur les appareils à pression avec l'arrêté ESPN de 2005 extrêmement contraignant dont les modalités d'application n'ont été explicitées que progressivement (guides de 2009 et 2012, révision de l'arrêté en 2015 et codification en 2018) alors que les fabrications étaient en cours et que les fournisseurs devaient faire face à des exigences fluctuantes. L'illustration en est la question du couvercle de cuve qui n'a été réglée transitoirement que 12 ans après le forgeage des fonds bombés et qu'EDF devra probablement remplacer au premier arrêt du réacteur

-  
Le problème de la construction de l'EPR de Flamanville n'est donc pas le conceptuel : le même réacteur a été mis en service en Chine.

Nous avons toutefois un problème, celui du coût d'une tranche. 13 G€ estimé en France, 12 G€ / tranche à Taishan en Chine, où 2 EPR français sont raccordés au réseau depuis 2018.

Pour rappel les 4 dernières tranches N4 à 1450 MW, à Chooz et à Civaux, ont coûté 1,5 G € / tranche.

Le problème fondamental a été le suivant : à force de courir après la sûreté, nous avons empilé des redondances, des contrôles, de la complexité donc des coûts qui sont en train de tuer la filière PWR française.

EDF, dans une coentreprise avec Framatome, Edvance, a pour but est de faire baisser le coût de construction de l'EPR en mettant au point l'EPR2. Pour rappel, l'essentiel du coût du kWh nucléaire, comme pour le renouvelable éolien et photovoltaïque, c'est le CAPEX de construction, et pas le combustible, d'un coût mineur pour le nucléaire, gratuit pour le vent et le soleil.

A Taishan en Chine le creusement des fondations des EPR a démarré fin août 2008. Les deux réacteurs EPR, d'une puissance de 1660 MWe net chacun, sont en construction respectivement depuis octobre 2009 et avril 2010. La construction de chaque réacteur était prévue pour durer 52 mois<sup>10</sup> (environ 4,5 ans), nettement plus rapide et moins chère que les deux EPR en construction en Finlande à Olkiluoto et en France à Flamanville. Les réacteurs ont été mis en service en 2018.

La compétence en France peut être reconstruite. Le conflit EDF Areva doit servir de leçon, cf. Rapport de la Cour des Comptes sur la Filière EPR d'août 2020. <sup>xxiii</sup>

## Conclusion

Pour l'avenir des générations futures et la filière énergétique française, il s'agit de choisir entre CO2 et nucléaire.

Sortir à la fois du nucléaire et des énergies fossiles relève de la pensée magique (wishfull thinking) où il suffirait que les scientifiques et industriels trouvent des solutions.

Ce rêve est généralement exprimé par des personnes n'ayant aucune formation scientifique.

Le nucléaire est gérable que ce soit au niveau des risques que des déchets

S'il faut décider entre nucléaire et CO2 : mieux vaut choisir le nucléaire.

## Un monde sans énergie fossile

L'hydrogène est le complément indispensable de l'électricité.

\*

Pour sortir de l'énergie fossile il faut remplacer les hydrocarbures dans toutes les applications.

Le problème est que l'électricité se stocke mal : pas d'espoir de « miracle ». Le tableau périodique des éléments est fini, limité. Pour les batteries de nos voitures 100 % électriques, nous utilisons déjà le meilleur élément, en haut à gauche, le lithium. La science ne permet pas d'entrevoir des solutions nouvelles, mais juste une amélioration incrémentale de nos batteries, notamment les électrodes sans en changer le principe.

Pour un certain nombre d'application la taille et le poids des batteries est rédhibitoire pour avoir l'autonomie voulue :

- Train
- Avion
- Bateaux (porte conteneurs)
- Camion / Bus
- 

Même la voiture électrique a toujours un problème sur l'autonomie et de temps de charge.\*

La durée de vie et le recyclage des batteries au lithium sont des sujets non maîtrisés à ce jour.

Une solution serait une voiture hybride électrique batterie lithium et pile à combustible Hydrogène .

Plus le véhicule est lourd et nécessite de l'autonomie, plus c'est impossible avec des batteries au Lithium ?

Les trains électriques pile à combustible Hydrogène H2 sont déjà au stade du déploiement commercial, notamment le train Alstom Corodia iLint<sup>xxiv</sup>



Pour rappel 70 % des lignes de chemin de fer dans le monde ne sont pas électrifiées. Un déploiement de train hydrogène pour remplacer les trains utilisant des locomotives au diesel serait plus rentable que de déployer des lignes électrifiées pour les voies non équipées.



Airbus a lancé un programme d'avions à Hydrogène<sup>xxv</sup>

Introducing Airbus ZEROe

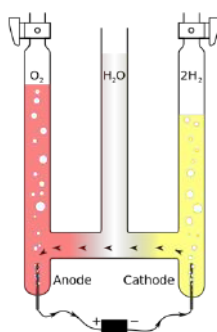
Turboprop		 <b>&lt;100</b> Passengers	 <b>1,000+nm</b> Range
		 Hydrogen Hybrid Turboprop Engines (x 2)	 Liquid Hydrogen Storage & Distribution System
Blended-Wing Body		 <b>&lt;200</b> Passengers	 <b>2,000+nm</b> Range
Turbofan		 Hydrogen Hybrid Turbofan Engines (x 2)	 Liquid Hydrogen Storage & Distribution System

**AIRBUS**

Enfin l'hydrogène est nécessaire pour remplacer les hydrocarbures dans certains processus industriels comme la production d'acier<sup>xxvi</sup>

## La production de H<sub>2</sub> décarboné. Production de H<sub>2</sub> par électrolyse

Nous pouvons remplacer la production actuelle de l'Hydrogène faite à partir de méthane (vaporeformage) en produisant de l'Hydrogène par électrolyse de l'eau



Le problème de la production en masse d'hydrogène par électrolyse est le rendement et le coût.

Les coûts de production de l'hydrogène par électrolyse de l'eau oscillent entre 2,5 € et 6,8 € le kilo contre moins de 1,5 à 2 € le kilo d'hydrogène produit par vaporeformage de méthane (CH<sub>4</sub>)

## H<sub>2</sub> est complémentaire des énergies renouvelables

Malgré le mauvais rendement, la production et le stockage d'hydrogène est un moyen de stocker de l'électricité "fatale", c'est-à-dire l'électricité produite par l'éolien s'il y a beaucoup de vent ou le photovoltaïque quand il y a beaucoup de soleil. Le coût est nul voire négatif, si bien sûr le réseau électrique de distribution (Enedis) et de transport (RTE) est en capacité à écouler cette électricité fatale depuis les sites de production vers les électrolyseurs.

Comme nous ne pouvons pas stocker l'électricité et que les productions éolienne et solaire d'électricité sont intermittentes, absence de vent et la nuit, la production d'hydrogène par électrolyse est une solution évidente.

Le couple gagnant co generation H2 / nucléaire.

Électrolyse à haute température augmente le rendement

A haute température (800°C) le rendement d'électrolyse de l'eau devient intéressant. Le CEA a projeté un coût de production de 2,5 € le kilo d'hydrogène.<sup>xxvii</sup>

Avant l'arrêt des recherches, l'Allemagne était en pointe sur le domaine. Heureusement, le CEA en France a préservé sa recherche et ses programmes associés

Co génération d'Hydrogène – Nucléaire

Par principe une centrale nucléaire fournit de l'électricité et produit de la chaleur

Des projets sont déjà en cours avec les nouvelles centrales en cours de développement aux Etats-Unis, comme le projet Nuscale Power<sup>xxviii</sup>, qui prévoit de la cogénération d'hydrogène<sup>xxix</sup>

Mais nous pouvons faire mieux avec les centrales du futur, type 4 nativement à haute température, comme le concept à haute température de Framatome<sup>xxx</sup>

Le coût de production de l'hydrogène pourrait alors être compétitif<sup>xxxi</sup>.

Cependant, compte tenu du niveau de développement de cette filière, passer des prototypes à des réacteurs déployables industriellement nécessitera encore 30 à 40 ans.

Compte tenu de la maturité des réacteurs EPR2, disponibles au travers de la co-entreprise Edvance entre EdF et Framatome, la meilleure décision à prendre aujourd'hui est de lancer la construction de plusieurs de ces réacteurs EPR2 sur des sites nucléaires existants, et d'y associer des installations de production d'hydrogène par électrolyse.

## Conclusion : La France peut devenir le leader mondial de l'énergie Hydrogène et électrique

La France a tous les atouts si elle ne se laisse pas dépasser par les autres pays comme les Etats-Unis, la Chine et la Russie. La France a une expertise nucléaire, recherche et filière industrielle intégrée, unique au monde. Mais la France a mis sur pause son ambition. L'arrêt du programme de recherche Astrid est symbolique de ce renoncement politique.

Les Chinois et les Russes continuent leurs programmes de recherche sur les centrales à neutrons rapide refroidies au sodium de IV ème génération.<sup>xxxii</sup>

Il n'est pas trop tard pour la France. Les Allemands nous laissent la place vide par idéologie, et nous invitent à être leur fournisseur d'hydrogène, comme nous sommes déjà leur fournisseur d'électricité.

La France doit lancer un programme volontaire comme dans les années 70 & 80, quand nous avons construit notre parc de centrales nucléaires, en concentrant les moyens là où nous avons des atouts : réacteurs EPR2 avec du combustible MOX multirecyclé, puis relancer à horizon 2030 le développements de réacteurs surgénérateurs à neutrons rapides.

## Notes et Références

---

<sup>i</sup> « Consommation mondiale d'énergie 1800-2000 : les résultats » MARTIN-AMOUROUX Jean-Marie - 2015 1214 - Encyclopédie de l'Énergie

<https://www.encyclopedie-energie.org/consommation-mondiale-denergie-1800-2000-les-resultats/>

<sup>ii</sup> Page 11 "Chiffres clés du climat - France, Europe et Monde - Édition 2021 - Datalab no 81 - Décembre 2020 - Ministère de la Transition Écologique"

[https://www.statistiques.developpement-durable.gouv.fr/sites/default/files/2020-12/datalab\\_81\\_chiffres\\_cles\\_du\\_climat\\_edition\\_2021.pdf](https://www.statistiques.developpement-durable.gouv.fr/sites/default/files/2020-12/datalab_81_chiffres_cles_du_climat_edition_2021.pdf)

<sup>iii</sup> Page 20 "Chiffres clés du climat - France, Europe et Monde - Édition 2021 - Datalab no 81 - Décembre 2020 - Ministère de la Transition Écologique"

[https://www.statistiques.developpement-durable.gouv.fr/sites/default/files/2020-12/datalab\\_81\\_chiffres\\_cles\\_du\\_climat\\_edition\\_2021.pdf](https://www.statistiques.developpement-durable.gouv.fr/sites/default/files/2020-12/datalab_81_chiffres_cles_du_climat_edition_2021.pdf)

<sup>iv</sup> « Dérèglement climatique : la fin du monde est-elle vraiment pour 2050 ? » Benoît Jourdain - Benoît Zagdoun - 2019 0930 - France Info TV

[https://www.francetvinfo.fr/meteo/climat/dereglement-climatique-la-fin-du-monde-est-elle-vraiment-prevue-pour-2050\\_3488261.html](https://www.francetvinfo.fr/meteo/climat/dereglement-climatique-la-fin-du-monde-est-elle-vraiment-prevue-pour-2050_3488261.html)

et Rapport Breakthrough-National Centre for Climate Restoration Mai 2019

[https://docs.wixstatic.com/ugd/148cb0\\_90dc2a2637f348edae45943a88da04d4.pdf](https://docs.wixstatic.com/ugd/148cb0_90dc2a2637f348edae45943a88da04d4.pdf)

<sup>v</sup> Global Energy Review 2021 IEA

<https://www.iea.org/reports/global-energy-review-2021>

<sup>vi</sup> Pic pétrolier sur Wikipedia

[https://fr.wikipedia.org/wiki/Pic\\_p%C3%A9trolier](https://fr.wikipedia.org/wiki/Pic_p%C3%A9trolier)

<sup>vii</sup> « La mer du Nord suscite toujours l'appétit des pétroliers » Vincent Collen - 2019 1008 -

Les Echos <https://www.lesechos.fr/industrie-services/energie-environnement/la-mer-du-nord-suscite-toujours-lappetit-des-petroliers-1138066>

<sup>viii</sup> Livre vert sur la sécurité d'approvisionnement énergétique 29 novembre 2000

<https://eur-lex.europa.eu/legal-content/FR/TXT/?uri=LEGISSUM%3A127037>

<sup>ix</sup> « Les plus gros producteurs mondiaux de pétrole » de Tristan Gaudiaut - 2019 0917 –

Statista.com <https://fr.statista.com/infographie/19382/plus-gros-producteurs-de-petrole-brut-dans-le-monde/>

---

<sup>x</sup> Bilan énergétique de la France pour 2019 - Ministère de la Transition Écologique  
<https://www.statistiques.developpement-durable.gouv.fr/bilan-energetique-de-la-france-pour-2019>

<sup>xi</sup> Provenances du pétrole brut importé en France Données annuelles de 1973 à 2019 INSEE 2020 0811  
<https://www.insee.fr/fr/statistiques/2119697>

<sup>xii</sup> « D’où vient le pétrole brut importé en France ? » - 2020 1118 - Connaissances des Energies.org  
<https://www.connaissancedesenergies.org/d-ou-vient-le-petrole-brut-importe-en-france-120209>

<sup>xiii</sup> « Le commerce extérieur de la France s’améliore en 2019 » Vie-Publique.fr de DILA (Direction de l’information légale et administrative), rattachée aux services du Premier ministre.  
<https://www.vie-publique.fr/en-bref/273282-le-commerce-exterieur-de-la-france-sameliore-en-2019>

<sup>xiv</sup> « En Californie, la canicule entraîne des coupures de courant pour deux millions de personnes » - Hortense Goulard – 2020 0817 – Les Echos  
<https://www.lesechos.fr/monde/etats-unis/en-californie-la-canicule-entraîne-des-coupures-de-courant-pour-deux-millions-de-personnes-1232932>

<sup>xv</sup> « Énergie en France » sur Wikipédia  
[https://fr.wikipedia.org/wiki/%C3%89nergie\\_en\\_France](https://fr.wikipedia.org/wiki/%C3%89nergie_en_France)

<sup>xvi</sup> « Énergies renouvelables : de nombreux défis » - 2021 0503 – Allemagne Energies.com  
<https://allemagne-energies.com/energies-renouvelables/>

<sup>xvii</sup> « Les émissions de gaz à effet de serre dans l'Union européenne » Arthur Olivier – 2021 0330 \* Toute l’Europe.eu  
<https://www.touteurope.eu/environnement/les-emissions-de-gaz-a-effet-de-serre-dans-lunion-europeenne/>

<sup>xviii</sup> « Programme nucléaire du Royaume-Uni » sur Wikipédia  
[https://fr.wikipedia.org/wiki/Programme\\_nucl%C3%A9aire\\_du\\_Royaume-Uni](https://fr.wikipedia.org/wiki/Programme_nucl%C3%A9aire_du_Royaume-Uni)

<sup>xix</sup> « Évaluation des risques » sur Wikipedia  
[https://fr.wikipedia.org/wiki/%C3%89valuation\\_des\\_risques](https://fr.wikipedia.org/wiki/%C3%89valuation_des_risques)

---

<sup>xx</sup> Why nuclear energy is sustainable and has to be part of the energy mix – 2014 11 – Scien Direct

<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2214993714000050#s0035>

<sup>xxi</sup> « Bilan et évolution des volumes (m3) de déchets déjà stockés ou destinés à être pris en charge par l'Andra »

<https://inventaire.andra.fr/les-donnees/les-dechets-radioactifs/dechets-radioactifs-bilan-fin-2019>

<sup>xxii</sup> La construction de l'EPR de Flamanville – Jean-Martin Folz – octobre 2019

[https://minefi.hosting.augure.com/Augure\\_Minefi/r/ContenuEnLigne/Download?id=104AF2DA-FA4D-4BED-B666-4D582E2C7A8A&filename=1505%20-Rapport%20Flamanville%20pdf.pdf](https://minefi.hosting.augure.com/Augure_Minefi/r/ContenuEnLigne/Download?id=104AF2DA-FA4D-4BED-B666-4D582E2C7A8A&filename=1505%20-Rapport%20Flamanville%20pdf.pdf)

<sup>xxiii</sup> « Rapport sur la filière EPR » Cour des Comptes - août 2020

<https://www.ccomptes.fr/system/files/2020-08/20200709-rapport-filiere-EPR.pdf>

<sup>xxiv</sup> Train à hydrogène sur Wikipedia

[https://fr.wikipedia.org/wiki/Train\\_%C3%A0\\_hydrog%C3%A8ne](https://fr.wikipedia.org/wiki/Train_%C3%A0_hydrog%C3%A8ne)

<sup>xxv</sup> « Airbus reveals new zero-emission concept aircraft » Airbus 2020 0920

<https://www.airbus.com/newsroom/press-releases/en/2020/09/airbus-reveals-new-zeroemission-concept-aircraft.html>

<sup>xxvi</sup> Une nouvelle usine d'acier décarboné en projet en Suède – AFP - 2021 0223

<https://www.connaissancedesenergies.org/afp/une-nouvelle-usine-dacier-decarbone-en-projet-en-suede-210223>

<sup>xxvii</sup> page 8 « Dossier de presse Les technologies de l'hydrogène au CEA » CEA – Mai 2012

<https://www.cea.fr/Documents/Les%20technologies%20de%20l%20E2%80%99hydrog%C3%A8ne%20au%20CEA.pdf>

<sup>xxviii</sup> <https://www.nuscalepower.com/projects>

<sup>xxix</sup> <https://www.nuscalepower.com/environment/clean-hydrogen-production>

<sup>xxx</sup> [https://www.framatome.com/EN/us\\_platform-3225/framatome-htgr.html](https://www.framatome.com/EN/us_platform-3225/framatome-htgr.html)

<sup>xxxi</sup> « Load following of Small Modular Reactors (SMR) by cogeneration of hydrogen: A techno-economic analysis” Science Direct – 2018 0401

<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0360544218300471>

<sup>xxxii</sup> “RAPPORT D'ENSEMBLE SUR LA TECHNOLOGIE NUCLÉAIRE » IAEA septembre 2020

[https://www.iaea.org/sites/default/files/gc/gc64-inf2\\_fr.pdf](https://www.iaea.org/sites/default/files/gc/gc64-inf2_fr.pdf)