



VOIE GÉNÉRALE

2^{DE}

1^{RE}

T^{LE}

Enseignement scientifique

ENSEIGNEMENT
COMMUN

L'ESSENTIEL SUR L'ÉNERGIE NUCLÉAIRE

Ce document résume les principales problématiques liées à la production d'énergie électrique à partir d'énergie nucléaire*. Après avoir rappelé le principe de cette transformation d'énergie, il présente de façon factuelle les principales données statistiques et économiques permettant d'analyser de façon globale les avantages et les inconvénients de cette source d'énergie.

Mots-clés

Conversion d'énergie, énergie nucléaire, déchets nucléaires, fission.

Références au programme

Thème 2 : Le futur des énergies

Histoire, enjeux, débats : Les enjeux de l'utilisation de l'énergie nucléaire : de la fission à la fusion contrôlée.

2.4 : Choix énergétiques et impacts sur les sociétés

Savoir-faire

Analyser d'un point de vue global les impacts de choix énergétiques majeurs : exemple du nucléaire.

Introduction : les diverses façons de produire de l'électricité

L'essentiel (entre 98 % et 99 %) de l'énergie électrique mondiale est aujourd'hui produit par conversion d'énergie électromécanique et repose sur le phénomène d'induction se produisant dans un alternateur mis en mouvement par une turbine (voir les ressources éducol « La conversion d'énergie mécanique en énergie électrique : fonctionnement d'un alternateur » et « La production et la distribution d'énergie électrique » disponible sur la page éducol [Programmes et ressources en enseignement scientifique - voie GT](#)). La turbine peut être mise en mouvement mécaniquement par un débit d'eau (centrale hydraulique) ou d'air (éolienne), ou par un moteur thermique à vapeur. Dans ce dernier cas, les différents systèmes électriques se différencient par la façon de produire cette vapeur – autrement dit, de faire bouillir de l'eau à partir d'une source de chaleur. Cette source de chaleur est obtenue par combustion du charbon, du pétrole, du gaz, de la biomasse, ou par fission de noyaux d'uranium.

Retrouvez éducol sur



* Une synthèse de Jacques Treiner, physicien, chercheur associé au laboratoire interdisciplinaire des énergies de demain (LIED – Université de Paris), président du Comité des experts du *Shift Project*.

Le photovoltaïque échappe à cette brève description : dans une cellule photovoltaïque, les électrons d'un semi-conducteur absorbent des photons solaires, ce qui les place dans des niveaux d'énergie où ils peuvent se mettre en mouvement et créer un courant électrique.

Parmi les diverses façons de produire de l'électricité, certaines sont dites pilotables, d'autres sont dites intermittentes. Une source est dite pilotable si la production d'électricité peut être humainement contrôlée. Elle est dite intermittente si la production d'électricité dépend d'un phénomène naturel sur lequel on ne peut agir (vent, rayonnement solaire, précipitations). L'énergie nucléaire est une source d'énergie pilotable.

La fission des noyaux atomiques comme source de chaleur

Le phénomène de fission des noyaux a été découvert à Berlin en décembre 1938. Les noms de Lise Meitner, d'Otto Hahn et de Fritz Strassmann sont associés à cette découverte¹. On connaissait depuis le début du XX^e siècle diverses manifestations d'instabilité des noyaux atomiques : radioactivité alpha (émission d'un noyau d'hélium), beta (émission d'un électron) ou gamma (émission d'un photon). Dans une fission, un noyau se divise en deux fragments de tailles voisines en émettant également quelques neutrons. Les deux fragments, électriquement chargés (protons), se repoussent violemment, car ils sont initialement au contact, entrent en collision avec la matière environnante, et leur énergie cinétique est peu à peu transmise de façon désordonnée au milieu. Ce transfert désordonné d'énergie est ce qu'on appelle, à l'échelle macroscopique, une source d'énergie thermique, communément désignée par source de chaleur.

Il s'agit d'une source extrêmement concentrée : lors d'une fission d'un noyau d'uranium, c'est environ 200 MeV d'énergie qui apparaissent. Par comparaison, l'énergie par atome mise en jeu lors d'une combustion (charbon, pétrole ou gaz) est de l'ordre de 1 eV.² Cette énergie apparaît car la masse des participants à une fission ne se conserve pas : la masse des produits de fission est inférieure à la masse du noyau initial, et c'est cette différence de masse qui est l'origine de l'énergie cinétique des fragments, selon la loi $E = \Delta m.c^2$, où Δm désigne la différence de masse entre l'état initial et l'état final.

On désigne par l'expression « concentration de l'énergie » la masse de matière qu'il faut transformer pour produire une quantité donnée d'énergie. Pour faire fonctionner une centrale de 1 GW pendant un an, il faut :

- 27 tonnes d'uranium par an (dont une tonne seulement d'uranium-235 aura fissionné);
- ou 170 tonnes de fuel ou 260 tonnes de charbon à l'heure;
- ou 1200 tonnes d'eau par seconde tombant de 100 m de hauteur;
- ou 5000 éoliennes de 1 MW;
- ou 30 km² de panneaux solaires.

Ces différences énormes de concentration reflètent les propriétés des interactions fondamentales de la matière. Effectuer une transformation nucléaire met en jeu l'interaction forte qui, dans un noyau, est environ 100 fois plus intense que l'interaction électromagnétique, laquelle gouverne les transformations chimiques (combustion). Et l'interaction électromagnétique est elle-même 1040 plus intense que l'interaction gravitationnelle mise en jeu dans un dispositif hydroélectrique.

Retrouvez éducol sur



1. Voir en annexe une note historique sur la découverte de la fission

2. Par exemple, la combustion d'un atome de carbone en gaz carbonique libère 4,1 eV.

Quels sont les noyaux atomiques susceptibles de délivrer de l'énergie par fission ?

Lorsqu'un noyau fissionne après avoir absorbé un neutron, on le dit « fissile ». Le seul noyau existant à l'état naturel qui fissionne à la suite de l'absorption d'un neutron est l'uranium 235, composé de 92 protons et de 143 neutrons. Mais deux autres noyaux, le thorium 232 et l'uranium 238, sont susceptibles de générer, après avoir absorbé un neutron, des noyaux fissiles qui n'existent pas à l'état naturel. L'absorption du neutron est suivie de deux désintégrations bêta. Dans le cas du thorium 232, on obtient d'uranium 233 ; dans le cas de l'uranium 238, on obtient le plutonium 239.

Les noyaux ^{232}Th et ^{238}U sont dits « fertiles ». Les noyaux ^{233}U et ^{239}Pu sont dits « fissiles », comme ^{235}U , cf. tableau ci-dessous.

Les noyaux ^{233}U et ^{239}Pu ne se rencontrent pas dans la nature car ils sont instables. La durée de vie de ^{233}U est de 159 000 ans. Celle de ^{239}Pu est de 24 000 ans. Ils ont sans doute existé au début de la formation du système solaire, il y a 4,56 milliards d'années, mais ils se sont désintégrés depuis. Le minerai d'uranium est constitué des deux isotopes ^{235}U et ^{238}U . La durée de vie du premier est de 700 millions d'années, celle du second de 4,5 milliards d'années. C'est la raison pour laquelle ^{238}U est le plus abondant : 99,3 %. ^{235}U a eu largement le temps de décroître. Sa proportion actuelle dans le minerai est de 0,7 %.

« Fissile » et « Fertile »

Z																				
94																				
93																				
92																				
91																				
90																				

Fig. 1 : Extrait du tableau périodique des éléments. Le seul élément naturel « fissile » par absorption d'un neutron est ^{235}U . ^{232}Th et ^{238}U sont dits « fertiles » : par absorption d'un neutron, suivie de 2 désintégrations bêta, ils donnent ^{233}U et ^{239}Pu , fissiles.

La réaction en chaîne : ralentissement des neutrons et enrichissement du minerai en ^{235}U

Lors d'une fission où un noyau lourd se scinde en deux noyaux de masses plus petites, quelques neutrons sont aussi libérés. Dans le cas de l'uranium 235, de 2 à 3 neutrons sont libérés. Si la matière alentour contient d'autres noyaux d'uranium 235, ceux-ci peuvent fissionner à leur tour, ce qui conduit à une réaction en chaîne.

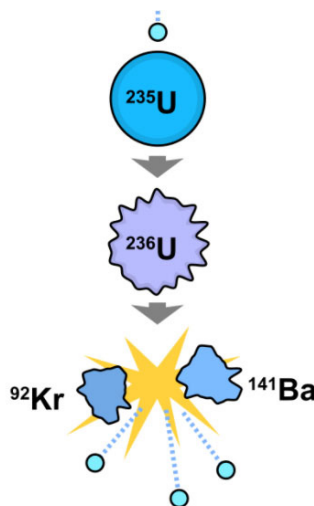


Fig. 2 : Schéma de fission d'un noyau ^{235}U .

Mais nous avons vu que dans le minerai naturel, ^{238}U était beaucoup plus abondant. Un neutron a donc une certaine probabilité d'être capturé par un noyau ^{238}U sans provoquer de fission, ou d'être capturé par ^{235}U et induire une fission selon le schéma ci-dessus. Il se trouve que la probabilité de fission est maximale si les neutrons sont « lents » (leur vitesse est alors de l'ordre de quelques centaines de mètres par seconde). Or les neutrons issus d'une fission sont rapides, leur vitesse est de quelques dizaines de km/s. On doit les ralentir en leur faisant traverser un milieu où les collisions avec les noyaux présents les ralentissent. Dans la grande majorité des réacteurs en service, ce milieu est simplement de l'eau.

Pour augmenter encore la probabilité de fission, on enrichit le minerai en ^{235}U . Cela se fait soit par diffusion gazeuse, soit par ultracentrifugation. Cette deuxième méthode est plusieurs dizaines de fois plus économe en énergie que la diffusion gazeuse.

Comment ça marche ?

Le schéma de fonctionnement d'un réacteur nucléaire à eau pressurisée (REP en français, PWR en anglais) est représenté dans la figure suivante :

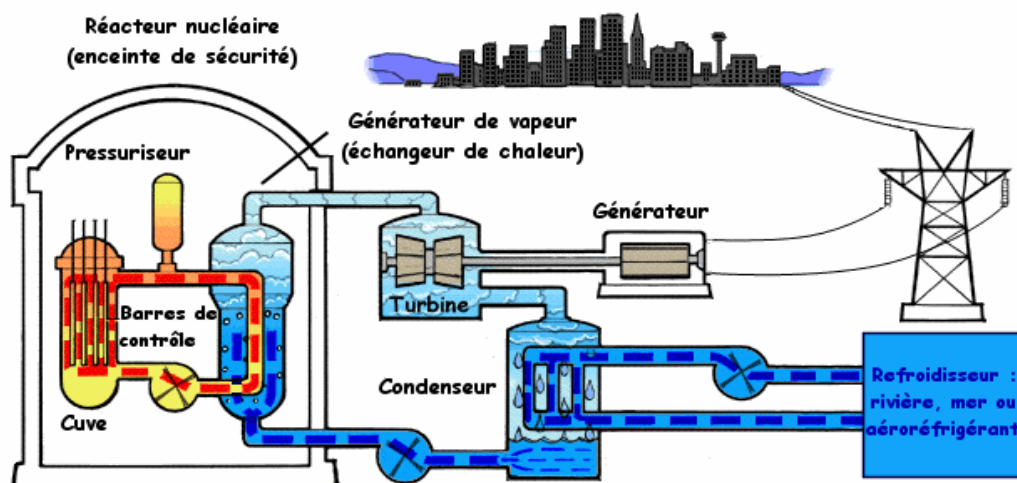


Fig. 3 : Schéma de fonctionnement d'un réacteur nucléaire.
 Noter les 3 circuits d'eau indépendants, en rouge et en bleu.

Les réactions de fission ont lieu dans la cuve, où circule de l'eau sous pression qui sert à la fois de ralentisseur des neutrons et de fluide caloporteur (en rouge). Cette eau ne sort pas de la cuve, car la chaleur est communiquée par contact thermique à un second circuit d'eau (en bleu), où est générée la vapeur qui actionne une turbine couplée à un générateur. L'eau est ensuite refroidie dans le condenseur, par échange de la chaleur résiduelle avec un troisième circuit d'eau. Les trois circuits d'eau sont indépendants.

Retrouvez éducol sur



Question de vocabulaire

Vocabulaire : de G-I à G-IV

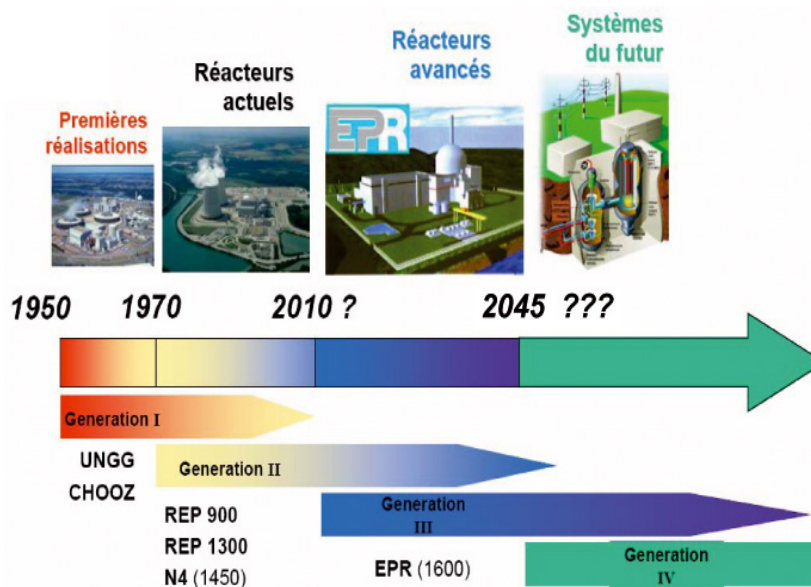


Fig. 4 : Historique des différents types de réacteurs nucléaires.

Les premiers réacteurs (G-I) utilisaient le graphite comme ralentisseur de neutrons et du gaz comme fluide caloporteur. La plupart des réacteurs actuels, dits de seconde génération (G-II) utilisent de l'eau à la fois comme ralentisseur et comme fluide caloporteur. L'EPR représente des réacteurs de troisième génération (G-III), plus puissants et dont la sécurité a été renforcée (double enceinte), de sorte qu'en cas d'accident, aucune radioactivité ne sorte du réacteur. Les réacteurs dits de quatrième génération (G-IV), peu développés aujourd'hui, ont un principe de fonctionnement différent des autres : ils utilisent la totalité du minerai d'uranium, et des neutrons rapides (réacteur à neutrons rapides, RNR). Le matériau fissile est le plutonium, généré par absorption des neutrons par ^{238}U . Il est possible de générer plus de plutonium qu'il s'en consomme, d'où le nom de réacteur surgénérateur. L'avantage principal de cette technologie tient à une meilleure utilisation du minerai, car les réserves sont augmentées dans le rapport des concentrations des deux isotopes, soit $99,3 / 0,7 = 142$. La France a construit dans les années 1980 un surgénérateur, Superphénix, dont le développement a été arrêté en 1997 alors qu'il avait été correctement couplé au réseau en 1986. Aujourd'hui, seuls les Russes et les Coréens en construisent, et la Chine développe son propre projet.

L'énergie nucléaire dans le monde et en France

Commençons par un aperçu de l'utilisation de toutes sources d'énergie disponibles. L'évolution de la consommation mondiale d'énergie primaire³ depuis 1900 est représentée sur la figure suivante :

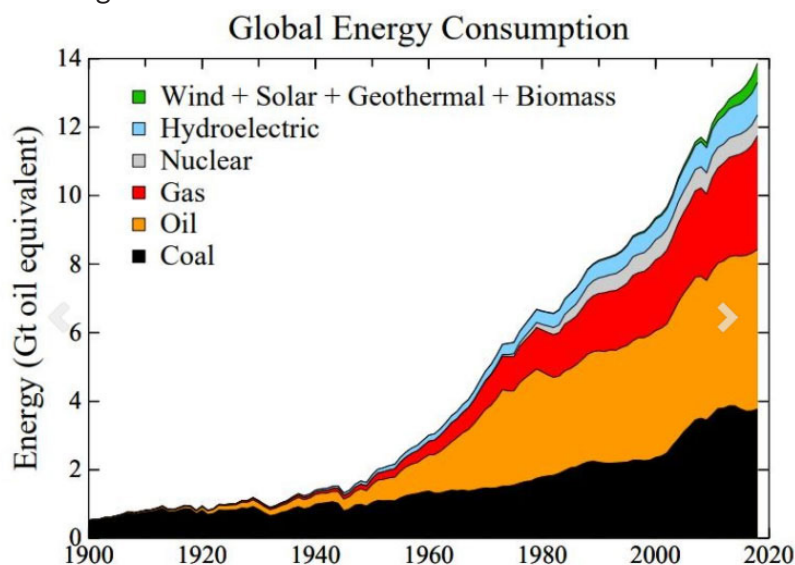


Fig. 5 : Consommation d'énergie primaire par source depuis 1900.

On constate que lorsqu'apparaît une nouvelle source d'énergie, elle ne vient pas se substituer aux sources existantes, elle vient se rajouter à ce qui existe déjà. On mesure là l'ampleur de la tâche consistant à sortir des combustibles fossiles, puisqu'il s'agit de substituer à des sources extrêmement performantes énergétiquement mais néfastes sur le plan climatique des sources décarbonées. C'est un exercice que l'humanité n'a jamais pratiqué.

Depuis plus de 50 ans, les principales sources d'énergie sont, à environ 80 %, les combustibles fossiles. La part de chacune est donnée dans le tableau suivant.

Type d'énergie	Pétrole	Charbon	Gaz naturel	Nucléaire	Biomasse	Hydro-électricité	Autre
Pourcentage de la consommation mondiale	32 %	28 %	21 %	5 %	10 %	2,5 %	1,5 %

Source : <https://www.connaissancedesenergies.org/les-chiffres-cles-de-lenergie-dans-le-monde-170926>

3. On distingue l'énergie primaire, celle est associée par exemple à la combustion d'une ressource fossile ou à la fission de noyaux d'uranium, et l'énergie finale, celle qui est payée par le consommateur, par exemple l'électricité. Le rapport des deux caractérise le rendement des transformations allant de l'une à l'autre.

Retrouvez éducol sur



En ce qui concerne les sources décarbonées, la situation est aujourd'hui la suivante :

Non carboné	%
Biomasse	51,8
Nucléaire	25,7
Hydroélectricité	13,1
Solaire + éolien + autres	9,4

Note

Le caractère « non carboné » de la biomasse repose sur le fait que le CO₂ émis lors de la combustion équivaut à celui qui a été absorbé lors de la photosynthèse. Ce bilan est pertinent pour du bois de chauffage dans les pays pauvres. Mais pour de la biomasse dédiée à de la production d'électricité, par exemple, cela néglige le bilan carbone des intrants (engrais) et du transport de la biomasse pour son utilisation énergétique.

Au total, 450 réacteurs nucléaires sont aujourd'hui en fonctionnement dans le monde, produisant environ 10 % de la production d'électricité mondiale (environ 25 000 TWh, en croissance rapide), avec comme principaux producteurs d'électricité d'origine nucléaire les États-Unis, la France et la Chine.

Type de production	Thermique	Nucléaire	Hydraulique	Biogaz et déchets	Autres EnR*
Pourcentage de la production mondiale	65 %	10 %	17 %	2 %	6 %

* EnR : énergie renouvelable

Source : <https://www.edf.fr/groupe-edf/espaces-dedies/l-energie-de-a-a-z/tout-sur-l-energie/produire-de-l-electricite/le-nucleaire-en-chiffres>.

Une soixantaine de réacteurs sont en cours de construction, principalement en Asie, et plus de 150 sont en projet. Une trentaine de pays envisagent de s'équiper de centrales.

L'Agence internationale de l'énergie atomique (IAEA), créée en 1957 sous l'égide de l'ONU et basée à Vienne, vise à promouvoir les usages pacifiques de l'énergie nucléaire et à limiter ses applications militaires. Elle a reçu le prix Nobel de la Paix en 2005.

Aujourd'hui, 31 pays disposent de centrales nucléaires, et 8 pays possèdent officiellement l'arme atomique : États-Unis, Russie, Chine, France, Royaume-Uni, Inde, Pakistan et Corée du Nord. Israël ne produit pas d'électricité d'origine nucléaire, mais dispose, sans reconnaissance officielle, de l'arme atomique.

Retrouvez éducol sur



L'énergie nucléaire en France

Le Commissariat à l'énergie atomique (CEA) est créé en France dès la fin de la Seconde Guerre mondiale (ordonnance du 18 octobre 1945 et décret du 8 novembre 1945) avec comme objectif le développement de l'énergie nucléaire dans le domaine de l'industrie, de la science et de la défense.

Mais le déploiement massif de l'énergie pour la production d'électricité est lié aux chocs pétroliers des années 1970, comme on peut le constater sur la figure suivante : les 3 vagues de réacteurs, dont la puissance croit de 900 MW à 1450 MW, sont construites entre 1975 et 2000, soit 58 réacteurs en 25 ans. La durée de construction est d'environ 5 ans et, dans la phase d'expansion, il s'en construit plusieurs par an. La maîtrise d'ouvrage fut assurée par EDF, avec l'appui de Framatome, sur la base d'un brevet de l'entreprise américaine Westinghouse.

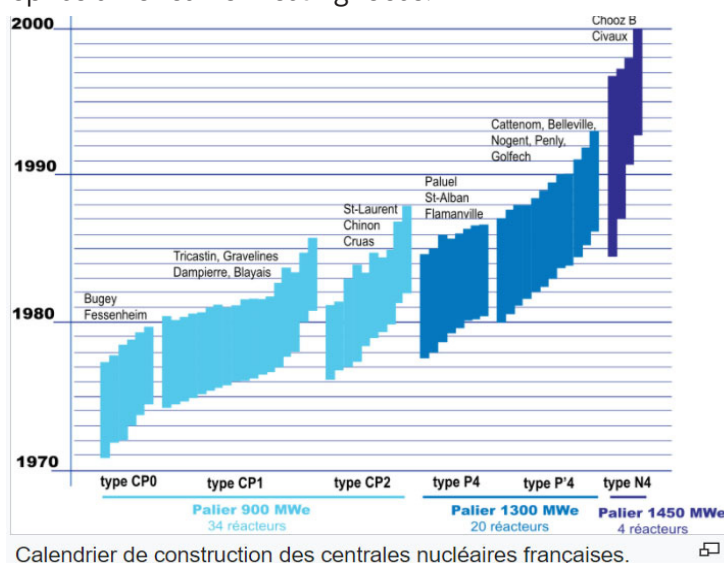


Fig. 6 : Calendrier de construction des centrales nucléaires françaises

L'évolution de la production d'électricité en France s'ensuit :

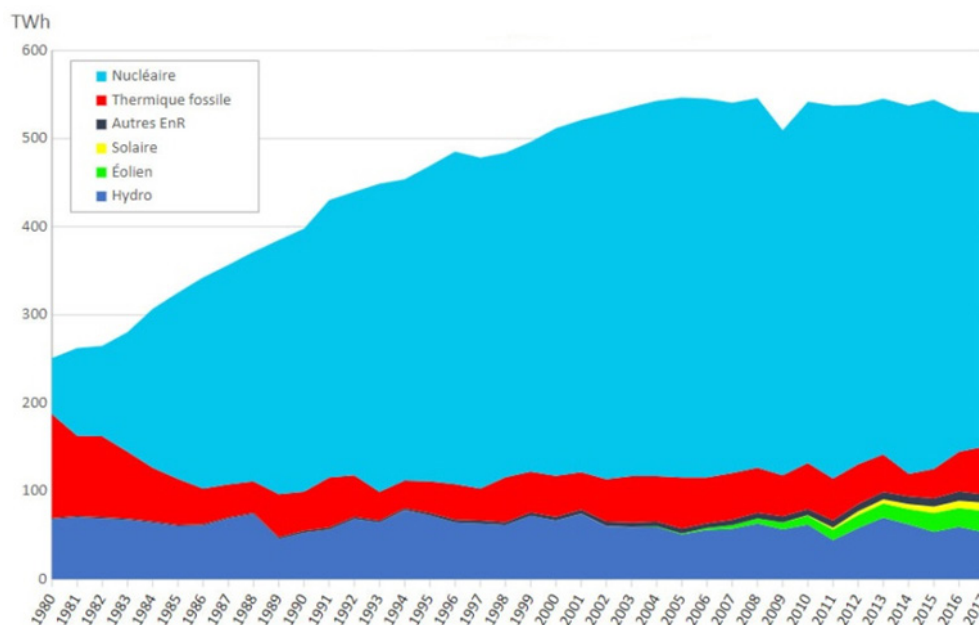


Fig. 7 : Production nette d'électricité en France.

Noter le petit décrochement de la production en 2008, associé à la crise économique mondiale. On observera sans doute le même type de décrochement sur les données de 2020.

Retrouvez éducol sur



La production d'électricité à partir du charbon disparaît pour l'essentiel vers 1995, mais la production à partir du gaz méthane et de l'hydraulique demeure à peu près constante : elles permettent de gérer les fluctuations de la demande (notamment le pic de 19h). Le nucléaire représente un peu plus de 75 % du total. En France, la production d'électricité est donc décarbonée à près de 95 %. Les deux autres pays européens dont la production d'électricité est également décarbonée sont la Suède (environ 50 % d'hydroélectricité et 50 % de nucléaire), et la Norvège (98 % d'hydroélectricité).

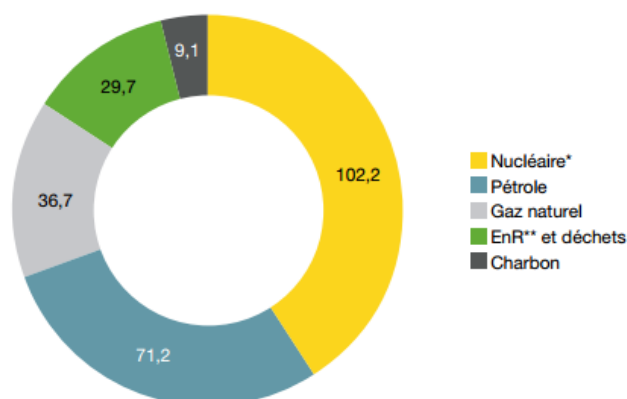
Une image synthétique des usages du mix énergétique français

Il existe deux façons de représenter notre consommation d'énergie : en termes d'énergie primaire et en termes d'énergie finale.

L'énergie primaire (cf. note 2 ci-dessus) est l'énergie associée aux transformations les plus en amont de la chaîne qui conduit à la satisfaction d'un besoin. L'énergie finale est l'énergie payée par le consommateur. Le passage de l'une à l'autre tient en partie compte des rendements de conversion et de transport.

Ainsi, la consommation d'énergie primaire en France est la suivante :

CONSOMMATION D'ÉNERGIE PRIMAIRE PAR TYPE D'ÉNERGIE EN FRANCE
TOTAL EN 2018 : 248,9 Mtep



* Hors solde exportateur d'électricité.
** Énergies renouvelables.

Fig. 8 : Mix énergétique français par source d'énergie primaire

On constate par exemple que le nucléaire représente environ 40 % de cette énergie (102 / 450). Mais si l'on considère l'énergie finale, l'image est différente : l'énergie nucléaire, qui apparaît sous forme d'énergie électrique, ne représente plus que 22 % du total. En fait, l'essentiel de l'énergie finale est d'origine fossile. Pour préciser ce point, considérons la consommation d'énergie finale par secteur :

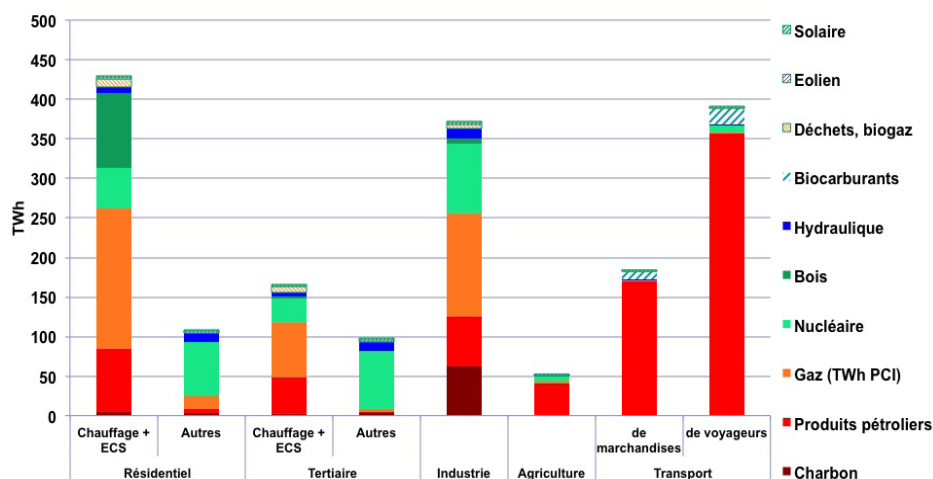


Fig. 9 : Consommation d'énergie finale en France, par secteur

On voit nettement que charbon, pétrole et gaz sont dominants. Le transport dépend à 98 % du pétrole, ainsi que l'agriculture ; le résidentiel (chauffage et eau chaude sanitaire) et l'industrie sont assurés aux deux tiers par des sources fossiles. Quant aux coûts, la facture énergétique du pétrole, du gaz et du charbon (qui sont à l'origine de plus de 80 % de nos émissions de CO₂) est d'environ 80 milliards d'euros par an, tandis que celle du minerai d'uranium de moins de 1 milliard d'euros, sans émissions de CO₂ associées.

Externalités associées à la production d'électricité nucléaire

Les paragraphes qui suivent sont l'objet de débats de société qui opposent souvent des positions tranchées. Il s'agit des sujets suivants : émissions de gaz à effet de serre, production et gestion des déchets, démantèlement des centrales, sûreté de fonctionnement, effets sanitaires. Il ne s'agit pas, ici, de prendre position, mais seulement de donner de façon aussi précise que possible dans un exposé court les éléments scientifiques sous-jacents à ces débats. Comme les sujets abordés ne sont pas toujours spécifiques à la production d'électricité nucléaire, nous adoptons quand c'est possible une approche comparative.

Émissions de gaz à effet de serre associées à la production d'électricité

Le groupe III du GIEC a compilé les données relatives aux émissions de CO₂ associées à la production d'un kWh selon la technologie utilisée. Ces émissions tiennent compte de la phase de construction, de fonctionnement et de démantèlement.

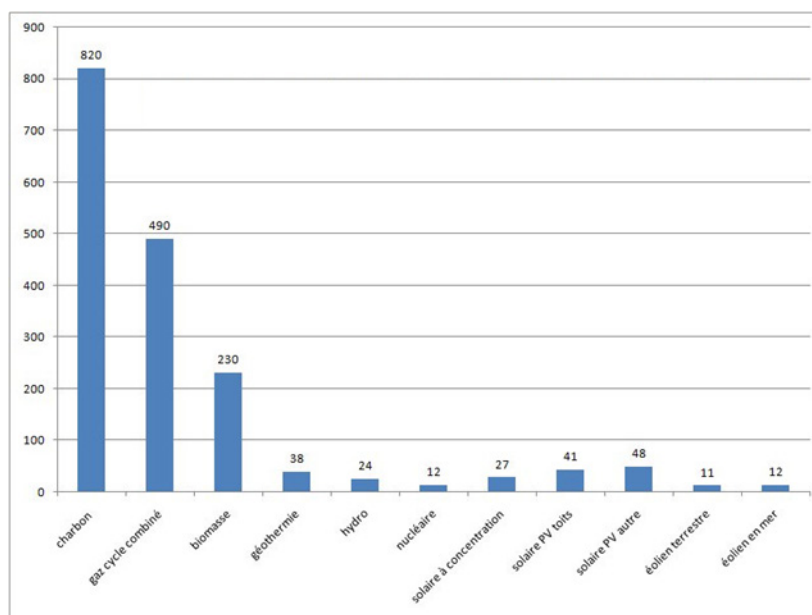


Fig. 10 : Emissions de gaz à effet de serre associées à la production d'électricité par source

On voit que l'éolien (terrestre ou en mer) et le nucléaire sont les technologies les moins émettrices. Ces valeurs expliquent, par exemple, pourquoi la production d'un kWh avec le mix électrique allemand émet environ 7 fois plus de CO₂ qu'avec le mix électrique français, et ceci malgré un fort développement de l'éolien et du solaire PV chez notre voisin. Les grandes fluctuations de production de ces sources contraignent à conserver une forte production avec des sources pilotables, charbon et gaz, qui produisent toujours la plus grande partie de l'électricité produite en Allemagne.

Déchets

Toute activité humaine produit des déchets. Il convient de les analyser de façon comparative. Ces déchets diffèrent par leur quantité et leurs éventuelles nocivités. Notons que les émissions de gaz carbonique devraient être considérées comme des déchets, bien qu'elles soient en général traitées à part. Au-delà des coûts induits par la gestion des déchets comme le CO₂ ou les déchets nucléaires, la question de leur persistance à long terme, à laquelle les générations futures devront faire face, pose d'importantes questions éthiques que les considérations factuelles doivent éclairer.

L'ADEME définit un déchet comme « un bien meuble dont son détenteur se défait ou souhaite se défaire. Il peut donc être caractérisé par sa nature mais également par son producteur – ménage, activité économique, service public. Qu'ils soient dangereux ou non dangereux, la gestion des déchets représente un enjeu majeur, tant au regard des impacts environnementaux et sanitaires que de la nécessité de préservation des ressources en matières premières ».

Pour fixer les idées, deux chiffres. Les déchets ménagers représentent en France 360 kg/habitant(hab)/an, les déchets industriels (y compris le bâtiment) 5000 kg/hab/an. Parmi ces déchets, 1,5 % sont qualifiés de dangereux, soit 75 kg/hab/an. À ces deux catégories, il faut rajouter les émissions de gaz carbonique dans l'atmosphère et les déchets nucléaires. Les émissions de CO₂ représentent 5 000 kg/hab/an. Les déchets nucléaires 2 kg/hab/an. C'est parce qu'il s'agit de faibles quantités qu'un entreposage des déchets radioactifs (de surface ou profond) peut être envisagé.

Parmi les déchets nucléaires, l'essentiel de la radioactivité est contenu dans les éléments dits « de moyenne et haute activité à vie longue » (MA-VL et HA-VL), qui représentent quelques pourcents du total, soit quelques dizaines de g/hab/an.

Les déchets nucléaires associés à la production d'électricité représentent environ 60 % du total des déchets radioactifs en France. Les autres secteurs produisant le plus de déchets radioactifs sont la recherche (28 %) et la défense (9 %). Le tableau ci-dessous recense les méthodes de gestion de ces déchets en fonction de leur durée de vie et de leur activité. Ainsi stockés, ces déchets peuvent être entreposés de façon à rendre très faible le risque sanitaire posé avant leur transformation complète par décroissance radioactive. En situation normale, la radioactivité au voisinage des sites est de 1000 fois à 1 000 000 de fois inférieure à la radioactivité naturelle. Quand les valeurs sont trop faibles pour être mesurables, elles résultent de calculs.

À ce sujet, on pourra :

- consulter la page [Les résultats de la surveillance et l'impact radiologique](#) de l'Andra ;
- visionner la vidéo [Faut-il avoir peur de vivre à côté d'un centre de stockage de déchets radioactifs ?](#) de l'Andra.







Catégorie	Déchets dits à vie très courte	Déchets dits à vie courte	Déchets dits à vie longue
Très faible activité (TFA)	 Gestion par décroissance radioactive		Stockage de surface (Centre industriel de regroupement, d'entreposage et de stockage)
Faible activité (FA)			 Stockage à faible profondeur à l'étude
Moyenne activité (MA)		Stockage de surface (centres de stockage de l'Aube et de la Manche)	
Haute activité (HA)	Non applicable		

Fig. 11 : Gestion des différents types de déchets nucléaires en France

L'Agence nationale pour la gestion des déchets radioactifs (ANDRA) est chargée de ces déchets. En fonction de leur activité et de leur durée de vie, l'ANDRA stocke les déchets en surface ou en profondeur.

La page [Le Laboratoire souterrain de l'Andra en Meuse/Haute-Marne fête ses 20 ans](#) du site de l'ANDRA propose un ensemble de vidéos concernant les déchets et leur gestion.

Risquons une évaluation grossière des coûts du projet CIGEO d'enfouissement des déchets MA-VL et HA. Une bonne mesure consiste à rapporter ce coût au nombre de MWh produits par le parc, de façon à obtenir un coût par MWh. On lit sur le site de CIGEO⁴ qu'il s'agit de traiter les déchets produits par 50 ans d'activité du parc actuel. Celui-ci produisant environ 400 TWh/an, la production totale en question est de 20 000 TWh. Le coût réel n'est pas connu de façon très précise, mais la fourchette haute est de l'ordre de 50 milliards d'€, ce qui, rapporté à la production, fait 2,5 €/Wh. Or la production d'un MWh revient aujourd'hui à environ 40 €. L'enfouissement représente donc quelques pour cent du coût de production de l'électricité, ce qui est relativement peu.

L'ANDRA propose le document technique [Évaluation des coûts afférents à la mise en œuvre des solutions de gestion à long terme des déchets radioactifs de haute et de moyenne activité à vie longue](#).

4. La page [Centre industriel de stockage géologique \(Cigéo\)](#) du site de l'ANDRA

Démantèlement des réacteurs

Selon l'AIEA, le parc nucléaire mondial est, en 2019, de 450 réacteurs en fonctionnement et de 55 en cours de construction. En fin d'exploitation, les réacteurs doivent être démantelés. À ce jour, une centaine de réacteurs ont été arrêtés définitivement, dont un petit nombre complètement démantelé. L'expérience est donc encore réduite, ce qui implique des incertitudes concernant les coûts futurs. Aux États-Unis, pays qui dispose du plus grand parc, plusieurs démantèlements ont été menés à terme complet.

Réacteurs à eau sous pression totalement démantelés aux États-Unis						
Réacteur	Rancho Seco	Yankee Rowe	Trojan	San Onofre 1	Connecticut Yankee	Maine Yankee
Puissance net	873	167	1 095	436	560	840
Constructeur	Babcock & Wilcox	Westinghouse	Westinghouse	Westinghouse	Westinghouse	Combustion Engineering
Chronologie						
Arrêt de production	1989	1992	1992	1992	1996	1997
Début de démantèlement	1997	immédiat	immédiat	1999	immédiat	immédiat
Fin d'évacuation du combustible	2002	2001	2003	2003	2005	2004
Fin de démantèlement	2008	2002	2005	2005	2006	2005

Fig. 12 : Liste des réacteurs nucléaires totalement démantelés aux USA. Les puissances des réacteurs sont données en MW.

Notons que la durée des opérations de démantèlement est ici de l'ordre de 10 à 15 ans, que les spécialistes poussent volontiers à une vingtaine d'années aujourd'hui. Les coûts estimés par la commission de réglementation nucléaire des États-Unis sont de 300 à 400 millions de dollars par réacteur, mais d'autres estimations les portent plutôt à environ 1 milliard d'euros.

On peut, là aussi, risquer une estimation en rapportant le coût à la quantité d'électricité produite pendant la durée de vie de l'installation. Considérons un réacteur de 1 GW fonctionnant pendant 50 ans. La production annuelle est d'environ 7 TWh, soit 350 TWh au total. Le coût de démantèlement de 1 G€ conduit donc à 3 €/Wh. C'est encore quelques pour cent du coût de production de l'électricité.

On trouvera sur le site de l'IRSN des informations complètes sur les aspects techniques du démantèlement, ainsi que sur l'état des lieux mondial.

Sûreté

En France, la sûreté nucléaire repose sur deux organismes : l'Autorité de sûreté nucléaire (ASN) et l'Institut de radioprotection et de sûreté nucléaire (IRSN). L'ASN emploie environ 500 personnes, dont l'activité consiste à contrôler les activités nucléaires civiles. Elle appuie ses avis sur l'IRSN (1 800 salariés dont 440 chercheurs), chargée de fournir une expertise dans trois domaines : santé et environnement, sûreté nucléaire, défense et non-prolifération. Après examen des réacteurs, l'ASN fournit trois types d'avis : « peut fonctionner en l'état », « peut fonctionner moyennant travaux », « doit arrêter ». Dans le second cas, si EDF décide de ne pas engager les travaux demandés, le réacteur doit fermer.

Concernant la durée de vie des centrales, il n'y a pas de durée fixe. L'IRSN précise : « Sur un plan technique, les centrales nucléaires ont été conçues et construites à l'origine pour fonctionner au moins 25, 30 ou 40 ans. Mais avec la progression des techniques et des connaissances, les centrales actuellement en fonctionnement ont été améliorées au fil des années pour continuer à fonctionner avec le plus haut niveau de sûreté possible, et elles pourraient donc éventuellement dépasser ces durées. [...] Ainsi, aux États-Unis, la durée prévue d'exploitation de chaque centrale nucléaire a été fixée dès l'origine à 40 ans. Cependant, ces dernières années, plusieurs centrales ont vu leur autorisation de fonctionnement prolongée à 60 ans. »

La notion de « vieillissement » d'un réacteur n'a en fait de sens que pour la cuve – l'endroit où se déroulent les réactions de fission –, car tous les autres éléments peuvent être remplacés si des défaillances sont constatées en cours de fonctionnement. Ainsi, en France, « chaque centrale reçoit une autorisation de fonctionnement pour 10 ans. À l'issue de ces 10 années, une visite décennale est organisée pour effectuer des contrôles et confirmer le niveau de sûreté de l'installation. Si tous les contrôles sont satisfaisants, une nouvelle autorisation de fonctionnement est donnée pour une période de 10 ans ». La durée d'une visite décennale est de 5 mois environ, pendant laquelle la centrale se trouve évidemment à l'arrêt. On appelle Grand Carénage l'ensemble des opérations de révision complète des installations.

Comme pour toute technologie, la sûreté évolue à la suite des incidents et des accidents qui surviennent. À Fukushima, par exemple, les réacteurs se sont correctement mis à l'arrêt à la suite du tremblement de terre, mais avec la perte de toute source d'électricité (les groupes électrogènes ont été noyés par le tsunami), l'évacuation de la chaleur résiduelle n'a pas pu être assurée, ce qui a provoqué la fusion des cœurs, une montée de la concentration et de la pression d'hydrogène dans les enceintes, leur explosion et le largage de radioactivité dans l'environnement. Bien qu'il n'y ait aucune victime directe à déplorer due à cette radioactivité, l'accident a conduit, en France, à la mise en place d'une nouvelle problématique en matière de sûreté – au-delà de l'approche où l'on estime la probabilité d'un accident – suivant le questionnement suivant : supposons que, malgré toutes les dispositions en place pour l'éviter, il y ait fusion d'un cœur de réacteur. Comment s'assurer qu'aucune radioactivité ne sorte de l'enceinte de confinement ? Un ensemble de mesures ont été décidées, qui s'ajoute aux opérations de Grand Carénage, et les travaux qui en découlent seront effectués dans les années qui viennent. Ils doivent permettre de prolonger la durée de vie des centrales d'au moins 10 ans au-delà de 30 ou 40 ans selon les réacteurs. Le coût de ces travaux, ainsi que les coûts de fonctionnement

Retrouvez éducol sur



et d'entretien jusqu'à 2030 sont d'environ 100 milliards d'euros (estimation haute). Calculons ce que ce coût représente, rapporté à l'énergie produite. Le parc actuel produit environ 420 TWh par an, soit 4 200 TWh au cours des 10 ans de prolongement. Ramené à cette production, le coût est donc de 24 €/MWh. Il ne s'agit là que d'une estimation grossière. La Cour des comptes a publié en 2012 une étude complète sur le coût de production de l'électricité nucléaire, incluant entretien, révision et provision pour démantèlement et stockage des déchets. Ce coût est de 42 €/MWh (il faut remarquer que le parc actuel est totalement amorti).

Note : des informations précises concernant les principaux accidents nucléaires, Three Mile Island, Tchernobyl et Fukushima notamment, peuvent être trouvées sur le site de l'IRSN.

Effets sanitaires associés à la production et la consommation d'énergie

Ces effets sanitaires sont délicats à apprécier, car ils sont de nature très diverse : effets associés au fonctionnement régulier des installations, comme la pollution de l'air par émission de particules (combustion des hydrocarbures), effets directs associés aux accidents, comme la rupture d'un barrage ou un accident nucléaire, effets associés au stress post-traumatique d'une catastrophe (déplacement de population à la suite des accidents de Tchernobyl et de Fukushima, perte de repères, etc.).

Par exemple, l'examen des décès immédiats dus à des accidents au cours de la période 1970-2008 fait apparaître que la grande majorité des cas est due au charbon, au pétrole et à l'hydraulique.

Nombre de décès lors des accidents par source d'énergie

	Pays de l'OCDE		Hors OCDE	
	Accidents	Morts dans l'accident	Accidents	Morts dans l'accident
Charbon	87	2 259	2 394	38 672
Pétrole	187	3 495	358	19 516
Gaz naturel	109	1 258	78	1 556
GPL	58	1 856	70	2 789
Hydraulique	1	14	21	30 069
Nucléaire	0	0	1	31
Biofioul	0	0	0	0
Biogaz	0	0	2	18
Géothermie	0	0	1	21
Total	442	8 882	2 925	92 672

*Nombre d'accidents sévères et de décès précoces
attribuables aux filières de l'énergie entre 1970 et 2008
(source OCDE [3])*

Période couverte : 1970-2008

Source : Burgher P, Hirschberg S. Comparative risk assessment of severe accidents in the energy sector. Energy Policy, 74, 2014, S45-S56.

Remarques

Le chiffre de 31 décès lors de l'accident de Tchernobyl ne prend pas en compte les décès à long terme dus aux cancers et aux maladies cardio-vasculaires induits. Les estimations, qui dépendent des effets à long terme des faibles doses de rayonnements ionisants, varient entre quelques milliers et plusieurs dizaines de milliers de décès. Les études épidémiologiques de population ayant été irradiées ne permettent pas de détecter des effets à long terme pour des irradiations inférieures à 100 mSv pour les adultes, et 50 mSv pour les enfants (la radioactivité naturelle en France varie de 2,5 à 5,5 mSv par an). Les effets traumatiques liés aux déplacements de population sont également à prendre en compte.

Quant au fonctionnement régulier des installations, les conclusions sont assez claires : la combustion des hydrocarbures pour la production d'électricité et pour le transport produit des particules fines dont les effets pulmonaires sont bien identifiés, alors que les énergies renouvelables et le nucléaire n'en produisent pas. Une façon standard de comparer les différentes sources consiste à comptabiliser les décès induits (en termes de morts prématurées) associés à la production d'un TWh d'énergie. Dans la figure suivante, on a tenu compte des décès dus aux accidents et à la pollution de l'air associée à l'utilisation régulière des installations. Les nombres associés à la pollution de l'air sont dominants.

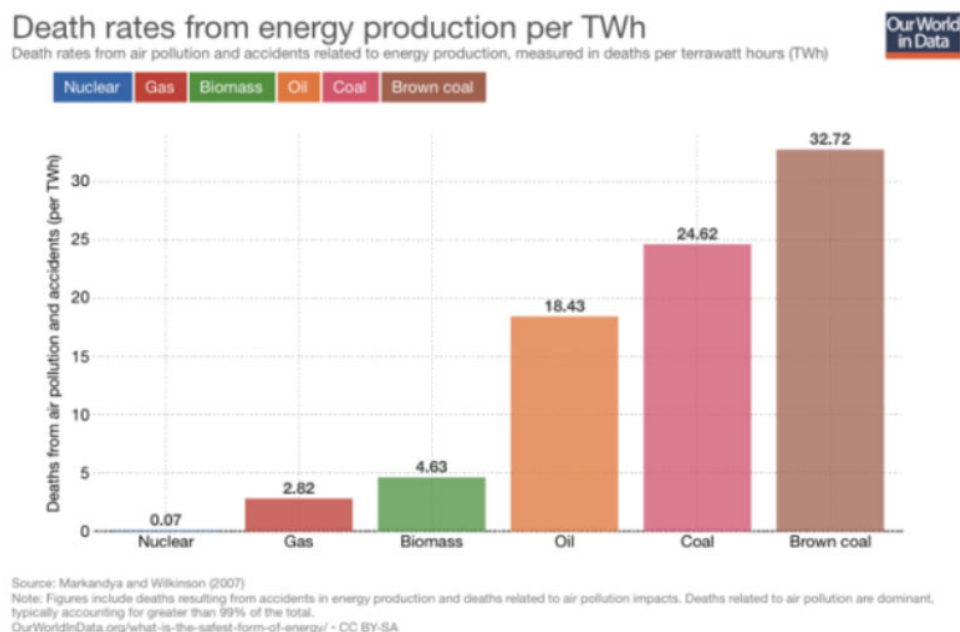


Fig. 13 : Taux de mortalité dus à la pollution de l'air et aux accidents, exprimés en décès par an par TWh produit.

Source : <https://ourworldindata.org/safest-sources-of-energy>

On estime par exemple que la pollution de l'air par la production de particules fines cause en France environ 40 000 décès prématurés par an, et environ 10 fois plus à l'échelle de l'Europe. L'énergie nucléaire, dans son fonctionnement normal, n'en provoque aucune.

Retrouvez éducol sur



On trouvera sur le site de l'UNSCEAR (United nation scientific committee on the effects of atomic radiation) des informations détaillées sur ces sujets. Sur la page [Qui sommes-nous ?](#) Du site de l'UNSCEAR), on apprend que « l'UNSCEAR a été créé par l'Assemblée générale des Nations unies en 1955. Son mandat dans le système des Nations unies consiste à évaluer les niveaux et les effets de la radio-exposition et de faire rapport sur ce sujet. Pour les gouvernements et organisations du monde entier, les estimations du Comité constituent la base scientifique qui leur permet d'évaluer les risques d'irradiation et d'établir des mesures de sûreté. ».

Annexe - Note sur la découverte de la fission

Pour comprendre les propriétés d'un système, on tente de le modifier de diverses façons, et l'on observe comment il réagit. Dans le cas du noyau, mis en évidence par Rutherford en 1911, il fallait disposer de sondes permettant d'y accéder. Jusqu'à la découverte du neutron par Chadwick en 1932, les sondes étaient des particules chargées, comme des alpha (noyaux d'hélium) ou des électrons. Or ces particules sont perturbées par la charge du noyau cible (qui dévie un alpha et l'empêche de s'approcher très près) ou par les cortèges électroniques des atomes. Avec la découverte du neutron, c'est tout un champ d'expériences qui s'ouvre, puisque cette particule électriquement neutre peut s'approcher d'un noyau sans être perturbée par sa charge. C'est ainsi que divers groupes d'expérimentateurs se sont constitués, notamment à Paris autour d'Irène et Frédéric Joliot-Curie, à Rome autour d'Enrico Fermi et à Berlin autour de Lise Meitner et Otto Hahn (ce dernier était chimiste). Les chercheurs étudiaient les conditions dans lesquelles un neutron est absorbé par un noyau, se transforme par désintégration beta en proton, ce qui permet de progresser dans le tableau de Mendeleïev. Dans le cas de l'uranium, qui est le dernier élément stable, on pensait obtenir ainsi des éléments chimiques non présents à l'état naturel, des transuraniens. Enrico Fermi reçut même le prix Nobel de physique en 1938 pour avoir considérablement développé cette physique. Mais ce n'est qu'à la suite d'une série d'expériences très fines faites sur l'uranium en décembre 1938 que l'on comprit le phénomène de fission.

Les physiciens comprirent tout de suite que l'énergie dégagée par la fission permettait de construire des bombes très puissantes. Le contexte de la Seconde Guerre mondiale explique le fait que la première utilisation de l'énergie nucléaire fut militaire : une bombe à l'uranium larguée sur Hiroshima le 6 août 1945, une bombe au plutonium larguée trois jours plus tard sur Nagasaki.