



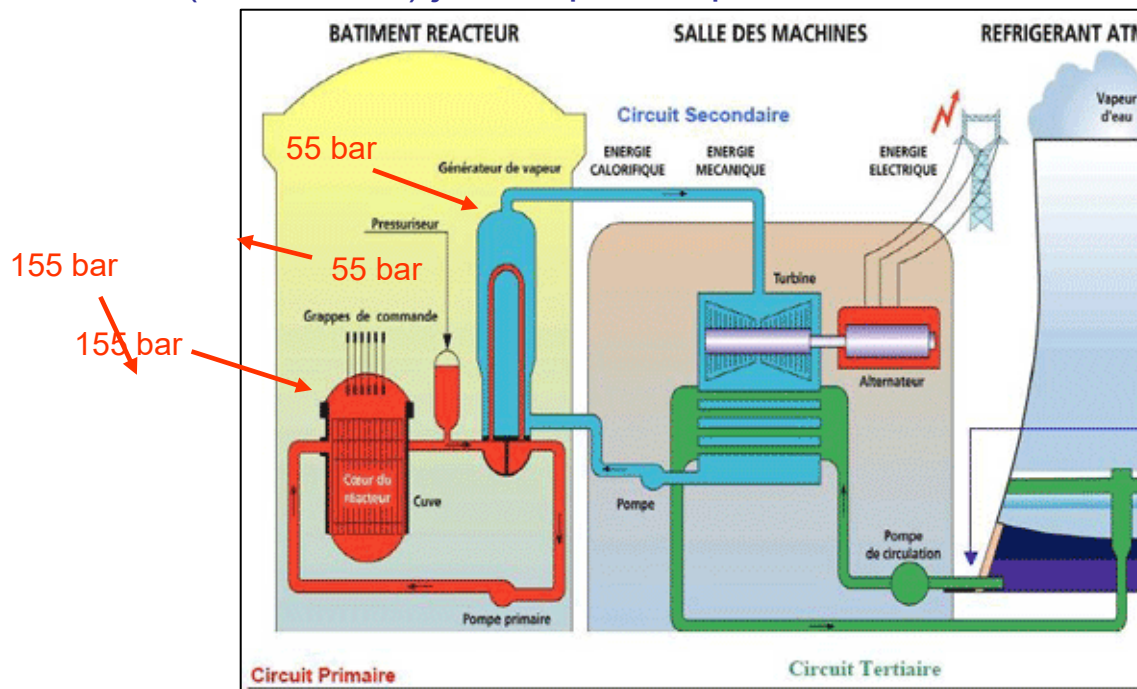
Électricité nucléaire



Électricité en France et dans le monde

Le nucléaire en France

- ◆ 18 centrales nucléaires, toutes construites avec la même technologie -Westinghouse- mais avec plusieurs paliers de développement.
- ◆ 57 réacteurs : 32 de 900 MW, 20 de 1300 MW, 4 de 1450 MW et 1 de 1620 MW. EdF exploite au total 72 réacteurs en comptant ceux du Royaume-Uni → 1^{er} exploitant nucléaire au monde.
- ◆ La puissance - nette - totale installée est de 63 GW mais en pratique, l'ensemble des centrales n'a (sans doute) jamais produit plus de 60 GW.



En France comme ailleurs, les réacteurs actuels utilisent de l'**uranium** (vs. thorium) car cela permettrait au départ de faire des armes...
...et un **cœur solide** (vs. sels fondus) car cela donne des installations relativement compactes permettant également la *propulsion des navires*.

En France, la **première génération** (UNGG) a *charge continue* été abandonnée pour des raisons de sécurité, entre 1968 et 1994.

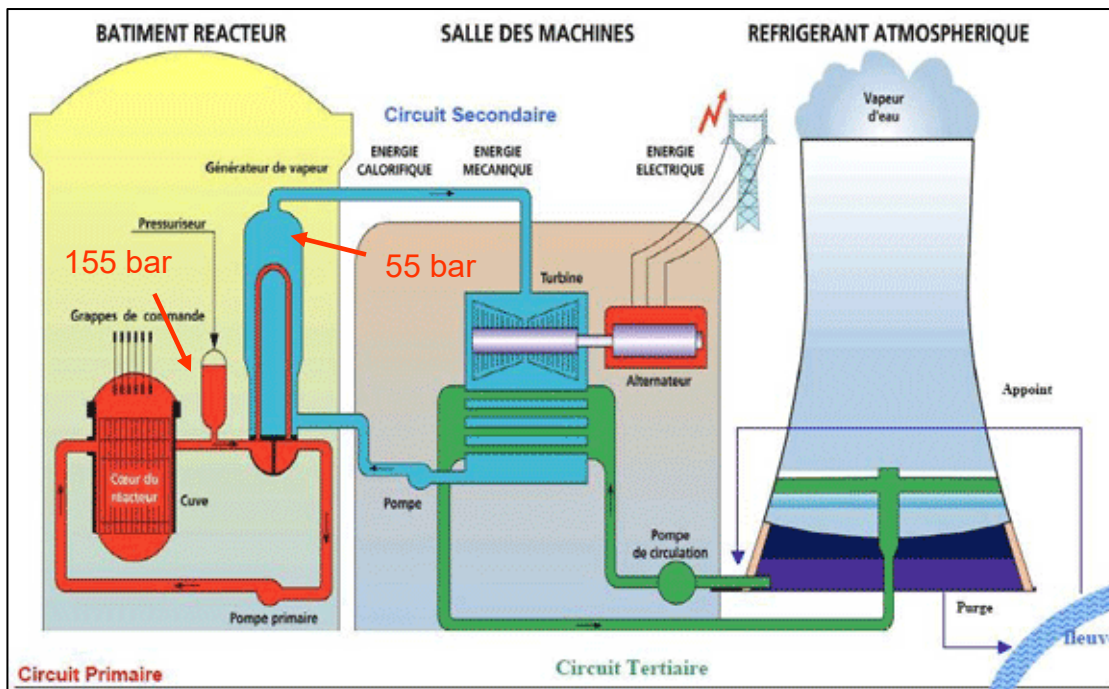
<http://www.asn.fr/index.php/Les-activites-controlees-par-l-ASN/Production-d-Electricite/Centrales-nucleaires>



Électricité en France et dans le monde

Le nucléaire en France

- ◆ 18 centrales nucléaires, toutes construites avec la même technologie -Westinghouse- mais avec plusieurs paliers de développement.
- ◆ 57 réacteurs : 32 de 900 MW, 20 de 1300 MW, 4 de 1450 MW et 1 de 1620 MW. EdF exploite au total 72 réacteurs en comptant ceux du Royaume-Uni → 1^{er} exploitant nucléaire au monde.
- ◆ La puissance - nette - totale installée est de 63 GW mais en pratique, l'ensemble des centrales n'a (sans doute) jamais produit plus de 60 GW.



Les réacteurs de **première génération** (UNGG) a *charge continue* ont été abandonnés pour des raisons de sécurité, entre 1968 et 1994.

Les réacteurs actuels, de **deuxième génération**, n'ont toutefois pas été prévus pour faire face à un **accident grave**... c'est-à-dire une **fusion du cœur**, contrairement à l'**EPR**.

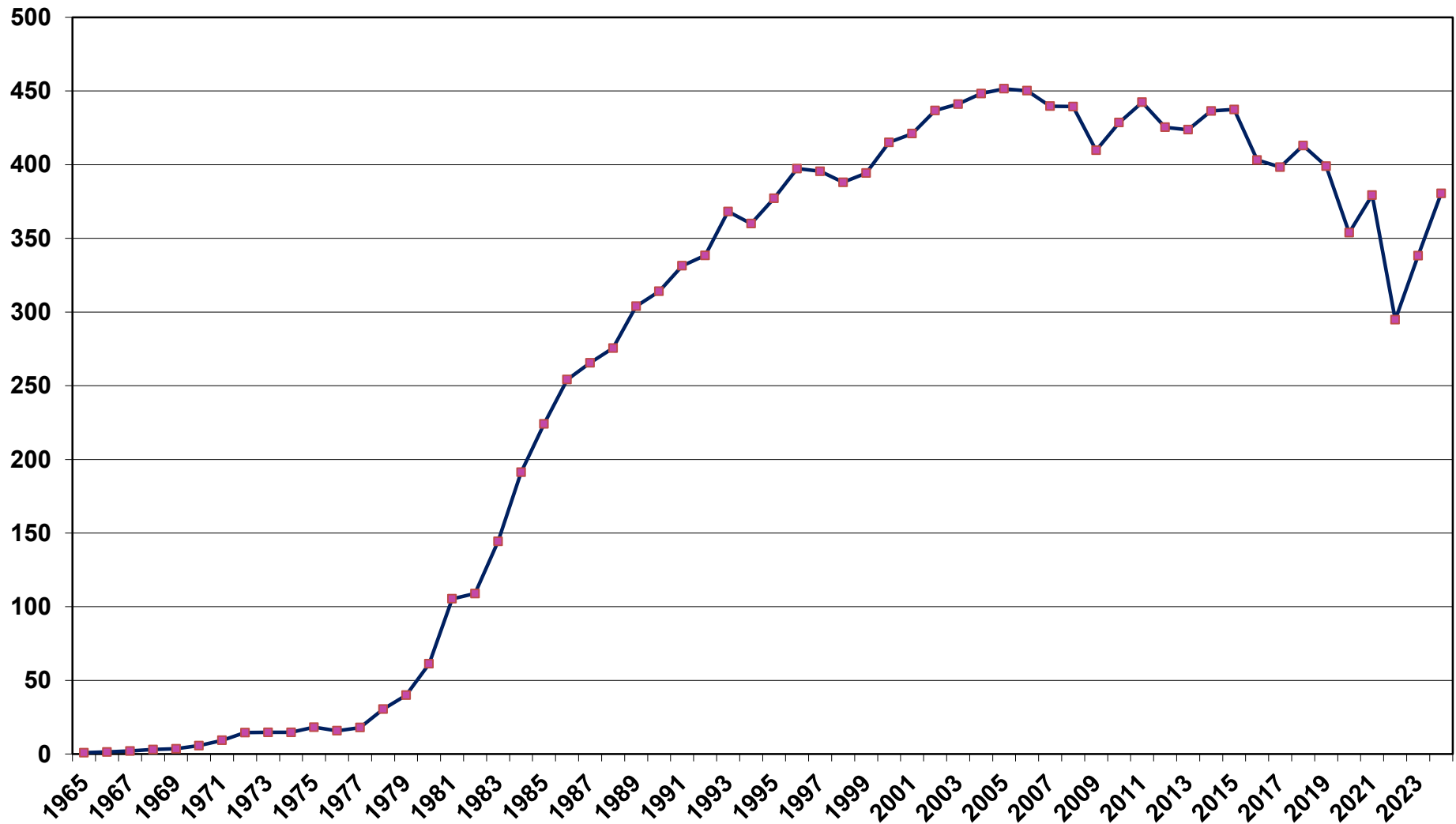
... le *prolongement de leur durée de vie* à 60 ans repose sur leur capacité à retenir et refroidir le **corium** en cas de **fusion du cœur** (→ [IRSN](http://www.irsn.fr)).

<http://www.asn.fr/index.php/Les-activites-controlees-par-l-ASN/Production-d-Electricite/Centrales-nucleaires>



Le nucléaire en France

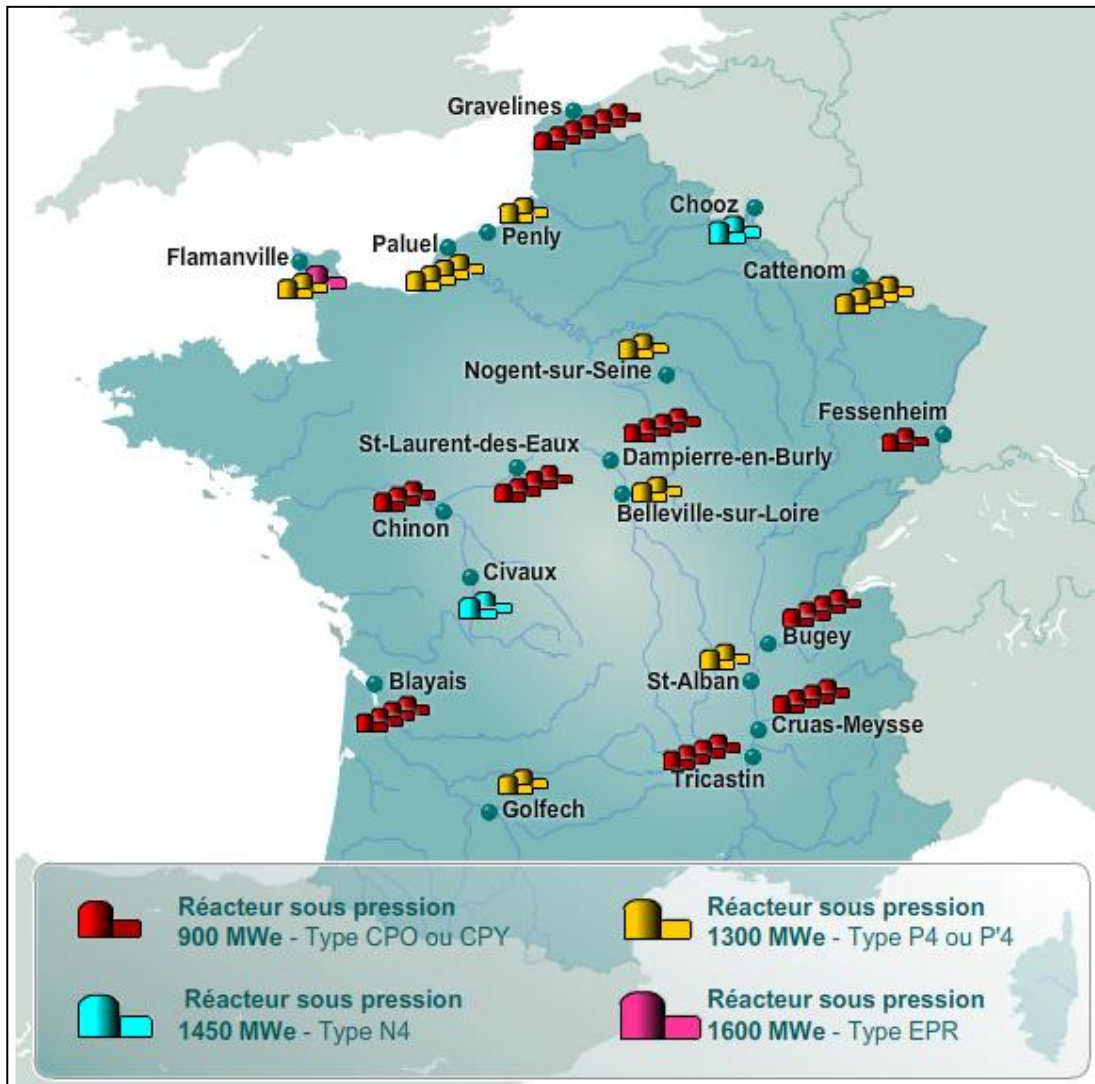
Production annuelle d'électricité nucléaire en France - Twh



EI Stats Review, 2025



Le nucléaire en France



- La centrale la plus puissante est celle de Gravelines, avec 5,4 GW.
- La puissance moyenne des réacteurs français est d'environ 1,1 GW.
- Les réacteurs les plus puissants sont installés à Chooz. Ils peuvent produire jusqu'à 1,5 GW net et rejettent alors 4,27 GW en puissance thermique.
- Les réacteurs de Chooz et Civaux, ont été mis en service entre 2000 et 2002. Les plus anciens et les moins puissants sont ceux de Fessenheim. Ils datent de 1978 et produisent 0,88 GW.
- La différence entre la puissance nette et brute varie de 30 à 60 MW suivant les réacteurs (de 3 à 4%).
- 14 des réacteurs nucléaires construits en France depuis 1955 sont arrêtés définitivement, et pour certains en cours de démantèlement. C'est le cas notamment à Creys-Malville, au Bugey, à Saint-Laurent, à Chooz, à Chinon et à Brennelis.

<http://www.asn.fr/index.php/Les-activites-controlees-par-l-ASN/Production-d-Electricite/Centrales-nucleaires>



Le nucléaire en France

Facture du nucléaire : l'alerte de la Cour des comptes

« Le coût de production de l'électricité nucléaire s'envole.

Entre 2010 et 2013, la facture a connu une forte hausse, passant de 49,6 euros par mégawattheure (MWh) à **59,8 euros/MWh**. ([→ prix de gros](#))

C'est une augmentation de 20,6 % en euros courants (+16 % en euros constants, c'est-à-dire en tenant compte de l'inflation).

Cette flambée des coûts tient à l'évolution des différentes charges, et notamment aux investissements de maintenance et de sécurité. Dans cette période, ils ont plus que doublé, passant de 1,75 milliard d'euros en 2010 à 3,8 milliards en 2013 (+117 %). »

Le Monde, 27 mai 2014

- La centrale la plus puissante est celle de Gravelines, avec 5,4 GW.
- La puissance moyenne des réacteurs français est d'environ 1,1 GW.
- Les réacteurs les plus puissants sont installés à Chooz. Ils peuvent produire jusqu'à 1,5 GW net et rejettent alors 4,27 GW en puissance thermique.
- Les réacteurs de Chooz et Civaux, ont été mis en service entre 2000 et 2002. Les plus anciens et les moins puissants sont ceux de Fessenheim. Ils datent de 1978 et produisent 0,88 GW.
- La différence entre la puissance nette et brute varie de 30 à 60 MW suivant les réacteurs (de 3 à 4%).
- 14 des réacteurs nucléaires construits en France depuis 1955 sont arrêtés définitivement, et pour certains en cours de démantèlement. C'est le cas notamment à Creys-Malville, au Bugey, à Saint-Laurent, à Chooz, à Chinon et à Brennelis.

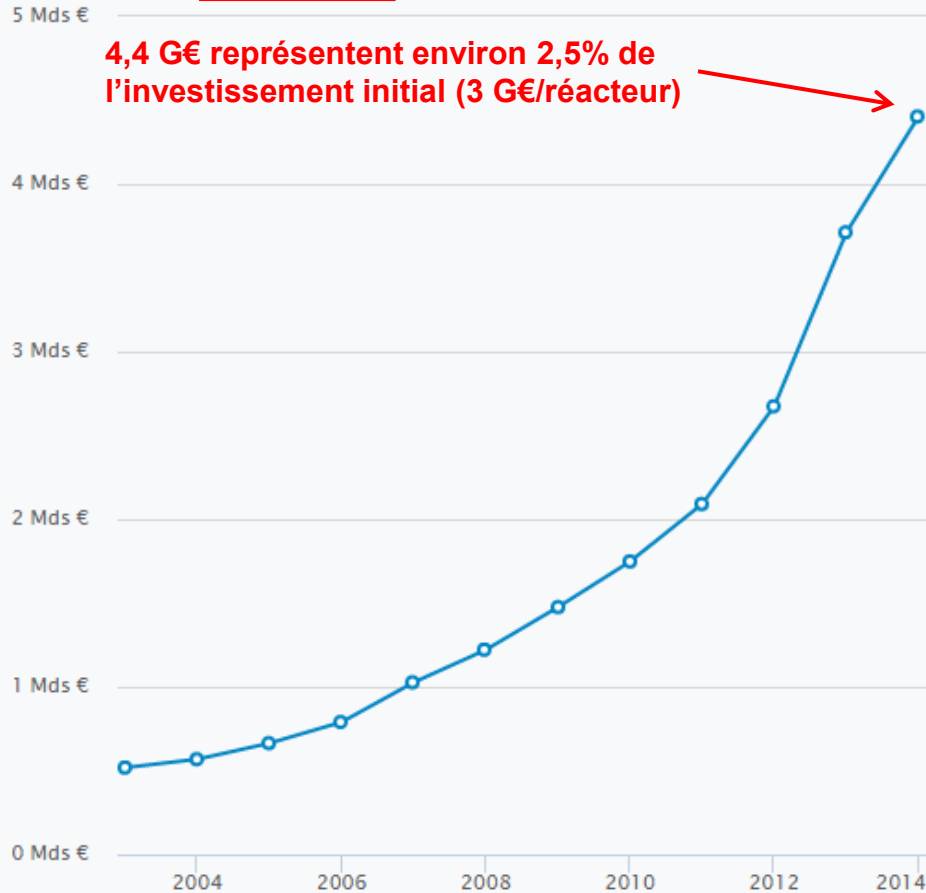
res.



Le nucléaire en France

► Les dépenses de maintenance des centrales en constante augmentation

Evolution des dépenses d'investissements de maintenance depuis 2003.



4,4 G€ représentent environ 2,5% de l'investissement initial (3 G€/réacteur)

Le coût total réclamé par la prolongation des réacteurs existants serait de 55 G€ (EdF) à 100 G€ (CdC)

*Ce n'est pas nécessairement + cher que de les remplacer !
... par des réacteurs neufs.*

Mais sortir du nucléaire pourrait tout de même coûter moins cher !

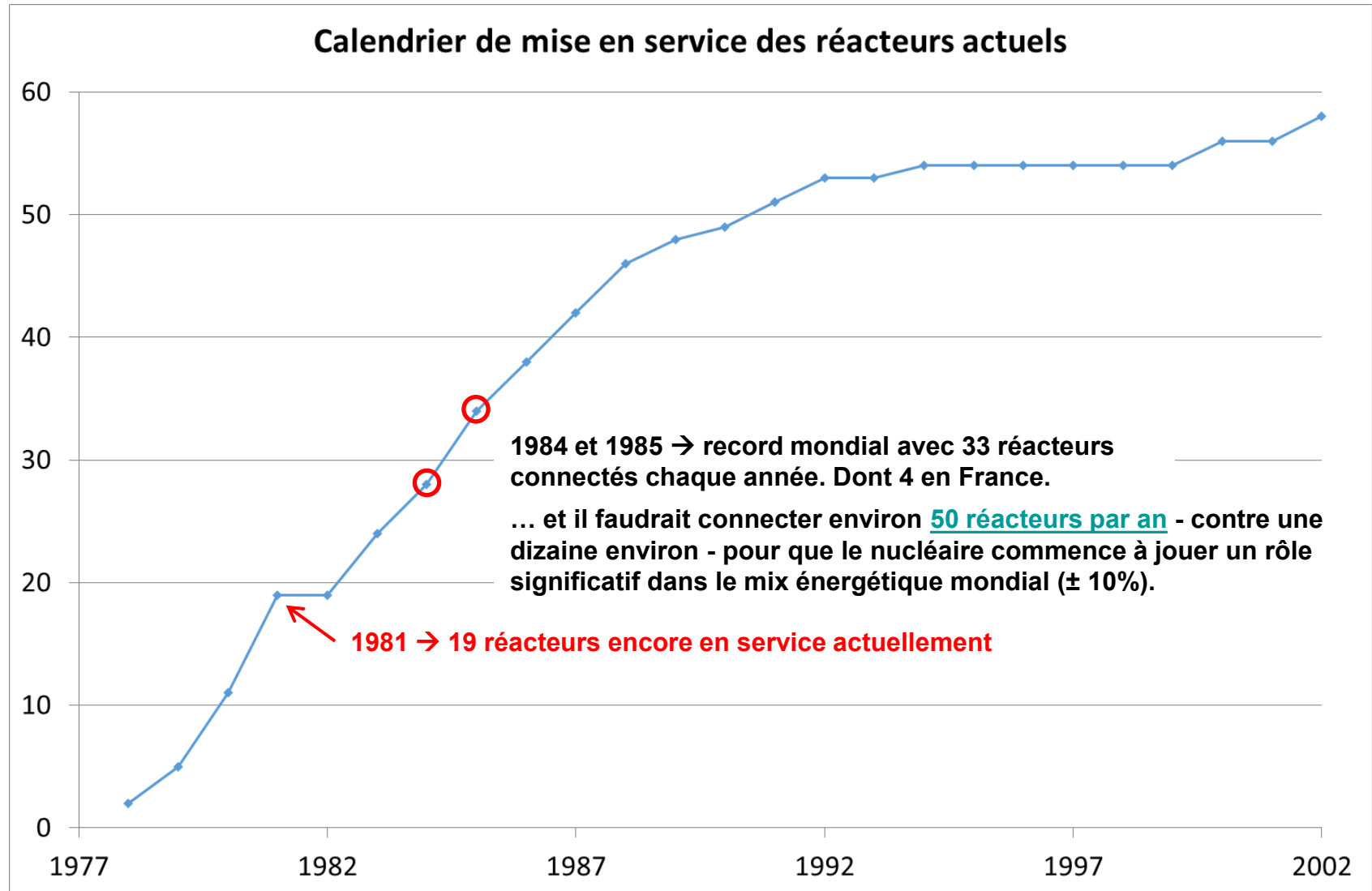
*... et l'ADEME commence à l'envisager sérieusement...
...pour 2060.*

SOURCE : COUR DES COMPTES

abonnes.lemonde.fr/les-decodeurs/article/2016/02/10/ce-qu-il-faut-retenir-du-rapport-de-la-cour-des-comptes-2016-en-7-graphes_4862552_4355770.html



Le nucléaire en France





Le nucléaire en France



La régulation des cours d'eau

Si le cours d'eau prévu pour refroidir la centrale a un débit insuffisant, il faut prévoir des retenues qui l'alimenteront en période sécheresse. C'est le cas du barrage de Pierre-Percée en Meurthe et Moselle, prévu pour assurer un débit suffisant dans la Moselle à Cattenom.

La centrale hydroélectrique est dotée de 2 pompes-turbines de 5,9 MW en pompage et 4,3 MW en turbinage.

Le barrage a été mis en service en 1993.

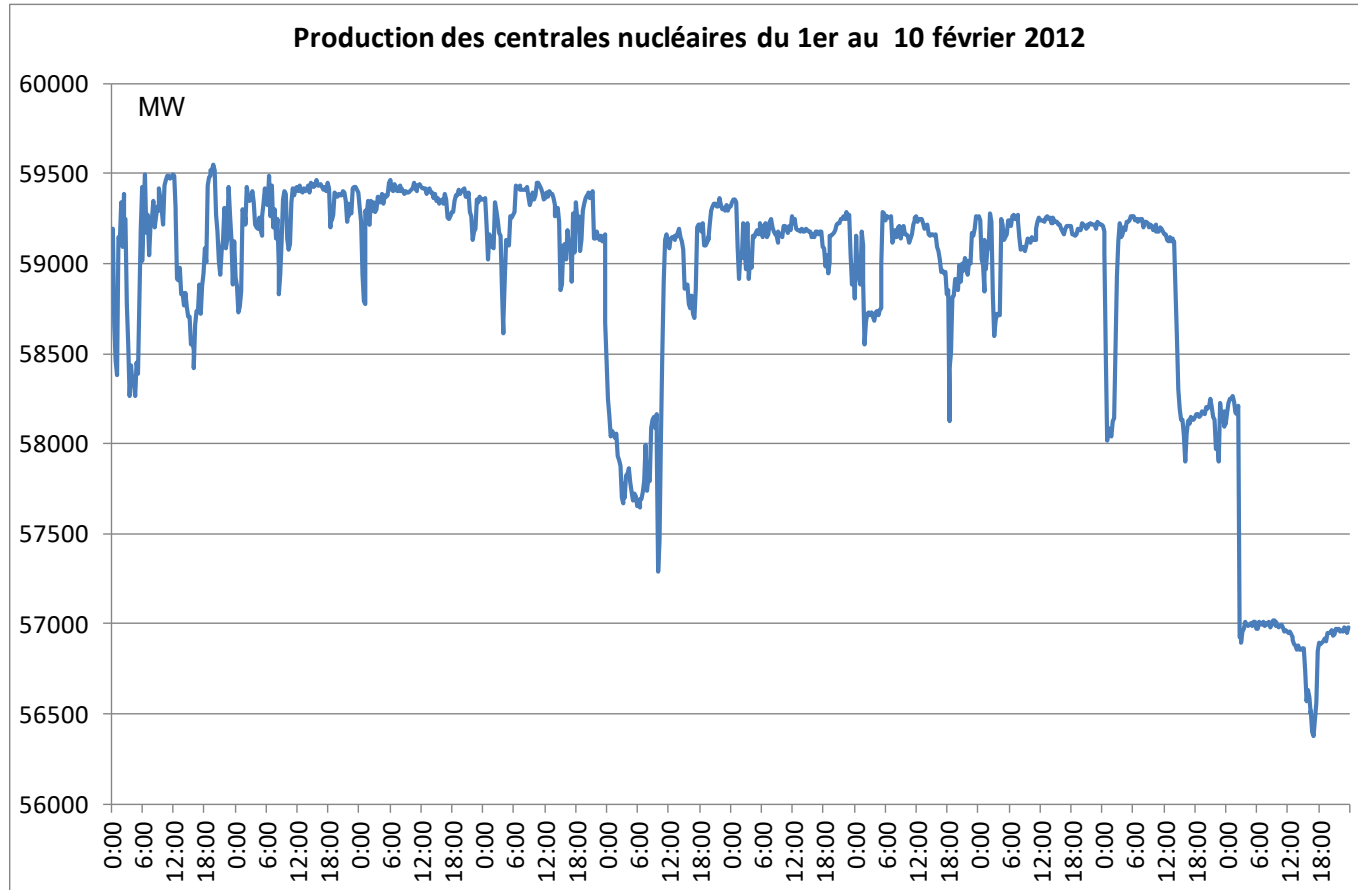
http://fr.wikipedia.org/wiki/Fichier:2010_06_04_Centrale_nucl%C3%A9aire_de_Fessenheim2.jpg

- Une centrale consomme énormément d'eau → jusqu'à 110 Mm³/an pour Civaux par exemple. (La retenue du barrage de Grand'Maison contient 132 Mm³.)
- Environ la moitié de cette eau est évaporée dans les tours aéroréfrigérantes (quand il y en a). Le reste est rejeté, à une température qui ne dépasse généralement pas 30°C.
- La surveillance sanitaire des eaux usées est indispensable.
- L'augmentation de température du cours d'eau auprès duquel la centrale est installée ne doit normalement pas dépasser 5 à 10°C.
- Si le cours d'eau possède un débit suffisant, la centrale peut fonctionner sans tour aéroréfrigérante sur le circuit tertiaire. C'était le cas à Fessenheim, c'est le cas en bord de mer.



Le nucléaire en France

D'un point de vue pratique (gestion du réseau), les centrales possèdent l'inconvénient de devoir fonctionner la plupart du temps à des puissances proches du maximum... Tout en étant sujettes à des arrêts intempestifs !

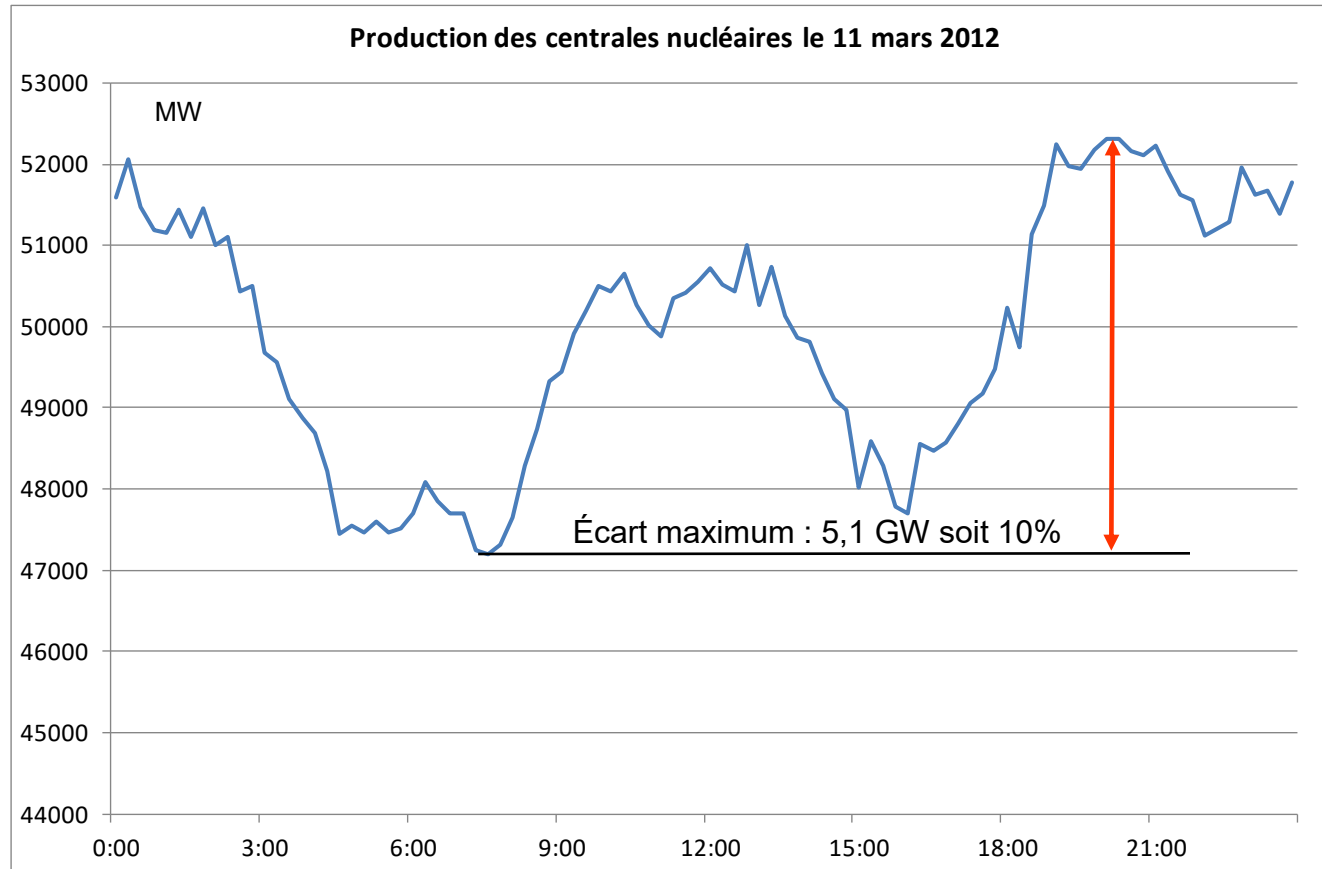


Source : RTE



Le nucléaire en France

D'un point de vue pratique (gestion du réseau), les centrales possèdent l'inconvénient de devoir fonctionner la plupart du temps à des puissances proches du maximum... Tout en étant sujettes à des arrêts intempestifs !



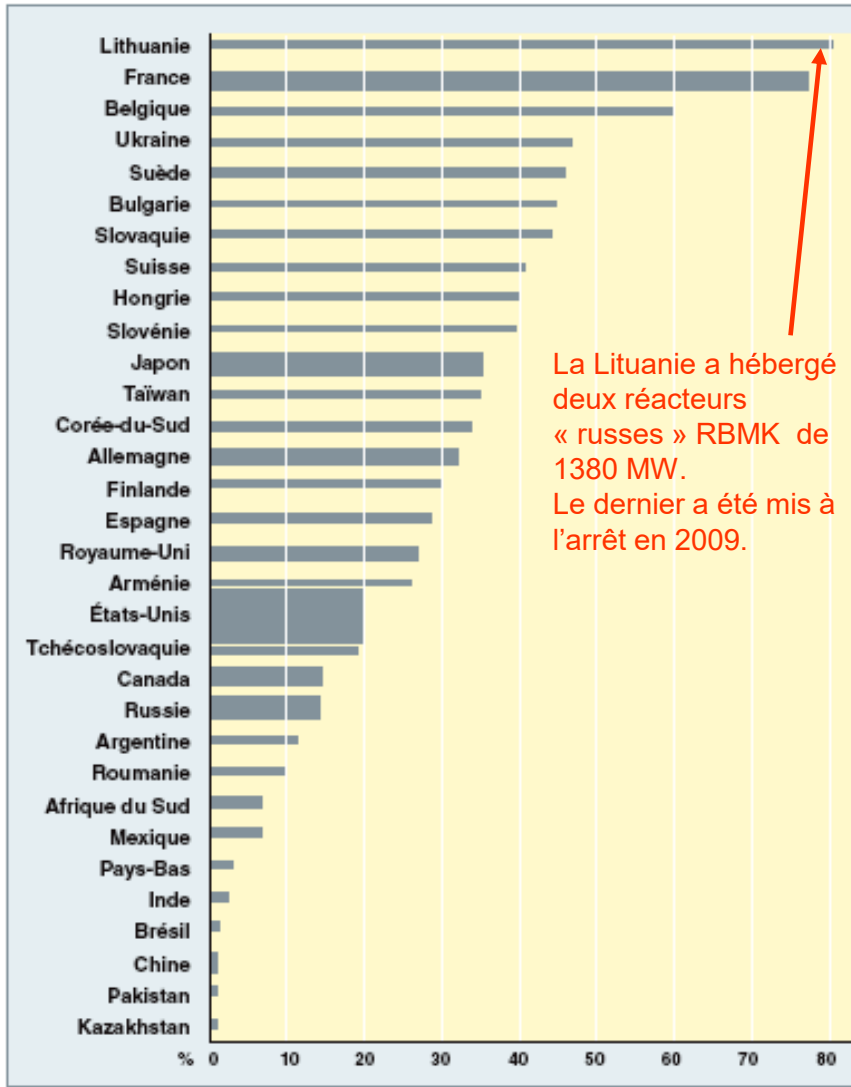
Source : RTE

A 17h00, le 11 mars

- La consommation nationale est de 48,2 GW
- La production des centrales nucléaire est de 48,8 GW
- La somme des puissances produites par les centrales nucléaires, l'éolien, et les autres moyens de production est de 55,5 GW.
- La production totale nationale est de 56,7 GW.
- On exporte 8,5 GW.



Le nucléaire dans le monde



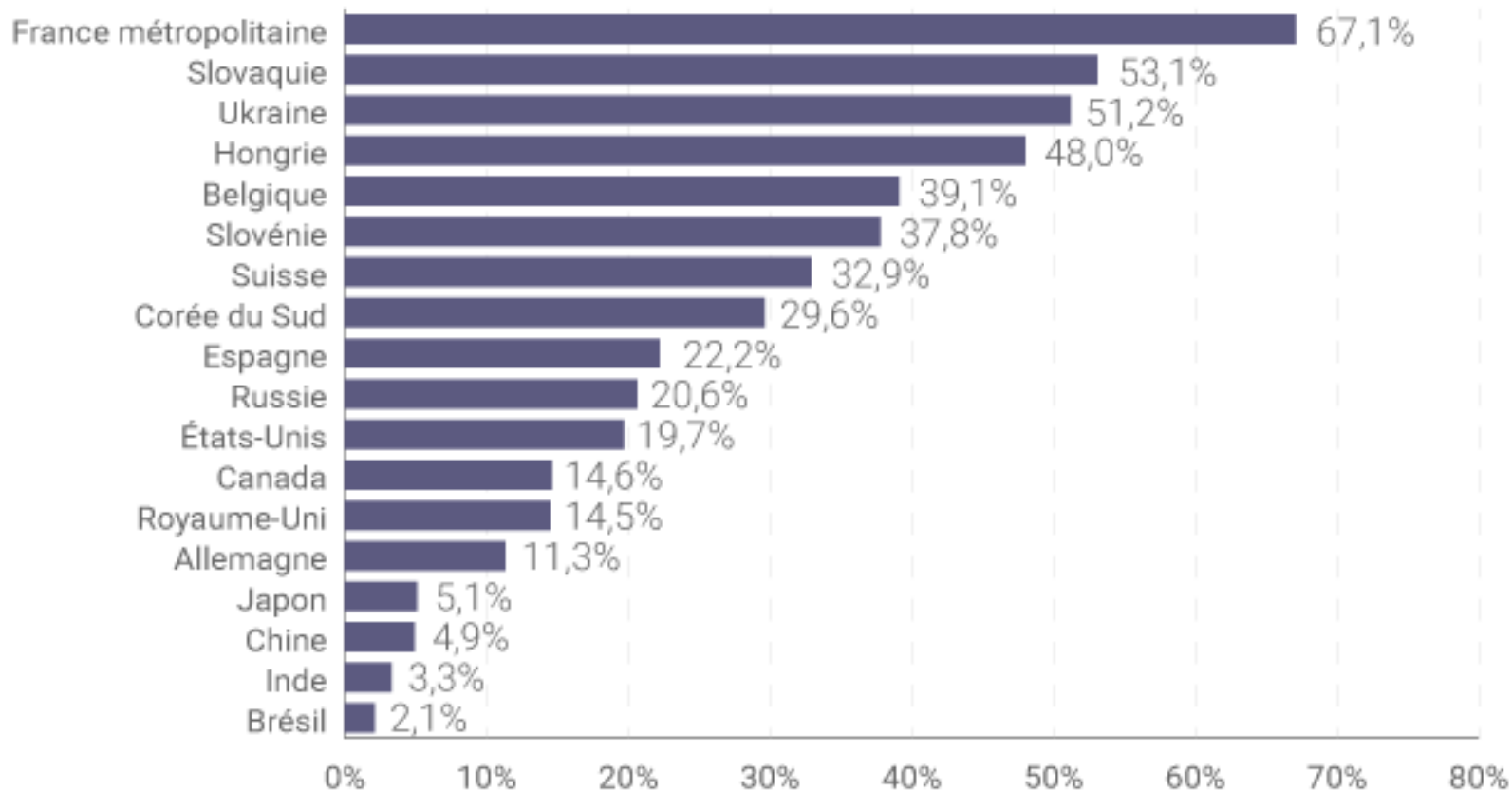
- Puissance installée → **376 GW/7500 GW**, soit **5,0%** du total mondial environ, contre 381 en 2023.
- En 2022, **416 réacteurs** -civils- en état de fonctionnement dans le monde (450 en 2019). Areva est présent, d'une manière ou d'une autre, sur la moitié d'entre eux. (→ **Le plus ancien au monde.**)
- Energie produite (2024, données BP) → 2817 TWh/31256 TWh, soit 9,0% de l'électricité mondiale... 17% en 2001, 16% en 2009, 13% en 2010, 12% en 2011 → la part du nucléaire **diminue**.
- ... dont 1881 TWh/2817 TWh, soit 67% pour les pays de l'OCDE (≈40% de la production électrique).
- Puissances installées (31 pays en 2024) :
 - USA : 94 réacteurs → ≈ **96,9 GW**
 - France : 57 réacteurs → ≈ **63,0 GW**
 - Chine : 57 réacteurs → ≈ **55,3 GW**
...et 11 (minimum) en construction
 - Russie : 36 réacteurs → ≈ **26,8 GW**
 - Corée du Sud : 26 réacteurs → ≈ **25,6 GW**
 - Ukraine : 15 réacteurs → ≈ **13,1 GW**
 - Canada : 17 réacteurs → ≈ **12,7 GW**
 - Japon : 14 réacteurs → ≈ **12,6 GW**
 - Inde : 21 réacteurs → ≈ **7,6 GW**
 - Espagne : 7 réacteurs → ≈ **7,1 GW**
 - Royaume-Uni : 9 réacteurs → ≈ **5,9 GW**
 - Suède : 6 réacteurs → ≈ **7,0 GW**
 - Emirats : 4 réacteurs → ≈ **5,3 GW**
 - Finlande : 5 réacteurs → ≈ **4,3 GW**
 - Tchéquie : 6 réacteurs → ≈ **4,0 GW**
 - Belgique : 4 réacteurs → ≈ **3,5 GW**

Part du nucléaire dans la production électrique, pays par pays, en 2008 (?). Source : CEA



Le nucléaire dans le monde

Monde Part du nucléaire dans la production d'électricité en 2020



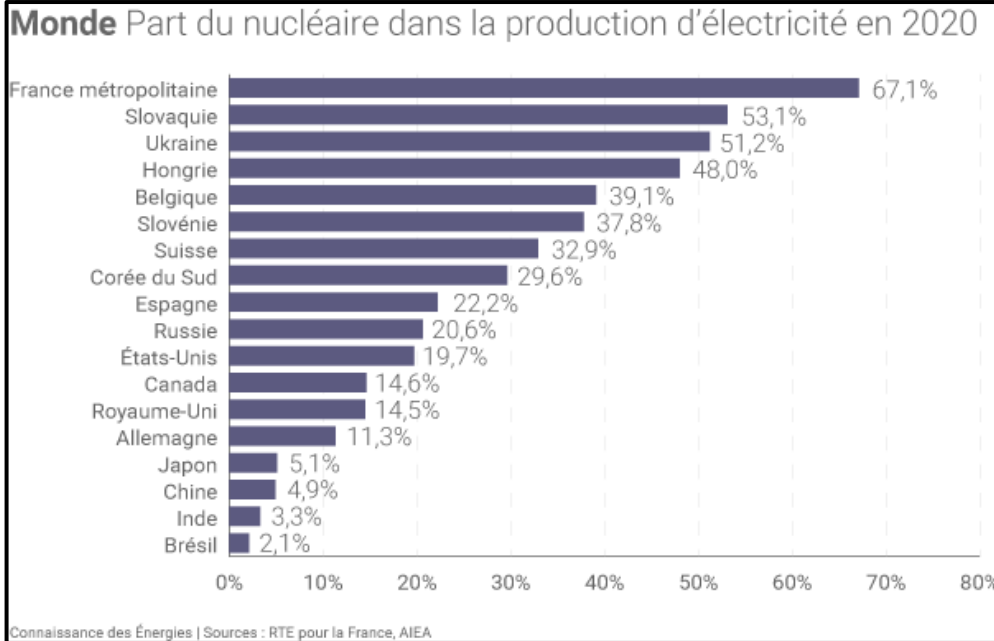
Connaissance des Énergies | Sources : RTE pour la France, AIEA

<https://www.connaissancedesenergies.org>



Le nucléaire dans le monde

- Puissance installée → **376 GW/7500 GW, soit 5,0%** du total mondial environ, contre 381 en 2023.
- En 2022, **416 réacteurs** -civils- en état de fonctionnement dans le monde (450 en 2019). Areva est présent, d'une manière ou d'une autre, sur la moitié d'entre eux. (→ **Le plus ancien au monde.**)
- Energie produite (2024, données BP) → 2817 TWh/31256 TWh, soit 9,0% de l'électricité mondiale... 17% en 2001, 16% en 2009, 13% en 2010, 12% en 2011 → la part du nucléaire **diminue**.
- ... dont 1881 TWh/2817 TWh, soit 67% pour les pays de l'OCDE (≈40% de la production électrique).
- Puissances installées (31 pays en 2024) :
 - USA : 94 réacteurs → ≈ **96,9 GW**
 - France : 57 réacteurs → ≈ **63,0 GW**
 - Chine : 57 réacteurs → ≈ **55,3 GW**
...et 11 (minimum) en construction
 - Russie : 36 réacteurs → ≈ **26,8 GW**
 - Corée du Sud : 26 réacteurs → ≈ **25,6 GW**
 - Ukraine : 15 réacteurs → ≈ **13,1 GW**
 - Canada : 17 réacteurs → ≈ **12,7 GW**
 - Japon : 14 réacteurs → ≈ **12,6 GW**
 - Inde : 21 réacteurs → ≈ **7,6 GW**
 - Espagne : 7 réacteurs → ≈ **7,1 GW**
 - Royaume-Uni : 9 réacteurs → ≈ **5,9 GW**
 - Suède : 6 réacteurs → ≈ **7,0 GW**
 - Emirats : 4 réacteurs → ≈ **5,3 GW**
 - Finlande : 5 réacteurs → ≈ **4,3 GW**
 - Tchéquie : 6 réacteurs → ≈ **4,0 GW**
 - Belgique : 4 réacteurs → ≈ **3,5 GW**



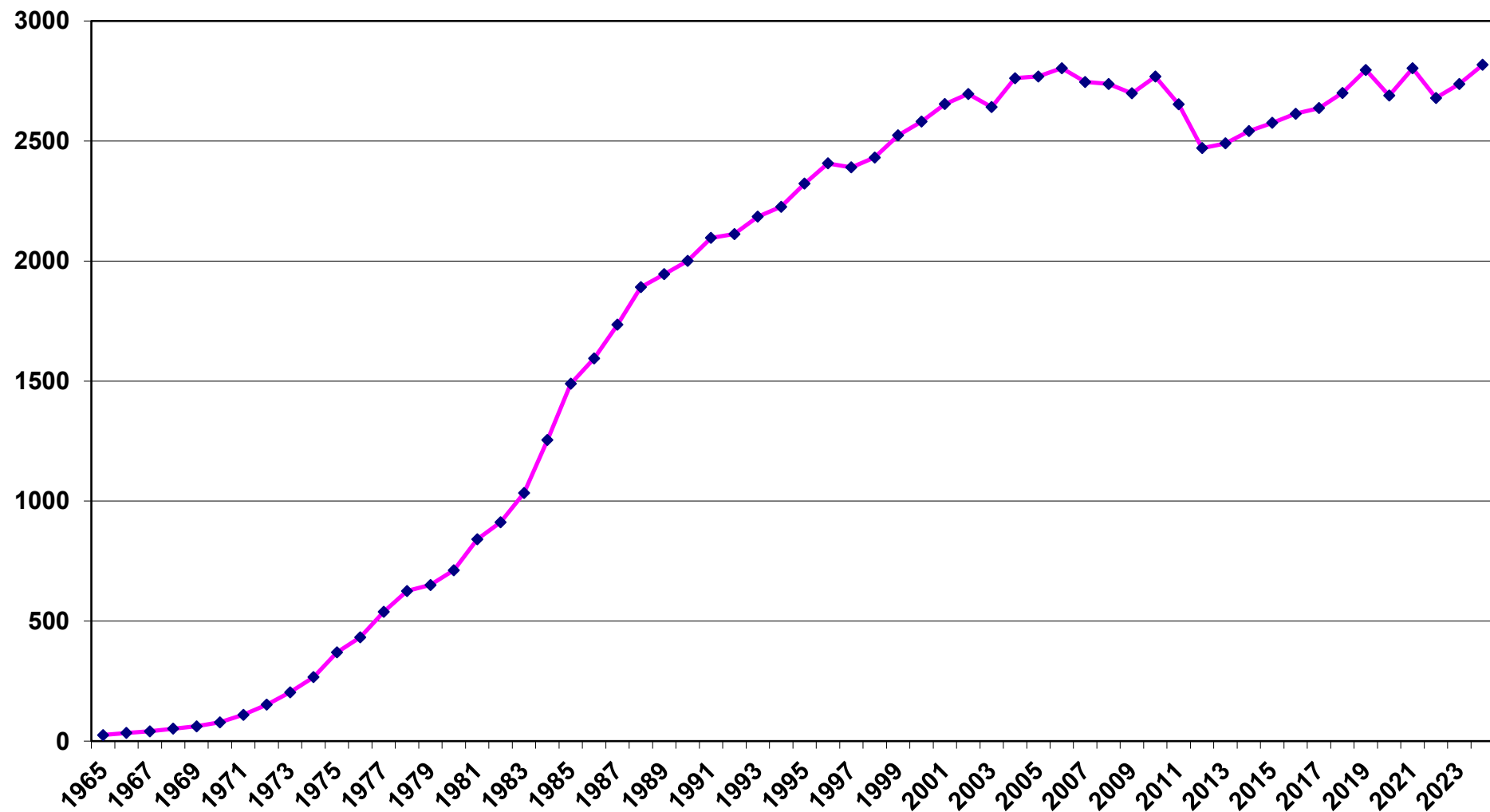
<https://www.connaissancedesenergies.org>

La Suède est le pays qui produit le plus d'électricité nucléaire au monde !
... par habitant, avec 6700 kWh/ha/an contre 5000 kWh/ha/an en France.



Le nucléaire dans le monde

Production mondiale annuelle d'électricité d'origine nucléaire en TWh

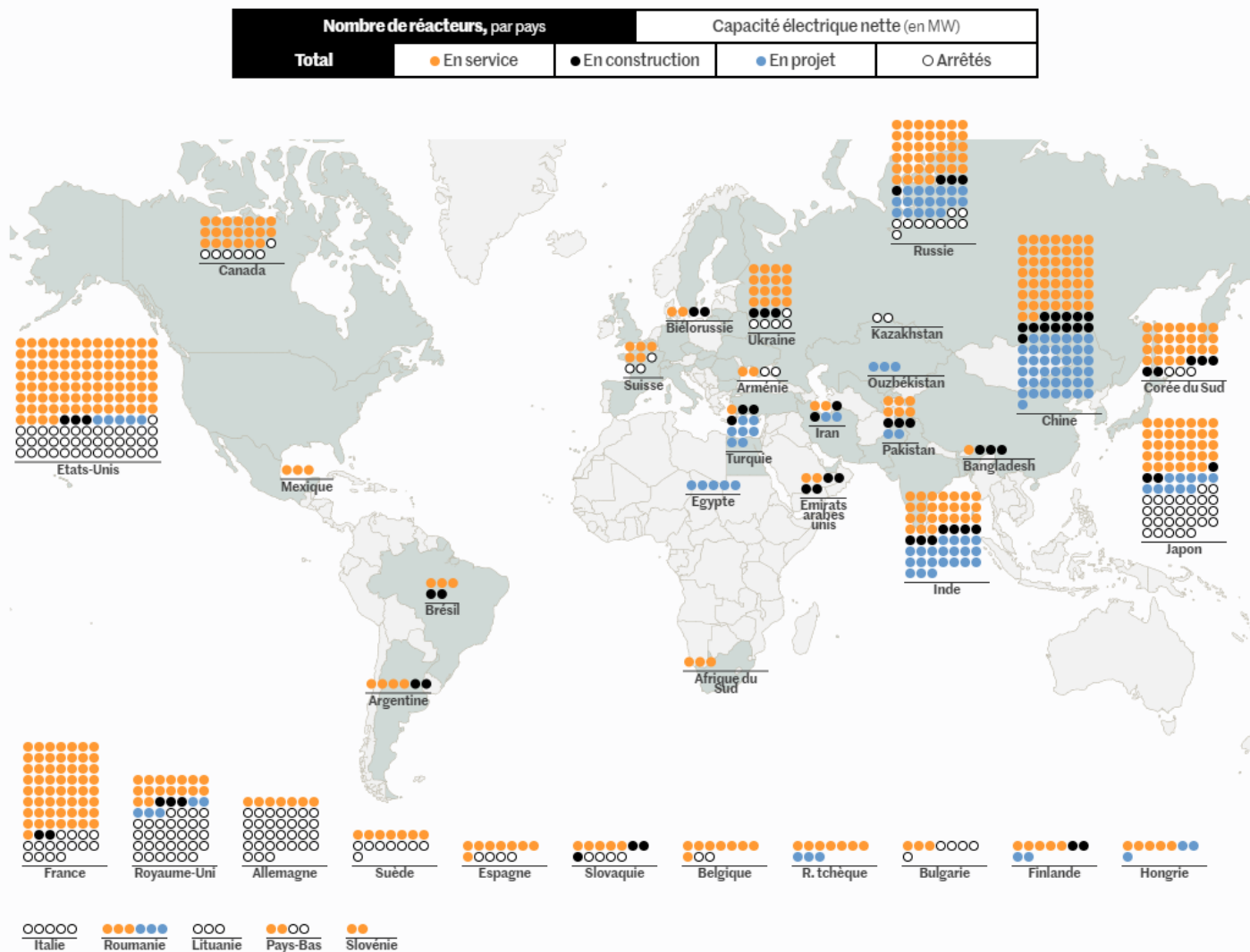


EI Stats Review, 2025

Électricité en France et dans le monde



Le nucléaire dans le monde



Source : Agence internationale de l'énergie (IEA)

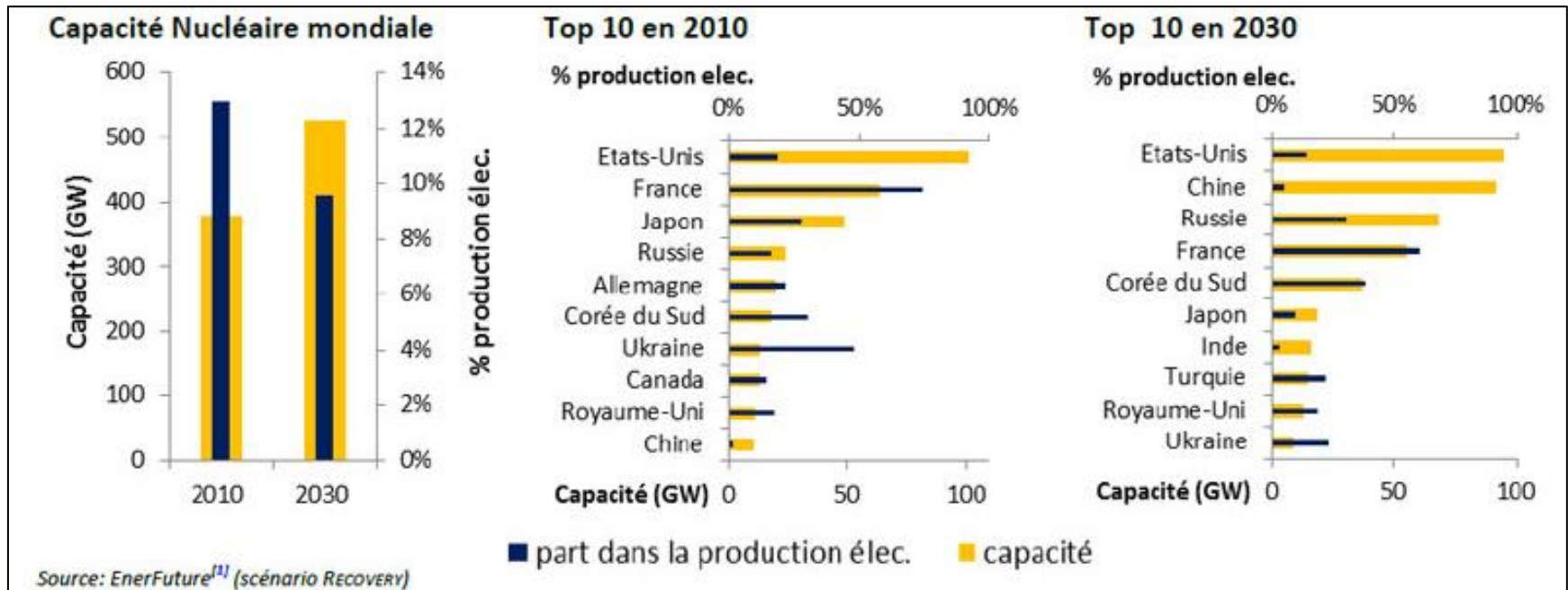
[Le Monde – 11 mars 2021](#)

Électricité en France et dans le monde



Le nucléaire dans le monde → des perspectives (version 2010-2015)

- ◆ Malgré l'accident de Fukushima, le marché du nucléaire civil reste très actif : une soixantaine de réacteurs sont en construction dans le monde → + 150 à 200 GW d'ici 2030.
 - ◆ Absence d'alternative pour de nombreux pays sans ressource fossile,
 - ◆ Vieillissement du parc existant,
 - ◆ Hausse de la demande en électricité → la Chine compte étendre son parc de 12 GW en 2011 à 100 GW en 2035... avec une part du nucléaire qui ne passera que de 2% à 4%.

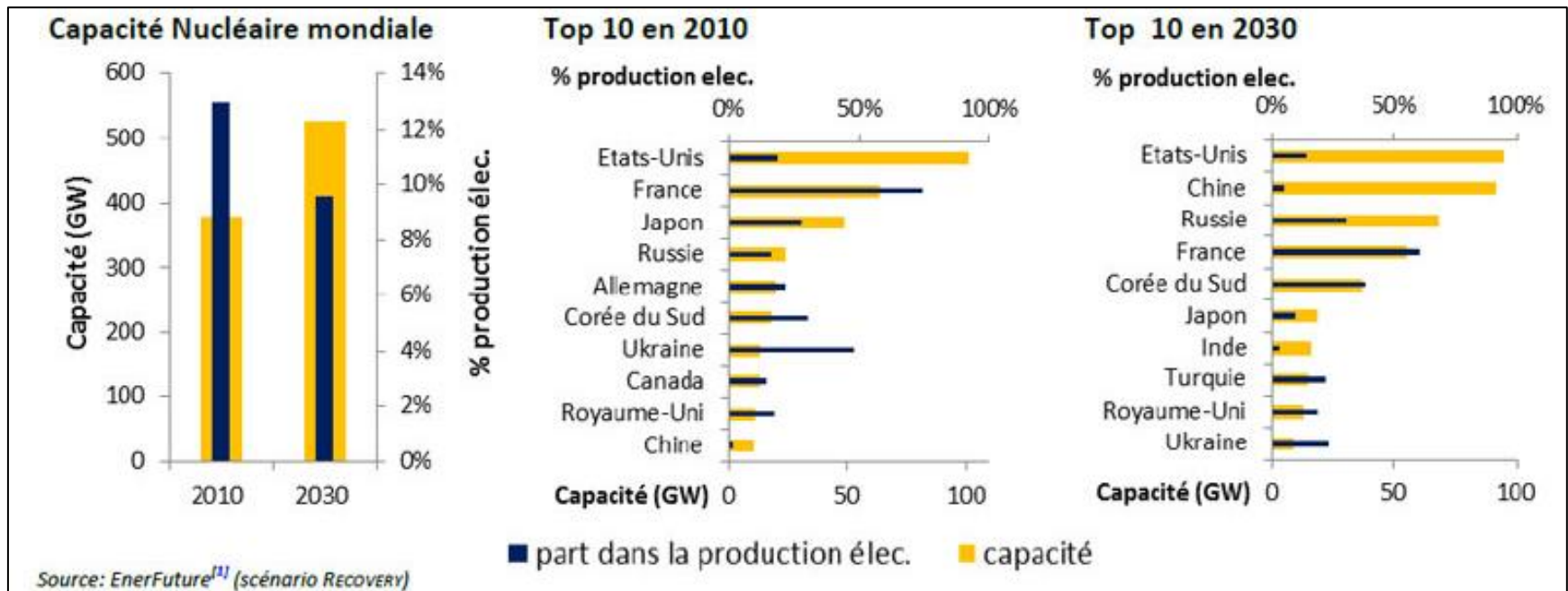


<http://www.enerzine.com/2/13117+perspectives-de-l-energie-nucleaire---vers-un-monde-bipolaire+.html>



Le nucléaire dans le monde → des perspectives, mais... (version 2015-2020)

- ◆ A ce discours « traditionnel » s'en est substitué progressivement un autre (voir par exemple le [Dessous des Cartes](#) ou [ici](#)) qui pointe les difficultés du nucléaire, liées principalement à :
 - ◆ Une sous-évaluation des coûts réels.
 - ◆ La compétitivité croissante des énergies renouvelables électriques (éolien puis solaire).
 - ◆ La complexité des installations nucléaires et les difficultés des opérateurs du secteur à conduire des chantiers d'envergure, surtout en Europe (les EPR d'Areva) et aux USA.

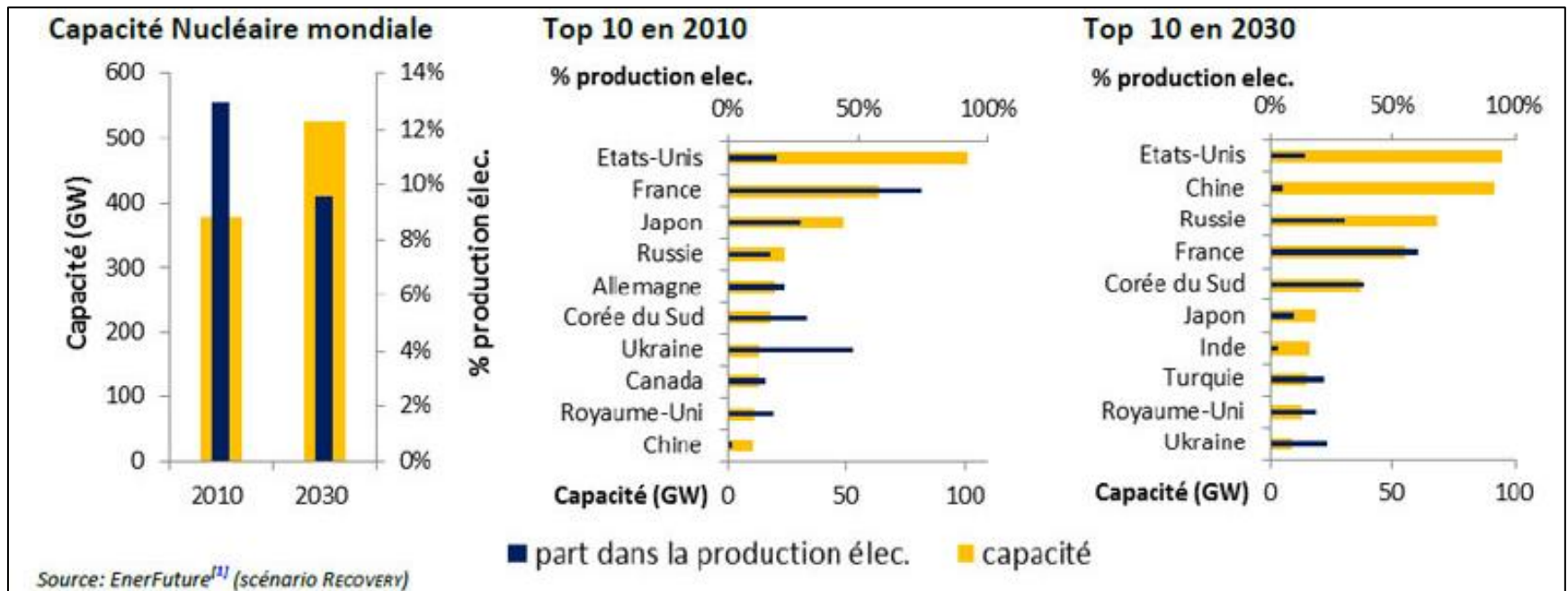


<http://www.enerzine.com/2/13117+perspectives-de-l-energie-nucleaire---vers-un-monde-bipolaire+.html>



Le nucléaire dans le monde → des perspectives (version 2020-2025)

- ♦ Aujourd'hui, malgré les difficultés, on observe un regain de popularité de l'électricité nucléaire, lié principalement à :
 - ♦ Une prise de conscience du rôle de l'électricité dans la décarbonation et du besoin de ressources non-intermittentes.
 - ♦ Une amélioration de la flexibilité de l'offre et de nouveaux concepts de production.
 - ♦ Un besoin de souveraineté énergétique pour de nombreux pays,



<http://www.enerzine.com/2/13117+perspectives-de-l-energie-nucleaire---vers-un-monde-bipolaire+.html>



Accidents de centrales nucléaires

- ◆ Réacteur nucléaire → réaction en chaîne contrôlée destinée à produire :
 - ◆ de la **chaleur** que l'on transforme ensuite en énergie mécanique ou électrique ;
 - ◆ du **plutonium** ;
 - ◆ des **neutrons** ou des **isotopes radioactifs**.
- ◆ Toutes applications confondues → plus d'un millier de réacteurs dans le monde.
- ◆ Le premier réacteur nucléaire a été construit aux États-Unis en 1942, à l'Université de Chicago. Il développait une puissance de 500 kW. Le premier réacteur *électronucléaire* a été construit à Obninsk, en URSS, en 1954. Il pouvait fournir 5 MW. Le premier réacteur électronucléaire français a été construit en 1956 à Marcoule ; il marque les débuts de la **filière graphite-gaz**.



Électricité en France et dans le monde

Exemple de réacteur nucléaire pour la recherche scientifique

Institut Laue-Langevin à Grenoble : le réacteur à haut flux a une puissance de 58 MW.



http://www.epn-campus.eu/fileadmin/user_files/sitemap/carte.html



Accidents de centrales nucléaires

- ◆ Un réacteur nucléaire est constitué :
 - ◆ d'un **cœur** où se déroule la réaction de fission,
 - ◆ de **réflecteurs de neutrons** : graphite, béryllium, acier et/ou carbure de tungstène),
 - ◆ de **moyens de contrôle de la réaction** : barres de contrôle en cadmium, gadolinium ou bore,
 - ◆ d'une **cuve métallique**,
 - ◆ et d'une **enceinte de confinement**.

- ◆ La **fission** nucléaire correspond à la transformation d'un noyau lourd et instable en atomes plus légers (les produits de fission). **La fission de l'uranium 235 libère en moyenne 2,4 neutrons.**

- ◆ Si ces 2,4 neutrons ont une probabilité supérieure à $1/2,4$ d'induire une nouvelle fission, la réaction est auto-entretenu : le réacteur atteint le régime **critique**.



Accidents de centrales nucléaires

- ◆ Un **neutron lent** a une plus grande probabilité d'être **capté** par un atome d'uranium 235.
En pratique, la première difficulté est de **ralentir** les neutrons... de 1 MeV à moins de 1 eV
→ **neutrons thermiques**, grâce à un **modérateur** : eau et/ou du **graphite**.
- ◆ Pour piloter (ralentir) la réaction en chaîne → **barres de contrôle** qui **absorbent** les **neutrons**.
- ◆ Lorsque l'on dépasse le régime critique, le nombre de neutrons produits par la réaction augmente de manière exponentielle, mais sans atteindre la cinétique d'une arme nucléaire :
 - ◆ Une petite fraction des neutrons de fission (0,7% pour l'U235... moins pour le MOX) sont émis après quelques secondes, ce sont les **neutrons retardés**, à l'origine de la différence entre **réactivité immédiate (prompte)** et **réactivité retardée**.
 - ◆ Un premier effet thermique → plus grande absorption des neutrons par le milieu ambiant.
 - ◆ Dans certains réacteurs électronucléaires, l'augmentation de l'ébullition de l'eau et la diminution de son effet **modérateur**.
 - ◆ Un deuxième effet thermique plus macroscopique lié à la **dilatation** du milieu qui diminue le confinement (quand ça commence à aller vraiment mal....).
 - ◆ ... et le combustible présent dans un réacteur est **nettement moins riche en matériaux fissiles** que dans une arme thermonucléaire ($\approx 3,7\%$ vs. $\approx 90\%$).



Accidents de centrales nucléaires

- ◆ En situation accidentelle, **la réactivité d'un cœur ne peut donc pas atteindre celle d'une arme nucléaire**. Lorsqu'un système devient accidentellement sur-critique, il accumule de l'énergie et subit des transformations qui le rendent à nouveau sous-critique.
- ◆ *... Mais le problème principal réside dans le comportement du **corium**, c'est-à-dire les produits de la fusion du cœur après un accident majeur → lors de la catastrophe de Tchernobyl, les scientifiques de l'URSS ont redouté -les 8 ou 9 mai 1986- une explosion catastrophique au contact d'une poche d'eau.*
- ◆ Il existe deux types d'accidents possibles : la **fusion du cœur** et l'**accident de criticité**.
- ◆ Accident de criticité = excès important de réactivité → **réactivité prompte** → augmentation de la température → vaporisation partielle → surpression et explosion.
- ◆ Il y aurait déjà eu **60 accidents de criticité** dans le monde, dont 3 à Los Alamos (en 1945, 1946 et 1958), et 38 sur des réacteurs prototypes ou des réacteurs de recherche. Le dernier date(rail) de 1999, à Tokaï au Japon ← quantité trop importante d'uranium dans une cuve de décantation.
- ◆ Les explosions survenues à Fukushima sont liées à une **élévation anormale de la température du cœur**, sans qu'il y ait eu d'accident de criticité.
- ◆ La catastrophe de Tchernobyl ne correspondrait pas non plus à un accident de criticité.



Le(s) réacteur(s) naturel(s) d'Oklo au Gabon

- ◆ Les physiciens de la Cogema qui exploitaient une mine d'uranium à Oklo au Gabon ont remarqué en 1972 que la concentration en uranium 235 était anormalement basse par endroit : de 0,440% à 0,7171% contre 0,7202% normalement.
- ◆ La meilleure explication proposée à cette anomalie est que la concentration très élevée en uranium des mines d'Oklo était suffisante pour initier des réactions de fission nucléaire spontanées.
- ◆ Oklo est le seul site connu où des réacteurs naturels aient pu exister, dans seize endroits différents.

Les traces de réactions de fission datent d'environ deux milliards d'années.

(Et certains présentent Oklo comme le plus vieux site de déchets nucléaires au monde.)



<http://www.ans.org/pi/np/oklo/>



Accidents de centrales nucléaires

- ◆ Les accidents et les incidents nucléaires sont classés sur une **échelle de 1 à 7** en fonction de leurs **conséquences sur la sécurité**, de l'**incidence sur le site**, et de l'**incidence hors-site**.
- ◆ Les événements notés de 1 à 3 sont considérés comme des **incidents**. Un incident de niveau 3 est un incident grave avec mise hors service des dispositifs de sécurité, et éventuellement des rejets minimes.
- ◆ **Conséquence sur la sécurité :**
 - 4 → pertes des défenses et contamination.
- ◆ **Incidence sur le site :**
 - 4 → endommagement important du réacteur ou des barrières radiologiques, ou décès d'un travailleur suite à des rejets.
 - 5 → endommagement grave du réacteur ou des barrières radiologiques.
- ◆ **Incidence hors-site :**
 - 4 → rejets mineurs avec exposition du public de l'ordre des limites prescrites.
 - 5 → rejets exigeant l'application partielle des mesures prévues de protection.
 - 6 → rejets importants exigeant l'application intégrale des mesures de protection.
 - 7 → rejets majeurs, avec des conséquences étendues sur la santé et l'environnement.



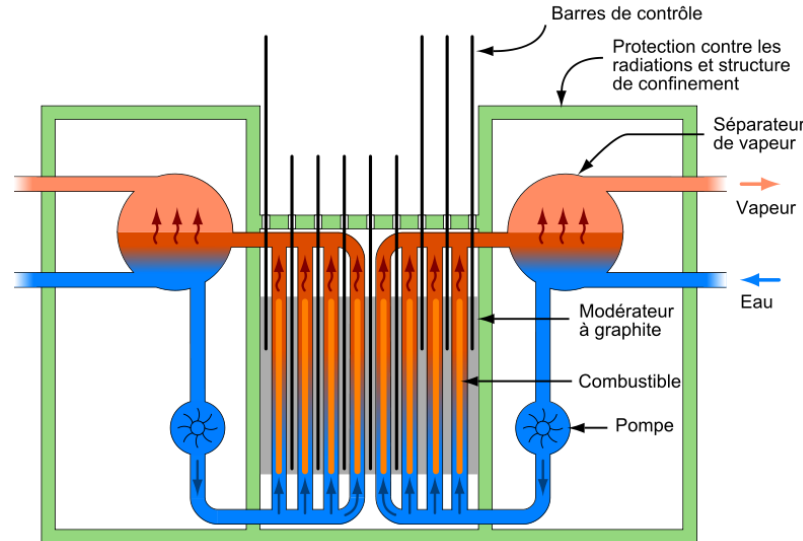
Accidents de centrales nucléaires

- ◆ Les catastrophes de Tchernobyl et Fukushima sont des accidents de **niveau 7**.
- ◆ Accident de **niveau 6** : pas d'accident de centrale mais catastrophe de Kychtym (complexe nucléaire Maïak) en Russie le 29 septembre 1957 → contamination radioactive dans une usine de retraitement de combustible → 200 victimes et 10000 personnes ont été évacuées.
- ◆ Accidents de **niveau 5** : quatre, dont deux en centrale.
 - Chalk River**, Ontario, Canada, 1952 → perte de l'eau de refroidissement du cœur d'un réacteur expérimental → augmentation de puissance → explosions en série et destruction du toit de l'enceinte de confinement.
 - Three Mile Island**, États-Unis, 1979 → panne des pompes d'alimentation en eau du circuit secondaire + défaillances mécaniques, erreurs humaines, absence de procédure et défauts de conception → fusion du cœur. L'enceinte de confinement n'a pas souffert → rejets limités.
- ◆ Accidents de **niveau 4** : au moins quatre en centrale.
 - Saint-Laurent-des-Eaux**, France, octobre 1969 → fusion de 50 kg de dioxyde d'uranium lors d'une opération de chargement du réacteur A1 filière UNGG (Uranium Naturel, Graphite-Gaz).
 - Saint-Laurent-des-Eaux**, France, mars 1980 → fusion de deux éléments combustibles du réacteur A2 suite à l'obstruction d'une douzaine de canaux du bloc de graphite.



Catastrophe de Tchernobyl - 26 avril 1986

- ◆ Le réacteur n°4 de Tchernobyl est de type RBMK → sans circuit primaire, instable à faible puissance (coeff. de température positif), modéré au graphite, et sans enceinte de confinement pour permettre le (dé)chargement continu.
- ◆ L'accident est survenu lors d'un exercice qui avait pour but de prouver que la centrale pouvait être relancée d'elle-même à la suite d'une perte totale du réseau électrique.
 - Exercice conduit à puissance trop faible : 500 MW_t au lieu de 700-1000 MW_t puis 30 MW_t,
 - Pic Xénon et Iode → re-démarrage difficile,
 - Désactivation des sécurités : barres de contrôle et gestion du circuit d'eau,
 - Augmentation finalement trop rapide de la puissance → explosion.



Il reste onze réacteurs RBMK en fonctionnement. Leur exploitation serait prévue pour durer jusqu'en 2030/2035.

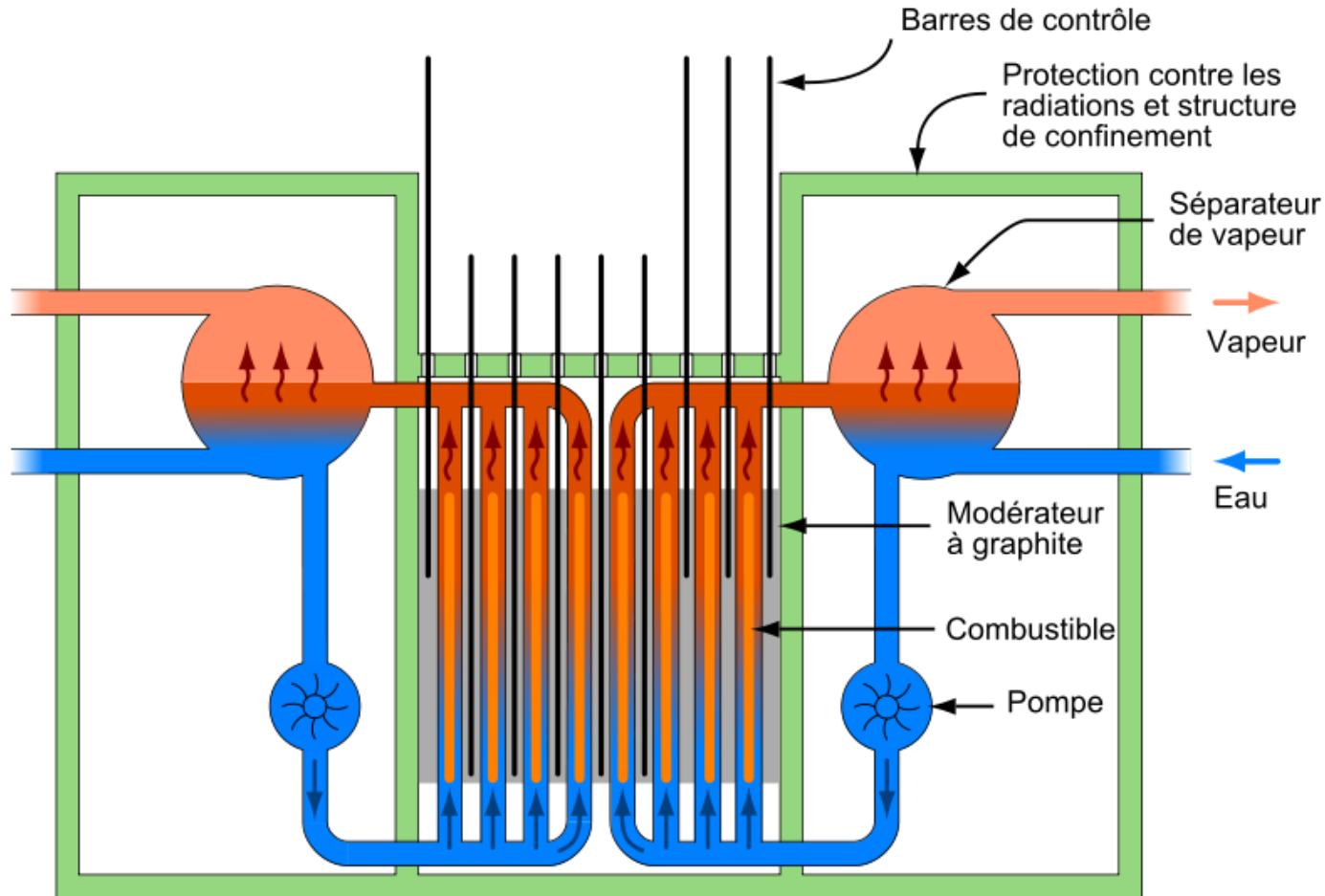
La sécurité a été considérablement améliorée.

http://fr.wikipedia.org/wiki/Fichier:RBMK_reactor_schematic-fr.svg



Catastrophe de Tchernobyl

L'explosion serait due à la radiolyse de l'eau et/ou à une pression de vapeur trop importante.

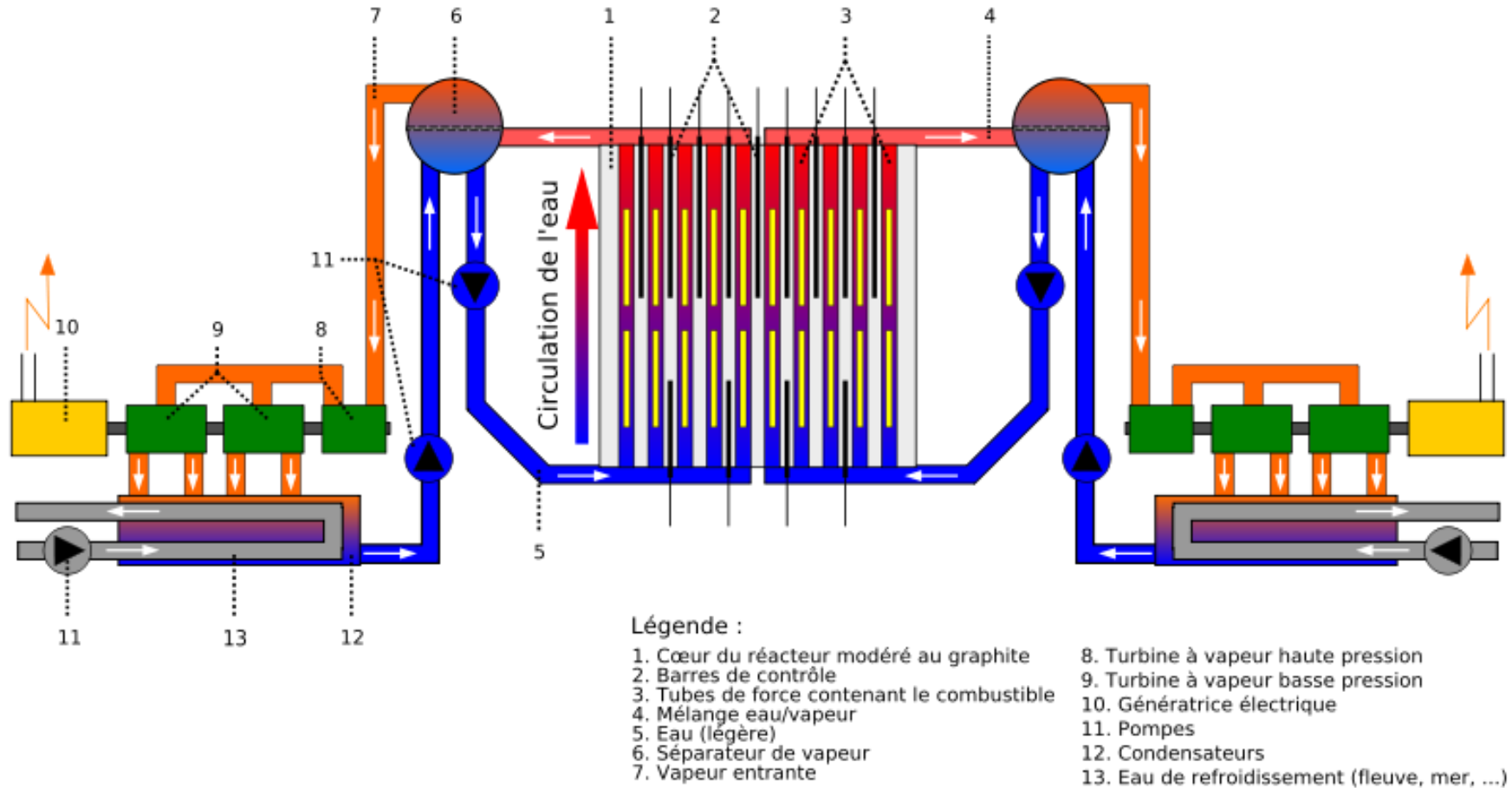


http://fr.wikipedia.org/wiki/Fichier:RBMK_reactor_schematic-fr.svg



Catastrophe de Tchernobyl

L'explosion serait due à la radiolyse de l'eau et/ou à une pression de vapeur trop importante.

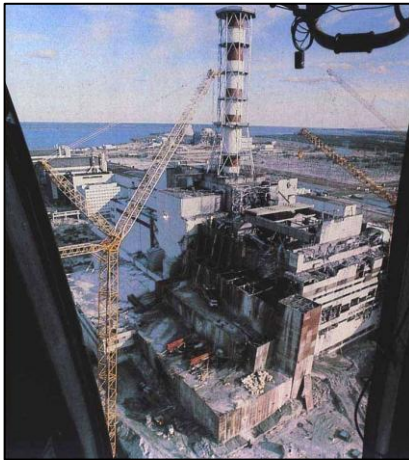


http://fr.wikipedia.org/wiki/Fichier:RBMK_fr.svg



Catastrophe de Tchernobyl → conséquences

- ◆ Zone d'exclusion définitive de 300000 ha (3000 km²) → 2 villes et 70 villages sont évacués entre le 27 avril et le 7 mai, soit au total 250000 habitants environ.
- ◆ 56 décès immédiats et 600000 ouvriers appelés de l'ensemble de l'URSS pour procéder au nettoyage du site, dans des conditions très variables.
- ◆ Les estimations du nombre total des victimes varient d'un facteur 10 selon les sources :
 - 4000 décès à terme d'après le rapport du Forum Tchernobyl organisé à Vienne en septembre 2005 sous l'égide de l'AIEA, de l'OMS et du PNUD,
 - 10000 décès à terme d'après une étude du CIRC de Lyon,
 - 35000 décès effectifs parmi les seuls liquidateurs d'après Union Tchernobyl.



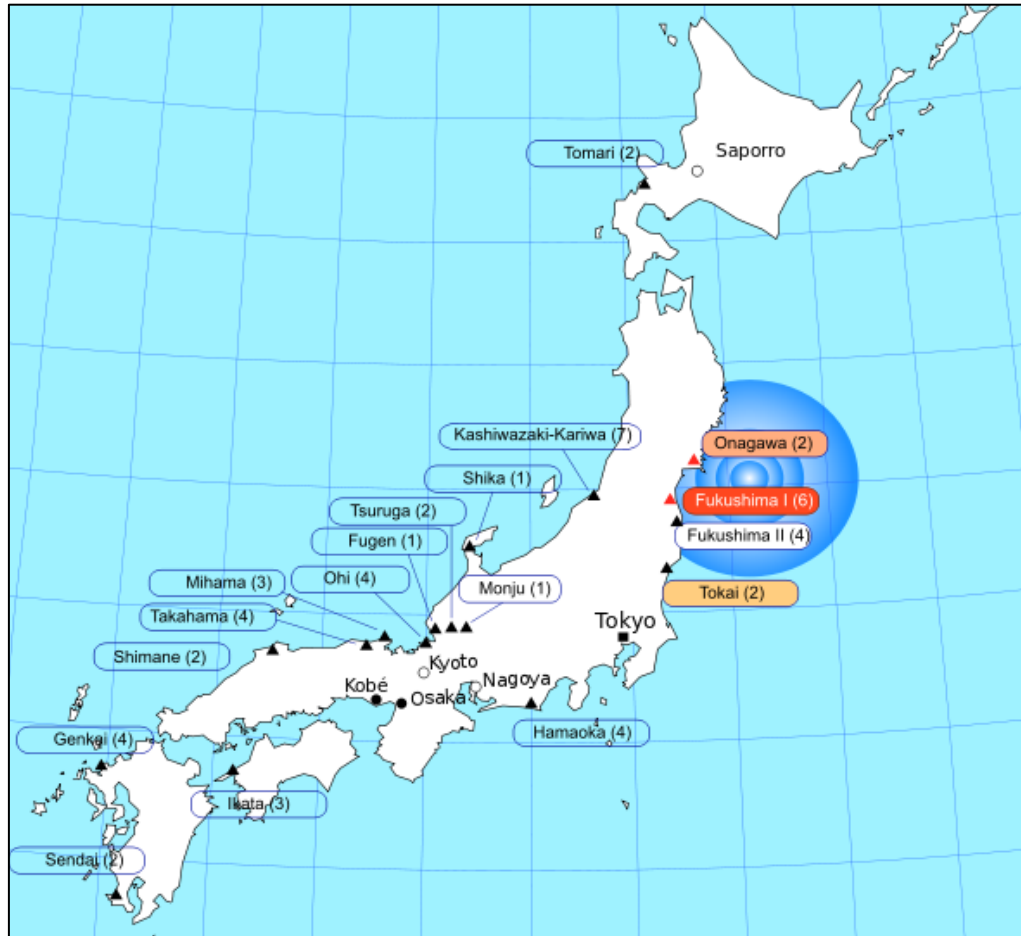
<http://www.astrosurf.com/luxorion/tchernobyl.htm>



<http://fr.wikipedia.org/wiki/Fichier:Chernobylreactor.jpg>



Accident de Fukushima - 11 mars 2011



Énergie nucléaire au Japon

- 380000 km² - 130 Mha
- Un réseau électrique à 50 Hz au Nord... et un autre à 60 Hz au Sud !
- 54 réacteurs en activité en mars 2011 dans 18 centrales
- → environ 46,8 GW
- 34 réacteurs à eau bouillante et 20 réacteurs à eau pressurisée
- En 2010 → 292 TWh/1145 TWh, soit 25% de la production totale d'électricité est nucléaire
- La centrale de Fukushima aurait été construite pour résister à un séisme de magnitude 8 et à un tsunami de 5,7 m.

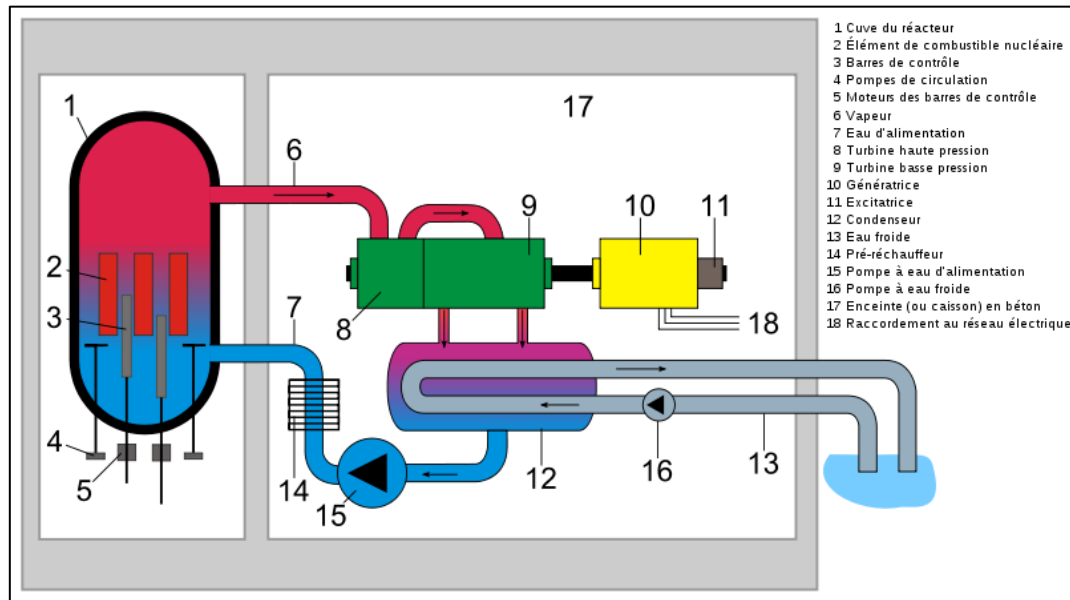
L'accident nucléaire de Fukushima au Japon est la conséquence d'un séisme de magnitude 9 qui s'est produit à 145 km de la centrale et qui a déclenché un tsunami de 15 m.

http://fr.wikipedia.org/wiki/Fichier:Nuclear_plants_Japan_in_2011.svg



Accident de Fukushima

- ◆ La centrale de Fukushima Daiichi comportait six réacteurs : réacteur 1 de 460 MWe, réacteurs 2 à 5 de 784 MWe et réacteur 6 de 1100 MWe. Les réacteurs 1, 2 et 3 fonctionnaient au moment du séisme. Les réacteurs 4, 5 et 6 étaient à l'arrêt pour maintenance.
- ◆ Le plus ancien de ces réacteurs datait de 1971.
- ◆ Il s'agit de réacteurs à eau bouillante où l'eau sert à la fois de fluide caloporteur et de modérateur. L'eau est partiellement vaporisée dans le cœur. Elle circule à une pression de 70 à 80 bars. La puissance est régulée par des barres de contrôle en graphite.

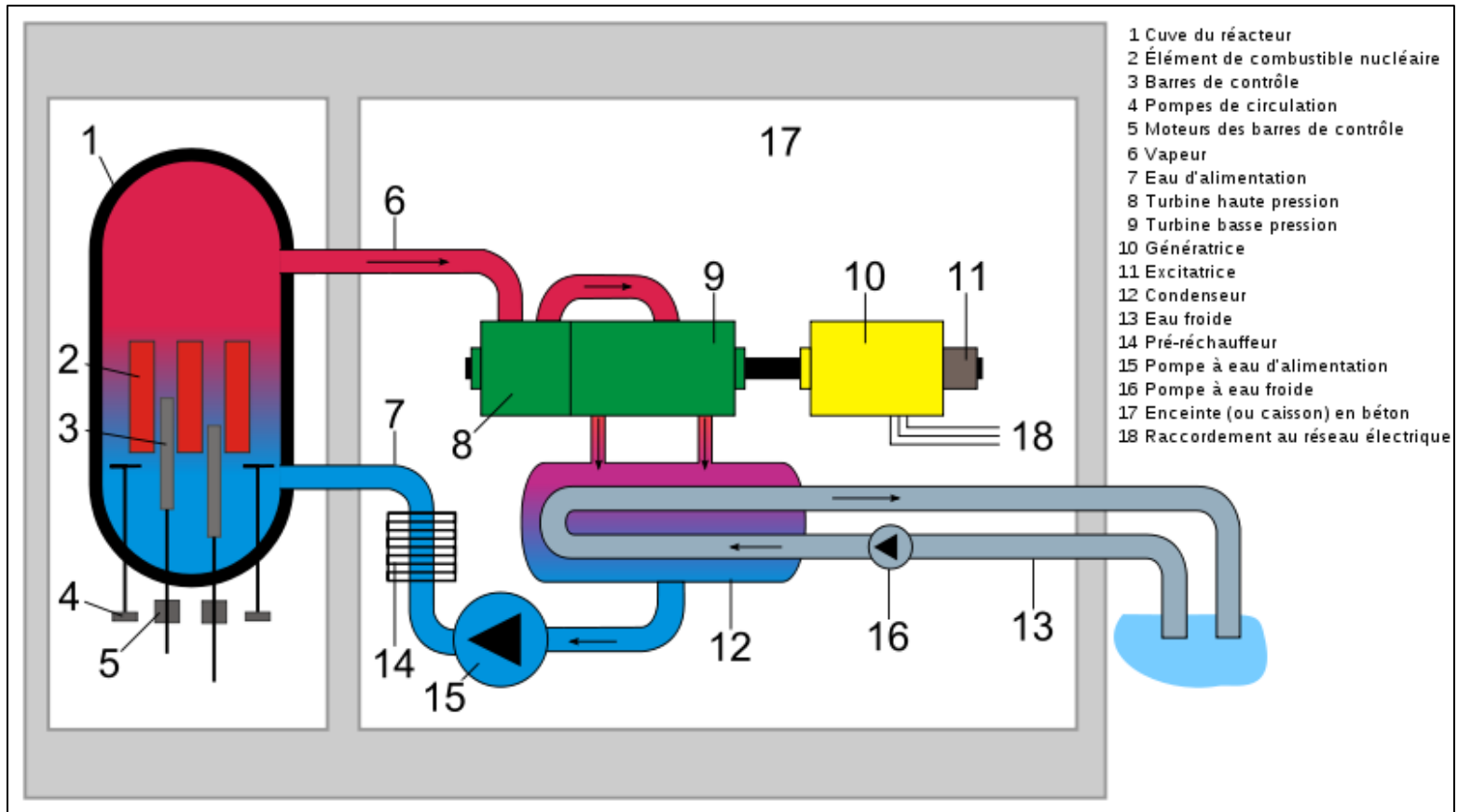


http://fr.wikipedia.org/wiki/Fichier:Boiling_water_reactor_french.svg



Accident de Fukushima

- Il s'agit de réacteurs à eau bouillante où l'eau sert à la fois de fluide caloporteur et de modérateur. L'eau est partiellement vaporisée dans le cœur. Elle circule à une pression de 70 à 80 bars. La puissance est régulée par des barres de contrôle en graphite.

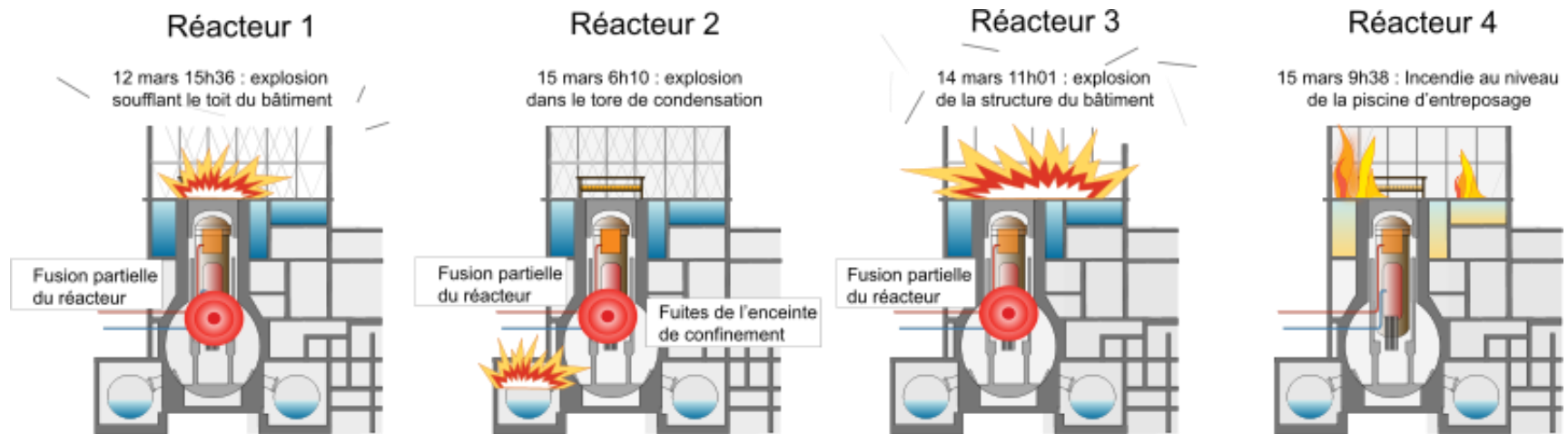


http://fr.wikipedia.org/wiki/Fichier:Boiling_water_reactor_french.svg



Accident de Fukushima

- ◆ D'une manière générale, un réacteurs nucléaire dégage encore 7% de sa puissance thermique nominale ($2380 \times 0,07 \approx 170$ MW à Fukushima) immédiatement après l'arrêt, puis 2% (50 MW) après 30 minutes et 1% (25 MW) après 8 heures.
- ◆ Ce dégagement thermique se poursuit également dans les piscines de désactivation.
- ◆ Au moment de la première secousse, les réacteurs 1, 2 et 3 stoppent automatiquement. Les lignes d'alimentations électriques des réacteurs sont détruites par le tremblement de terre → les groupes électrogènes de secours diesel actionnent les pompes de refroidissement.
- ◆ 45 minutes après le tremblement de terre, le tsunami atteint la centrale dont les bâtiments sont complètement inondés → perte des moyens de refroidissement des réacteurs 1 à 4.



http://fr.wikipedia.org/wiki/Fichier:Fukushima_16-mar.svg



Accident de Fukushima → conséquence

- ◆ Destruction et arrêt définitif des réacteurs 1 à 4... puis des 2 derniers.
- ◆ 5 décès directs.
- ◆ Zone d'exclusion de 20 km autour de la centrale, soit 700 km² environ. 150000, puis 250000 personnes auraient été déplacées. L'évacuation aurait conduit à 2300 décès indirects.
- ◆ 20 personnes auraient reçu des doses d'irradiation supérieures à 20 mSv (valeur maximale annuelle pour les travailleurs du nucléaire).
- ◆ D'après l'Agence Japonaise de Sûreté Nucléaire, l'accident a dispersé l'équivalent de 10 % de des rejets de Tchernobyl (mais en pratique, la situation n'est pas encore sous contrôle).
- ◆ 48 des 50 réacteurs japonais encore en état sont *immédiatement* arrêtés dans l'attente de nouvelles règles de sécurité. De mai à juin 2012, puis entre le 15 septembre 2013 et début 2016, tous sont arrêtés.
- ◆ Aujourd'hui, 11 réacteurs sont définitivement arrêtés... Il y aurait actuellement 8 réacteurs en fonctionnement sur les 43 encore opérationnels... 2 sont en construction.
- ◆ **8 des 17 réacteurs allemands sont arrêtés au printemps 2011.**
- ◆ Le 30 juin 2011, l'Allemagne vote la sortie du nucléaire (22% de l'électricité du pays) → un 9^{ième} réacteur est arrêté en 2015, un 10^{ième} en 2017, un 11^{ième} en 2019, les trois derniers en 2023.



Le nucléaire → tentative de synthèse (1/2)

- ◆ Densification de la population mondiale → une augmentation sans précédent du nombre de victimes des catastrophes naturelles et industrielles.
- ◆ Il existe un équivalent historique à la catastrophe de Tchernobyl : la catastrophe de Bhopal.

Catastrophe de Bhopal

3 décembre 1984

7600 à 12000 décès.

Catastrophe Tchernobyl

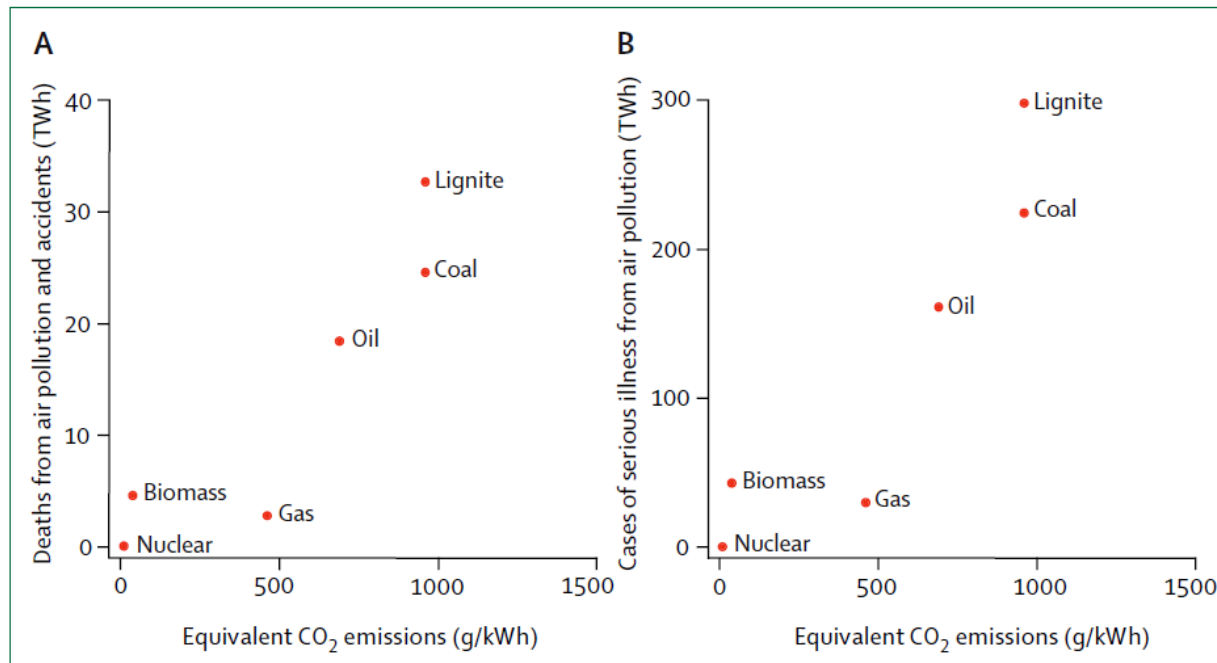
26 avril 1986

4000 à 10000 décès.



Le nucléaire → tentative de synthèse (1/2)

- ◆ Densification de la population mondiale → une augmentation sans précédent du nombre de victimes des catastrophes naturelles et industrielles.
- ◆ Il existe un équivalent historique à la catastrophe de Tchernobyl : la catastrophe de Bhopal.
- ◆ Malgré sa gravité, l'accident de Fukushima est sans commune mesure avec Tchernobyl.
- ◆ Il existe des études objectives qui analysent l'impact sur la santé de différentes filières énergétiques. On sait quantifier l'impact sanitaire de chaque TWh produit.



Anil Markandya, Paul Wilkinson - Lancet 2007; 370: 979–90 – Pour un commentaire actualisé, [voir ici](#).



Le nucléaire → tentative de synthèse (1/2)

- ◆ Densification de la population mondiale → une augmentation sans précédent du nombre de victimes des catastrophes naturelles et industrielles.
- ◆ Il existe un équivalent historique à la catastrophe de Tchernobyl : la catastrophe de Bhopal.
- ◆ Malgré sa gravité, l'accident de Fukushima est sans commune mesure avec Tchernobyl.
- ◆ Il existe des études objectives qui analysent l'impact sur la santé de différentes filières énergétiques. On sait quantifier l'impact sanitaire de chaque TWh produit.
- ◆ L'énergie nucléaire et ses risques ne peuvent cependant pas être jugés objectivement :
 - ◆ A tort ou à raison, l'amalgame arme nucléaire/énergie nucléaire est inévitable :
 - [risques liés aux armes](#)... ou bien [ici](#) (B52) → [état des relations Russie-USA](#) (avant l'Ukraine).
 - La bombe **précède** les centrales et beaucoup d'autres technologies sont issues du monde militaire.
- ◆ A tort ou à raison, le terrorisme nucléaire inquiète (« états voyous »).
- ◆ L'impact sur l'opinion publique d'un accident industriel majeur est bien supérieur à celui d'une succession de petits événements... [voir ici](#) pour une tentative de démystification de la question par J.-M. Jancovici sur France Culture (l'ambiance est un peu tendue...) [ou là](#) pour un débat plus posé sur Arte en 2021.
- ◆ En France, le nucléaire souffre d'une longue histoire de non-dits... et d'erreurs graves.



Le nucléaire → tentative de synthèse (2/2)

- ◆ ... mais en ne considérant que les **éléments objectifs**, côté **positif** :
 - ◆ Une production régulière, *relativement* fiable, et décarbonée.
 - ◆ Une durée de vie très importante des centrales... et donc un coût raisonnable *in fine*.
 - ◆ Des perspectives d'évolution réelles, comme avec les réacteurs au thorium 232, les SMR...
 - ◆ Pas ou peu d'impact sanitaire, y compris en prenant en compte les accidents.
 - ◆ ... tous les scénarios du GIEC reposent ± et en partie sur le développement du nucléaire.
- ◆ Côté **négatif** :
 - ◆ Une dérive importante des coûts... à pondérer par la durée de vie des centrales.
 - ◆ Une complexité des centrales et de la filière de plus en plus délicate à maîtriser.
 - ◆ Des risques technologiques importants : malfaçons, évolution des normes/réglementation, vieillissements inattendus des matériels/corrosion, accidents ... et *conflits armés*.
 - ◆ Des réactions de l'opinion publique difficiles à gérer.
 - ◆ Un mode de production centralisé *-peut-être-* obsolète et une pilotabilité à améliorer.

En ce qui concerne la France, il existe un consensus ± implicite sur le fait qu'il n'est plus raisonnable, d'avoir une production électrique qui dépende à 70% ou 80% du nucléaire.

La réduction du taux de charge des réacteurs pourra participer (plus ou moins) à l'objectif des 50%.



Le nucléaire → répondre à 5 questions, au choix

- ◆ Qu'est-ce qu'un réacteur nucléaire à charge continue ou à flux continu ?
- ◆ Donner la liste des 9 pays qui possèdent l'arme nucléaire
- ◆ Citer les deux principaux types d'accidents nucléaires
- ◆ Combien est-ce que la France possède de réacteurs électronucléaires ?
- ◆ En quelles années a-t-on mis en service le plus de réacteurs nucléaires dans le monde ?
- ◆ Les puissances des réacteurs électronucléaires français sont de 900 MW, 1300 MW, 1450 MW ou 1620 MW. Lesquels sont les plus nombreux ?