



Association française pour l'information scientifique

L'énergie nucléaire, hier, aujourd'hui, demain

2 - L'histoire de l'électronucléaire

Thierry CAILLON



LA SFEN

- La Société Française d'Énergie Nucléaire est le carrefour français des connaissances sur l'énergie nucléaire.
- Créée en 1973, association régie par la loi de 1901, la SFEN est un lieu d'échanges pour les spécialistes de l'énergie nucléaire français et étrangers.
- Elle rassemble 3 600 professionnels de l'industrie, l'enseignement, et la recherche.
- Elle a une vocation scientifique, et non militante.

➤ <https://sfen.org/>

➤ <https://sfenral.fr/>



Faire avancer
le nucléaire

SOMMAIRE

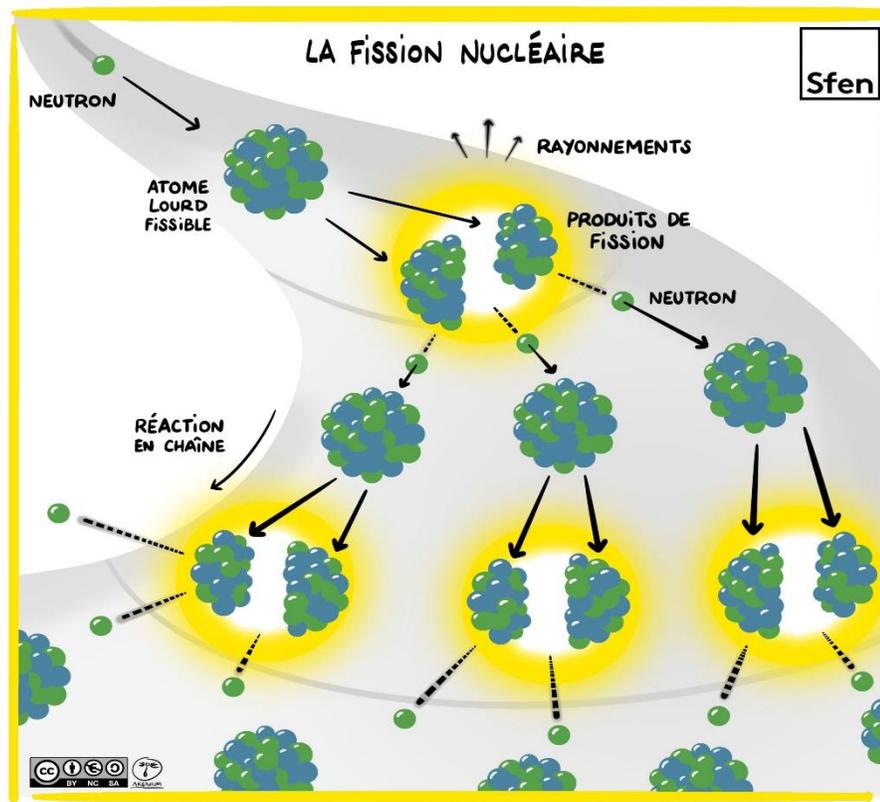
- 1. La fission nucléaire : principe et génèse**
- 2. Les 3 composants d'un réacteur électrogène**
- 3. Les 4 générations de réacteurs au fil du temps**
- 4. Les 5 types de réacteurs actuels**
- 5. Les réacteurs de demain**
- 6. Et après-demain ?**



LA FISSION NUCLÉAIRE : PRINCIPE

- La fission consiste à projeter un neutron sur un atome lourd instable fissile (uranium 235 ou plutonium 239), qui éclate alors en 2 atomes plus légers. Cela produit de l'énergie, des rayonnements radioactifs et 2 ou 3 neutrons capables à leur tour de provoquer une fission. Et ainsi de suite. C'est le mécanisme de la **réaction en chaîne**.

- Cet éclatement s'accompagne d'un **dégagement de chaleur**, c'est à dire d'énergie, très important.
- 1 g d' ^{235}U libère ainsi autant d'énergie que la combustion de 2,4 tonnes de charbon ou de 1,6 tonne de pétrole.



LA FISSION NUCLÉAIRE : GÉNÈSE

- C'est en **1938** que **trois chimistes allemands (Hahn, Meitner et Strassmann)**, mettent en évidence le phénomène de fission nucléaire, montrant qu'un neutron peut casser un noyau d'uranium en 2 noyaux plus petits, en libérant une grande quantité d'énergie.
- **En 1939, trois français (Joliot, Halban et Kowarski)** mettent en évidence, outre les produits de fission et une grande quantité d'énergie, la production de 2 ou 3 neutrons de haute énergie dans la fission de l'uranium. Ils imaginent la possibilité d'une réaction en chaîne et déposent 3 brevets au nom du CNRS. Ces brevets, très complets, fournissent toutes les indications pour réaliser un réacteur nucléaire, et sont encore consultables au CEA.
- **Le 2 août 1939, Einstein écrit au pdt Roosevelt**, sur la demande de deux physiciens hongrois (Szilard et Wigner) qui redoutaient que l'Allemagne nazi se dote d'une bombe atomique, pour attirer son attention sur la nouvelle source d'énergie que représente l'uranium et sur la possibilité de construire une bombe.



LA FISSION NUCLÉAIRE : GÉNÈSE

- **Le 1^{er} septembre 1939, la seconde guerre mondiale éclate**
- **D'octobre 1939 à juin 1942, le Projet Manhattan sera mis en place**, dirigé par le général Groves et le physicien Oppenheimer, pour aboutir à la construction de l'arme atomique, qui sera lancée sur Hiroshima et Nagasaki à l'été 1945.
- La découverte de l'énergie nucléaire dégagée par la fission a donc débouché sur 2 applications, les réacteurs nucléaires électrogènes d'une part et la bombe A d'autre part,
- Et le **contexte très spécifique de l'époque a fait que les recherches se sont concentré en premier et exclusivement sur l'application militaire**, dont le monde entier a découvert les conséquences avec effroi,
- **Marquant ainsi jusqu'à aujourd'hui la perception du nucléaire civil , et son association, consciente ou non, au nucléaire militaire.**



LES 3 COMPOSANTS D'UN RÉACTEUR

L'énergie nucléaire utilise une large gamme de technologies. Les différents types de réacteurs dans le monde sont regroupés selon le combustible, le modérateur et le fluide caloporteur qu'ils utilisent :

- **Le combustible** : constitué d'atomes fissiles, il est utilisé pour produire de l'énergie dans un réacteur nucléaire. Les principaux atomes fissiles sont l'uranium 233, l'uranium 235, le plutonium 239 et le plutonium 241. Seul l'uranium 235 se trouve à l'état naturel. C'est donc lui qui est utilisé le plus souvent comme combustible, sous forme plus ou moins enrichie.
- **Le modérateur** : placé au cœur du réacteur, il ralentit la vitesse des neutrons et garantit ainsi une réaction en chaîne optimale. Ce peut être de l'eau ordinaire (grâce à l'hydrogène, le meilleur des ralentisseurs), de l'eau lourde (eau dans laquelle n'est conservé que l'isotope lourd de l'hydrogène, le deutérium), ou du graphite (carbone pur).
- **Le fluide caloporteur** : transporte la chaleur produite vers la turbine. Ce peut être de l'eau pressurisée, de l'eau bouillante, du gaz, du sodium ou du sel fondu.



3

LES 4 GENERATIONS DE REACTEURS

Une génération correspond à un saut technologique (en matière de sûreté, de fonctionnement, du cycle de combustible, de compétitivité). **Chaque génération répond à des objectifs liés aux enjeux majeurs de l'époque de leur conception.**

Cette notion est différente de celle de filière ou de type de réacteur : on trouve plusieurs technologies dans chaque génération.



1^{ères} réalisations



UNGG
MAGNOX
HWGCR

Réacteurs actuels



REOMG (RBMK)
REB (BWR) AGR
REP (PWR) PHWR
VVER (WWER) CANDU

Réacteurs évolutionnaires



EPR
AP 600 et AP 1000
VVER AES 2006
ABWR et ESBWR
APR 1400
HUALONG One
CANDU EC6
APWR
ATMEA
KERENA

Réacteurs du futur



RTHT (VHTR)
RESC (SCWR)
RSF (MSR)
RNR (FNR) → $\left\{ \begin{array}{l} \text{RNR-Na (SFR)} \\ \text{RNR-G (GFR)} \\ \text{RNR-Pb (LFR)} \end{array} \right.$
SMR

Génération IV

Génération III et III+

Génération II

Génération I



LES 4 GENERATIONS DE REACTEURS

La **1^{ère} génération** comprend les prototypes et les 1^{ers} réacteurs de taille industrielle à usage commercial mis au point dans les années 1950 et 1960, et entrés en service avant les années 1970.

- Conçu dans l'immédiat après-guerre 39-45, ces réacteurs devaient faire la démonstration du potentiel de la puissance atomique mise au service de l'énergie civile.
- Il s'agit généralement de réacteurs refroidis à l'eau et modérés au graphite, d'une puissance comprise entre 50 et 500 MW.
- L'enrichissement de l'uranium n'étant pas encore développé, la majorité de ces réacteurs utilisaient l'uranium naturel comme combustible.
 - UNGG (Uranium Naturel Graphite Gaz) en France
 - MAGNOX (MAGnesium-Non OXidizing) au Royaume-Uni
 - HWGCR (Réacteur à eau lourde refroidi au gaz)



FAISABILITE

LES 4 GENERATIONS DE REACTEURS



Les réacteurs nucléaires de **2^{ème} génération** sont entrés en service à partir de 1970.

- Ils correspondaient à la nécessité d'une meilleure compétitivité de l'énergie nucléaire et d'une amélioration de l'indépendance énergétique, dans un contexte de fortes tensions sur le cours des énergies fossiles (choc pétrolier).
- La plupart des réacteurs de 2^{ème} génération sont des réacteurs à eau pressurisée (REP ou PWR). Ils utilisent de l'uranium enrichi à 3-4 % et sont modérés à l'eau. En France, les REP seront issus d'une technologie américaine (Westinghouse) adaptée par EDF.
- La majorité des réacteurs actuellement en exploitation dans le monde sont des réacteurs de génération 2 :
 - REP (PWR) : réacteur à eau pressurisée
 - REB (BWR) : réacteur à eau bouillante
 - RRG (AGR) : réacteur avancé refroidi au gaz
 - RELP (PHWR) : réacteur à eau lourde pressurisée
 - VVER (WWER) : réacteur à eau pressurisée de conception soviétique
 - RBMK (REOMG) : réacteur de grande puissance à tubes de force à eau bouillante, modéré au graphite, de conception soviétique
 - CANDU : réacteur à l'uranium naturel et à eau lourde de conception canadienne

DEPLOIEMENT

LES 4 GENERATIONS DE REACTEURS

La **3^{ème} génération** de réacteurs nucléaires, conçus à partir des années 1990, et qui prend aujourd'hui progressivement le relais, met l'accent sur les impératifs liés à la sûreté et à la sécurité.

- Ces réacteurs dits « évolutionnaires » tirent les enseignements du REX de l'exploitation des réacteurs de génération 2, des accidents de Three Miles Island (1979), de Tchernobyl (1986), des attentats du 11 septembre 2001, puis ensuite de l'accident de Fukushima (2011).
- Ils intègrent des systèmes de récupération du corium en cas de fonte du cœur ainsi que des redondances accrues pour les systèmes de sécurité interne et externe et de contrôle commande.
- La majorité des réacteurs actuellement en construction dans le monde sont des réacteurs de génération 3 :
 - l'EPR (european pressurized reactor) français (Framatome)
 - l'AP 600 et AP 1000 (advanced pressurized) américano-japonais (Westinghouse)
 - l'AES 2006, dernier modèle de 1 200 MWe du VVER russe
 - l'ABWR et l'ESBWR (réacteurs à eau bouillante) (GE Hitachi - Toshiba)
 - Il y a aussi : le coréen APR 1400, le chinois HUALONG 1 (dérivé de la GEN II), le canadien EC6 (dernier modèle du CANDU), le japonais APWR ou encore les français ATMEA et KERENA conçus par Framatome en collaboration avec d'autres électriciens



OPTIMISATION

LES 4 GENERATIONS DE REACTEURS

La 4^{ème} **génération** correspond aux réacteurs, actuellement en conception, qui pourraient voir un déploiement industriel à l'horizon 2030-2050.

- Ils sont en **rupture technologique totale** avec tout ce qui a été réalisé jusqu'à présent. Les recherches sur ces systèmes du futur sont menées dans le cadre du Forum international Génération IV qui a établi 4 critères auxquels ils devront répondre : la durabilité, la sûreté, la compétitivité économique et la résistance à la prolifération nucléaire.
- 6 technologies ont été retenues, dont 3 sont des réacteurs à neutrons rapides (RNR), une technologie qui permettrait de produire 50 à 100 fois plus d'électricité que les réacteurs actuels, et qui limiterait la durée de vie des déchets radioactifs à quelques centaines d'années :
 - RNR (FNR) : RNR-Na (SFR) / RNR-G (GFR) / RNR-Pb (LFR) : réacteurs à neutrons rapides refroidis au sodium, au gaz, ou au plomb
- Les trois autres technologies sont :
 - RESC (SCWR) : réacteurs à eau supercritique
 - RTHT (VHTR) : réacteurs à très haute température
 - RSF (MSR) : réacteurs à sels fondus
- Il y a également en développement, depuis quelques années :
 - SMR : réacteurs compacts modulaires, de petite puissance (300-400 MW)



DURABILITE

4

LES 5 TYPES DE REACTEURS ACTUELS

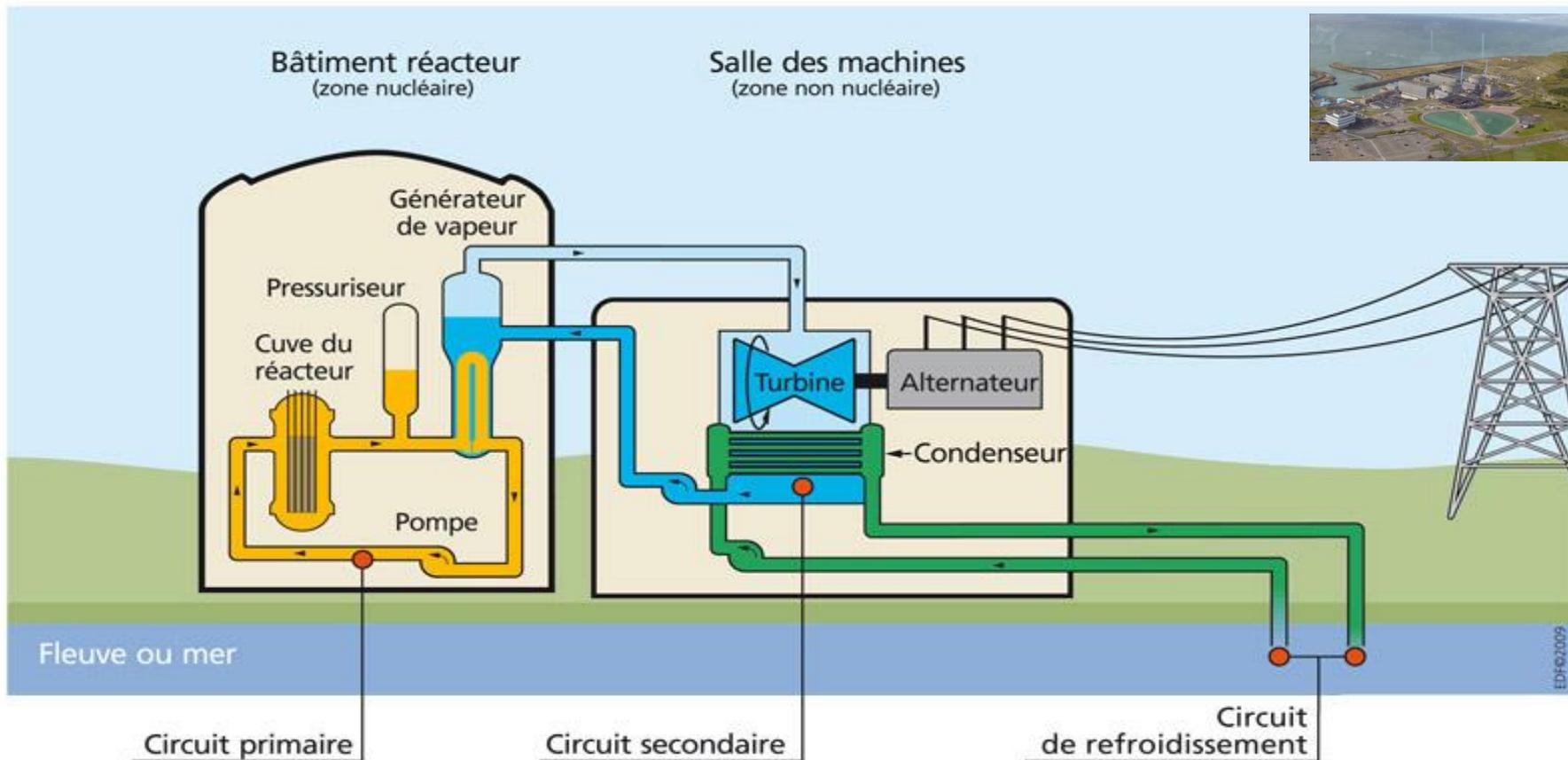
- On trouve 6 grands types de réacteurs en exploitation dans le monde. La concentration en uranium du combustible utilisé, le modérateur utilisé pour ralentir le processus de fission, et le caloporteur utilisé pour transférer la chaleur, varient d'un modèle à l'autre.
- Sur les 444 réacteurs en exploitation dans le monde à fin 2019, les réacteurs à eau pressurisée (REP) sont le type le plus répandu avec 65% du parc mondial, suivi par les réacteurs à eau bouillante (REB) avec 15%.

Type de réacteur	Combustible	Modérateur	Caloporteur	Nombre
Réacteur à eau sous pression (REP)	UO2 enrichi	Eau ordinaire	Eau ordinaire	292
Réacteur à eau bouillante (REB)	UO2 enrichi	Eau ordinaire	Eau ordinaire	75
Réacteur à eau lourde sous pression (RELP)	UO2 naturel	Eau lourde	Eau lourde	49
Réacteur à eau ordinaire modéré au graphite (REOMG)	UO2 enrichi	Graphite	Eau ordinaire	15
Réacteur refroidi par gaz (RRG)	U naturel et UO2 enrichi	Graphite	Dioxyde de carbone	14
Réacteur à neutrons rapides (RNR)	PuO2 et UO2	Aucun	Sodium liquide	3



4 LES 5 TYPES DE REACTEURS ACTUELS

Réacteur à Eau sous Pression (REP ou PWR) : *65% du parc mondial*



4 LES 5 TYPES DE REACTEURS ACTUELS

Réacteur à Eau sous Pression (REP ou PWR) : *65% du parc mondial*

- Le cœur du réacteur avec le combustible nucléaire est placé dans une cuve elle-même en contact avec de l'eau. Le combustible enrichi (de 3 à 5%) en U235 fissile permet d'utiliser l'eau ordinaire pour ralentir les neutrons et refroidir également le cœur du réacteur. Cette eau « primaire » est sous haute pression (155 bars) grâce à un pressuriseur qui empêche cette eau de bouillir afin de la maintenir sous forme liquide.
- Grâce aux pompes primaires, l'eau « primaire » circule en circuit fermé entre la cuve du réacteur et le générateur de vapeur (GV). Le GV est un échangeur qui va permettre la transmission de la chaleur de l'eau du circuit primaire à l'eau du circuit secondaire. L'eau « secondaire » (qui ne sera jamais en contact avec le combustible) étant soumise à une pression beaucoup plus faible (70 bars), va entrer en ébullition. La vapeur alors produite est acheminée vers le turboalternateur. Une fois actionné par la vapeur, le turboalternateur produit de l'électricité.
- A la sortie du turboalternateur, la vapeur est retransformée en eau dans un condenseur refroidi par de l'eau de mer ou de rivière ou encore par de l'air frais et humide qui s'engouffre dans les tours en béton appelées aéroréfrigérants. Cette eau est donc un 3ème circuit totalement indépendant de l'eau secondaire. L'eau secondaire est ramenée vers le réacteur nucléaire pour être à nouveau transformée en vapeur refermant ainsi le cycle

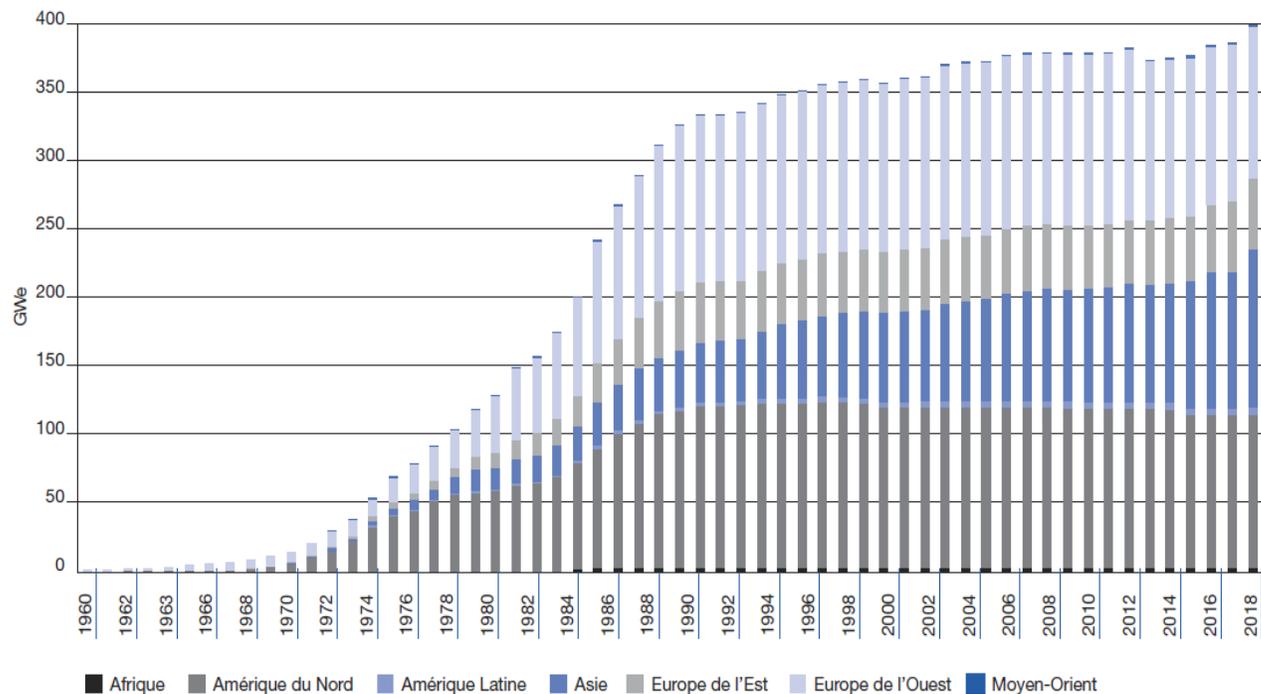


4 PANORAMA DU PARC MONDIAL

L'énergie nucléaire contribue pour 5% à la consommation mondiale d'énergie primaire, et pour 10% à la production mondiale d'électricité (en évitant 40% des émissions de CO2).

- Fin 2019, le parc nucléaire civil mondial comptait **444 réacteurs** dans **31 pays**.
- En 2019, ce sont les **Etats-Unis** qui ont produit le plus d'électricité nucléaire avec 96 réacteurs,
- devant la **France** avec 58 réacteurs,
- la **Chine** avec 47 réacteurs,
- et la **Russie** avec 38 réacteurs.

EVOLUTION ANNUELLE DE LA PUISSANCE NUCLÉAIRE NETTE MONDIALE CONNECTÉE AU RÉSEAU



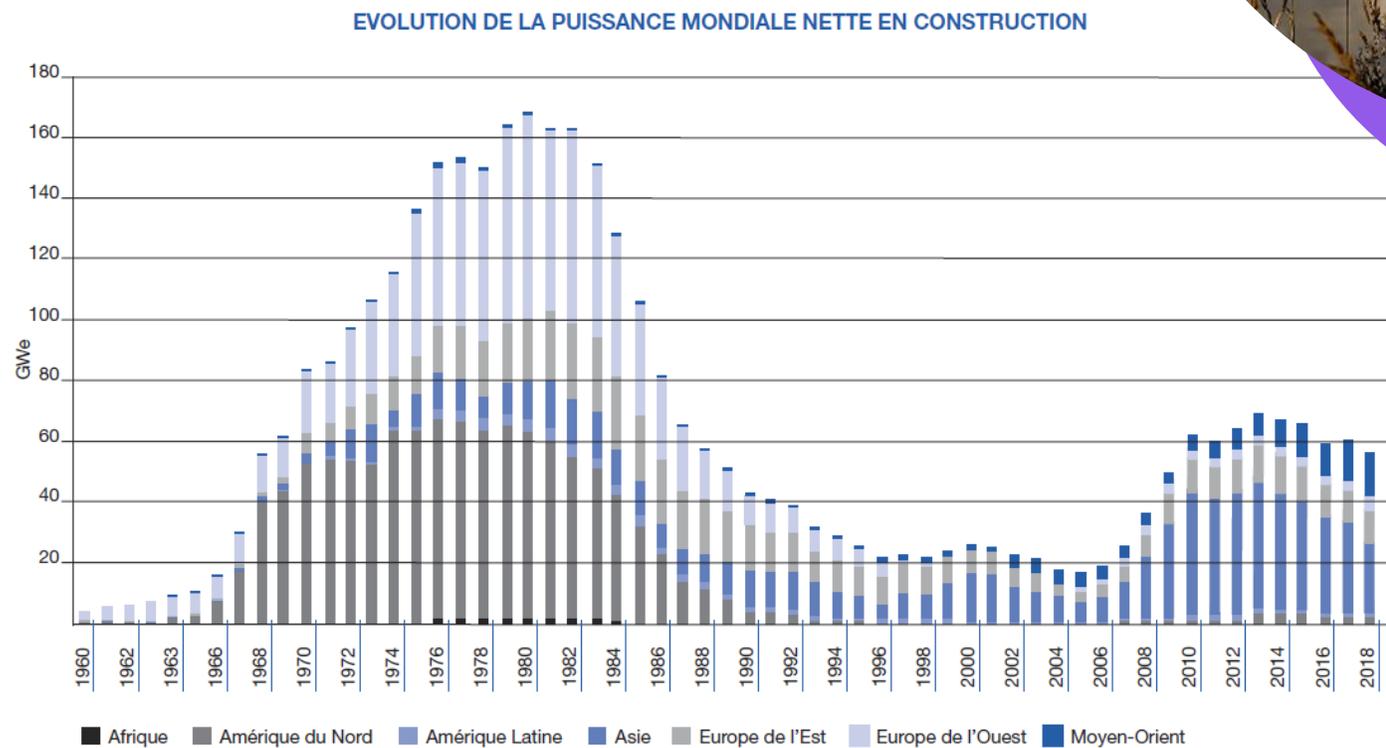
4 PERSPECTIVES DU PARC MONDIAL

Après deux décennies de tassement de l'activité de construction, les chantiers de centrales nucléaires reprennent :

- En 2020, il y a **54 construction de réacteurs en cours**, dans 16 pays (dont 12 en la Chine)
- Et **119 à l'état de projet** (yc dans une vingtaine de pays primo-accédants)

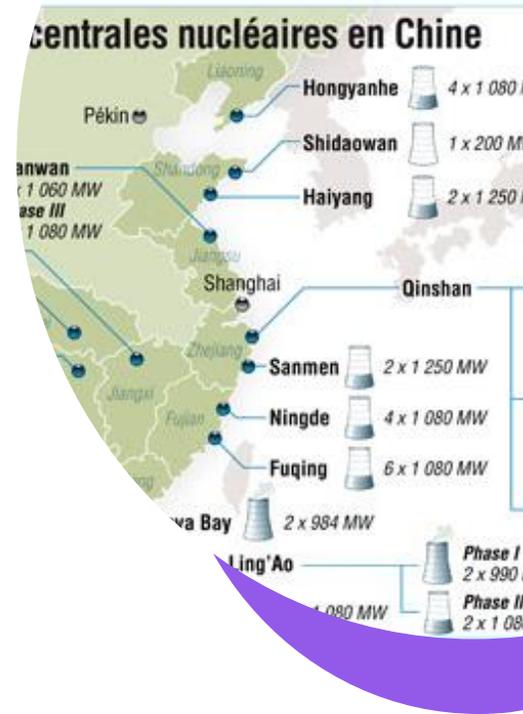
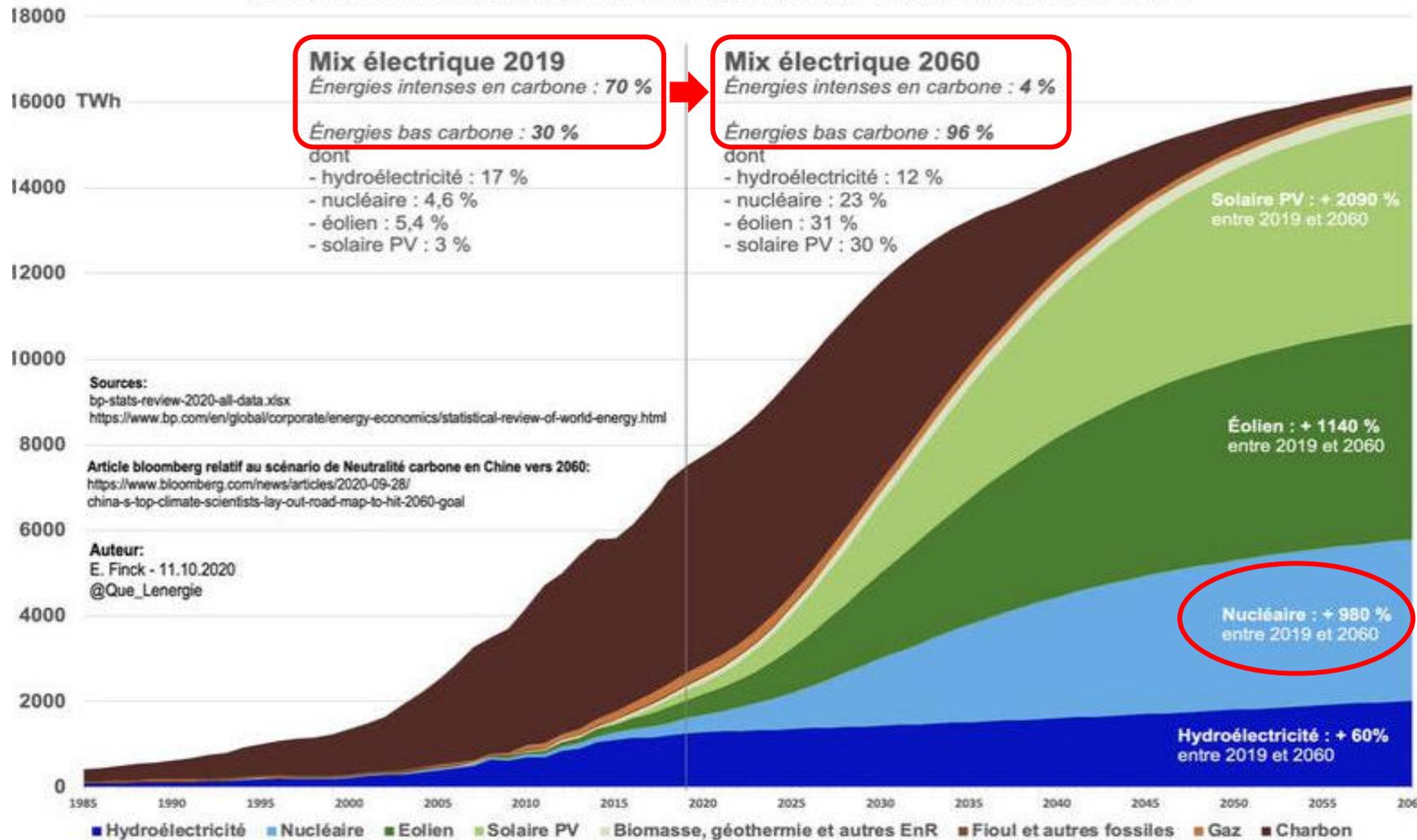
6 nouvelles tranches ont été mises en service en 2019 (après 9 en 2018) :

- 3 en Russie,
- 2 en Chine, (après 7 en 2018)
- et 1 en Corée du Sud.



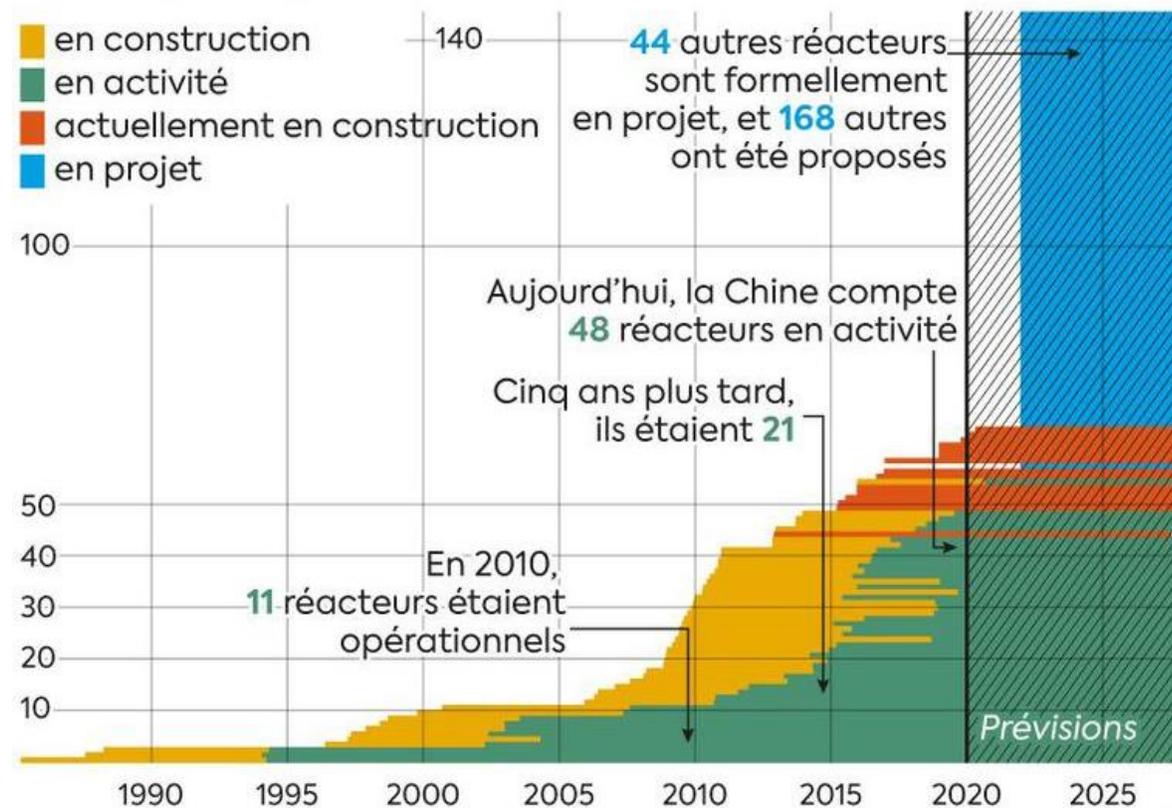
PERPECTIVES DU PARC MONDIAL

Évolution de la production électrique totale en Chine
 Période 1985-2019 : valeurs réelles / Période 2020-2060 : scénario Neutralité carbone atteinte en 2060

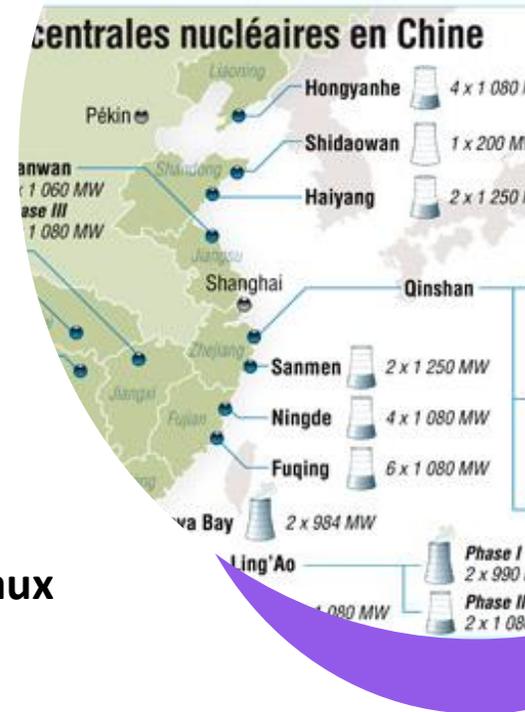


Le programme nucléaire chinois

Nombre de réacteurs nucléaires en Chine



SOURCE : WORLD NUCLEAR ASSOCIATION



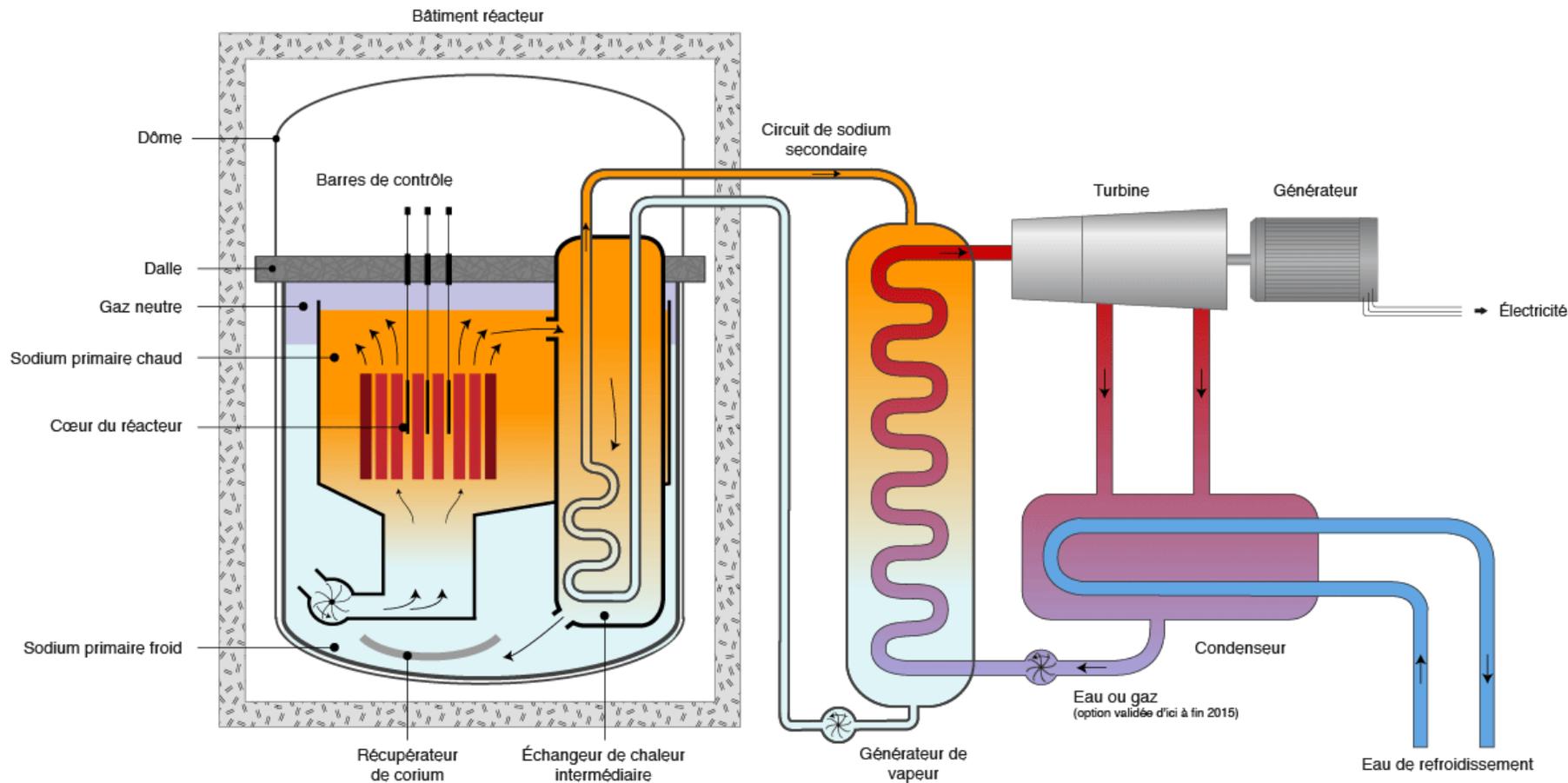
Hypothèse de référence :
13 et 14ème plans quinquénaux
2016-2020 puis 2021-2025

- En 2016 : 36 réacteurs (34 GW)
- En 2020 : 49 réacteurs (58 GW)
- En 2025 : 80 réacteurs (86 GW)
- En 2030 : 121 réacteurs (120 GW)

Soit 6 à 8 nouveaux réacteurs par an
sur 15 ans (100 au total)

5 LES REACTEURS DE DEMAIN

Réacteur à Neutrons Rapides (RNR ou FNR) :



LES REACTEURS DE DEMAIN

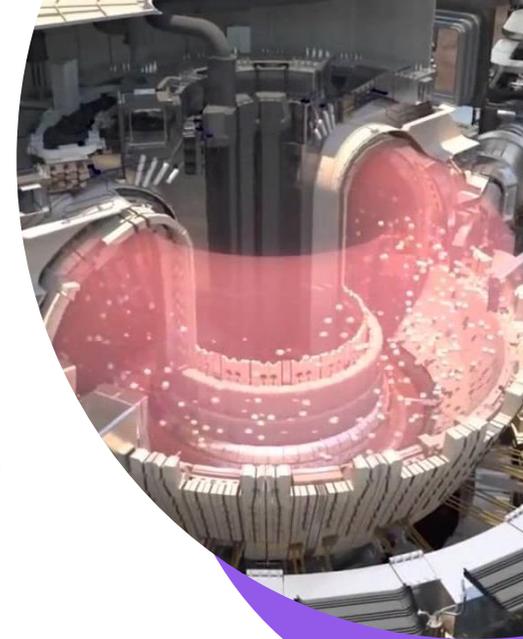


Réacteur à Neutrons Rapides (RNR ou FNR) :

- Ces réacteurs extraient 96% de l'énergie de fission contenue dans l'uranium naturel.
- Ils produisent 50 à 100 fois plus d'énergie qu'un réacteur à neutrons thermiques
- Ils recyclent les combustibles usés des réacteurs à neutrons thermiques. Sur le long terme, ils réduisent la quantité ainsi que la durée de radio-toxicité des déchets (de 300 000 à 300 ans).
- Ils peuvent générer plus de matière fissile qu'il n'en consomment, dans certaines conditions (utilisation de plutonium) : On les dit « surgénérateur » : le cœur du combustible riche en Pu239 est entouré d'une couverture fertile d'U238 pour que les neutrons rapides qui la traversent soient capturés par un noyau d'U238, qui se transforme ultérieurement en Pu239, régénérant ainsi ce noyau fissile.
- Ils peuvent aussi consommer directement du Pu, permettant un multi-recyclage.
- Contrairement aux réacteurs classiques où l'on évite les captures dans l'uranium de peur qu'elles n'entravent la marche du réacteur, ces captures sont ici recherchées. Les surgénérateurs n'ont pas besoin d'un modérateur : les neutrons se ralentissent à la suite des chocs élastiques sur les noyaux lourds présents dans le cœur. Ces chocs favorisent la capture dans les noyaux d'U238 de la couverture fertile. Cela rend le cœur de ces réacteurs petit et compact.
- Le refroidissement se fait au sodium, au plomb, ou au gaz : RNR-Na (SFR), RNR-Pb (LFR) ou RNR-G (GFR).

6

ET APRÈS-DEMAIN ?



- Une génération correspond à un saut technologique en matière de sûreté, de fonctionnement, du cycle de combustible, de compétitivité.
- Chaque génération répond à des objectifs liés aux enjeux majeurs de l'époque de leur conception.

1^{ères} réalisations



UNGG
MAGNOX
HWGCR

Réacteurs actuels



REOMG (RMBK)
REB (BWR) AGR
REP (PWR) PHWR
VVER (WWER) CANDU

Réacteurs évolutionnaires



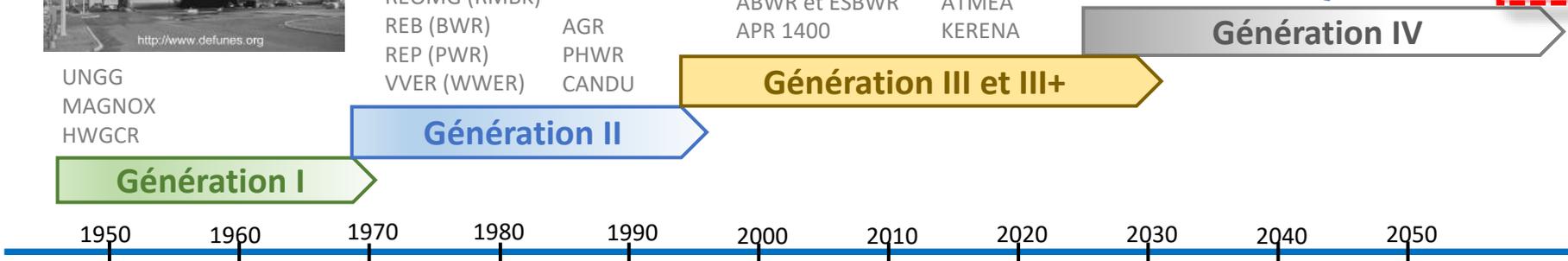
EPR
AP 600 et AP 1000
VVER AES 2006
ABWR et ESBWR
APR 1400
HUALONG One
CANDU EC6
APWR
ATMEA
KERENA

Réacteurs du futur



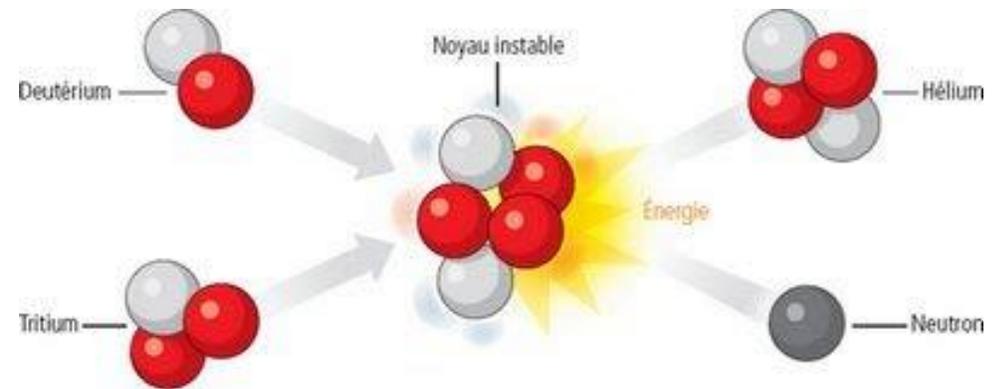
RTHT (VHTR)
RESC (SCWR)
RSF (MSR)
RNR (FNR) → { RNR-Na (SFR)
RNR-G (GFR)
RNR-Pb (LFR)
SMR

Et après ?



La **fusion nucléaire**, l'énergie qui alimente le soleil et les étoiles... : dans plus de 50 pays, des scientifiques travaillent pour recréer et maîtriser cette énergie, avec pour objectif un déploiement industriel au cours de la seconde moitié du XXI^{ème} siècle.

- La fusion est en quelque sorte l'opposé de la fission : il s'agit de rapprocher 2 atomes d'hydrogène (deutérium et tritium) à des températures de plusieurs millions de degrés, comme au cœur des étoiles. Lorsque ces noyaux légers fusionnent, le nouveau noyau créé se retrouve dans un état instable ; il tente de retrouver un état stable en éjectant un atome d'hélium et un neutron, en dégageant une quantité d'énergie colossale.
- La fusion libère une énergie 4 millions de fois supérieure à celle de la réaction chimique (combustion du charbon, pétrole, gaz), 4 fois supérieure à celle de la fission...
- Sans émission de CO₂...
- Sans production de déchets...
- Sans risque de fusion du cœur



Bibliographie

Pour en savoir plus

Bibliographie

Sites web :

- <https://new.sfen.org/academie-235/>
- https://www.laradioactivite.com/site/pages/Energie_nucleaire.htm
- https://www.irsn.fr/FR/connaissances/Installations_nucleaires/Pages/Home.aspx
- <http://www.cea.fr/comprendre/Pages/energie-nucleaire.aspx>

Livres et revues :

- La technologie des réacteurs à eau pressurisée, Serge Marguet, 1168 pages - EDP Sciences – collection R&D EDF
- Mémento Sureté nucléaire en exploitation, édition 2016, 785 pages – document interne EDF
- Historique et bilan de fonctionnement des RNR-Na, par Joël Guidez et Jean-Guy Nokhamzon, 2014, publié sur le site du CEA
- Revue Générale Nucléaire, nov-déc 2018, dossier « Fusion nucléaire : la recette de demain ? » => <http://www.sfen.org/rgn/2-8-fusion-nucleaire>
- Revue Générale Nucléaire, sept-oct 2019, dossier « GEN IV, vers la boucle énergétique » => <http://www.sfen.org/rgn/dossier-%C2%AB-les-gen-iv,-vers-la-boucle-energetique-%C2%BB>

Vulgarisateurs, youtubeurs :

- Dr Nozman => https://www.youtube.com/results?search_query=dr+nozman
<https://twitter.com/DrNozman>
- Tristan Kamin => https://www.youtube.com/results?search_query=tristan+kamin
<https://twitter.com/TristanKamin>
- Le Réveilleur => https://www.youtube.com/results?search_query=le+r%C3%A9veilleur+nucl%C3%A9aire
https://twitter.com/Le_Reveilleur



Merci !



L'énergie nucléaire, hier, aujourd'hui, demain 2 - L'histoire de l'électronucléaire



Thierry CAILLON