Université Claude Bernard Lyon 1

Master SYVIC
Ecole “Enjeux du nucléaire et développement durable”

L’énergie nucléaire, une solution écologique ?

Thierry CAILLON

Sfen Rhône Ain-Loire

SOMMAIRE

01 – L’énergie nucléaire, de A à Z : génèse, fonctionnement, développement et perspectives

02 – Les inconvénients de l’énergie nucléaire

03 – Les atouts de l’énergie nucléaire

04 – Quelle place du nucléaire face au défi climatique ?

Sfen Rhône Ain-Loire

Sfen Rhône Ain-Loire

01

L’énergie nucléaire, de A à Z

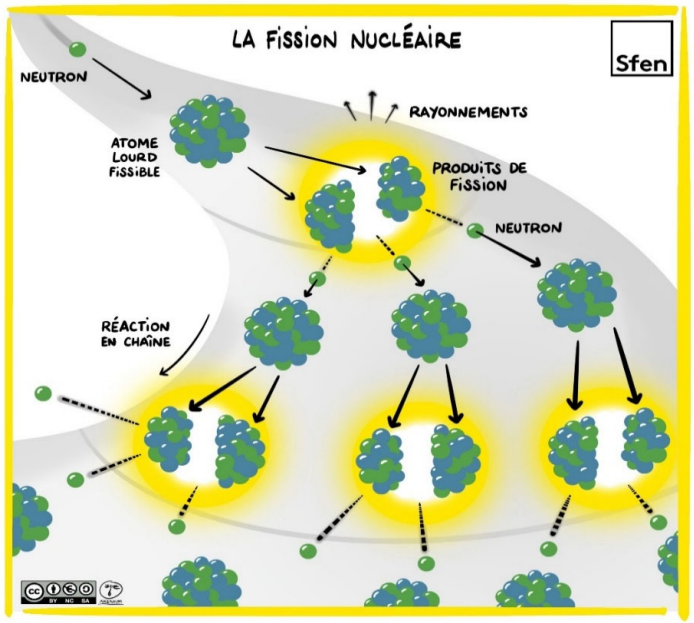
1. La fission : principe et génèse
2. L’essor de l’énergie nucléaire
3. Fonctionnement et type de réacteur
4. Panorama et perspectives mondiales

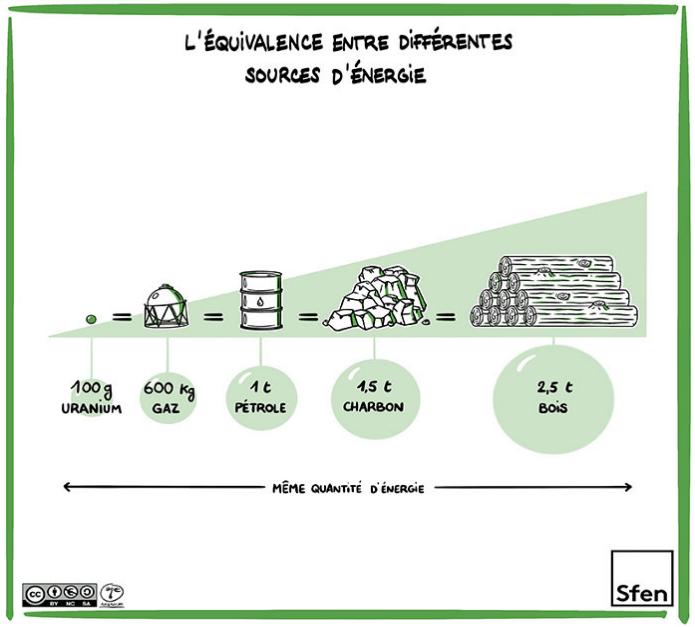
1.1 LA FISSION NUCLÉAIRE : PRINCIPE

La fission consiste à projeter un neutron sur un atome lourd, instable et fissile (U235 ou Pu239), 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 :





Sfen Rhône Ain-Loire

1.1 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 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 **trois brevets, pour réaliser un réacteur nucléaire électrogène**, au nom du CNRS.

- **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.

1.1 LA FISSION NUCLÉAIRE : GÉNÈSE

- **Le 1er 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 possibles :
  - les réacteurs nucléaires électrogènes d'une part,
  - la bombe A d'autre part…

- Et **le contexte très spécifique de l'époque a fait que les recherches se sont concentrées d'abord 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.**

1.2 L'ESSOR DE L'ENERGIE NUCLÉAIRE

Une génération correspond à un saut technologique (en matière de sureté, de fonctionnement, du cycle de combustible, de compétitivité) mais aussi **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.

1ères réalisations

Réacteurs actuels

Réacteurs évolutionnaires

Réacteurs du futur

Génération IV

Génération III et III+

Génération II

Génération I

1950 1960 1970 1980 1990 2000 2010 2020 2030 2040 2050

Sfen Rhône Ain-Loire

1.2 L'ESSOR DE L'ENERGIE NUCLÉAIRE

La **1ère génération** comprend les prototypes et les 1ers 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

1.2 L'ESSOR DE L'ENERGIE NUCLÉAIRE

Les réacteurs nucléaires de **2ème 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 2ème 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

1.2 L'ESSOR DE L'ENERGIE NUCLÉAIRE

La **3ème 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

1.2 L'ESSOR DE L'ENERGIE NUCLÉAIRE

La **4ème 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

DURABILITE

- Il y a également en développement, depuis quelques années :
  - SMR : réacteurs compacts modulaires, de petite puissance (300-400 MW)

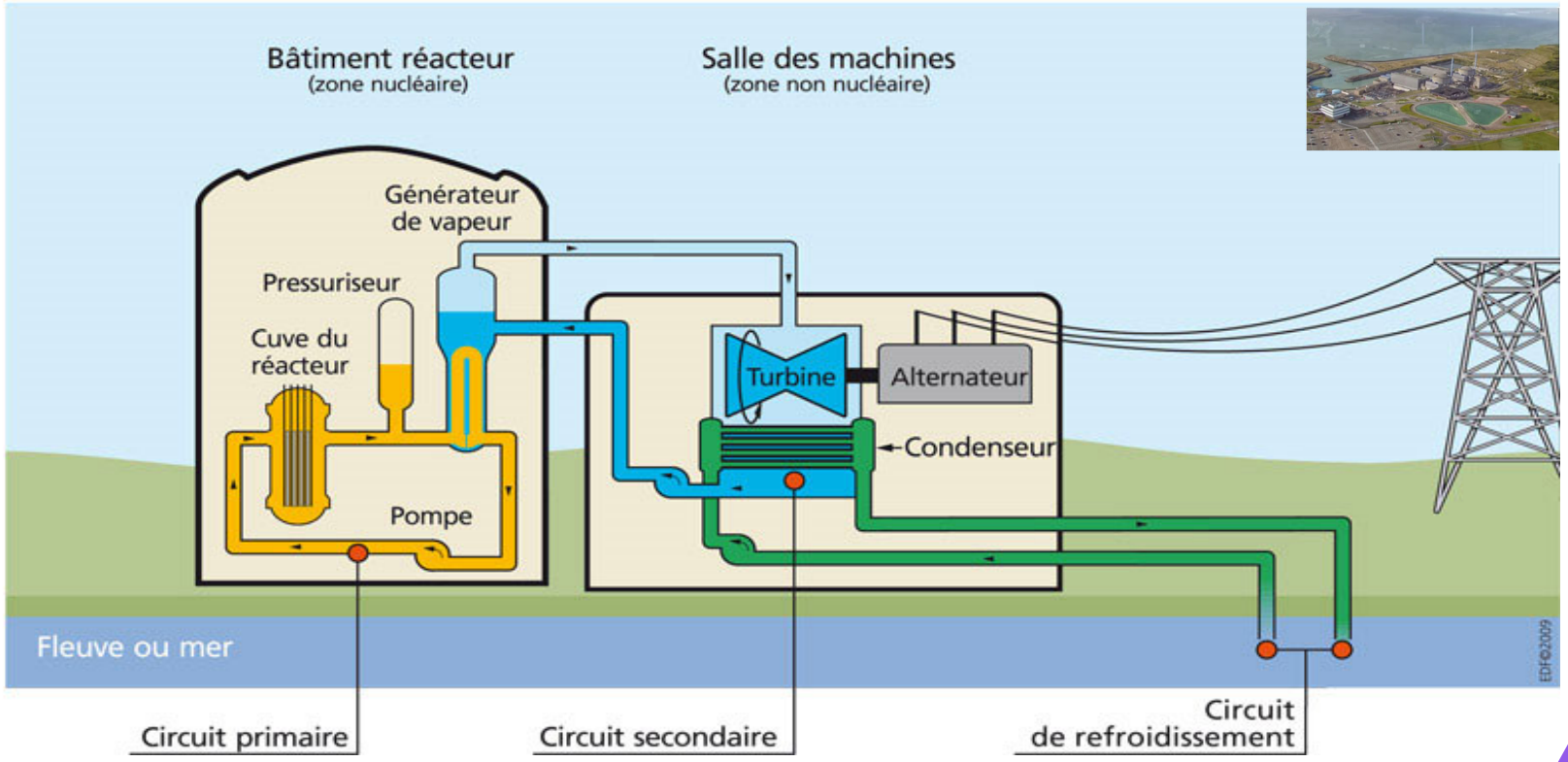
1.2 L'ESSOR DE L'ENERGIE NUCLÉAIRE

- 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 en 2020, les réacteurs à eau pressurisée (REP) sont le type le plus répandu, avec 66% du parc mondial

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

1.3 LE FONCTIONNEMENT D'UN REACTEUR

Réacteur à Eau Pressurisée (REP ou PWR) : ***66% du parc mondial (100% du parc francais)***



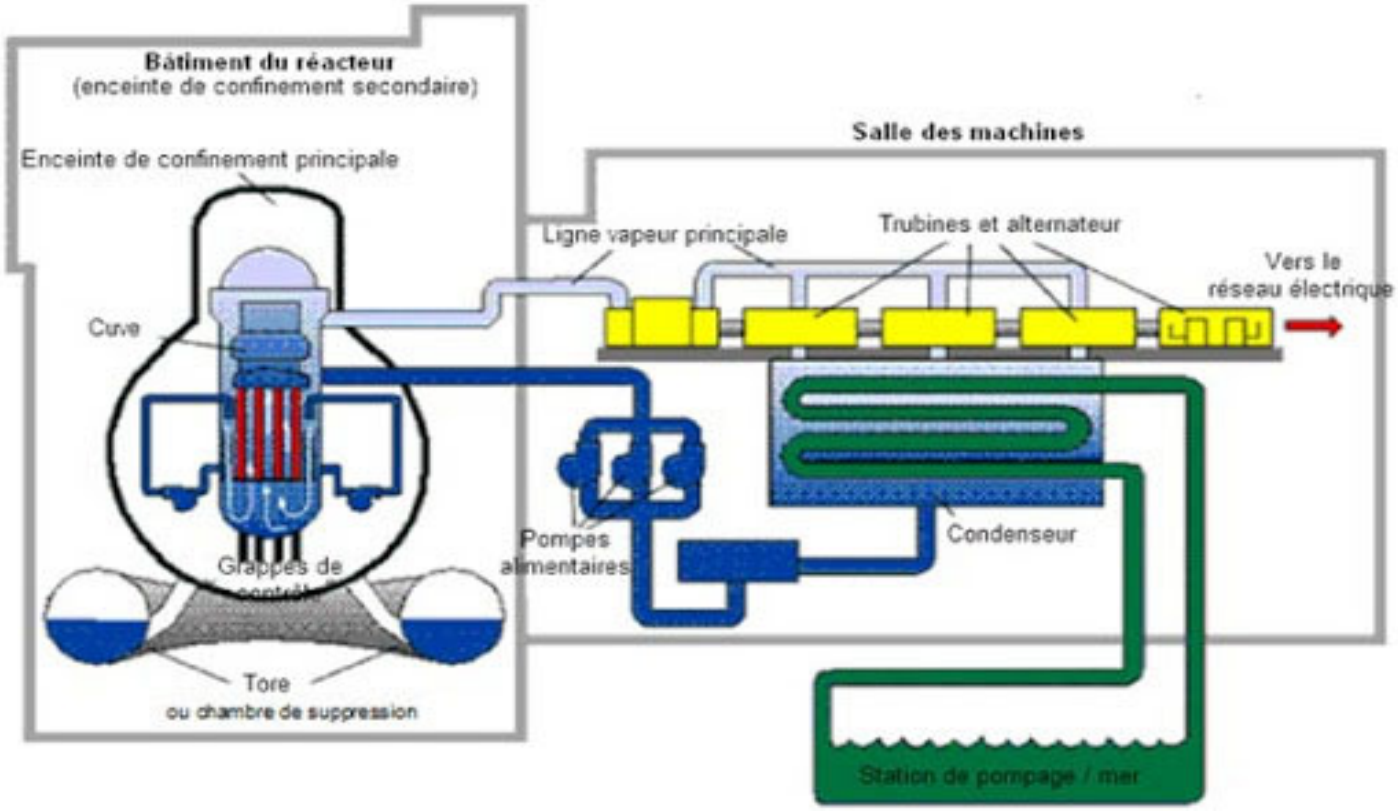
1.3 LE FONCTIONNEMENT D'UN REACTEUR

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) grace à un préssuriseur 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

1.3 LES 6 TYPES DE REACTEURS

Réacteur à Eau Bouillante (REB ou BWR) : *15% du parc mondial*



Sfen Rhône Ain-Loire

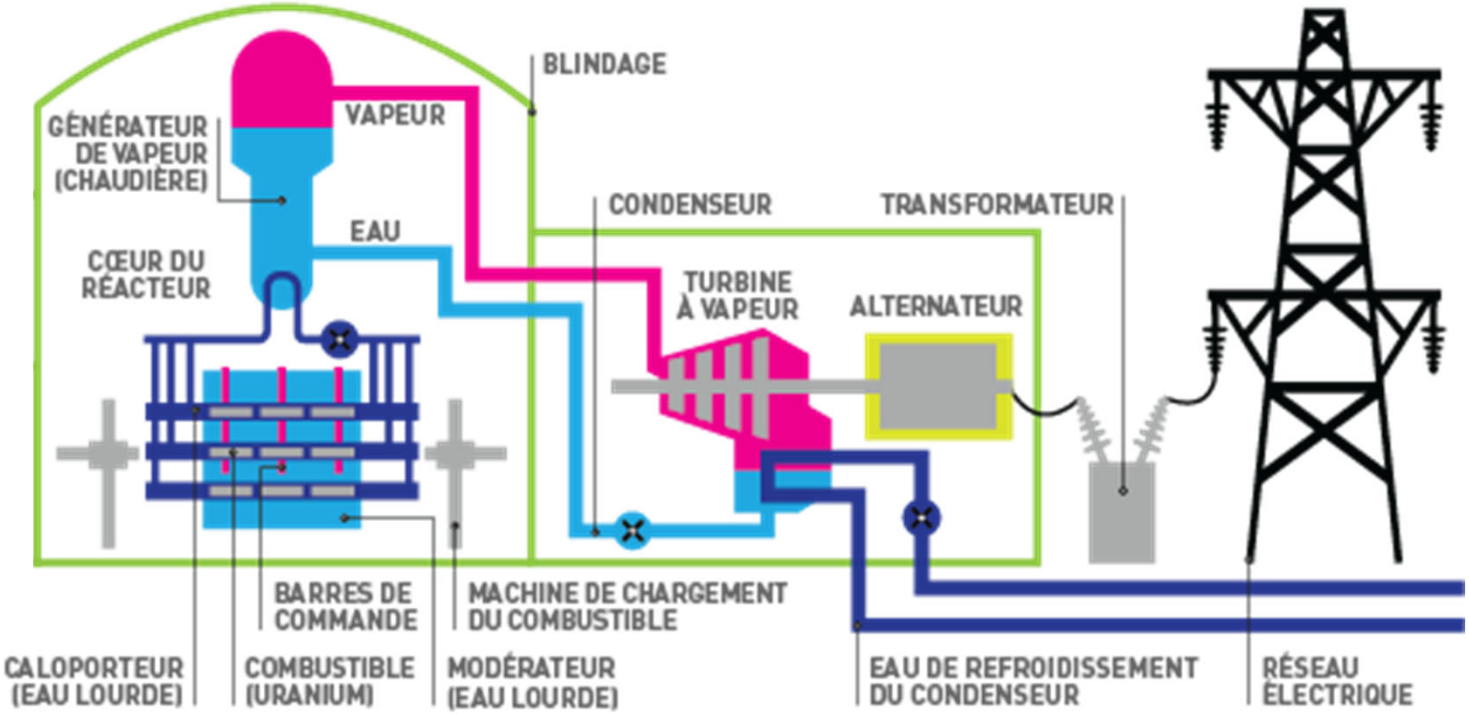
1.3 LES 6 TYPES DE REACTEURS

Réacteur à Eau Bouillante (REB ou BWR) : *15% du parc mondial*

- Dans un REB, à l'inverse d'un REP, il n'y a pas d'eau secondaire, l'eau chauffée par les assemblages de combustible nucléaire entre en ébullition à l'intérieur même de la cuve.
- La vapeur produite est acheminée vers le turboalternateur à l'aide des tuyauteries vapeur (l'eau non vaporisée est remise en circulation dans le cœur du réacteur au moyen de pompes de recirculation).
- Il y a donc une barrière de moins entre la radioactivité du combustible et l'environnement et donc nécessité d'avoir une étanchéité renforcée du gainage du combustible, et plus loin des turbines. (A Fukushima, cette barrière de moins est à l'origine des flaques d'eau extrêmement radioactives observées le 25 mars 2011 dans le hall des turbines.)
- Les barres de contrôle sont introduites depuis le dessous de la cuve du cœur du réacteur par l'intermédiaire d'une forte pression hydraulique, une particularité des REB. L'insertion des absorbants dans le cœur en cas d'arrêt d'urgence ne se fait donc pas par gravité (à la différence des REP).
- Une particularité des REB : une augmentation soudaine de la pression de vapeur provoque par condensation une augmentation de la proportion d'eau liquide. Cette augmentation de l'eau, qui favorise la modérationdes neutrons, se traduit par un accroissement des réactions de fission et de l'énergie dégagée. Pour combattre l'effet déstabilisant de ces transitoires de pression, les REB sont équipés de soupapes de sûreté qui évacuent la vapeur en surpression qui est recueillie après condensation dans un tore humide situé en dessous de la cuve.

1.3 LES 6 TYPES DE REACTEURS

Réacteur à Eau Lourde sous Pression (RELP ou PHWR) :

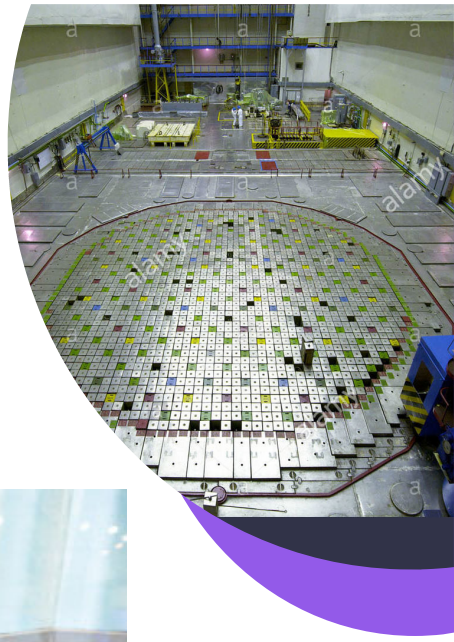


1.3 LES 6 TYPES DE REACTEURS

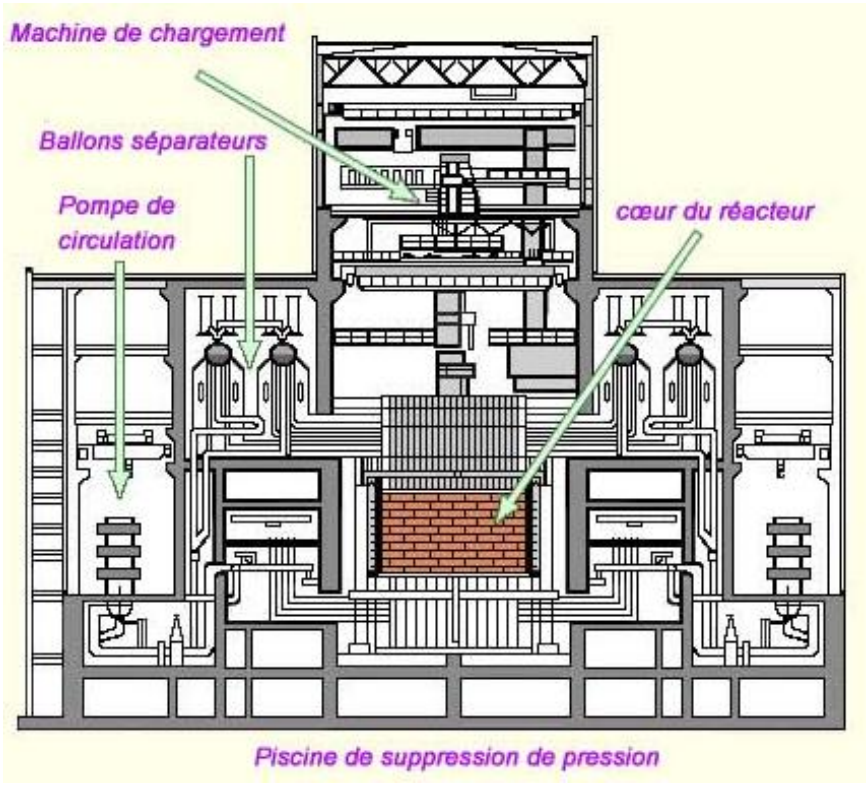
Réacteur à Eau Lourde sous Pression (RELP ou PHWR) :

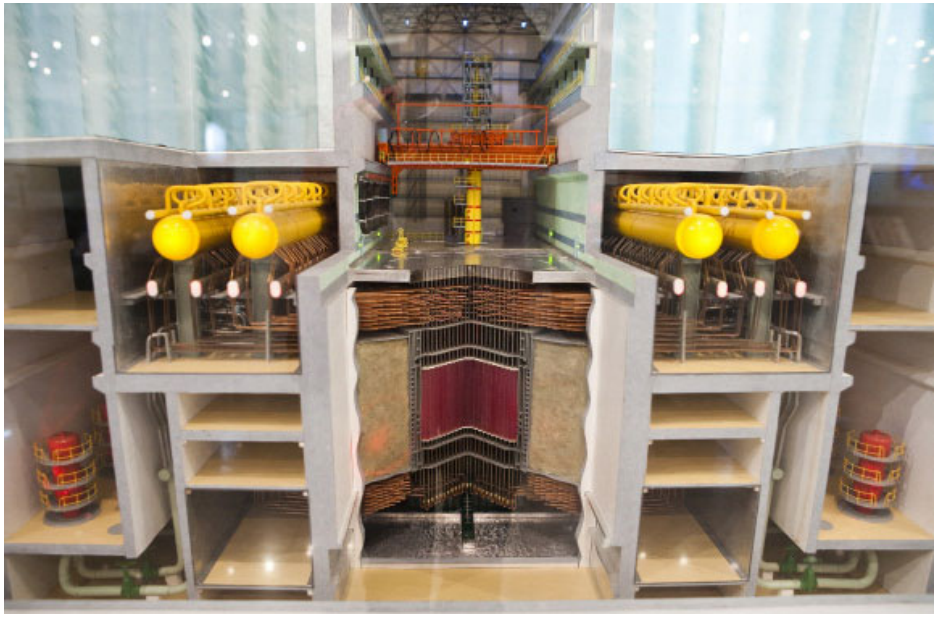
- L'eau lourde (D^2O) est une combinaison d'oxygène et de deutérium (atome d'hydrogène lourd).
- Elle est utilisée comme modérateur dans ces réacteurs développés au Canada. L'eau lourde absorbe moins les neutrons que l'eau classique. Ainsi de l'uranium naturel transformé en plutonium peut être directement utilisé comme combustible dans ces réacteurs.
- L'étape d'enrichissement de l'uranium est donc évitée dans ces réacteurs.
- L'eau lourde peut également être utilisée comme fluide caloporteur car ses propriétés physiques sont proches de celles de l'eau classique.
- Le recours à l'uranium naturel rendait cette filière attractive à l'époque où de nombreux pays ne disposaient pas d'uranium enrichi. Tous les réacteurs canadiens appartiennent à la filière **CANDU** (CANada Deutérium Uranium) qui fut exportée notamment en Inde et au Pakistan.
- Le chargement et le déchargement en continu du combustible est une des caractéristiques des réacteurs CANDU. Etant donné la pauvreté en isotope 235 fissile de l'uranium naturel, le cœur du réacteur est conçu pour être constamment rechargé en combustible neuf contrairement au cœur des réacteurs à eau légère comme les REP dont on remplace le combustible enrichi par tiers tous les 12 à 18 mois. En théorie, un réacteur CANDU n'a pas besoin de s'arrêter.

1.3 LES 6 TYPES DE REACTEURS



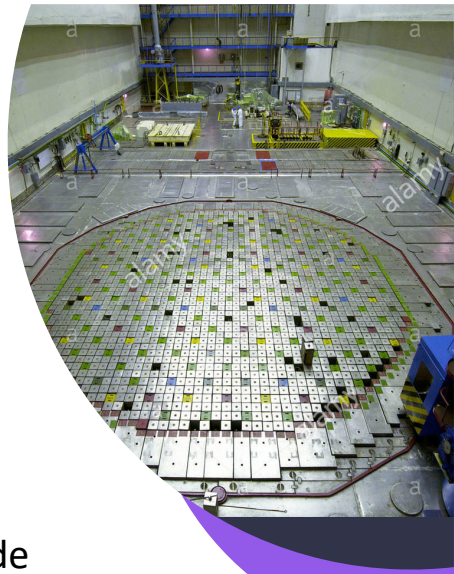
Réacteur à Eau Ordinaire Modéré au Graphite (REOMG ou RBMK) :





Sfen Rhône Ain-Loire

1.3 LES 6 TYPES DE REACTEURS

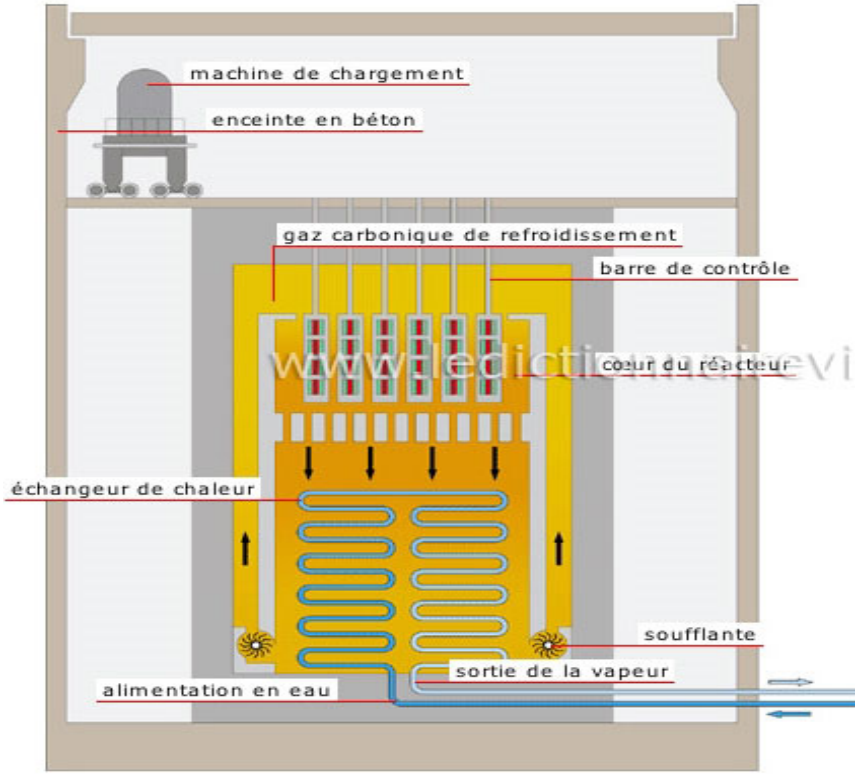


Réacteur à Eau Ordinaire Modéré au Graphite (REOMG ou RBMK) :

- Les réacteurs RBMK sont des réacteurs dévelopés par l'Union Soviétique, utilisant le graphite comme modérateur et l'eau ordinaire bouillante comme fluide caloporteur. Le combustible est de l'uranium 235 faiblement enrichi (2 % initialement, 2,6% aujourd'hui)
- Le cœur est volumineux : 20 fois celui d'un REP. Pas de cuve sous pression, mais un grand nbre de tubes verticaux, appelés « tubes de force » contenant le combustible. Pas d'enceinte de confinement.
- Chaque tube de force renferme un assemblage combustible autour duquel l'eau de refroidissement circule à une pression d'environ 70 bars. L'eau joue le rôle de réfrigérant et fournit la vapeur directement utilisée pour actionner les turbines (il n'y a pas de générateur de vapeur).
- Les 1681 tubes de force, contenant au total 190 tonnes d'^{235}U, sont placés verticalement dans l'empilement de graphite. L'ensemble repose sur une structure mécano-soudée contenue dans une cavité en béton. Au-dessus du réacteur, une machine de chargement permet le renouvellement du combustible de manière continue pendant l'exploitation.
- Le contrôle de la réactivité est assuré par environ 200 barres absorbantes de neutrons, réparties dans tout le cœur du réacteur. Elles sont introduites depuis le dessous du coeur du réacteur : l'insertion des absorbants en cas d'arrêt d'urgence ne se fait donc pas par gravité.

1.3 LES 6 TYPES DE REACTEURS

Réacteur Refroidi au Gaz (RRG ou AGR) :



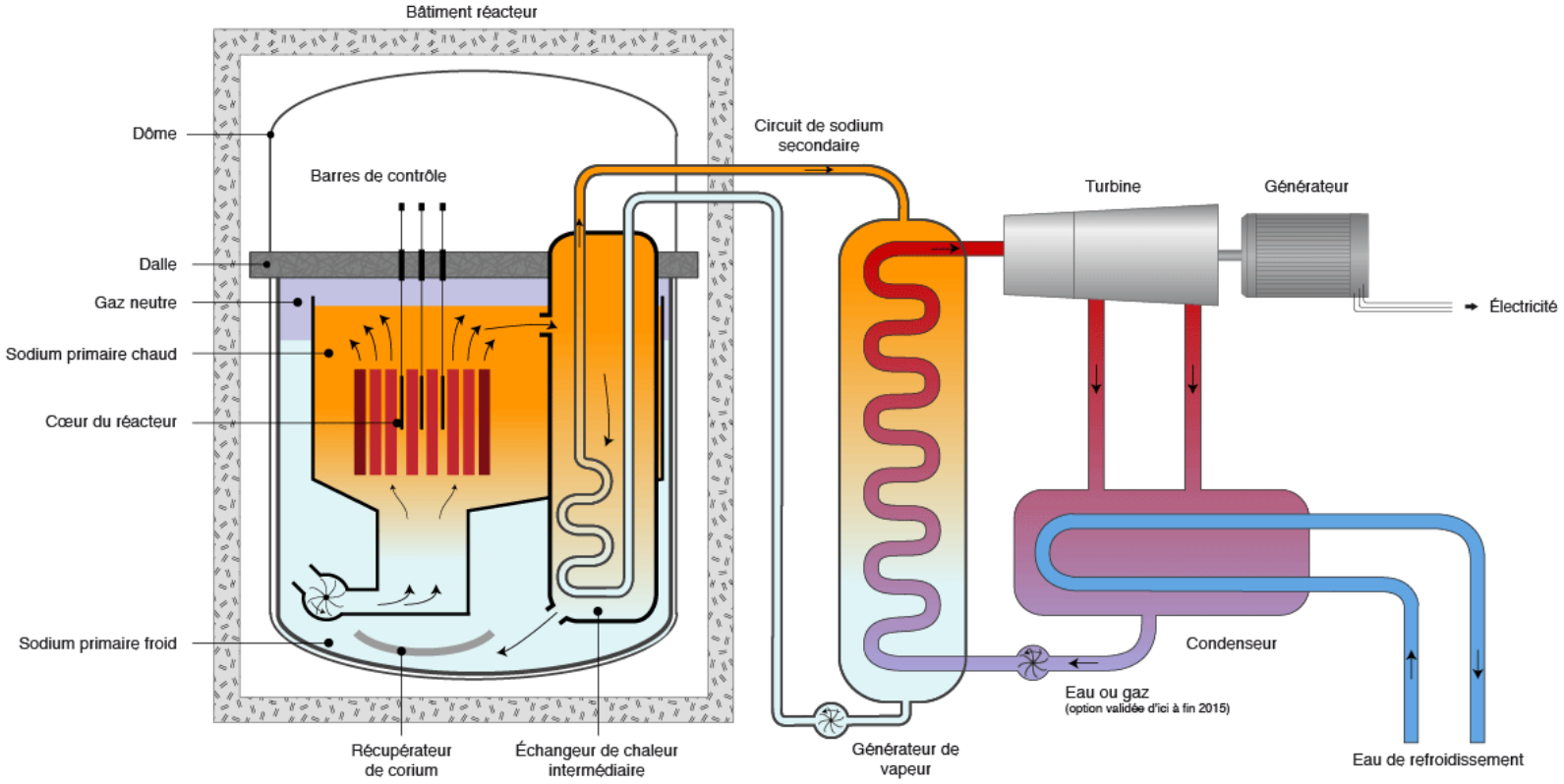
1.3 LES 6 TYPES DE REACTEURS

Réacteur Refroidi au Gaz (RRG ou AGR) :

- En France et au Royaume Uni, les 1ers réacteurs, alimentés en uranium naturel, étaient modérés par du graphite et refroidis par du gaz carbonique.
- Ces réacteurs gaz-graphite (directement dérivés du 1er réacteur démarré par Enrico Fermi en 1942), s'appelaient en France UNGG (Uranium Naturel Gaz et Graphite), et au Royaume Uni MAGNOX (du nom de l'alliage qui gainait l'uranium : Magnesium Non OXidizing).
- Plus tard, les Anglais ont augmenté les performances de la filière Magnox en enrichissant légèrement l'uranium de leur combustible, désormais gainé d'acier inoxydable dans une filière dénommée Advanced Gas-cooled Reactor (AGR).
- À l'instar des réacteurs CANDU, ces modèles peuvent être rechargés en marche.
- Tous les UNGG sont arrêtés, tandis que les AGR et derniers Magnox comptaient encore pour 8 GW en 2017.

1.3 LES 6 TYPES DE REACTEURS

Réacteur à Neutrons Rapides (RNR ou FNR) :



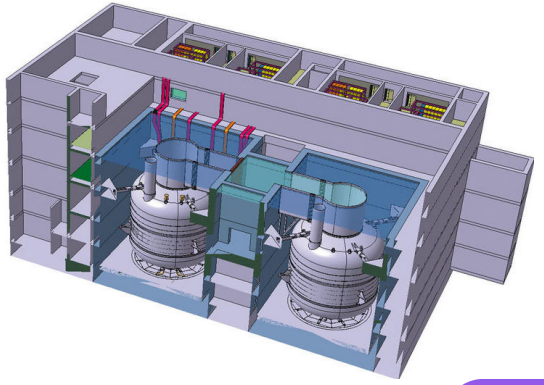
1.3 LES 6 TYPES DE REACTEURS

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).

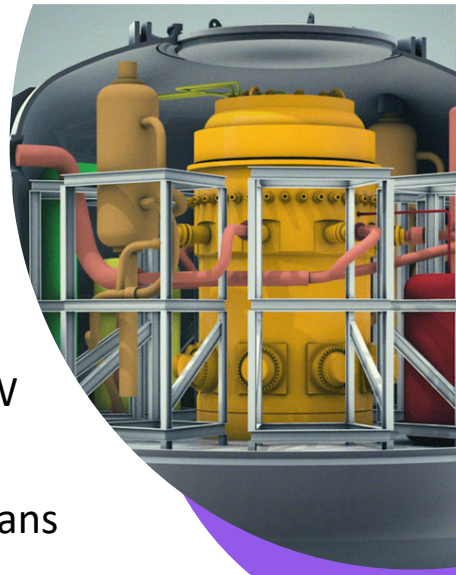
1.3 LES 6 TYPES DE REACTEURS

Small Modular Reactor (SMR), et Micro Modular Reactor (MMR) :



Sfen Rhône Ain-Loire

1.3 LES 6 TYPES DE REACTEURS



Small Modular Reactor (SMR), et Micro Modular Reactor (MMR) :

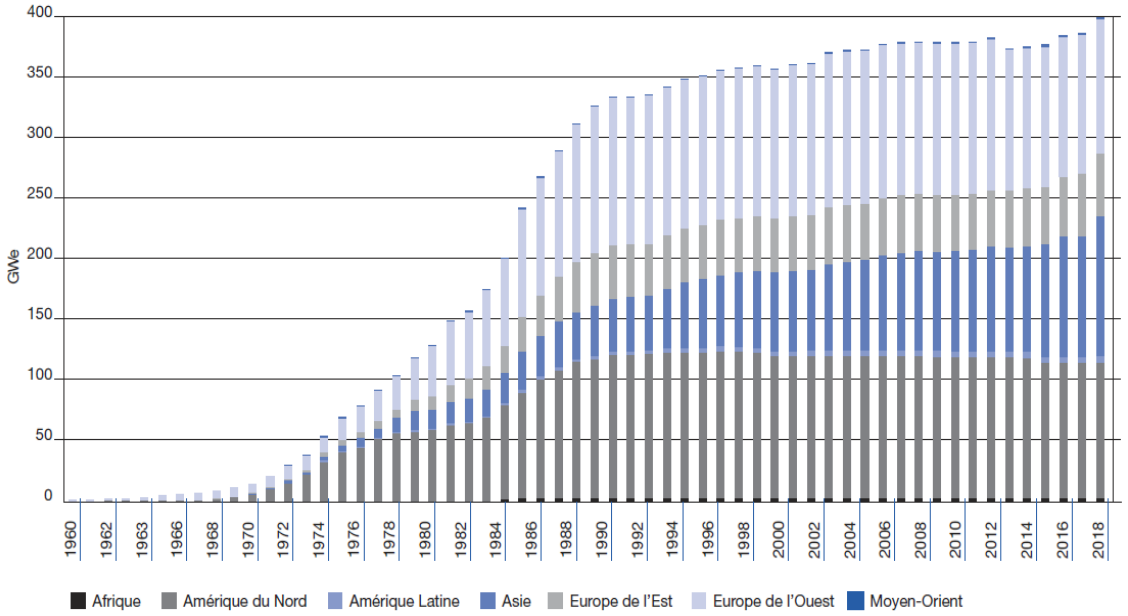
- Ces réacteurs de petite et moyenne puissance (10 MW pour les MMR, et jusqu'à 300 MW pour les SMR) ont 2 spécificités : leur taille réduite, et leur modularité.
- Leur compacité autorise une architecture intégrée où tous les composants sont placés dans un équipement sous pression unique, en intégrant des systèmes de sûreté passifs.
- La simplicité du design permet une fabrication standardisée et en série d'un nombre élevé de composants et de systèmes, fabriqués puis testés en usine. Facilement transportables, les modules sont assemblés sur site. Cela permet des délais de construction raccourcis, et un coût optimisé.
- Les SMR et MMR offrent de nouveaux usages, particulièrement adaptés aux enjeux actuels et futurs :
  - ✓ Alimenter les sites isolés en électricité (sans réseau robuste et développé)
  - ✓ Produire de l'eau douce par dessalement
  - ✓ Décarboner la production d'hydrogène et de carburants de synthèse
  - ✓ Équilibrer les réseaux électriques
  - ✓ Chauffer les villes et les usines

1.4 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).

- Au début de l'année 2020, 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



Sfen Rhône Ain-Loire

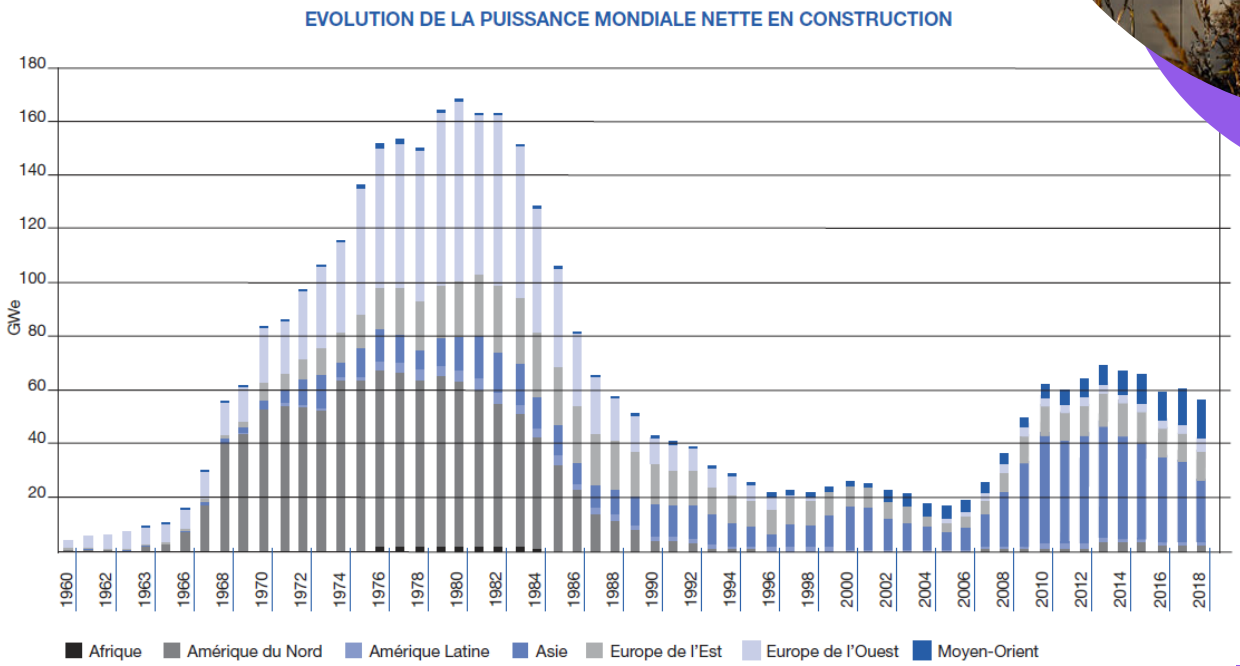
1.4 PERSPECTIVES DU PARC MONDIAL

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)

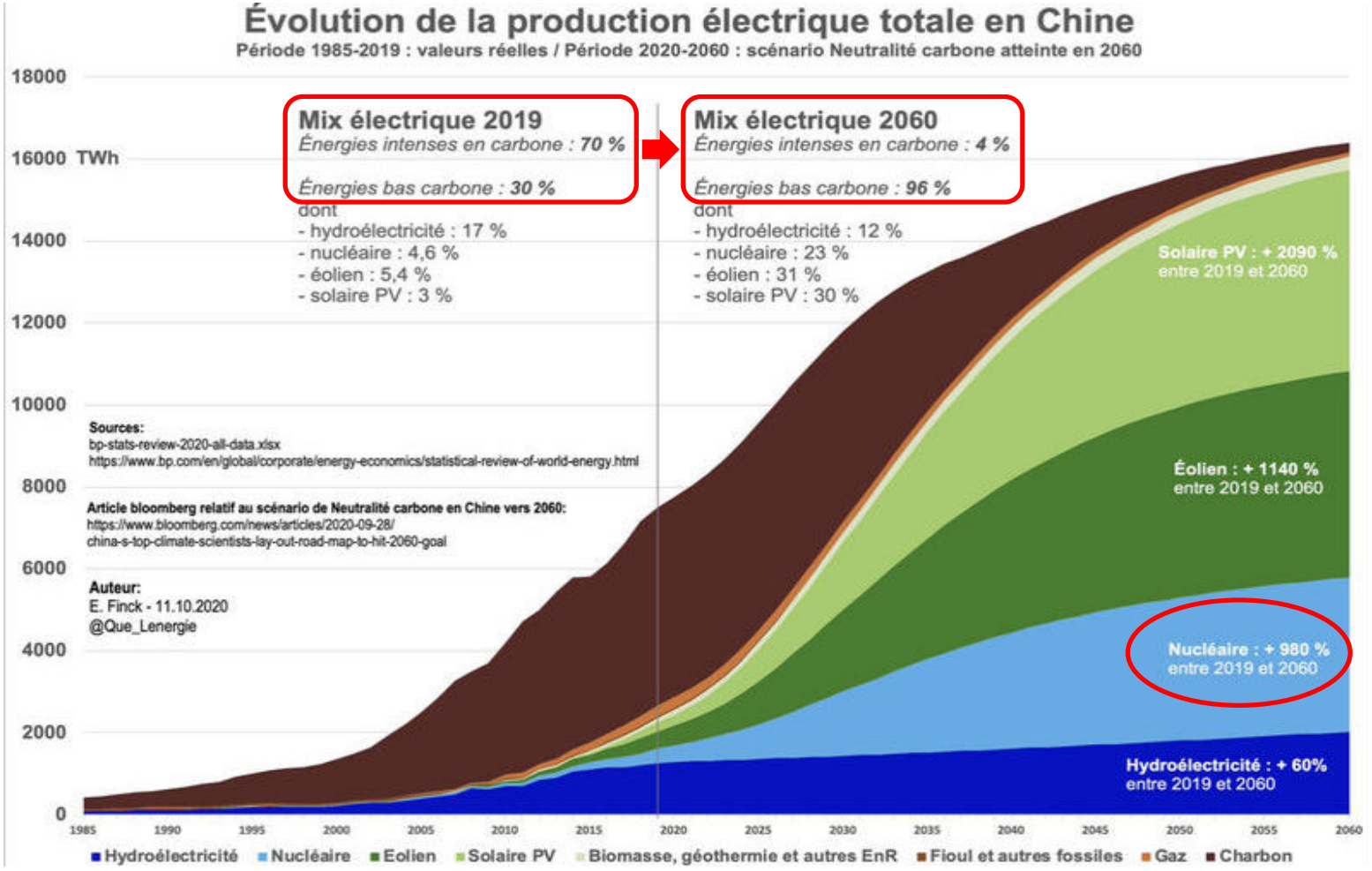
6 nouvelles tranches ont été mises en service en 2019 (après 9 en 2018) :

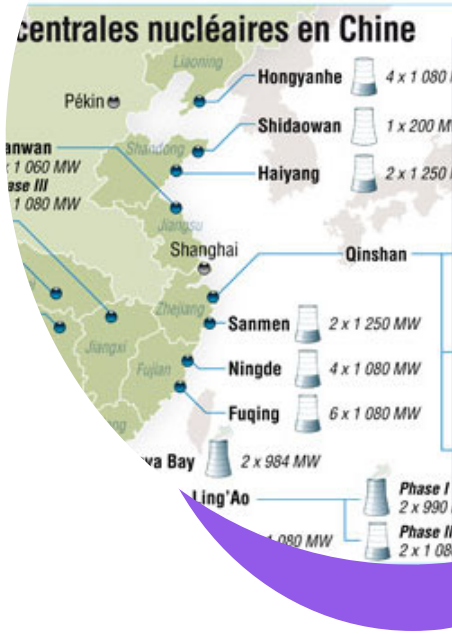
- 3 en Russie,
- 2 en Chine, (après 7 en 2018)
- et 1 en Corée du Sud.



Sfen Rhône Ain-Loire

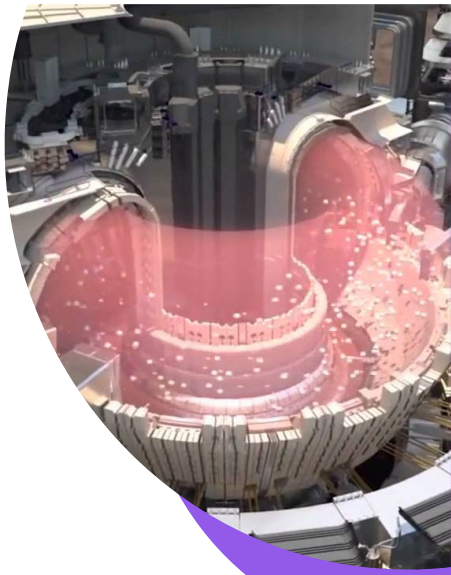
1.4 PERPECTIVES DU PARC MONDIAL





Sfen Rhône Ain-Loire

1.4 ET APRÈS LA GENERATION IV ?



1ères réalisations

UNGG
MAGNOX
HWGCR

Réacteurs actuels

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

Génération IV

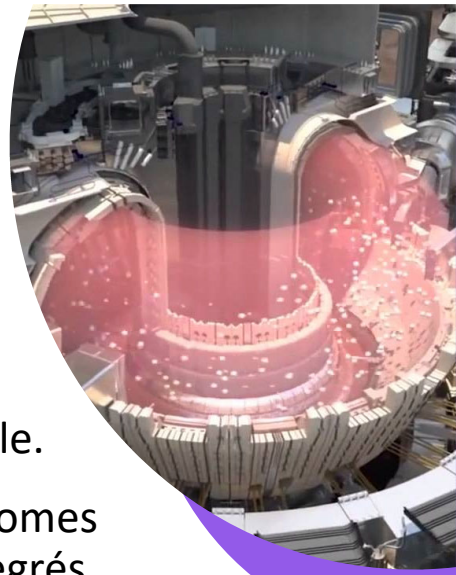
Génération III et III+

Génération II

Génération I

1950 1960 1970 1980 1990 2000 2010 2020 2030 2040 2050

1.4 ET APRES LA GENERATION IV ?

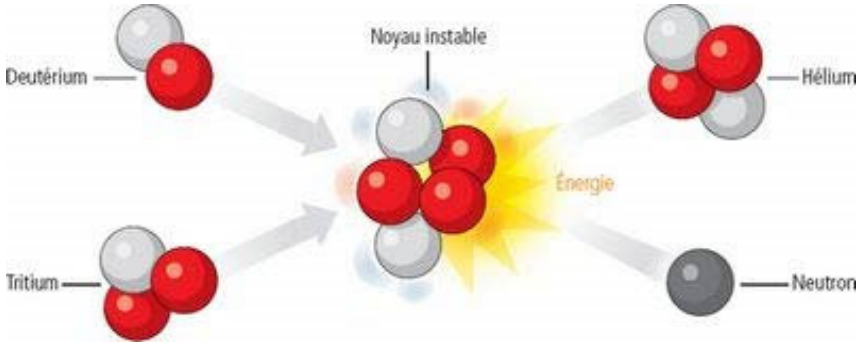


La **fusion nucléaire**, l'énergie qui alimente le soleil et les étoiles… :

dans plus de 50 pays, des scientifiques travaillent pour recréer et maitriser 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 coeur



Sfen Rhône Ain-Loire

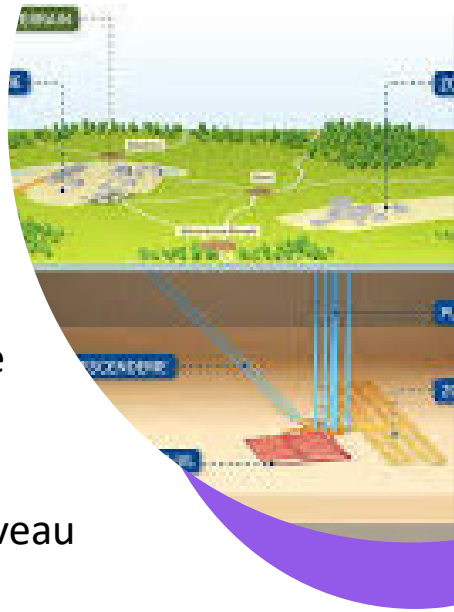
Sfen Rhône Ain-Loire

02

Les inconvénients du nucléaire

1. La forte toxicité et durée de vie de ses déchets
2. La forte gravité et le fort impact de ses accidents
3. Sa faible acceptabilité sociale

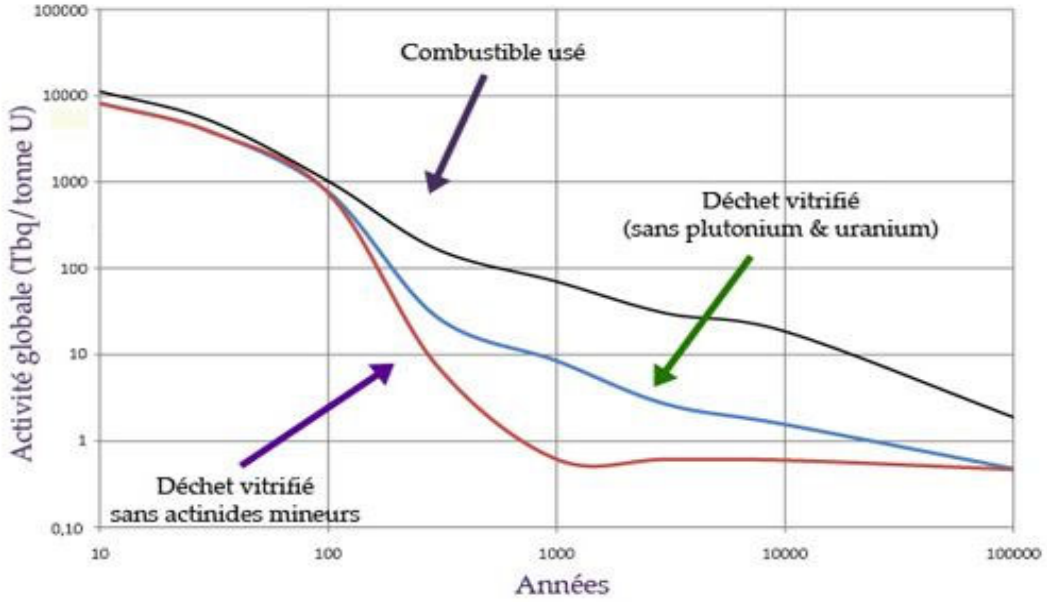
2.1 LA FORTE TOXICITÉ ET DURÉE DE VIE DE SES DÉCHETS



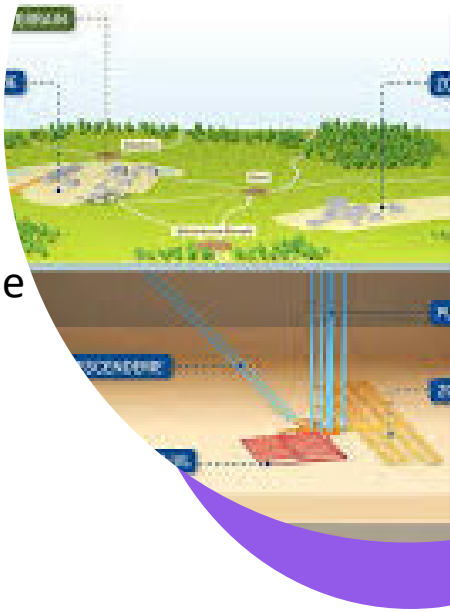
Les déchets Haute Activité (HA), bien qu'en faible volume (0,2%), ont une très forte toxicité :

- La radioactivité se mesure en Béquerel/gramme : en centaines pour les Très Faible Activité (TFA), en millions pour les Moyenne Activité (MA), en millards de Bq/g pour les HA (pour mémoire, un humain dégage 8 000 Bq)

La durée de vie des déchets HA en France est très importante : 10 000 ans pour revenir au niveau de l'uranium naturel :

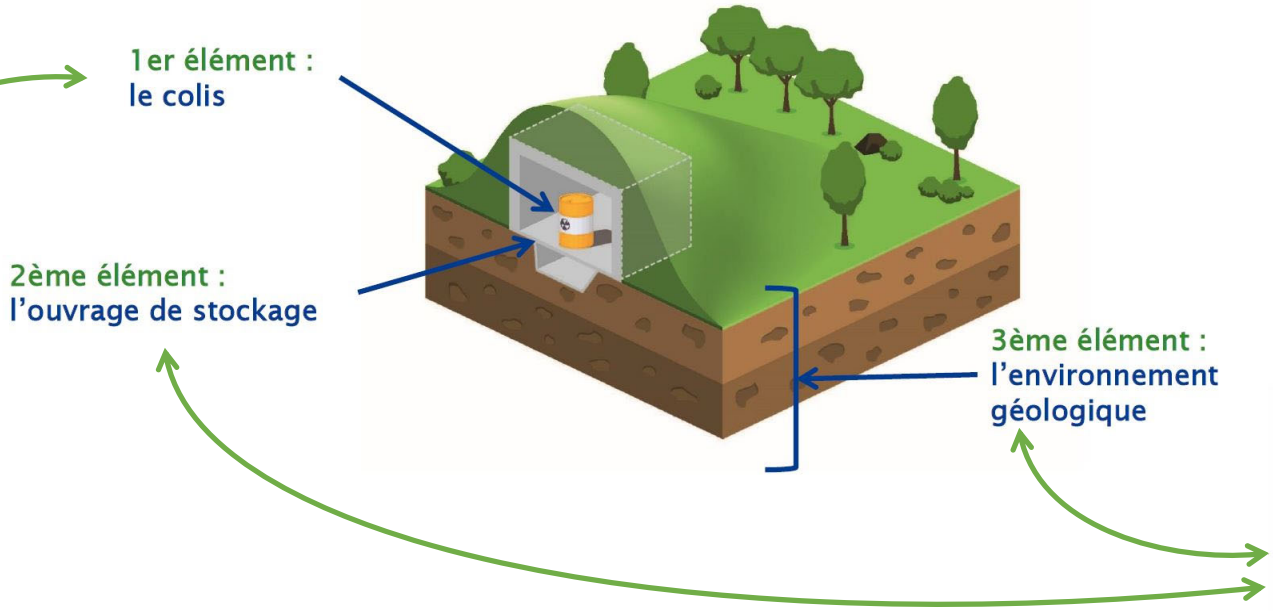


2.1 LA FORTE TOXICITÉ ET DURÉE DE VIE DE SES DÉCHETS



Le niveau de toxicité et la durée de vie des déchets HA et MA-VL nécessite de les isoler de la biosphère par plusieurs « barrières » :

Colis HA Colis MA-VL



CIGÉO
Centre industriel de stockage réversible profond

Sfen Rhône Ain-Loire

2.2 La forte gravité et le fort impact de ses accidents

Le nucléaire civil a occasionné 3 accidents majeurs : TMI, Tchernobyl, Fukushima. Sans entrer dans le détail précis du scénario de chaque catastrophe, il est cependant utile d'aborder en 1er lieu leurs causes majeures et les caractéristiques différenciantes des installations, afin de mieux comprendre leurs conséquences sanitaires, sociales et économiques :

Three Miles Island (1979, USA) :

- qq insuffisances de conception (filière REP pas encore mature)
- 2 défaillances matérielles
- 3 erreurs humaines
- Présence d'enceinte de confinement

➢ Fusion partielle du coeur, réaction exothermique zirconium-eau, production d'hydrogène

Tchernobyl (1986, Ukraine) :

- Nbreux défauts de conception (filière russe RBMK)
- 6 erreurs humaines graves (3 non respects volontaires des règles de conduite + 3 inhibations volontaires de systèmes de sûreté)
- Absence d'enceinte de confinement

➢ Explosion du cœur

➢ Incendie du graphite

Fukushima (2011, Japon) :

- qq insuffisances de conception
- Perte totale source refroidissement et source électrique (suite au tsunami)
- Resistance au séisme (8,9)
- Présence d'enceinte de confinement
- Réaction héroique des opérateurs

➢ Fusion partielle de 3 cœurs, réaction exothermique zirconium-eau, production d'hydrogène

➢ Explosion de l'hydrogène ds 3 BK

2.2 LA FORTE GRAVITÉ ET LE FORT IMPACT DE SES ACCIDENTS

Conséquences sanitaires, sociales et économiques de ces 3 catastrophes :

Three Miles Island (1979, USA) :

- Faibles rejets sur qq heures
- Stress et confusion de la population / recommandations contradictoires (140 000 pers s'enfuient, embouteillages monstres)
- **0** décès immédiat
- **0** décès différé
- **0** morbidité induite
- Arret de la filère nucléaire aux USA pendant 30 ans

Tchernobyl (1986, Ukraine) :

- Rejets continus pendant 10j
- Dépots des rejets sur tte l'Europe (13 000 km2)
- Contamination des denrées alimentaires
- 270 000 pers évacuées
- **50** décès immédiats
- **7 000** cancers thyroide (+ **9 000** autres cancers potentiels ?)
- Augmentation morbidité / angoisse, maladies psychosomatiques, sentiment de non reconnaissance et d'abandon par les nvx Etats de la CEI, alcool, drogue, augmentation des suicides

Fukushima (2011, Japon) :

- 15 rejets discontinus sur 2 sem
- Dépot des rejets sur 250 km (600 km2)
- Contamination des denrées alimentaires
- 150 000 pers évacuées
- **0** décès immédiat
- **1** décès différé ? (cancer du poumon d'un travailleur sur la centrale)
- 1 000 décès ds l'evacuation (parmi les 20 000 décès dus au séisme + tsunami)
- Augmentation morbidité / recours au charbon, pénurie d'électricité (1 000 morts de froid ?)

2.3 SA FAIBLE ACCEPTABILITÉ SOCIALE

L'énergie nucléaire est impopulaire aux yeux de certains, pour différentes raisons :

- L'inquiétude légitime sur le niveau de sûreté (Tchernobyl, Fukushima),
- L'inquiétude légitime sur les déchets radioactifs (toxicité/l'environnement et passif transmis aux générations futures),
- L'association, consciente ou inconsciente, entre le nucléaire civil et le nucléaire militaire (Hiroshima).

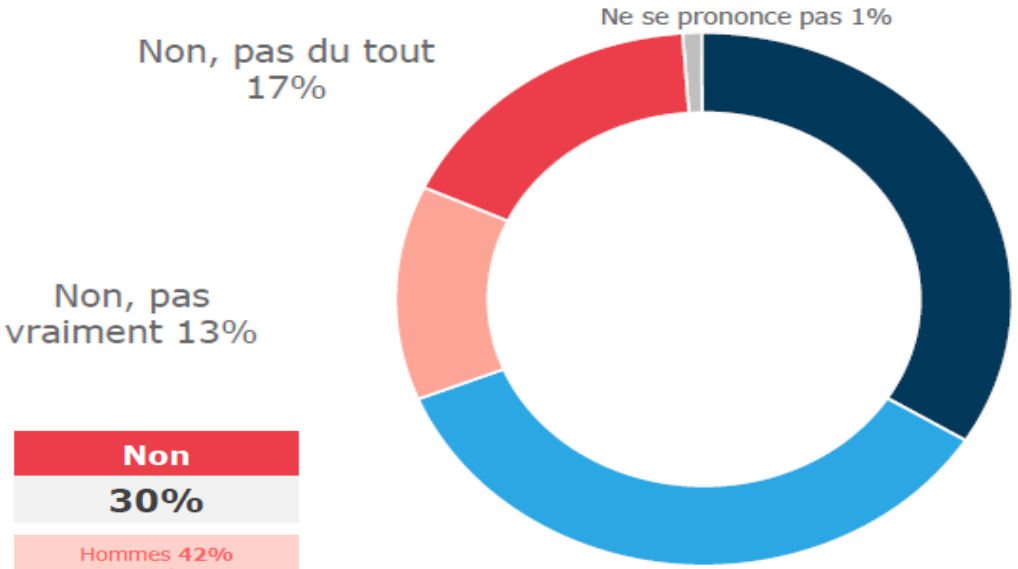
Ces 3 sujets d'inquiétudes, sont amplifiés et déformés par les phénomènes suivants :

- La complexité des questions scientifiques et techniques qui sont liées à l'énergie nucléaire, ce qui ne facilite pas son appropriation par le grand public, mais aussi par les médias (la filière nucléaire n'ayant pas dans le passé été très efficace en terme de communication et vulgarisation),
- Un traitement par les médias majoritairement médiocre, voire parfois éronné (plus centré sur le "buzz" que sur l'argumentation scientifique),
- Un traitement par certains politiques et ONG environnementales basé sur des positions dogmatiques, et non sur des faits avérés.

2.3 SA FAIBLE ACCEPTABILITÉ SOCIALE

- **Avec pour résultat une perception du public souvent éloignée de la réalité des faits :**

Selon vous, le nucléaire contribue-t-il à la production de gaz à effet de serre (CO2) et au dérèglement climatique ?



Non
30%
Hommes **42%**
65 ans et plus **39%**
CSP+ **45%**
Communes rurales **37%**

Oui
69%
~~Femmes 79%~~
18-34 ans **86%**
CSP- **80%**

Sondage BVA, avril 2019 :

« Les français et le nucléaire : connaissances et perceptions »

Mais il y a des raisons d'espérer

- Tristan KAMIN
- Yves CALVI
- Le REVEILLEUR
- Axel De TARLE
- Dr NOZMAN
- VD4 BUGEY
- Pub ORANO
- Pub CNNP

Sfen Rhône Ain-Loire

Sfen Rhône Ain-Loire

03

Les atouts du nucléaire

1. Sa forte densité énergétique
2. Sa faible conso de ressources
3. Ses faibles émissions de CO2
4. Son faible volume de déchets
5. Son coût compétitif
6. Sa forte sureté

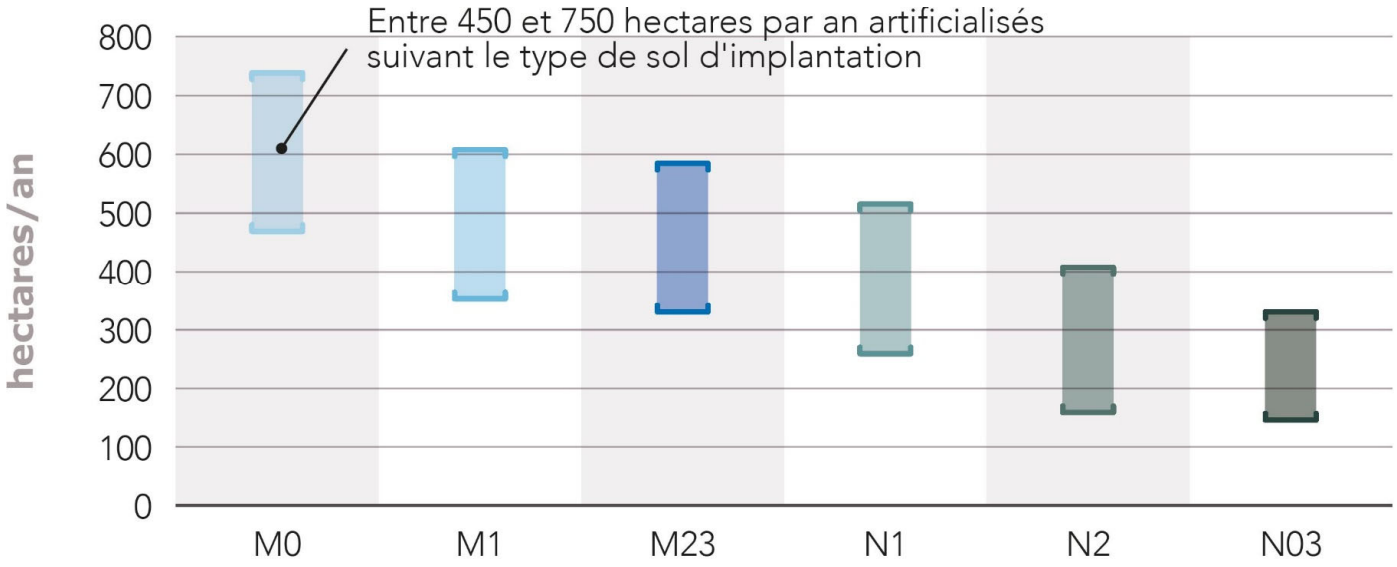
3.1 SA FORTE DENSITÉ ÉNERGÉTIQUE

La densité énergétique représente l'énergie par unité de volume (ou de masse)

Source	Réaction	Densité Energétique kWh / kg
Antimatière	Annihilation matière-antimatière	24 965 421 631
Deutérium et tritium	Fusion thermonucléaire	6 934 839 342
Uranium-235	**Fission nucléaire**	**22 083 333**
Essence	Chimique	13,1
Propane (ou GPL)	Chimique	12,8
Charbon	Chimique	6,6
Bois	Chimique	4,5
Accumulateur lithium-air	Électrochimique	2,5
Accumulateur lithium-soufre	Électrochimique	0,5
Batterie au plomb	Électrochimique	0,3
Accumulateur lithium-ion	Électrochimique	0,2
Volant d'inertie	Mécanique	0,01
Condensateur	Électrique	0,001

3.1 SA FORTE DENSITÉ ÉNERGÉTIQUE

L'énergie nucléaire a aussi une forte densité surfacique d'énergie (c'est-à-dire l'énergie par unité de surface), et de ce fait, sur l'ensemble de son cycle de vie (de l'extraction du minerai jusqu'à la restauration des sols post-démantèlement), l'énergie nucléaire à une emprise très limitée sur l'utilisation des sols :



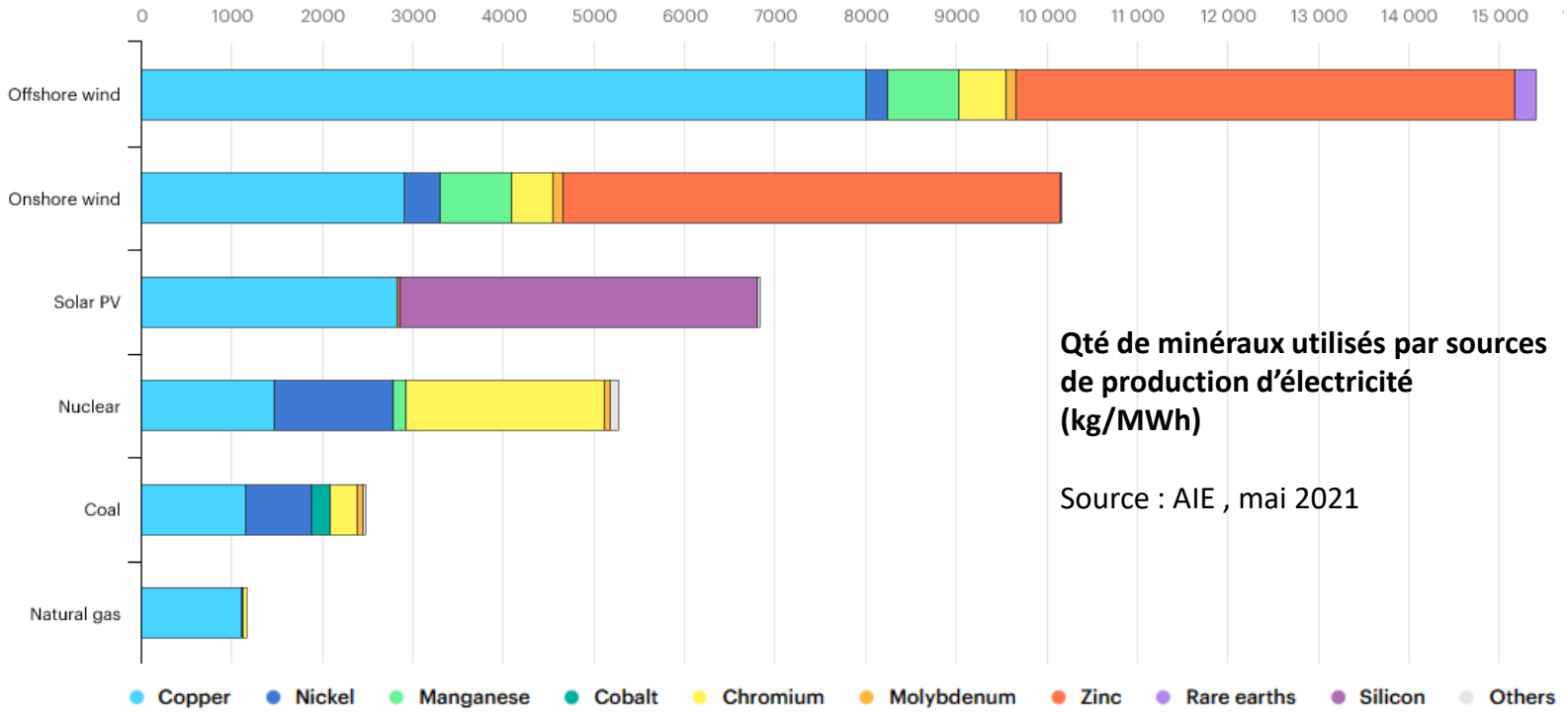
Flux d'artificialisation projeté à 2050 dans les scénarios et à l'échelle de la France

Source : rapport RTE « Futurs énergétique 2050 », octobre 2021

Nb : scénario M0 = 100% ENR jusqu'à scénario N03 = 50% nucléaire / 50% ENR

3.2 SA FAIBLE CONSO DE RESSOURCES

L'énergie nucléaire consomme peu de matières premières (minéraux, métaux) et de matériaux de construction (béton, acier,…), comparativement aux autres sources d'énergie électrique (toujours en raisonnant en ACV) :



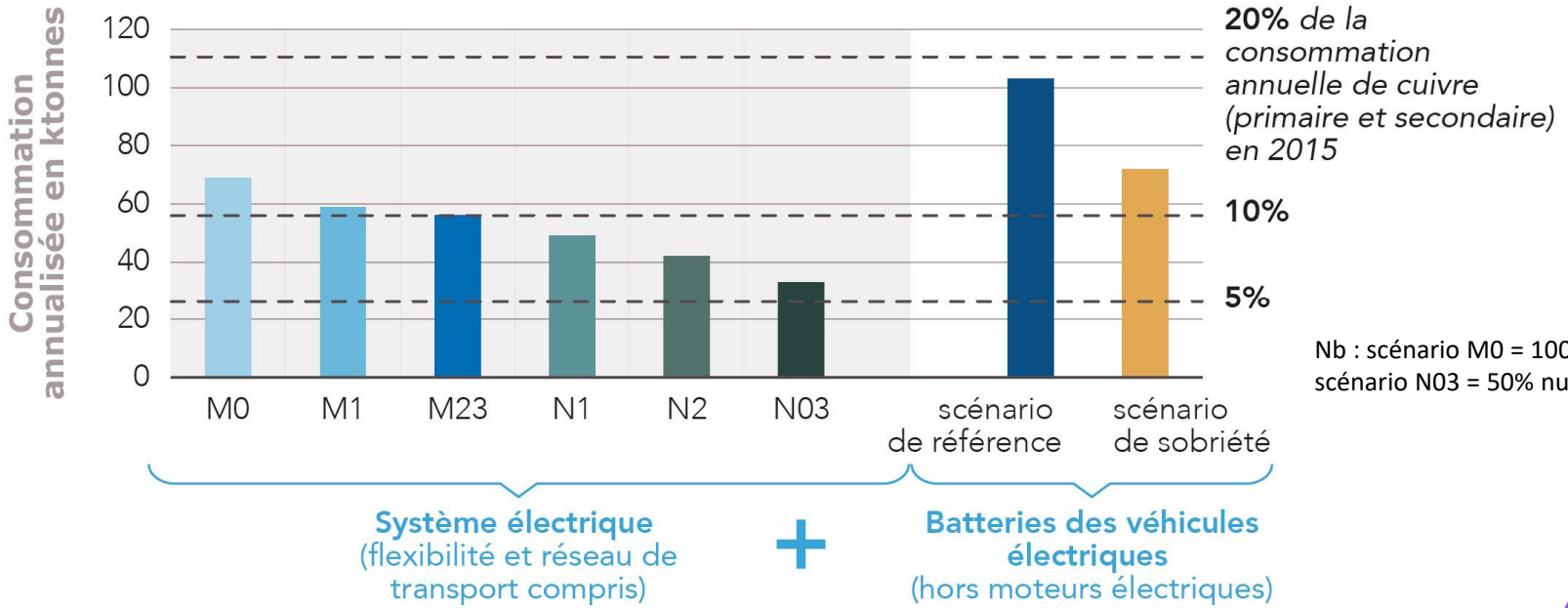
Qté de minéraux utilisés par sources de production d'électricité (kg/MWh)

Source : AIE , mai 2021

3.2 SA FAIBLE CONSO DE RESSOURCES

Dans le rapport RTE d'Octobre 2021 : « Futurs énergétiques 2050 », ce sont les scénarios ayant le plus de nucléaire qui consomment le moins de cuivre

Consommation annuelle de cuivre projetée à 2050 dans les scénarios
(et pour les batteries de véhicules électriques)

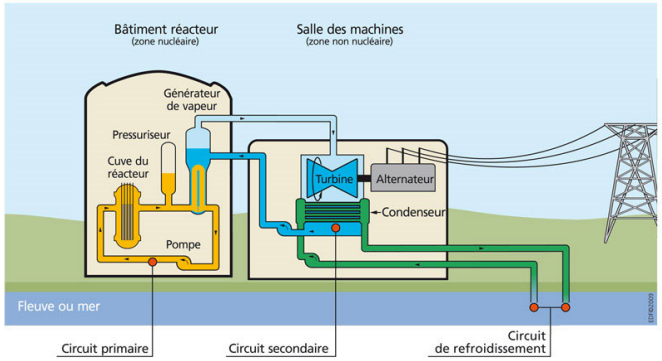


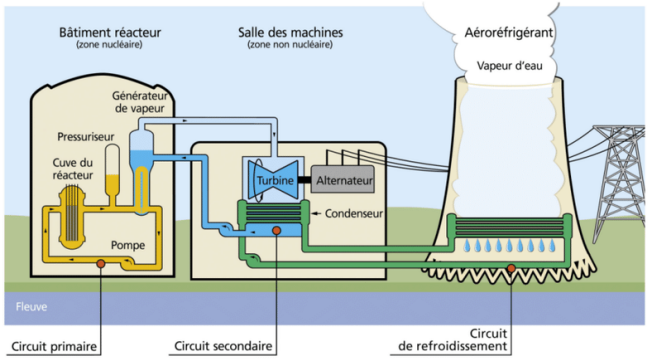
Nb : scénario M0 = 100% ENR jusqu'à
scénario N03 = 50% nucléaire / 50% ENR

3.2 SA FAIBLE CONSO DE RESSOURCES

Contrairement à une idée reçue répandue, un réacteur nucléaire consomme peu d'eau :

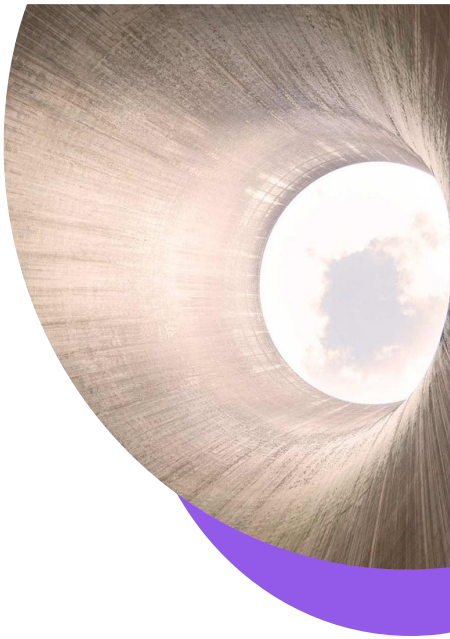
- Pour un réacteur en circuit ouvert (c'est-à-dire refroidi avec l'eau de rivière ou de mer), si la quantité prélevée est importante (150 à 180 L/kWh, cad 50 m3/s), cette eau est intégralement restituée à la rivière ou à la mer



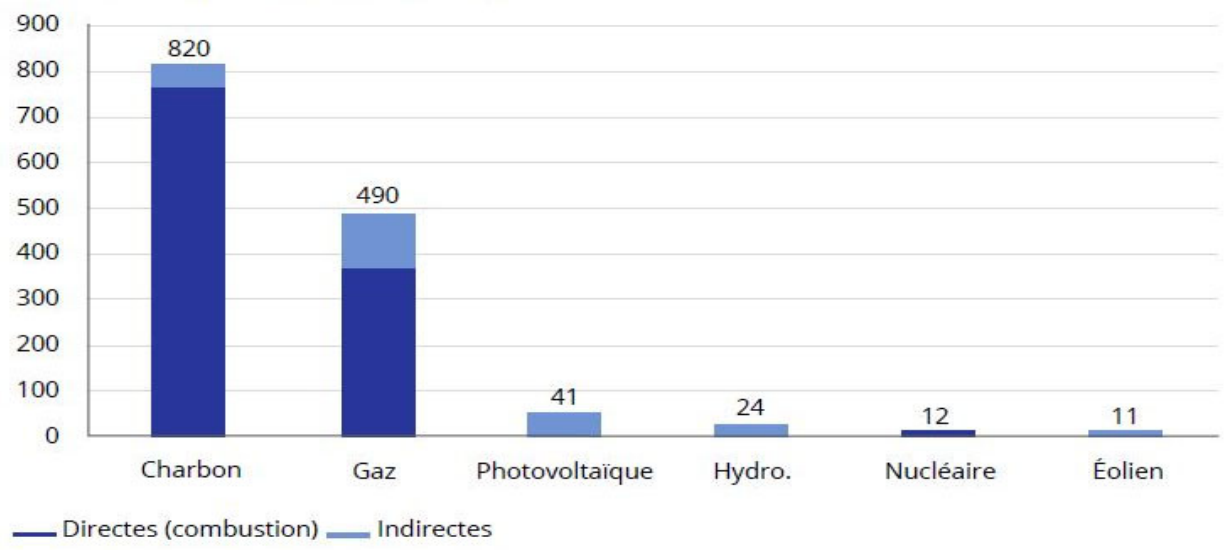


- Pour un réacteur en circuit fermé (c'est-à-dire refroidi à l'air via des tours aéro-réfrigérantes), la quantité d'eau prélevée est modeste : 6 à 8 L/kWh, cad 2 m3/s, et 40% est restituée à l'atmosphère via le panache de vapeur d'eau des aéro-réfrigérants (0,8 m3/s)

3.3 SES FAIBLES ÉMISSIONS DE CO2



Les experts du GIEC placent l'énergie nucléaire au niveau mondial à 12 g de CO2/KWh :



Bilan gaz à effet de serre (g eq CO2/kWh)

Méthodologie : ACV

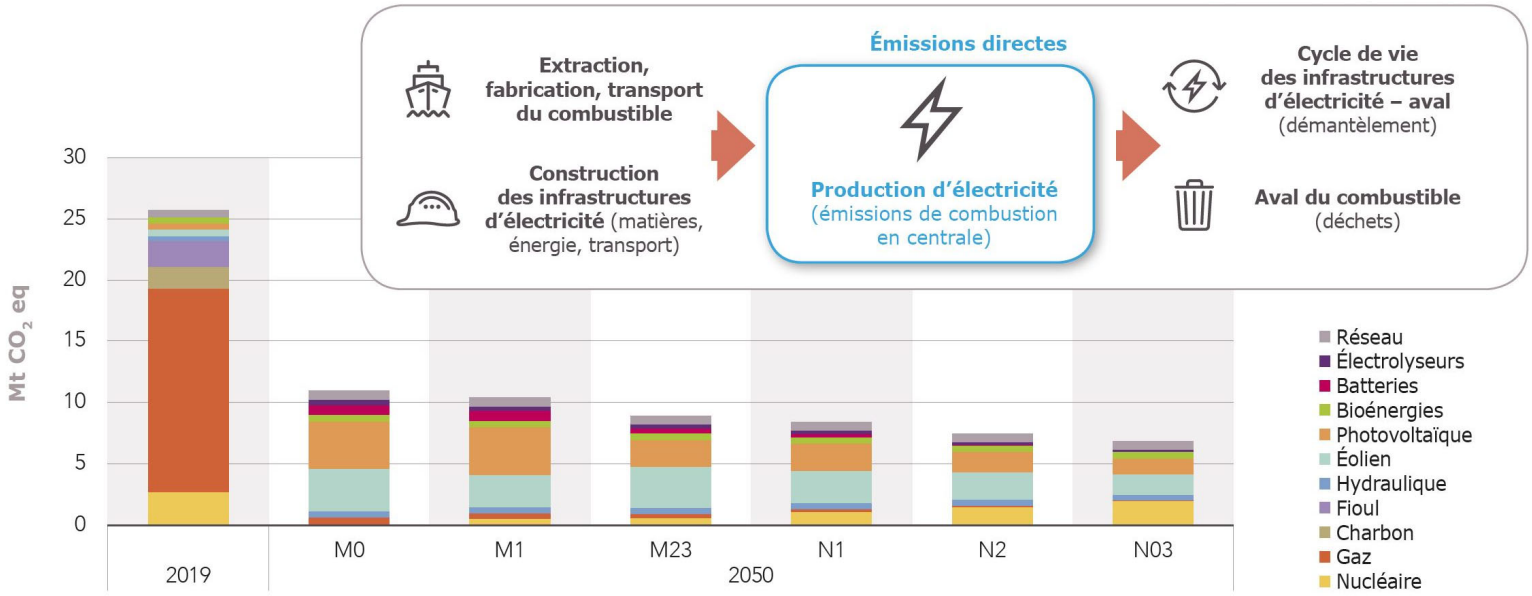
Source : IPCC par GIEC, 2015

L'ADEME ainsi que le CEA s'accordent sur un niveau d'émissions du nucléaire français de respectivement 6 g CO2/kWh et 5,29 g CO2/kWh (du fait du faible contenu carbone de l'électricité utilisée pour l'étape d'enrichissement de l'uranium)

3.3 SES FAIBLES ÉMISSIONS DE CO2

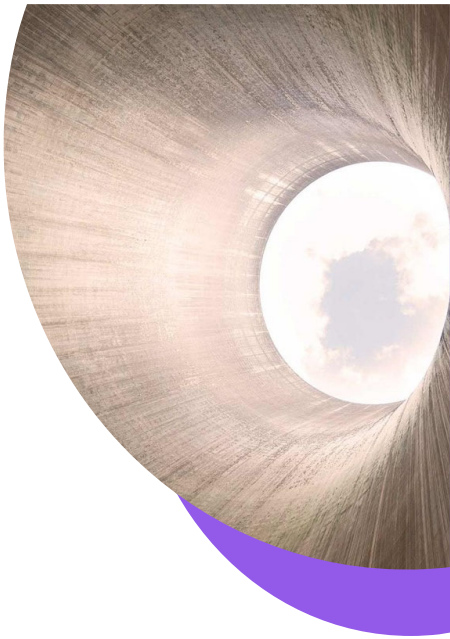
Dans le rapport RTE d'Octobre 2021 : « Futurs énergétiques 2050 », ce sont les scénarios ayant le plus de nucléaire qui émettent le moins de CO2 :

Emissions de gaz à effet de serre en cycle de vie du système électrique

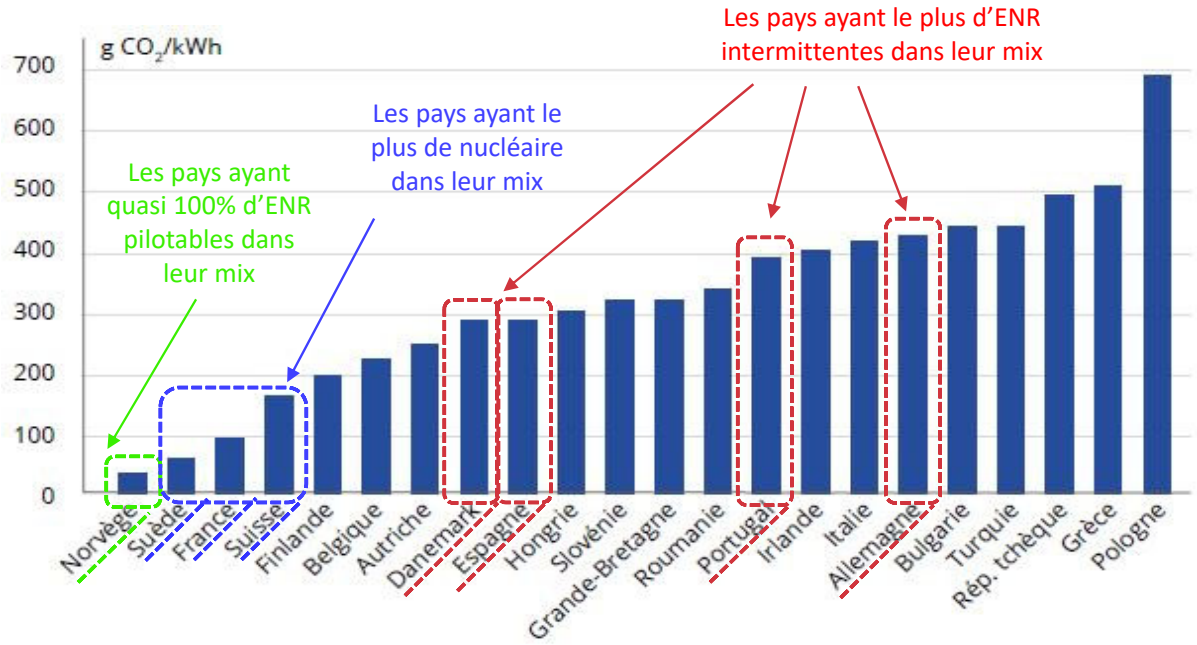


Nb : scénario M0 = 100% ENR jusqu'à scénario N03 = 50% nucléaire / 50% ENR

3.3 SES FAIBLES ÉMISSIONS DE CO2



Grace à l'énergie nucléaire (72% de son mix électrique),
la France est le pays le moins émetteur de C02 des sept plus grands pays industrialisés :



Intensité carbone du secteur électrique
(10/2016 à 09/2017)

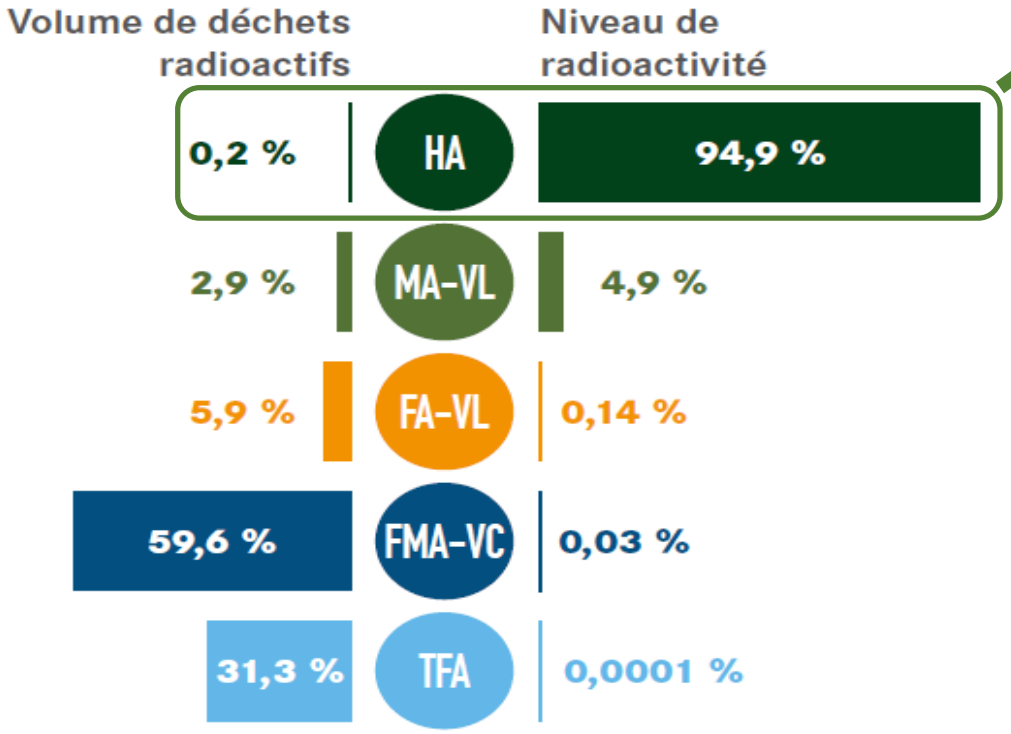
Méthodologie : ACV

Source : MIT, 2018

- La France a déjà atteint les objectifs que l'AIE a fixé pour 2050

3.4 Son faible volume de déchets

Les déchets radioactifs, c'est quoi précisemment ?



Tous les déchets HA issus des 58 réacteurs français tiennent dans une piscine olympique

Inventaire national des déchets radioactifs en France

Source : ANDRA, 2018

HA : Haute Activité (à Vie Longue)
MA-VL : Moyenne activité à Vie Longue
FA-VL : Faible Activité à Vie Longue
*FMA-VC : Faible et Moyenne Activité a Vie Courte**
TFA : Très Faible Activité (à Vie Courte)*

** Vie Courte = période radioactive ≤ 31 ans*

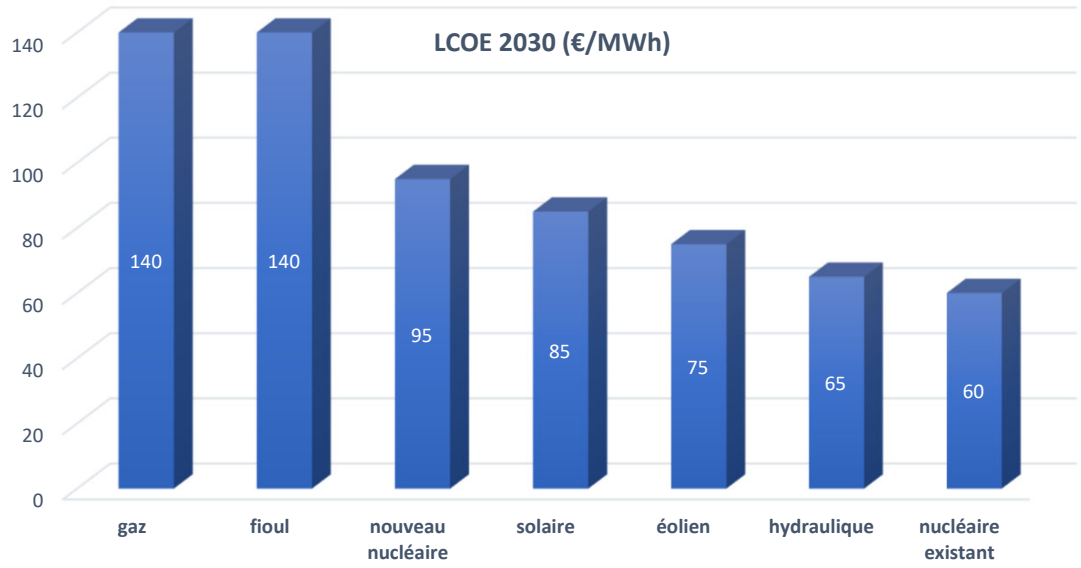
3.4 SON FAIBLE VOLUME DE DÉCHETS

Les volumes de déchets, selon les # scenarios d'évolution du parc nucléaire francais :

		SR1	SR2[1]	SR3	SNR
Poursuite ou arrêt de la production électronucléaire		Poursuite (durée totale de fonctionnement entre 50 et 60 ans)	Poursuite (durée totale de fonctionnement de 50 ans)	Poursuite (durée totale de fonctionnement entre 50 et 60 ans)	Arrêt au bout de 40 ans (sauf EPR™ au bout de 60 ans)
Type de réacteurs déployés dans le futur parc		EPR puis RNR	EPR puis RNR	EPR	/
Retraitement des combustibles usés		Tous : UNE, URE, MOX et RNR	Tous : UNE, URE, MOX et RNR	UNE seuls	Arrêt anticipé du retraitement des UNE
Requalification des combustibles usés et de l'uranium en déchets		Aucune	Aucune	URE, MOX, RNR et uranium appauvri	Tous combustibles usés, uranium appauvri et URT
HA	Combustibles usés à base d'oxyde d'uranium des réacteurs électronucléaires (UNE, URE)	-	-	3 700 tML	25 000 tML
	Combustibles usés à base d'oxyde mixte d'uranium et de plutonium des réacteurs électronucléaires (MOX, RNR)	-	-	5 400 tML	3 300 tML
	Déchets vitrifiés	12 000 m³	10 000 m³	9 400 m³	4 200 m³
MA-VL		72 000 m³	72 000 m³	70 000 m³	61 000 m³
FA-VL	Déchets[2,3]	190 000 m³	190 000 m³	190 000 m³	190 000 m³
	Uranium appauvri, sous toutes ses formes physico-chimiques	-	-	470 000 tML	400 000 tML
	Uranium issu du retraitement des combustibles usés sous toutes ses formes physico-chimiques	-	-	-	34 000 tML
FMA-VC		2 000 000 m³	1 900 000 m³	2 000 000 m³	1 800 000 m³
TFA[4]		2 300 000 m³	2 200 000 m³	2 300 000 m³	2 100 000 m³

3.5 SON COUT COMPÉTITIF

Comparaison du coût moyen actualisé à long terme de plusieurs sources d'électricité :



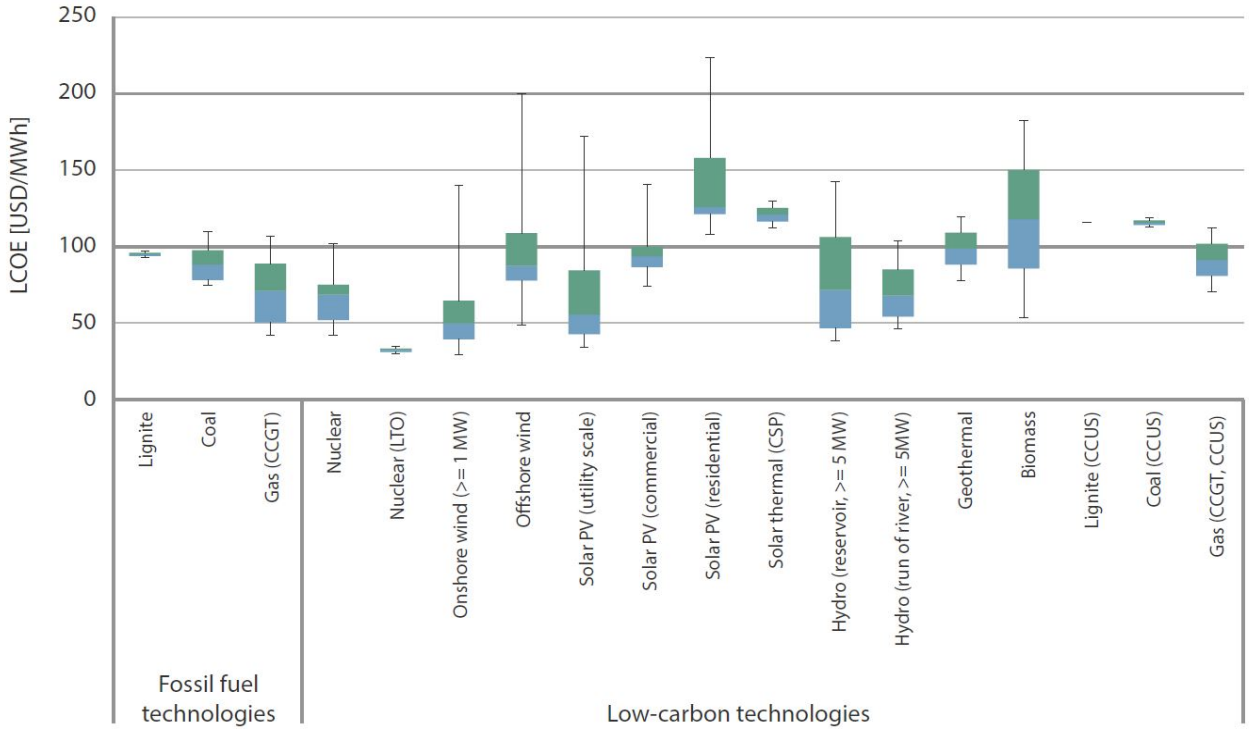
Rapport de la Commission Européenne
janvier 2019

Basé sur l'étude « Energy Prices and Costs in Europe »

- Sachant que le coût moyen actualisé à long terme (ou LCOE) n'inclut pas les coûts induits des énergies intermittentes (solaire, éolien), comme les capacités de production de back-up, le stockage, les interconnexions supplémentaires.

3.5 SON COUT COMPÉTITIF

Comparaison du coût moyen actualisé à long terme de plusieurs sources d'électricité :



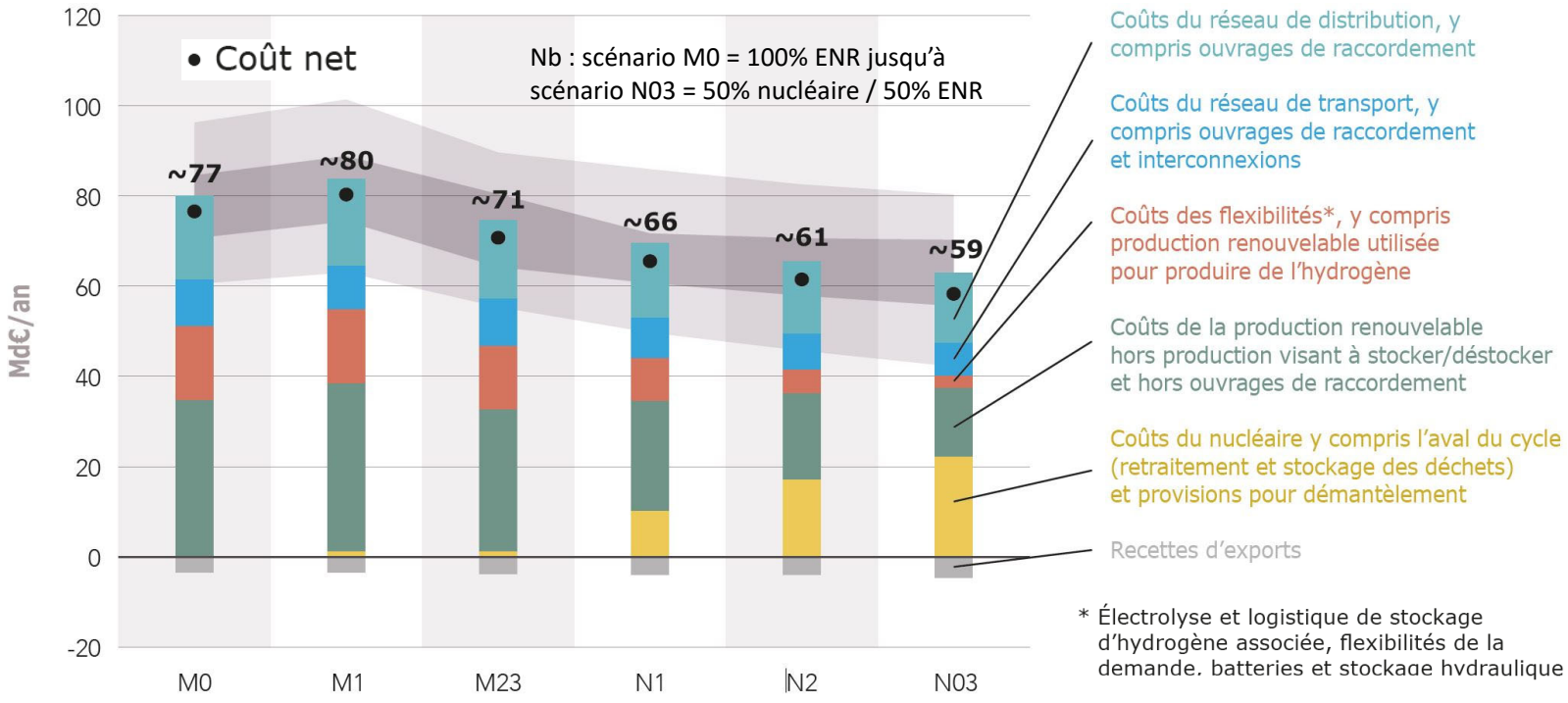
Note: Values at 7% discount rate. Box plots indicate maximum, median and minimum values. The boxes indicate the central 50% of values, i.e. the second and the third quartile.

Rapport de l'Agence Internationale de l'Energie (AIE) Décembre 2020

Basé sur l'étude « Projected Costs of Generating Electricity, IEA, December 2020 »

3.5 SON COUT COMPÉTITIF

Comparaison des coûts complets (production + acheminement + flexibilités) en France selon les scénarios du rapport RTE d'Octobre 2021 : « Futurs énergétiques 2050 » :

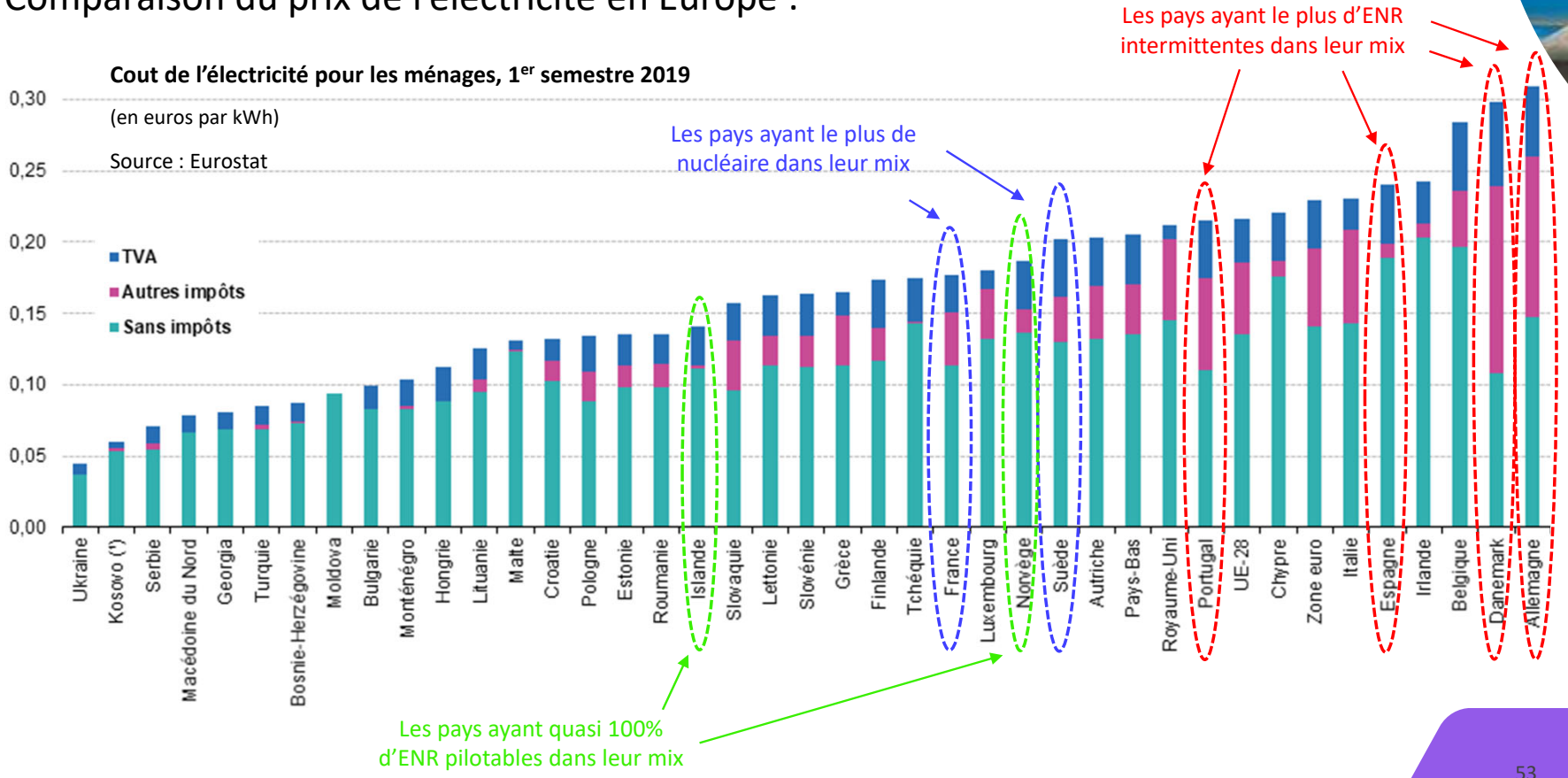


* Électrolyse et logistique de stockage d'hydrogène associée, flexibilités de la demande, batteries et stockage hydraulique

Sfen Rhône Ain-Loire

3.5 SON COUT COMPÉTITIF

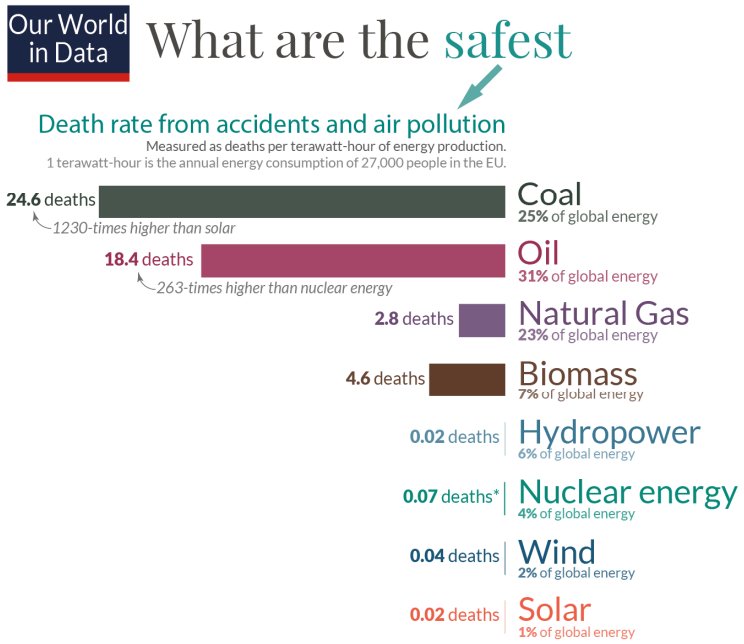
Comparaison du prix de l'électricité en Europe :



Sfen Rhône Ain-Loire

3.6 SA FORTE SURETÉ

Comparaison de la mortalité pour chaque source d'énergie :



Nbre de décés :

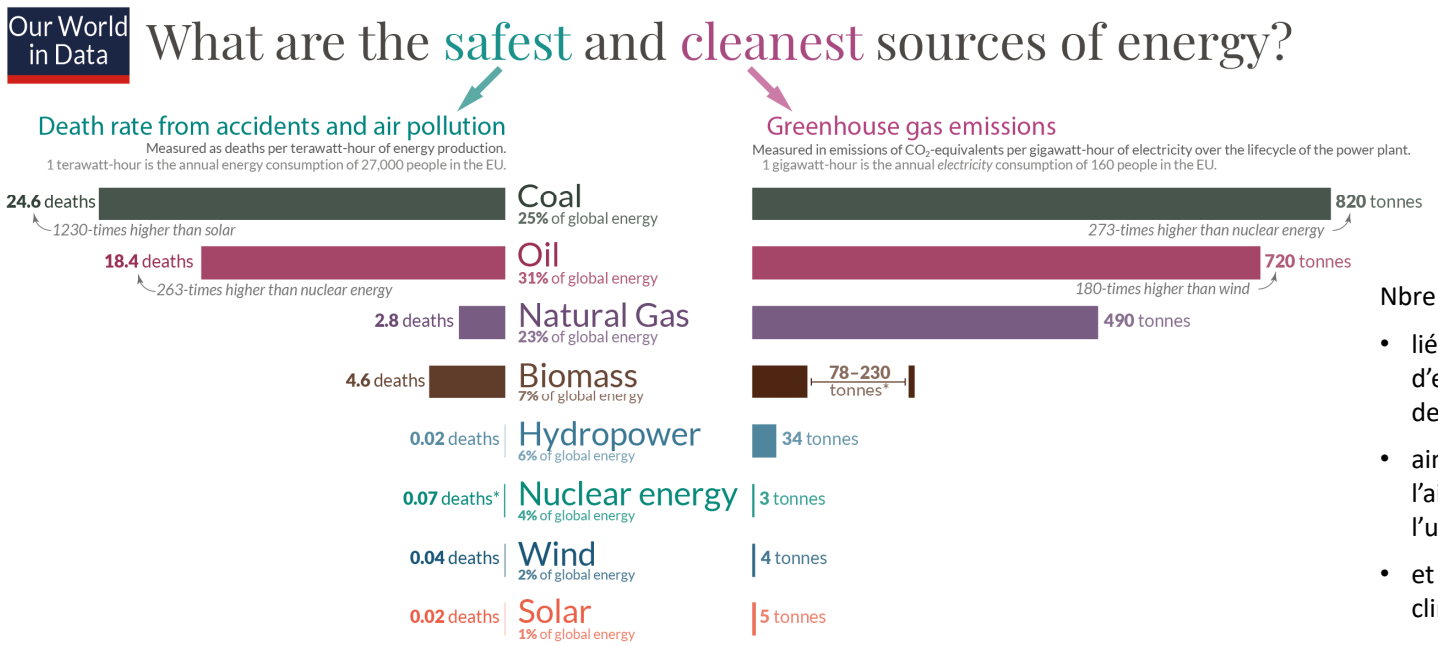
- liés aux accidents lors des phases d'extraction, transformation et production de l'énergie,
- ainsi que ceux découlant de la pollution de l'air (pendant la production, le transport et l'utilisation des différents combustibles),
- et enfin ceux résultant du changement climatique

*Life-cycle emissions from biomass vary significantly depending on fuel (e.g. crop resides vs. forestry) and the treatment of biogenic sources.
*The death rate for nuclear energy includes deaths from the Fukushima and Chernobyl disasters as well as the deaths from occupational accidents (largely mining and milling).
Energy shares refer to 2019 and are shown in primary energy substitution equivalents to correct for inefficiencies of fossil fuel combustion. Traditional biomass is taken into account.
Data sources: Death rates from Markandya & Wilkinson (2007) in *The Lancet*, and Sovacool et al. (2016) in *Journal of Cleaner Production*;
Greenhouse gas emission factors from IPCC AR5 (2014) and Pehl et al. (2017) in *Nature*; Energy shares from BP (2019) and Smil (2017).
OurWorldinData.org – Research and data to make progress against the world's largest problems.

Licensed under CC-BY by the authors Hannah Ritchie and Max Roser.

3.6 SA FORTE SURETÉ

Comparaison de la mortalité pour chaque source d'énergie :



Nbre de décés :

- liés aux accidents lors des phases d'extraction, transformation et production de l'énergie,
- ainsi que ceux découlant de la pollution de l'air (pendant la production, le transport et l'utilisation des différents combustibles),
- et enfin ceux résultant du changement climatique

3.6 SA FORTE SURETÉ

L'industrie nucléaire est probablement la filière la plus controlée et surveillée, et elle ne cesse de se renforcer en tenant compte du REX :

- Contrôle interne :
  - la Filière Indépendante de Sureté (FIS), mise en place en France après TMI :
  - l'Ingénieur Sureté (IS) en CNPE,
  - l'Inspection Nucléaire (IN) rattaché au Directeur de la DPN d'EDF (Division Production Nucléaire),
  - l'Inspecteur Général de Sureté Nucléaire (IGSN) rattaché au PDG d'EDF
- Contrôle externe :
  - l'Autorité de Sureté du Nucléaire (ASN), indépendante du pouvoir politique,
  - avec son "bras armé" l'Institut de Radioprotection et de Sûreté Nucléaire (IRSN)
- Prise en compte du REX :
  - l'INPO (Institute of Nuclear Power Operations), association internationale d'exploitants (mais sans les russes), mise en place par les États-Unis suite à TMI,
  - WANO (World Association of Nuclear Operators), association mondiale d'exploitants mise en place suite à Tchernobyl

Sfen Rhône Ain-Loire

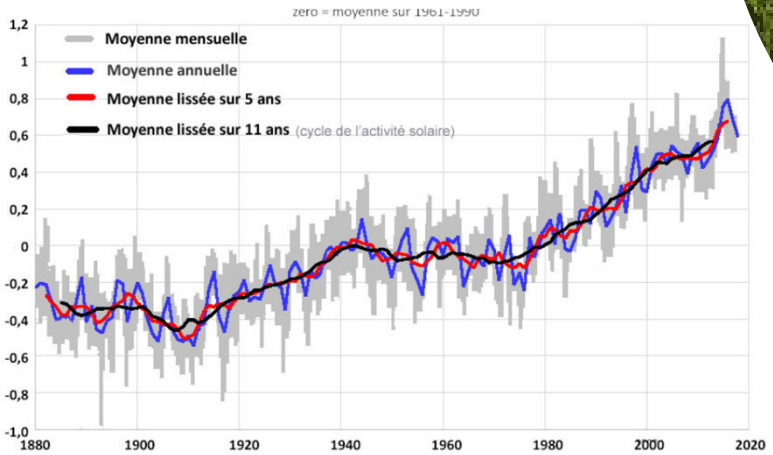
04

Quelle place du nucléaire face au défi climatique ?

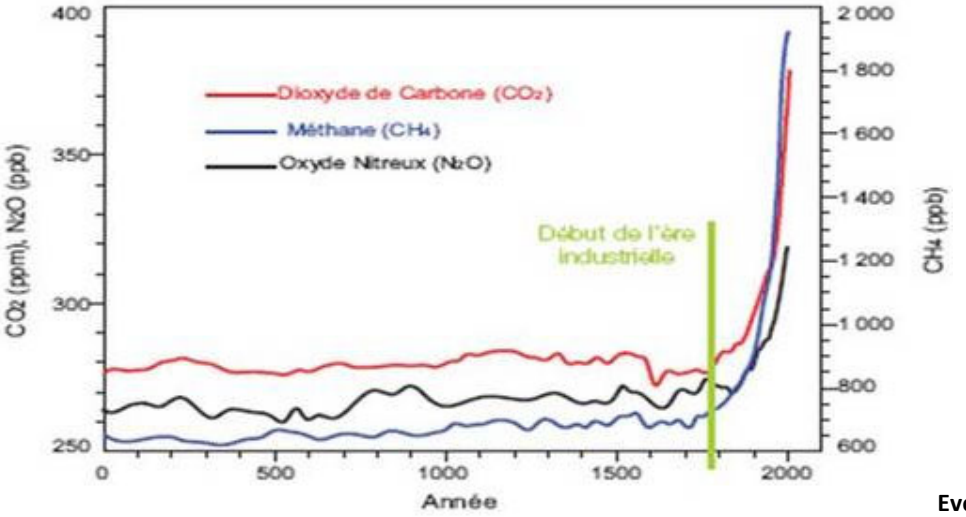
1. L’évolution des émissions de CO2, et ses conséquences
2. Le rôle de l’énergie dans les émissions de CO2

4.1 L'ÉVOLUTION DES ÉMISSIONS DE CO2, ET SES CONSÉQUENCES

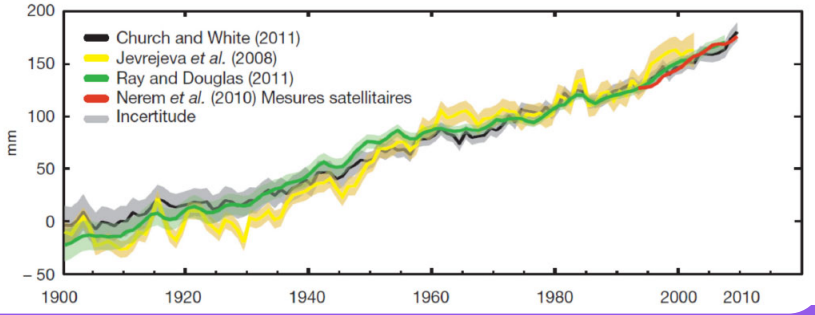
Evolution de la température moyenne globale de 1800 à 2018 (GIEC, 2014)



Evolution des concentrations des GES (GIEC, 2007)



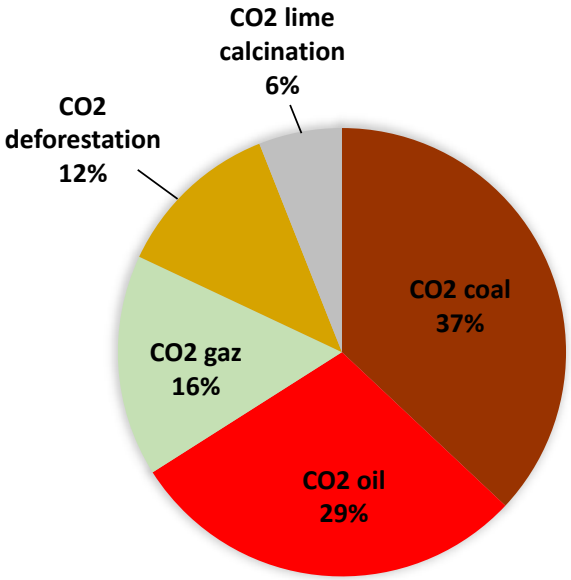
Evolution du niveau moyen des mers, par rapport à la période 1900-1905 (GIEC, 2013)



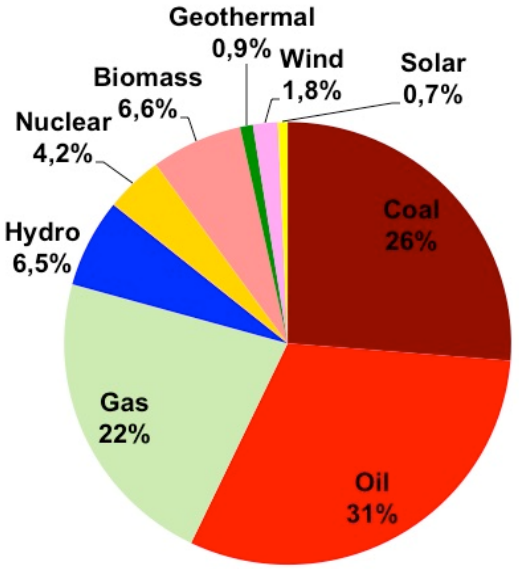
Sfen Rhône Ain-Loire

4.2 LE ROLE DE L'ENERGIE DANS LES ÉMISSIONS DE CO2

Origine des émissions mondiales de CO2
(BP Statistical Review, 2017)



Consommation mondiale d'énergie primaire
(BP Statistical Review, 2017)



82% des émissions proviennent de l'utilisation de l'énergie
(pour utilisation ensuite dans différents secteurs : électricité, industrie, transport, bâtiment, chauffage,…)

79% de la consommation d'énergie proviennent de sources fossiles
(pétrole, charbon, et gaz)

Sfen Rhône Ain-Loire

4.3

Echange / Débat

Quelle place du nucléaire face au défi climatique ?

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, rapports 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, janv-fév 2019, dossier « Environnement et biodiversité : un grand bol d'air » => http://www.sfen.org/rgn/3-10-nucleaire-energie-econome-ressources
- 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
- Rapport RTE , octobre 2021 : "Futurs énergétiques 2050" - Consommation et production : les chemins de l'électricité de RTE pour la neutralité carbone
  => https://www.rte-france.com/actualites/futurs-energetiques-neutralite-carbone-2050-principaux-enseignements

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

Université Claude Bernard Lyon 1

Merci !

L'énergie nucléaire, une solution écologique ?

Sfen Rhône Ain-Loire

Thierry CAILLON