

Energie Nucléaire

- A. Quelques petites questions de culture générale sur le nucléaire ...**
- B. Les centrales dans le monde**
- C. Radioactivité**
- D. Neutronique**
- E. Centrales Nucléaires à Fission actuelles**
- F. Déchets**
- G. Centrales de quatrième génération ?**
- H. Fusion**

**Quelques petites questions de culture générale sur
le nucléaire, avec ou sans réponses ...**

Quel pays possède la plus grande production d'électricité d'origine nucléaire ?

Quel pays possède la plus grande proportion de production d'électricité d'origine nucléaire ?

Combien de TEP faut-il pour produire la même énergie qu'un gramme d'uranium ?

Quelle est l'unité de radioactivité ?

Quel est le niveau moyen de radioactivité naturelle en France ?

Quel est le bilan carbone d'une centrale nucléaire ?

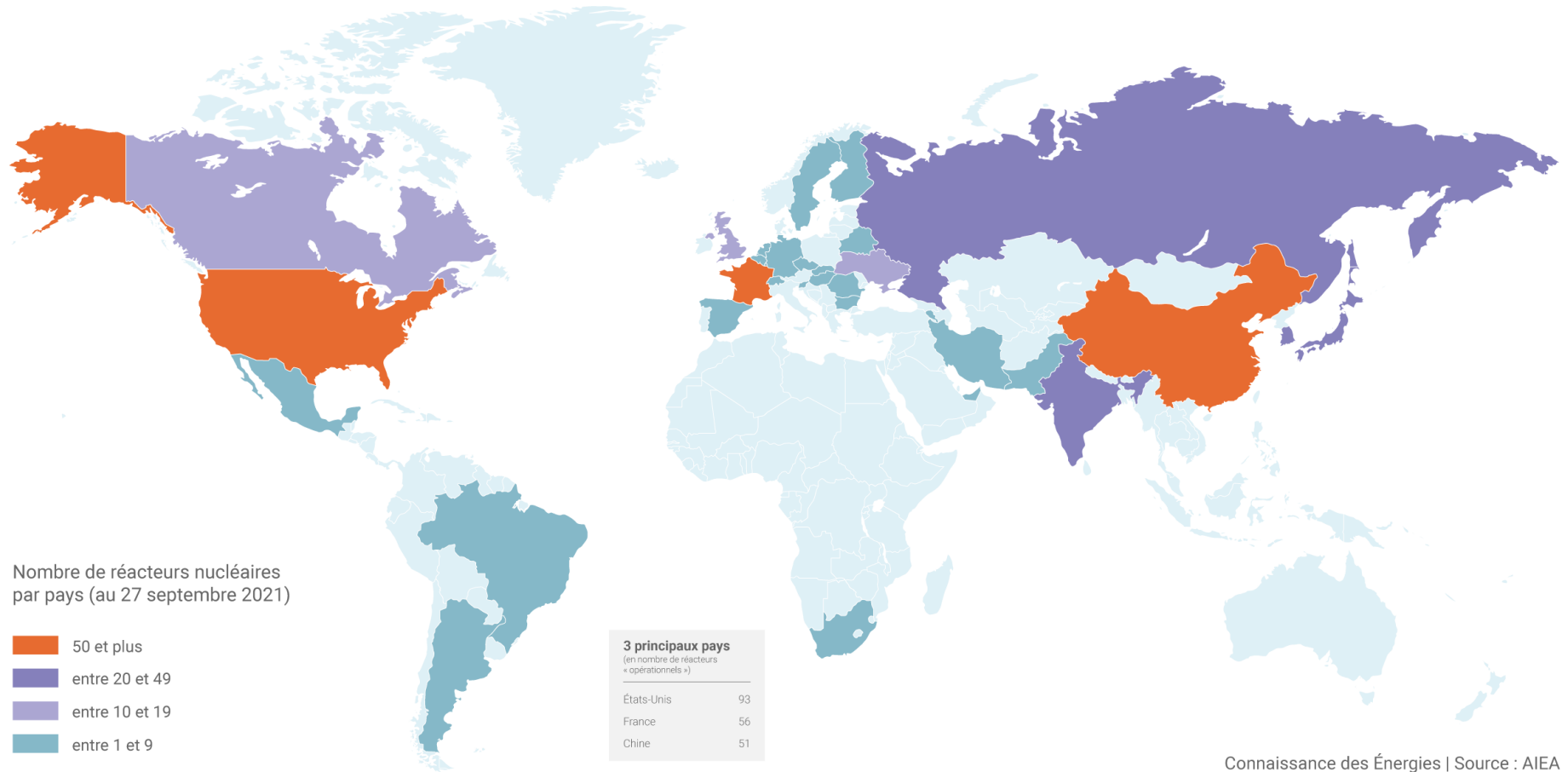
Combien coûte la fabrication (et son démantèlement) d'une centrale nucléaire ?

Quelle est la durée de vie des déchets radioactifs à vie longue ?

Quelles sont les générations des centrales nucléaires (1^{ère}, 2^{ème}, 3^{ème}, 4^{ème}) ?

Réacteurs dans le monde

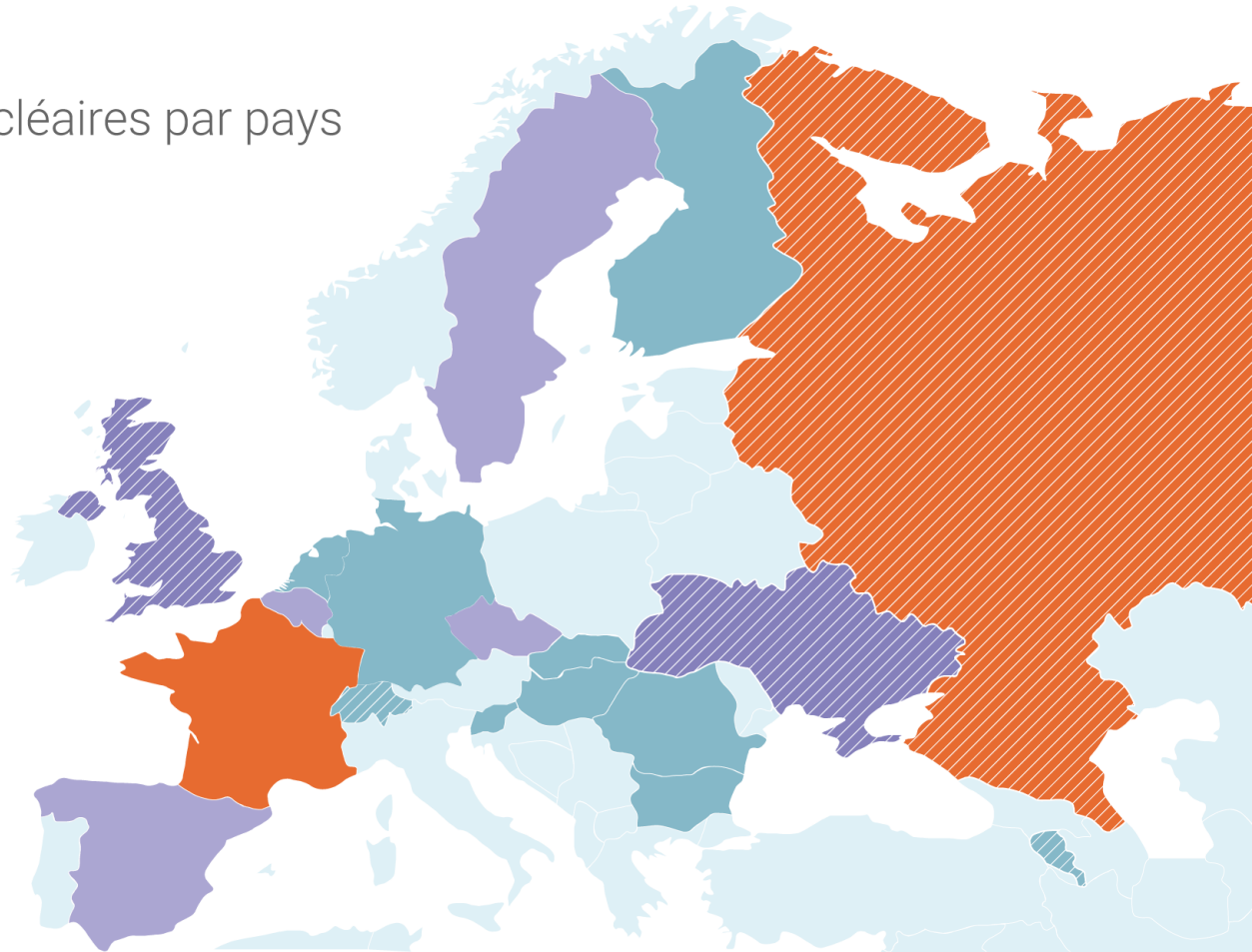
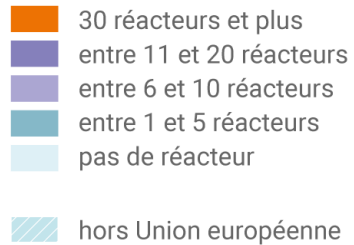
Monde Nombre de réacteurs nucléaires « opérationnels » selon l'AIEA



Nucléaire en Europe

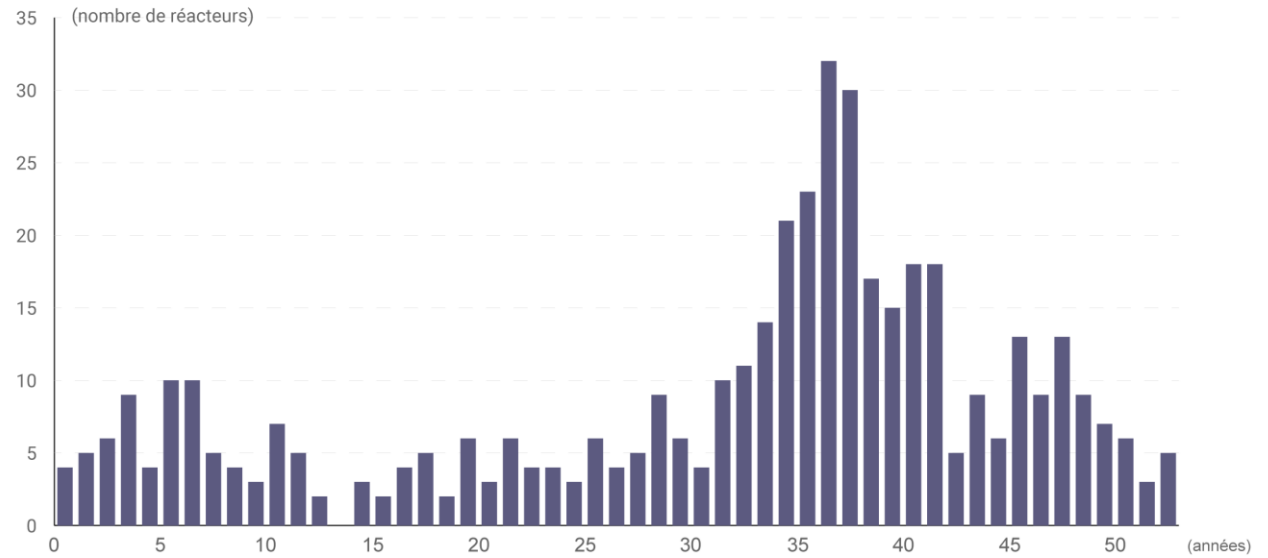
Union européenne

Répartition des réacteurs nucléaires par pays



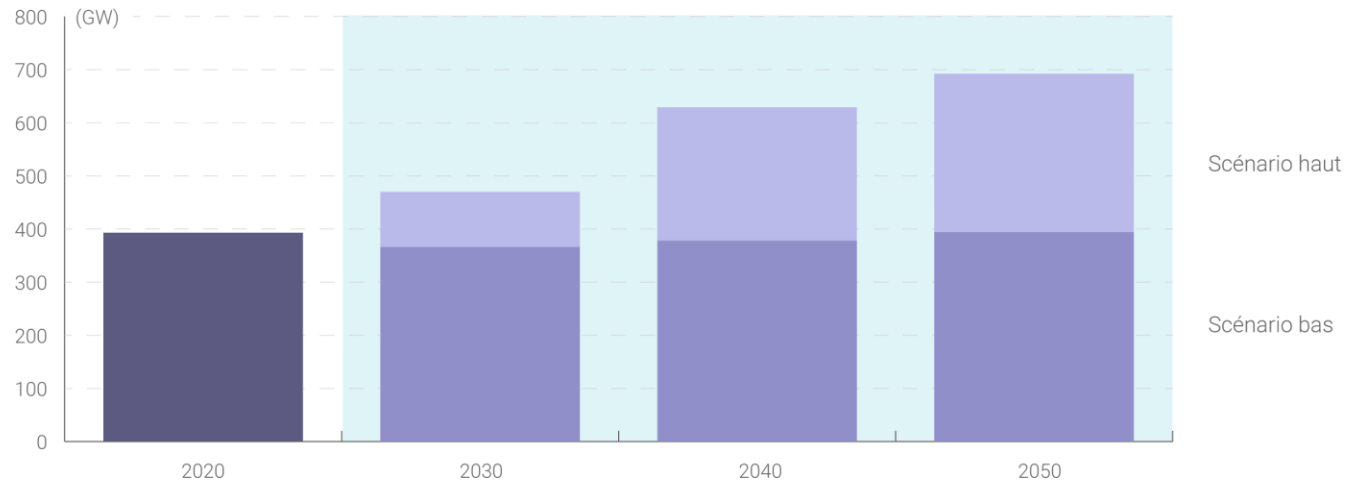
Connaissance des Énergies | Source : AIEA

Monde Âge des reacteurs nucléaires « opérationnels » selon l'AIEA



Connaissance des Énergies | Source : AIEA

Nucléaire Prévisions de l'AIEA sur l'évolution des capacités mondiales

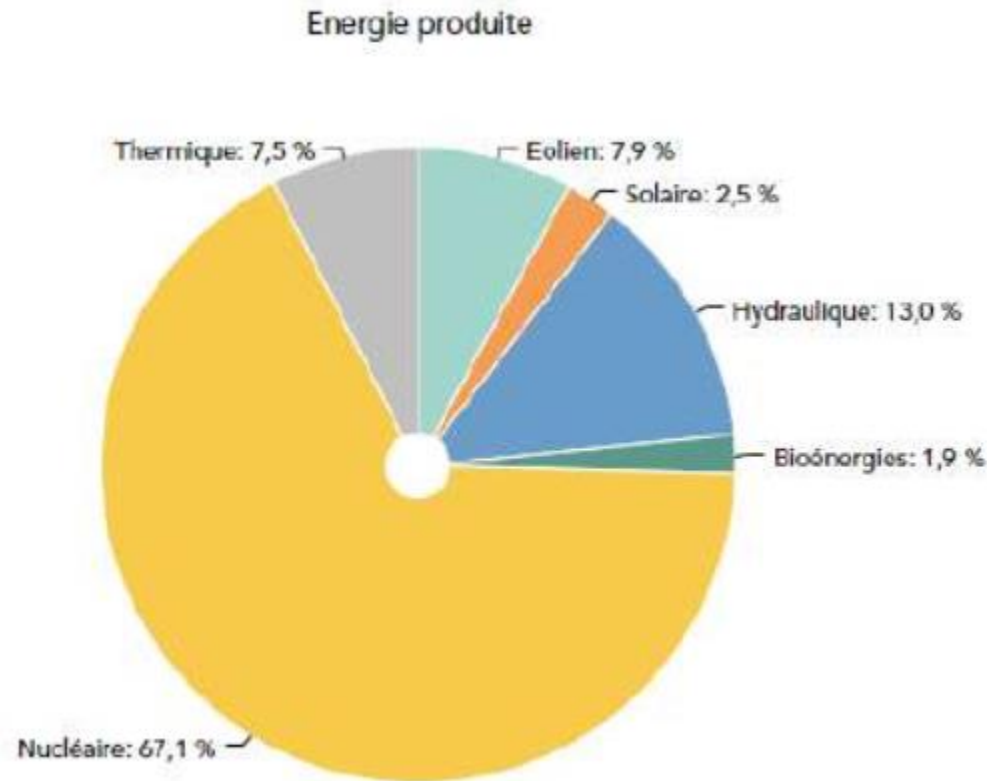


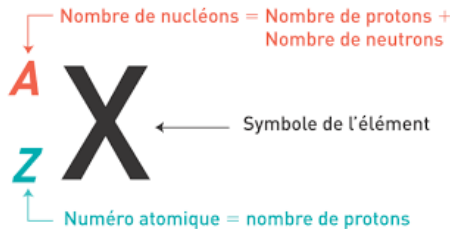
Connaissance des Énergies | Source : AIEA

Part du nucléaire en France

Bilan énergétique (Source : RTE)

2020





Radioactivité

Tableau périodique des éléments chimiques

| | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
|-----------|------------------------------------|-----------------------------------|--------------------------------------|-------------------------------------|-----------------------------------|---------------------------------------|------------------------------------|------------------------------------|-----------------------------------|------------------------------------|-------------------------------------|-----------------------------------|--------------------------------------|------------------------------------|-------------------------------------|-----------------------------------|----------------------------------|----------------------------------|
| Groupe → | I A | II A | III A | IV A | V A | VI A | VII A | VIII | IX | X | XI | II B | III B | IV B | V B | VI B | VII B | 0 |
| Période ↓ | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 | 13 | 14 | 15 | 16 | 17 | 18 |
| 1 | Hydrogène 1 H 1,007975 | | | | | | | | | | | | | | | | | Hélium 2 He 4,002602 |
| 2 | Lithium 3 Li 6,9395 | Béryllium 4 Be 9,0121831 | | | | | | | | | | | Bore 5 B 10,8135 | Carbone 6 C 12,0106 | Azote 7 N 14,006441 | Oxygène 8 O 15,9994 | Fluor 9 F 18,99840316 | Néon 10 Ne 20,1797(6) |
| 3 | Sodium 11 Na 22,98976928 | Magnésium 12 Mg 24,3055 | | | | | | | | | | | Aluminium 13 Al 26,9815385 | Silicium 14 Si 28,085(1) | Phosphore 15 P 30,97376200 | Soufre 16 S 32,0675 | Chlore 17 Cl 35,453 | Argon 18 Ar 39,948(1) |
| 4 | Potassium 19 K 39,0983(1) | Calcium 20 Ca 40,078(4) | Scandium 21 Sc 44,955908(6) | Titane 22 Ti 47,867(1) | Vanadium 23 V 50,9415(1) | Chrome 24 Cr 51,9961(6) | Manganèse 25 Mn 54,938044 | Fer 26 Fe 55,845(2) | Cobalt 27 Co 58,933194 | Nickel 28 Ni 58,6934(4) | Cuivre 29 Cu 63,546(3) | Zinc 30 Zn 65,38(2) | Gallium 31 Ga 69,723(1) | Germanium 32 Ge 72,630(8) | Arsenic 33 As 74,921595 | Sélénium 34 Se 78,971(8) | Brome 35 Br 79,904 | Krypton 36 Kr 83,798(2) |
| 5 | Rubidium 37 Rb 85,4678(3) | Strontium 38 Sr 87,62(1) | Yttrium 39 Y 88,90584 | Zirconium 40 Zr 91,224(2) | Niobium 41 Nb 92,90637 | Molybdène 42 Mo 95,95(1) | Technétium 43 Tc [98] | Ruthénium 44 Ru 101,07(2) | Rhodium 45 Rh 102,90550 | Palladium 46 Pd 106,42(1) | Argent 47 Ag 107,8682(2) | Cadmium 48 Cd 112,414(4) | Indium 49 In 114,818(1) | Étain 50 Sn 118,710(7) | Antimoine 51 Sb 121,760(1) | Tellure 52 Te 127,60(3) | Iode 53 I 126,90447 | Xénon 54 Xe 131,293(6) |
| 6 | Césium 55 Cs 132,905452 | Baryum 56 Ba 137,327(7) | Lanthanides 57-71 | Hafnium 72 Hf 178,49(2) | Tantale 73 Ta 180,94788 | Tungstène 74 W 183,84(1) | Rhénium 75 Re 186,207(1) | Osmium 76 Os 190,23(3) | Iridium 77 Ir 192,227(3) | Platine 78 Pt 195,084(6) | Or 79 Au 196,966569 | Mercur 80 Hg 200,592(3) | Thallium 81 Tl 204,3835 | Plomb 82 Pb 207,2(1) | Bismuth 83 Bi 208,98040 | Polonium 84 Po [209] | Astato 85 At [210] | Radon 86 Rn [222] |
| 7 | Francium 87 Fr [223] | Radium 88 Ra [226] | Actinides 89-103 | Rutherfordium 104 Rf [267] | Dubnium 105 Db [268] | Seaborgium 106 Sg [269] | Bohrium 107 Bh [270] | Hassium 108 Hs [277] | Méitnerium 109 Mt [278] | Darmstadtium 110 Ds [281] | Roentgenium 111 Rg [282] | Copernicium 112 Cn [285] | Nihonium 113 Nh [286] | Flerovium 114 Fl [289] | Moscovium 115 Mc [289] | Livermorium 116 Lv [293] | Tennesse 117 Ts [294] | Oganesson 118 Og [294] |
| | | | | Lanthane 57 La 138,90547 | Cérium 58 Ce 140,116(1) | Praséodyme 59 Pr 140,90766 | Néodyme 60 Nd 144,242(3) | Prométhium 61 Pm [145] | Samarium 62 Sm 150,36(2) | Europium 63 Eu 151,964(1) | Gadolinium 64 Gd 157,25(3) | Terbium 65 Tb 158,92535 | Dysprosium 66 Dy 162,500(1) | Holmium 67 Ho 164,93033 | Erbium 68 Er 167,259(3) | Thulium 69 Tm 168,93422 | Ytterbium 70 Yb 173,045 | Lutécium 71 Lu 174,9668 |
| | | | | Actinium 89 Ac [227] | Thorium 90 Th 232,0377 | Protactinium 91 Pa 231,03588 | Uranium 92 U 238,02891 | Neptunium 93 Np [237] | Plutonium 94 Pu [244] | Américium 95 Am [243] | Curium 96 Cm [247] | Berkélium 97 Bk [247] | Californium 98 Cf [251] | Einsteinium 99 Es [252] | Fermium 100 Fm [257] | Mendélévium 101 Md [258] | Nobélium 102 No [259] | Lawrencium 103 Lr [266] |

Métaux

Alcalins Alkalino-terreux Lanthanides Actinides Métaux de transition Métaux pauvres Métalloïdes

Non métaux

Autres non-métaux Halogènes Gaz nobles Non classés

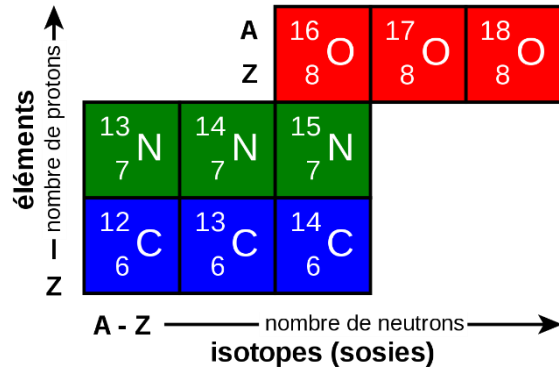
primordial

désintégration d'autres éléments

synthétique

Matières terrestres : 92 éléments de l'hydrogène à l'Uranium 238

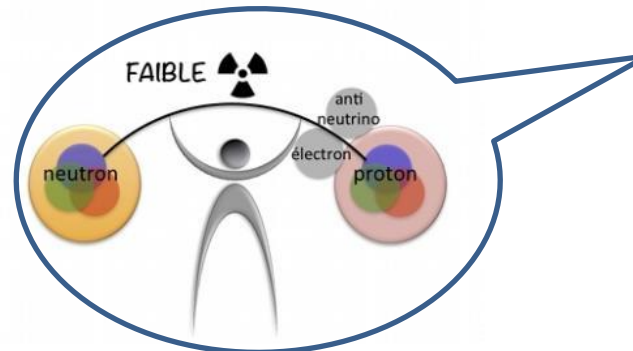
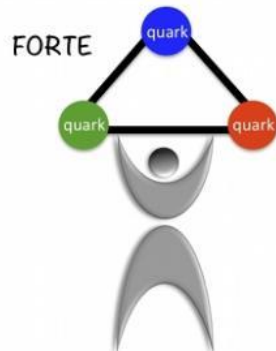
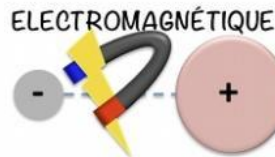
+ lourds : Transuraniens = créés par l'homme et sont instables



Isotones : même nombre de neutrons N

Isobares : même nombre de masse A

Isotopes : même nombre atomique Z



Radioactivité

Plusieurs isotopes d'un même élément chimique sont naturellement présents dans l'atmosphère.

Ex 1 : carbone dans le CO_2 , est réparti de la manière suivante :

- 98,89% de $^{12}_6\text{C}$ (stable)
- 1,11 % de $^{13}_6\text{C}$ (stable)
- et une infime fraction de $^{14}_6\text{C}$ (radioactif de période 5730 ans) : le rapport

$^{14}_6\text{C} / ^{12}_6\text{C}$ vaut $1,3 \cdot 10^{-12}$

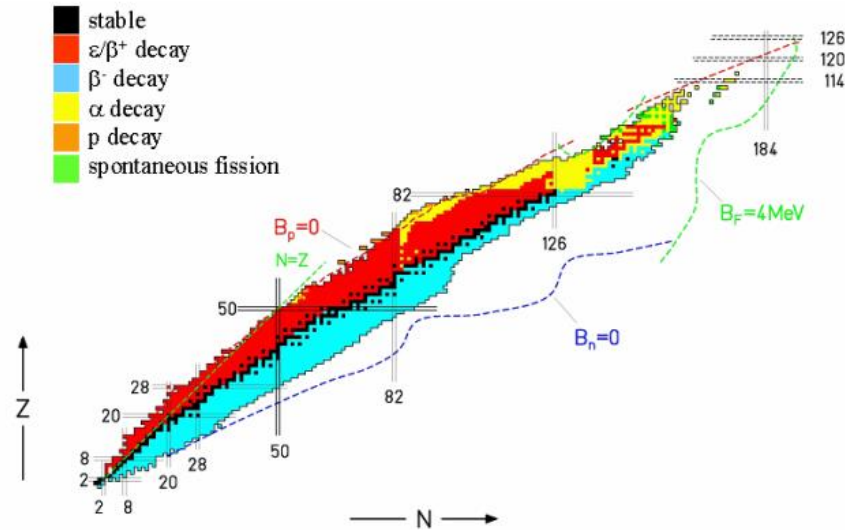
Ex 2 : le **corps humain est lui aussi naturellement radioactif !**

La radioactivité du corps humain provient de la présence en son sein de deux radioéléments d'origine naturelle, le potassium-40 et le carbone-14, à l'origine de 8000 désintégrations par seconde.

Rem : L'activité s'exprime en Becquerel (Bq) = une désintégration par seconde.
Autre unité historique, le Curie (Ci) qui correspond à $3,7 \cdot 10^{10}$ Bq.

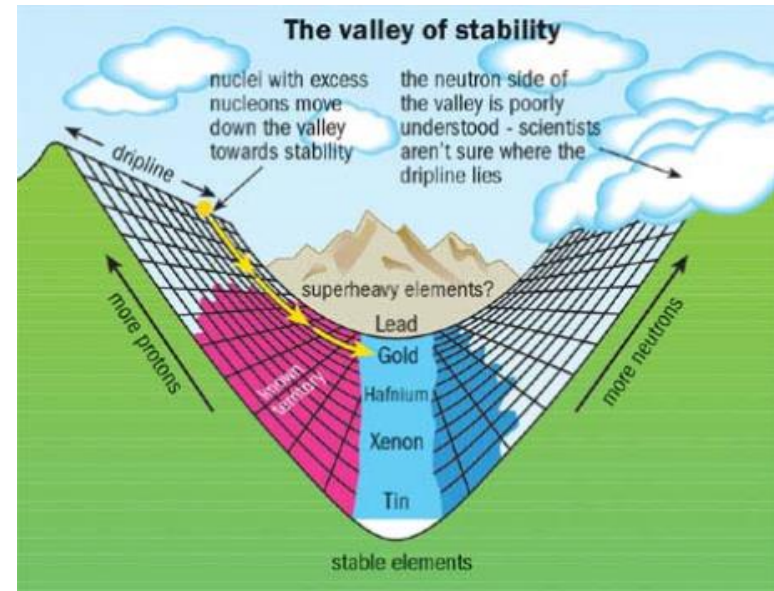
332 noyaux différents

50 instables (radioactifs naturels)



Carte des noyaux connus.

Les noyaux stables sont notés en noir.

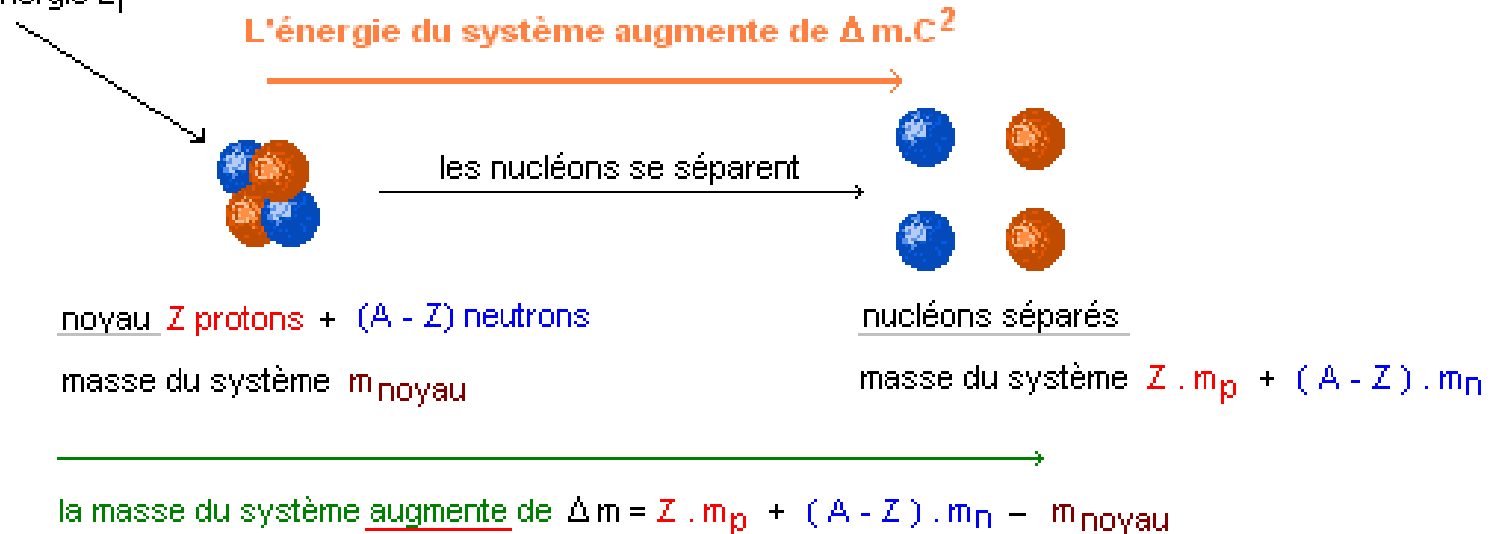


Energie de liaison

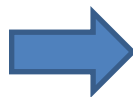
Constatation expérimentale :

la masse d'un noyau est toujours **inférieure** à la somme des masses de ses éléments constitutifs.

on fournit au noyau
l'énergie E_l



+ l'Energie de liaison est grande



+ le noyau est stable
+ grande est l'énergie libérée pour former celui-ci à partir de nucléons isolés

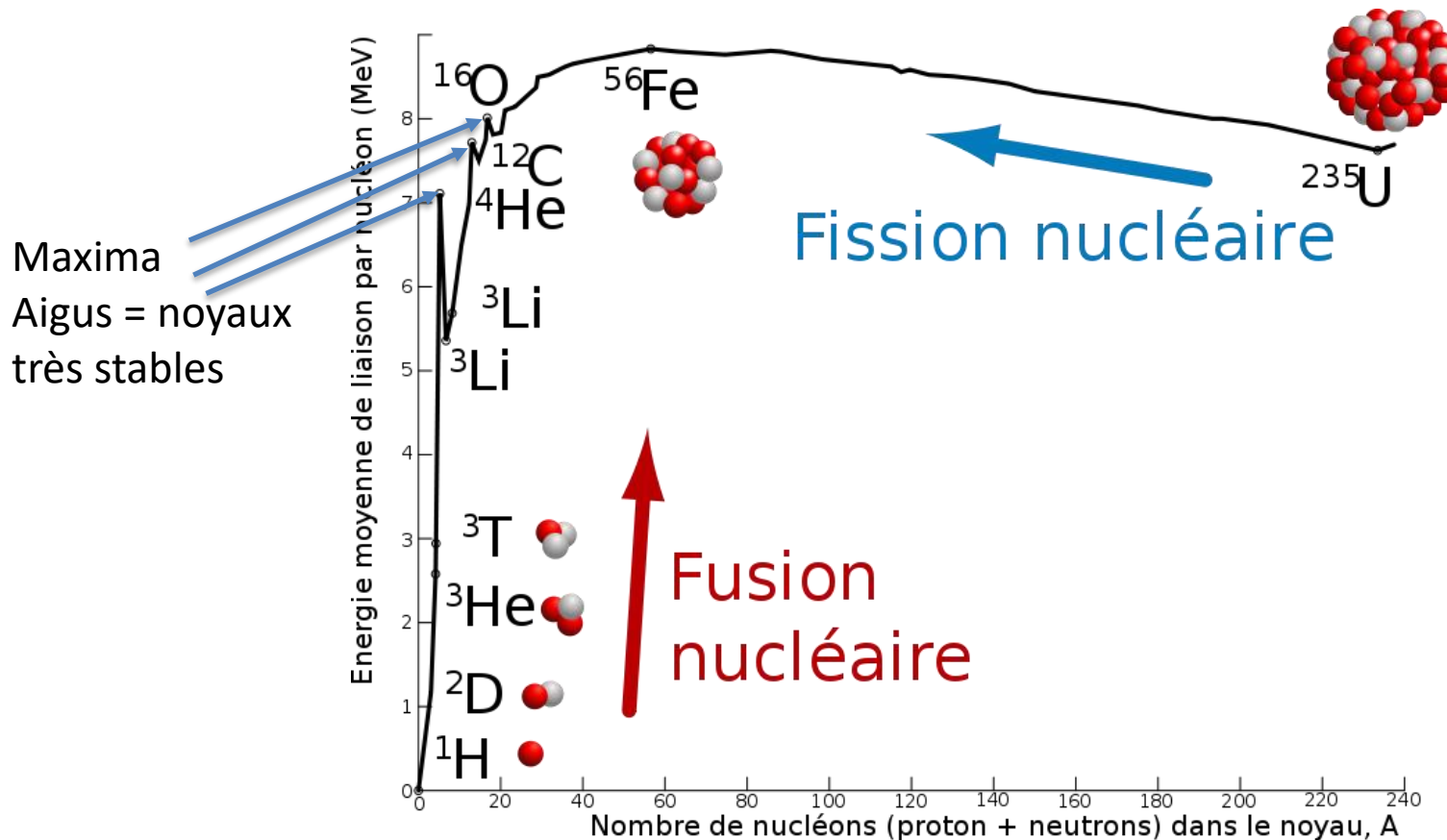


si le résultat de la réaction envisagée donne un ou des produits dont **l'énergie de liaison est supérieure à celle de départ on peut récupérer de l'énergie**

Energie de liaison par nucléon

Pour obtenir de l'énergie

EL/A réactifs inférieure aux EL/A des produits



Quelle est l'énergie dégagée par 1 g de combustible nucléaire ?


Données :


- $M(\text{U238}) = 238 \text{ g.mol}^{-1}$
- $M(\text{U235}) = 235 \text{ g.mol}^{-1}$
- Il y a 3.5 % d'U235 dans un gramme de combustible utilisé dans les centrale nucléaire de type REP (Réacteur à eau pressurisée).
- Un réacteur consomme 2/3 des atomes d'U235.
- Energie dégagée par la fission d'un atome d'U235 : $E = 200 \text{ MeV}$.
- Soit x_{U235} le nombre d'entités chimiques d'U235 contenus dans 1 gramme de combustible.
- Soit m_c la masse de combustible, $m_c = 1 \text{ g}$
- $1 \text{ TEP} = 4,187 \cdot 10^{10} \text{ J}$
- $1 \text{ eV} = 1,602 \cdot 10^{-19} \text{ J}$

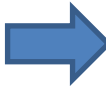
Exemple de Fission

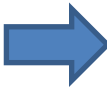
Quelle est l'énergie dégagée par 1 g de combustible nucléaire ?

Application numérique :


- 3.5 % d'U235 dans un gramme de combustible  Calcul de la masse d'uranium 235

$$m_{U235} = 3.5/100 \cdot mc = 3.5 \cdot 10^{-2} g$$
- $M(U235) = 235 \text{ g} \cdot \text{mol}^{-1}$  Calcul de la quantité de matière d'U235

$$n_{U235} = m_{U235} / M_{U235} = 1.49 \cdot 10^{-4} \text{ mol}$$
- $N_A = 6.022 \cdot 10^{23}$ Le nombre d'atomes ou de molécules (sans interaction, au repos et dans leur état fondamental) par mole de substance pure.  Calcul du nombre d'atomes d'U235

$$x_{U235} = n_{U235} \cdot N_A = 8.97 \cdot 10^{19}$$
- Energie dégagée par la fission d'un atome d'U235 : $E = 200 \text{ MeV}$. • $1 \text{ eV} = 1,602 \cdot 10^{-19} \text{ J}$
 Calcul de l'énergie dégagée fission d'1 gramme de combustible

$$E_{U235} = E \cdot x_{U235} \cdot 2/3 = 1.20 \cdot 10^{28} \text{ eV} = 1.20 \cdot 10^{19} \text{ GeV} = 1.92 \cdot 10^9 \text{ J} = 533 \text{ kWh}$$
- $1 \text{ TEP} = 4,187 \cdot 10^{10} \text{ J}$

$$= 11,6 \text{ MWh}$$
  Calcul de l'équivalence en TEP

$$E_{U235} = 1.92 \cdot 10^9 / 4.187 \cdot 10^{10} = 45,8 \cdot 10^{-3} \text{ TEP}$$

Les différents rayonnements ionisants :

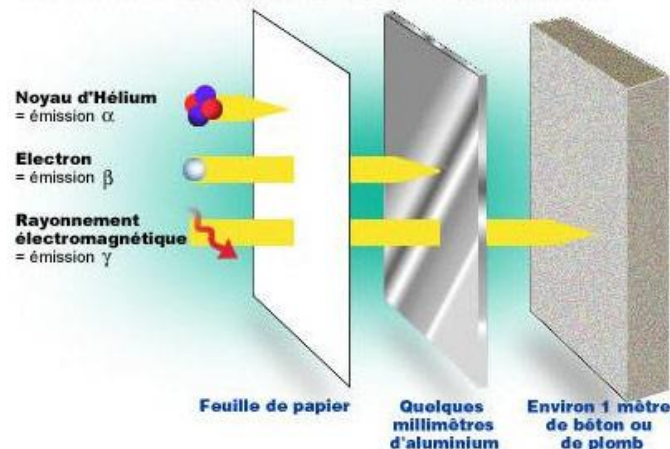
α ${}_Z^AX_N \rightarrow {}_{Z-2}^{A-4}Y_{N-2} + {}_2^4\alpha_2$ Perte de Protons et de neutrons

β^+ ${}_Z^AX_N \rightarrow {}_{Z-1}^AY_{N+1} + e^+ + \nu_e$
 ${}_Z^AX_N + e^- \rightarrow {}_{Z-1}^AY_{N+1} + \nu_e$ Transformation d'un proton en neutron

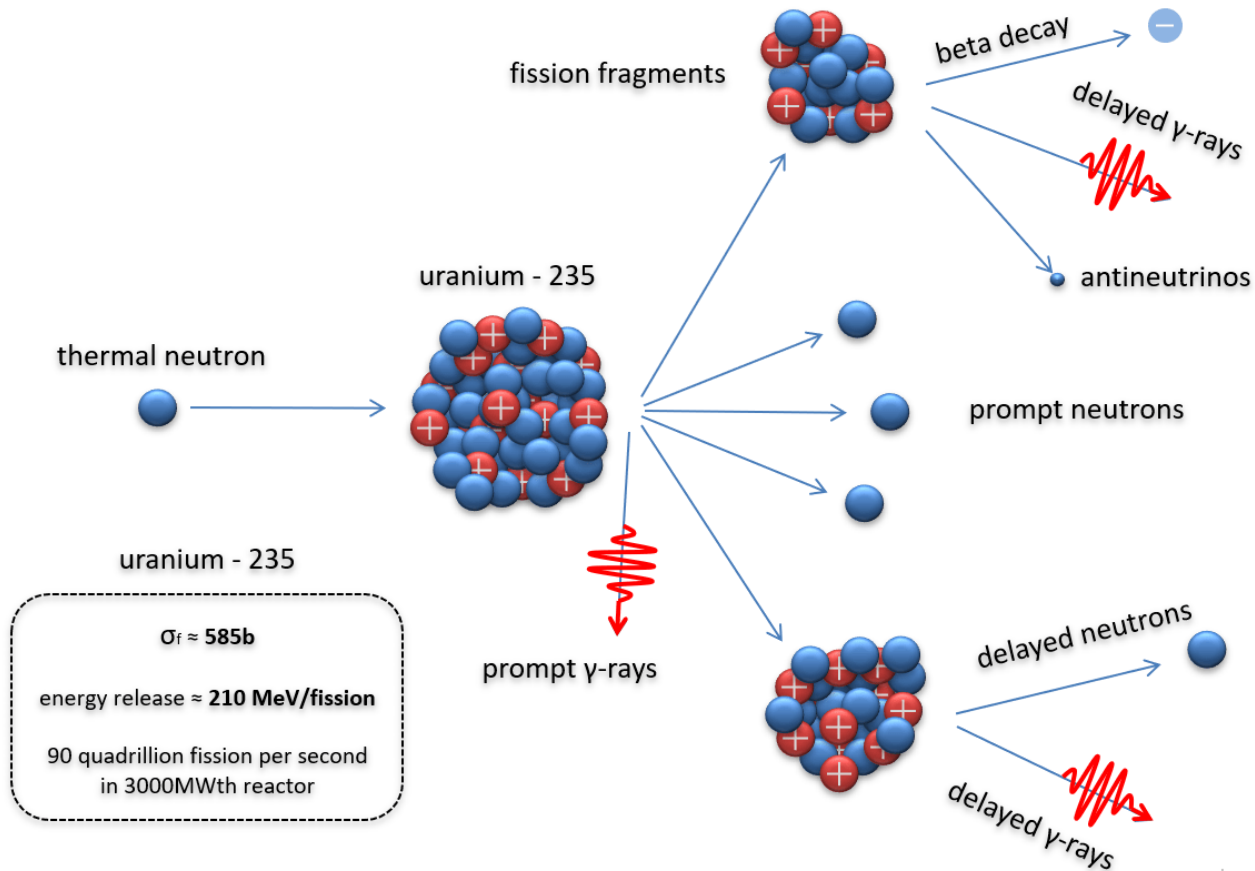
β^- ${}_Z^AX_N \rightarrow {}_{Z+1}^AY_{N-1} + e^- + \bar{\nu}_e$ Transformation d'un neutron en proton

γ ${}_Z^AX_N^* \rightarrow {}_Z^AX_N + \gamma$ Emission de photon

Le pouvoir de pénétration des différents rayonnements



Uranium-235 Fission



www.nuclear-power.com

1^{re} génération : les prototypes et premiers réacteurs de taille industrielle à usage commercial (mise au point : 1950 et 1960, entrés en service avant 1970). En France, pas d'enrichissement de l'uranium, uranium naturel comme combustible

2^e génération : 1970. Meilleure compétitivité de l'énergie nucléaire et indépendance énergétique (choc pétrolier). La majorité des réacteurs actuellement en exploitation dans le monde sont des réacteurs de 2^e génération. France : REP, Uranium enrichi 3%

3^e génération : impératifs liés à la sûreté et à la sécurité : résistance renforcée aux agressions externes, type chute d'avion Retour d'expérience de l'exploitation des réacteurs de 2^e génération, des accidents de Three Mile Island et de Tchernobyl ainsi que des attentats du 11 septembre 2001.

Ex : EPR (*European Pressurized Reactor*) (France, Finlande, Chine et Royaume-Uni)

4^e génération : actuellement en phase de conception. Déploiement industriel à l'horizon 2050.

Rupture technologique totale. Durabilité, sûreté, compétitivité économique et résistance à la prolifération nucléaire

Types de réacteurs actuels

| FILIÈRE | COMBUSTIBLE | MODÉRATEUR | CALOporteur |
|---|---------------------------------------|--|---|
| Réacteur UNGG (Uranium naturel graphite-gaz) Première filière développée en France. Le dernier réacteur de cette génération a été arrêté en 1994. | Uranium naturel (0,7 % d'uranium 235) | Carbone solide (graphite) | Gaz carbonique |
| Réacteur CANDU Filière développée au Canada. | Uranium naturel | Eau lourde* | Eau lourde sous pression |
| Réacteur RBMK <i>(Reactor Bolchoe Molchnastie Kipiachie</i> ou en français "Réacteur bouillant de grande puissance") Ces réacteurs constituent 40 % du parc nucléaire de l'ex- URSS. | Uranium enrichi à 1,8 % d'uranium 235 | Carbone (graphite) | Eau bouillante |
| Réacteur à eau bouillante (REB) Filière développée aux États-Unis, au Japon et en Suède. | Uranium enrichi à 3 % d'uranium 235 | Eau ordinaire entrant en ébullition dans le cœur | |
| Réacteur à eau sous pression (REP) La filière la plus classique dans le monde occidental. Elle a été développée en ex-URSS sous le nom de "VVER". | Uranium enrichi à 3 % d'uranium 235 | Eau sous pression maintenue à l'état liquide L'eau sous pression est à la fois le modérateur et le caloporteur. | |
| Réacteur à neutrons rapides (RNR) Le réacteur Phénix (250 MWe), prototype français, a fonctionné de 1973 à 2009. | Uranium enrichi ou plutonium | Aucun : les neutrons restent rapides. | Sodium liquide. Ne ralentit pas les neutrons. |

➤ Placé au cœur d'un réacteur nucléaire, le modérateur est la substance qui ralentit les neutrons sans les absorber, permettant ainsi une réaction nucléaire en chaîne efficace. L'élément retenu pour concevoir le modérateur d'un réacteur nucléaire est le plus souvent soit :

- de l'hydrogène : réacteur à eau légère ;
- du deutérium : réacteur à eau lourde ;
- ou du carbone : réacteur au graphite.

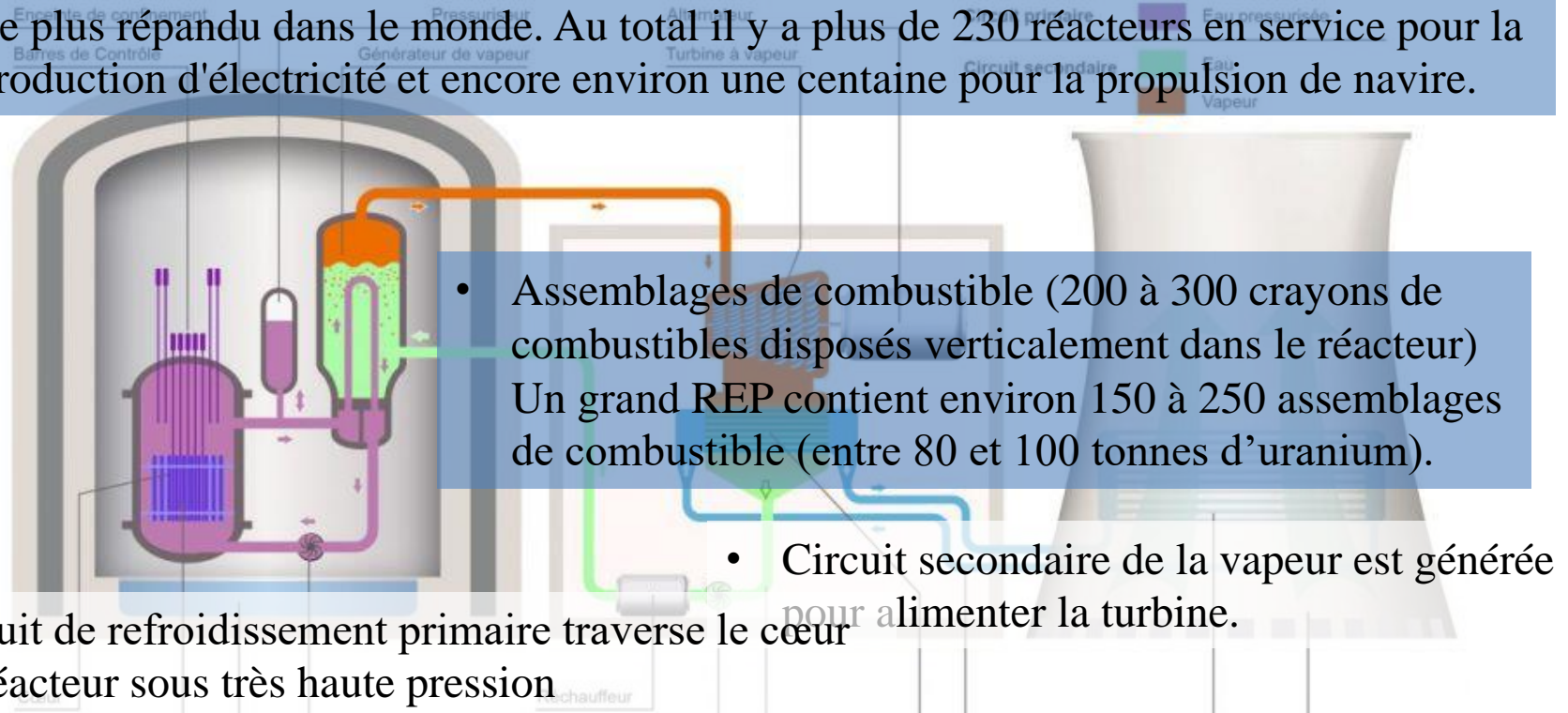
➤ Un fluide caloporteur est un fluide chargé de transporter la chaleur entre plusieurs sources de température.

*Eau lourde : constituée de molécules d'eau dont l'atome d'hydrogène est un atome de deutérium, isotope lourd de l'hydrogène (voir livret *L'atome*).

Types de Centrales : REP

Principe des Réacteurs à Eau Pressurisée (REP)

- Le plus répandu dans le monde. Au total il y a plus de 230 réacteurs en service pour la production d'électricité et encore environ une centaine pour la propulsion de navire.



- Circuit de refroidissement primaire traverse le cœur du réacteur sous très haute pression

- Eau dans le réacteur atteint environ 325°C



Empêcher l'ébullition : pression d'environ 150 bars.

- Utilisation de l'eau "normale" comme modérateur et caloporteur.

Sûreté des REP

- Eau du circuit primaire sert également de modérateur,
Si l'eau est transformée en vapeur, la réaction en chaîne ne sera plus entretenue
- Système d'urgence (scram) : injection d'acide borique dans l'eau du circuit 1^{aire}
- Les réacteurs sous pression russes VVER : beaucoup de ressemblances avec REP

Types de Centrales : REB

Design plus simple

Principe des Réacteurs à Eau Bouillante (REB)

Beaucoup de points communs avec le type REP

Un seul circuit de refroidissement avec de l'eau sous basse pression (75 bar)

L'eau bout dans un tel réacteur à 285 °C.

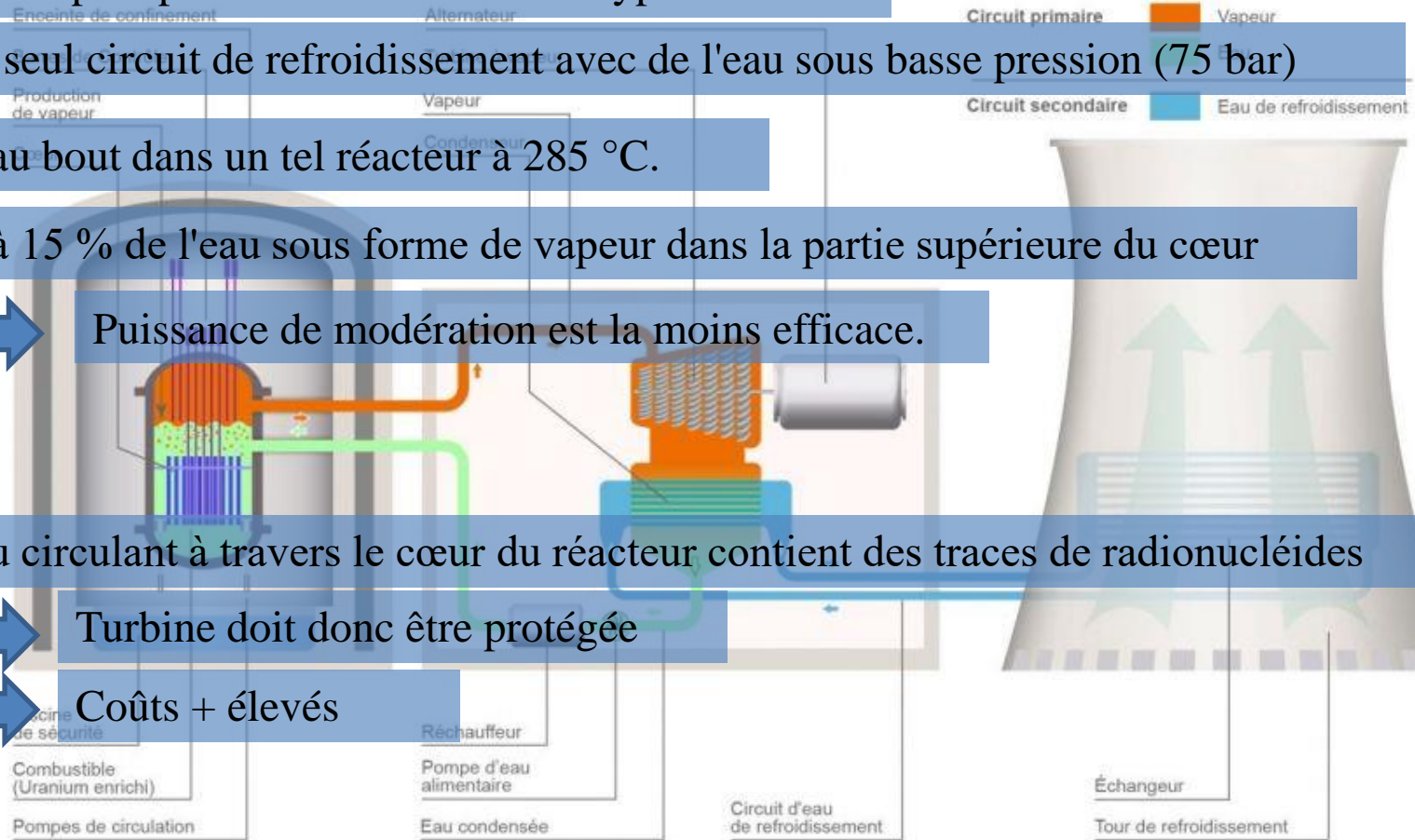
12 à 15 % de l'eau sous forme de vapeur dans la partie supérieure du cœur

→ Puissance de modération est la moins efficace.

L'eau circulant à travers le cœur du réacteur contient des traces de radionucléides

→ Turbine doit donc être protégée

→ Coûts + élevés



REP : **petite partie de la matière première U235 utilisée**

8 000 tonnes d'uranium naturel importées chaque année

1 000 tonnes d'uranium enrichi pour alimenter les centrales

7 000 tonnes d'uranium appauvri : entreposé, en vue d'une utilisation future

Stocks : plus de **270 000 tonnes**.

MOX (Oxyde mixte d'uranium et de plutonium) utilisable une seule fois

RNR (réacteurs à neutrons rapides) :

Consommation intégrale de l'uranium naturel (dont l'uranium appauvri)

Multiplication d'un facteur proche de 100 l'énergie que l'on peut extraire d'une masse donnée d'uranium naturel.

Utilisation sans limitation du plutonium produit par le parc actuel de réacteurs

Possibilité de **transmuter** certains éléments les plus radiotoxiques contenus dans les déchets ultimes.

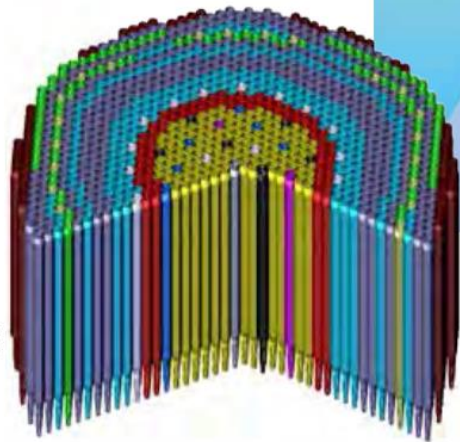
Réduction d'un facteur 10 de l'emprise de la zone de stockage des déchets de haute activité à vie longue, avec, au bout de 300 ans, une diminution jusqu'à un facteur 100 de la **radiotoxicité** contenue dans ces déchets.

Possibilité de fonctionner pendant plusieurs milliers d'années en se passant totalement d'uranium naturel.

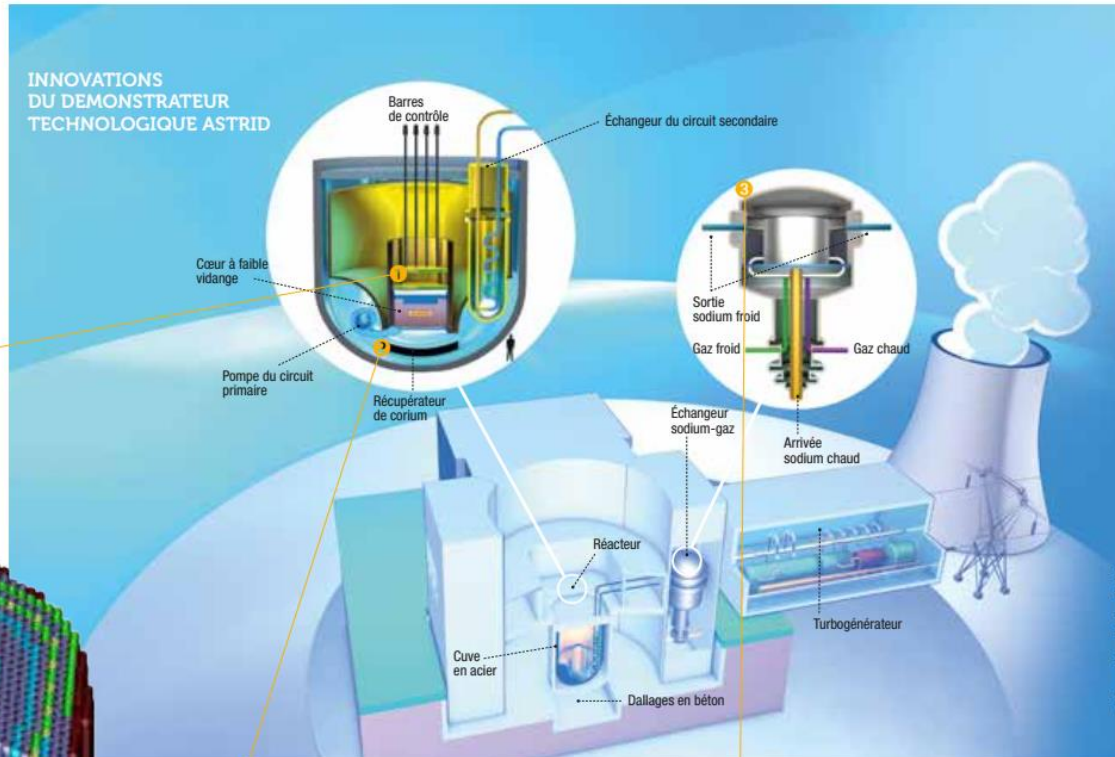
4^{ème} Génération : Astrid : RNR-Na

Parmi les avancées décisives réalisées, on peut citer par exemple :

- 1 un cœur innovant naturellement résistant aux situations accidentelles, qui constitue une avancée essentielle, unique au monde, dans le domaine de la sûreté. Il permet de réduire la réactivité du cœur en cas de perte du refroidissement du réacteur, entraînant une augmentation de la température du sodium ;



★ Cœur innovant d'Astrid, à sûreté améliorée.



- 2 un récupérateur de cœur fondu (le corium) intégré à la cuve du réacteur, qui permet d'empêcher la radioactivité de s'échapper dans l'environnement en cas d'accident grave de fusion du cœur ;

- 3 un système de conversion d'énergie qui n'utilise pas l'eau, mais un gaz, supprimant ainsi tout risque de réaction chimique entre l'eau et le sodium ;

- des dispositifs d'inertage[★] et de détection précoce de fuites qui suppriment les risques de feu de sodium ;
- des moyens multiples et redondants d'évacuation de la puissance résiduelle. Le réacteur peut utiliser l'air ambiant comme moyen de refroidissement, même en cas de perte des alimentations électriques et de la source froide ;
- la possibilité de réaliser des inspections et maintenances pendant le fonctionnement du réacteur ;
- des dispositions permettant d'augmenter le taux de combustion ainsi que la durée de cycles et de réduire la durée des arrêts pour le rechargement du combustible.

© Infographie : Fabrice Mathé

Et à très long terme : Fusion ?

La fusion une solution propre pour nos besoins en énergie ?

1 gramme de DT = 8 tonnes de pétrole

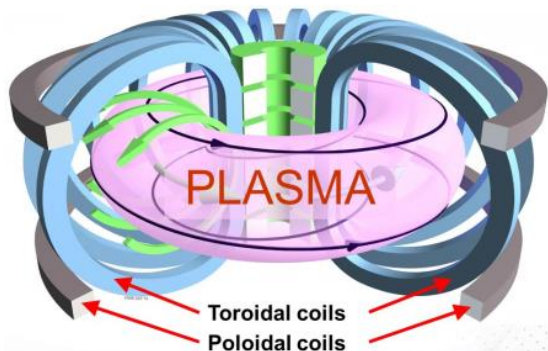
La fusion peut être obtenue à partir de différentes combinaisons de noyaux légers.

En l'état présent de la technologie, c'est la réaction deutérium + tritium (isotopes de l'hydrogène) qui est la plus accessible.

Les tokamaks se sont imposés dès la fin des années 60 comme les plus performantes des machines de fusion.



$^2\text{H} + ^3\text{H} \rightarrow ^4\text{He} + n + 17.6 \text{ MeV}$



Représentation du Tokamak

ITER

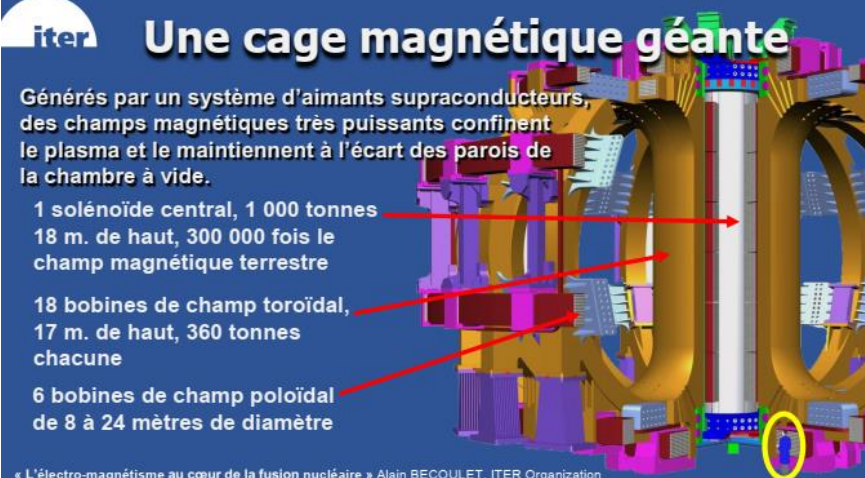
Mise en service expérimentale : 2025

Une cage magnétique géante

Générés par un système d'aimants supraconducteurs, des champs magnétiques très puissants confinent le plasma et le maintiennent à l'écart des parois de la chambre à vide.

- 1 solénoïde central, 1 000 tonnes
18 m. de haut, 300 000 fois le champ magnétique terrestre
- 18 bobines de champ toroïdal, 17 m. de haut, 360 tonnes chacune
- 6 bobines de champ poloïdal de 8 à 24 mètres de diamètre

« L'électro-magnétisme au cœur de la fusion nucléaire » Alain BECOULET, ITER Organization



<https://www.youtube.com/watch?v=-UC8eSbQiWU>