

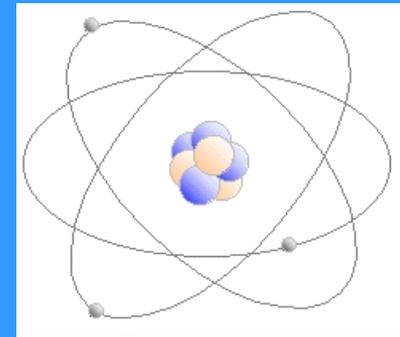


Le Fonctionnement d'une Centrale Nucléaire



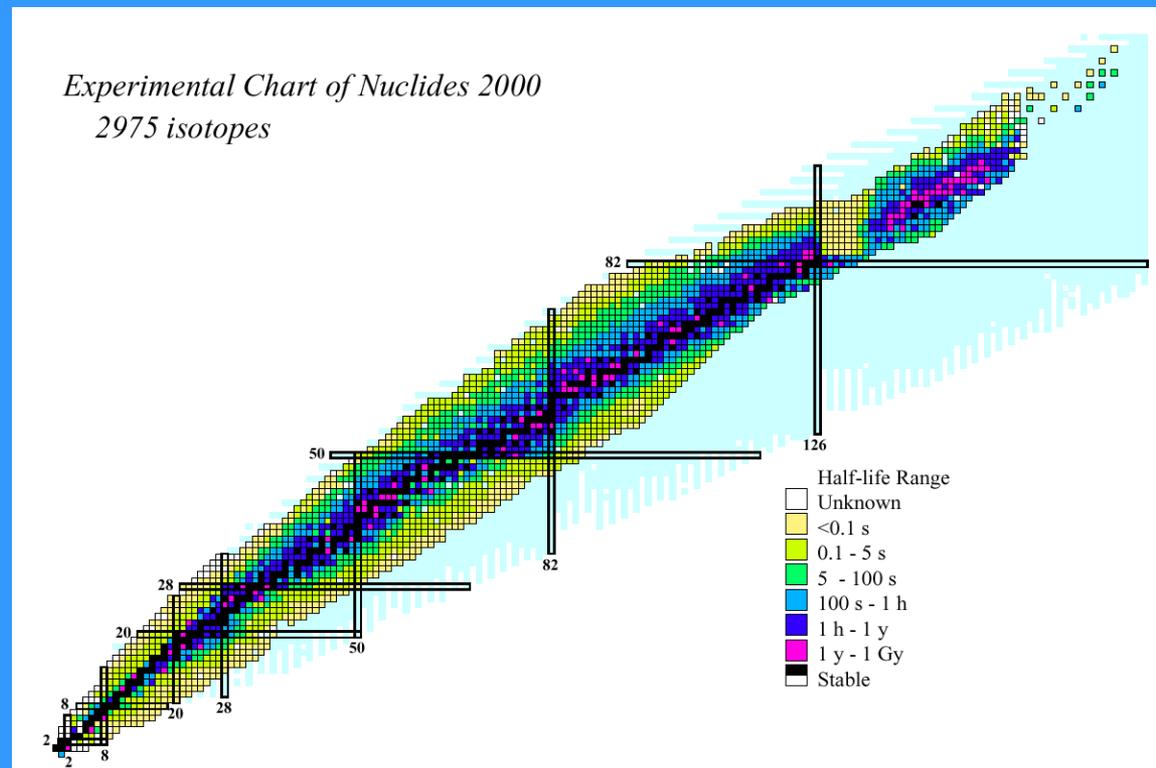
La Fission nucléaire (1)

- Rappel simplifié de la théorie atomique
 - La matière est constituée d'atomes
 - Ils sont constitués d'un noyau et d'un nuage d'électrons (négatifs)
 - Dans le noyau il y a des protons (positifs) et des neutrons (neutres)
 - Il y a autant de protons que d'électrons
 - Chaque élément est caractérisé par son numéro atomique (nombre de protons ou d'électrons). Tous les corps ayant le même numéro atomique ont les mêmes propriétés chimiques
 - Le même élément peut avoir un nombre différents de neutrons: ce sont les isotopes

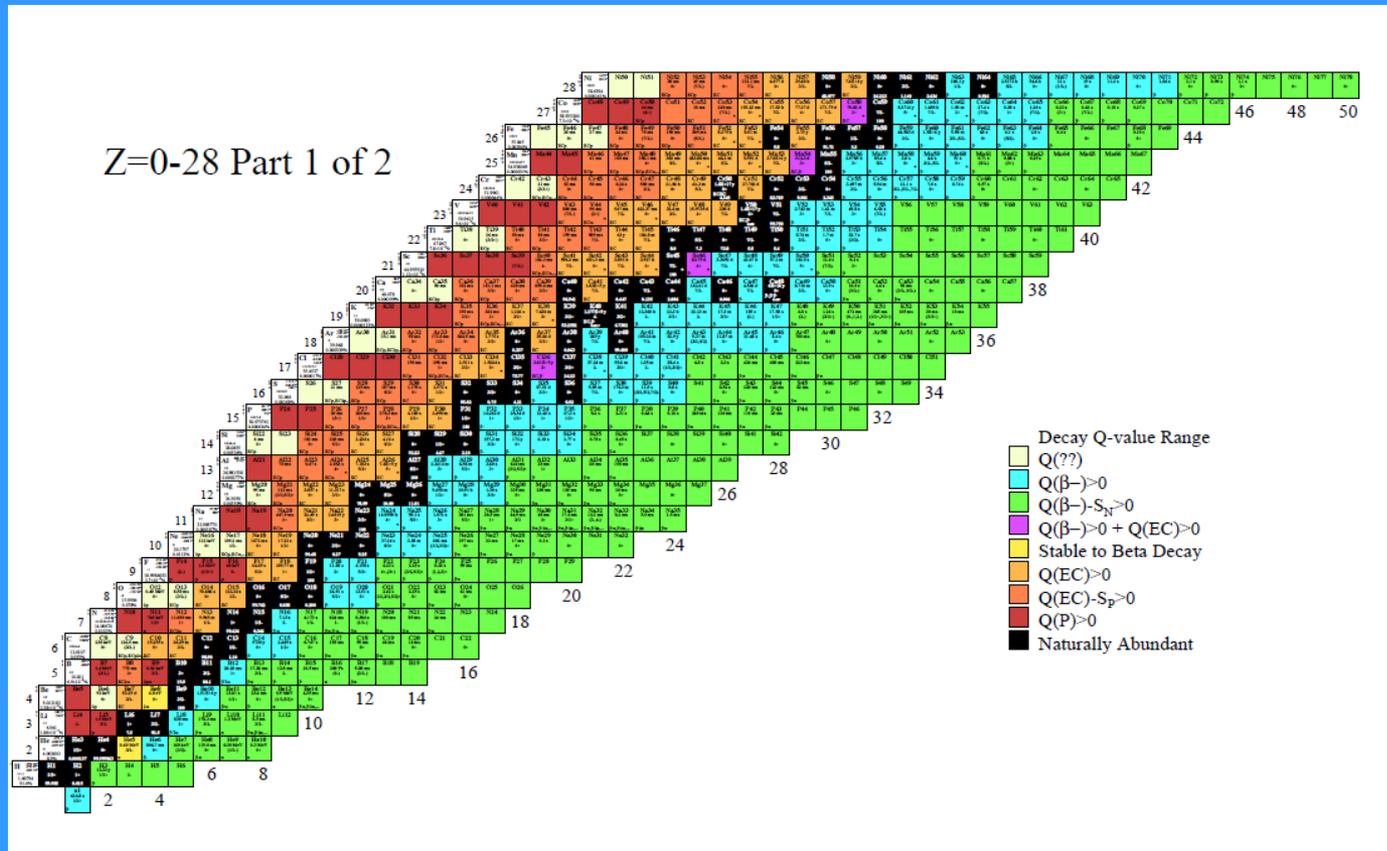


La Fission nucléaire (2)

- Les isotopes



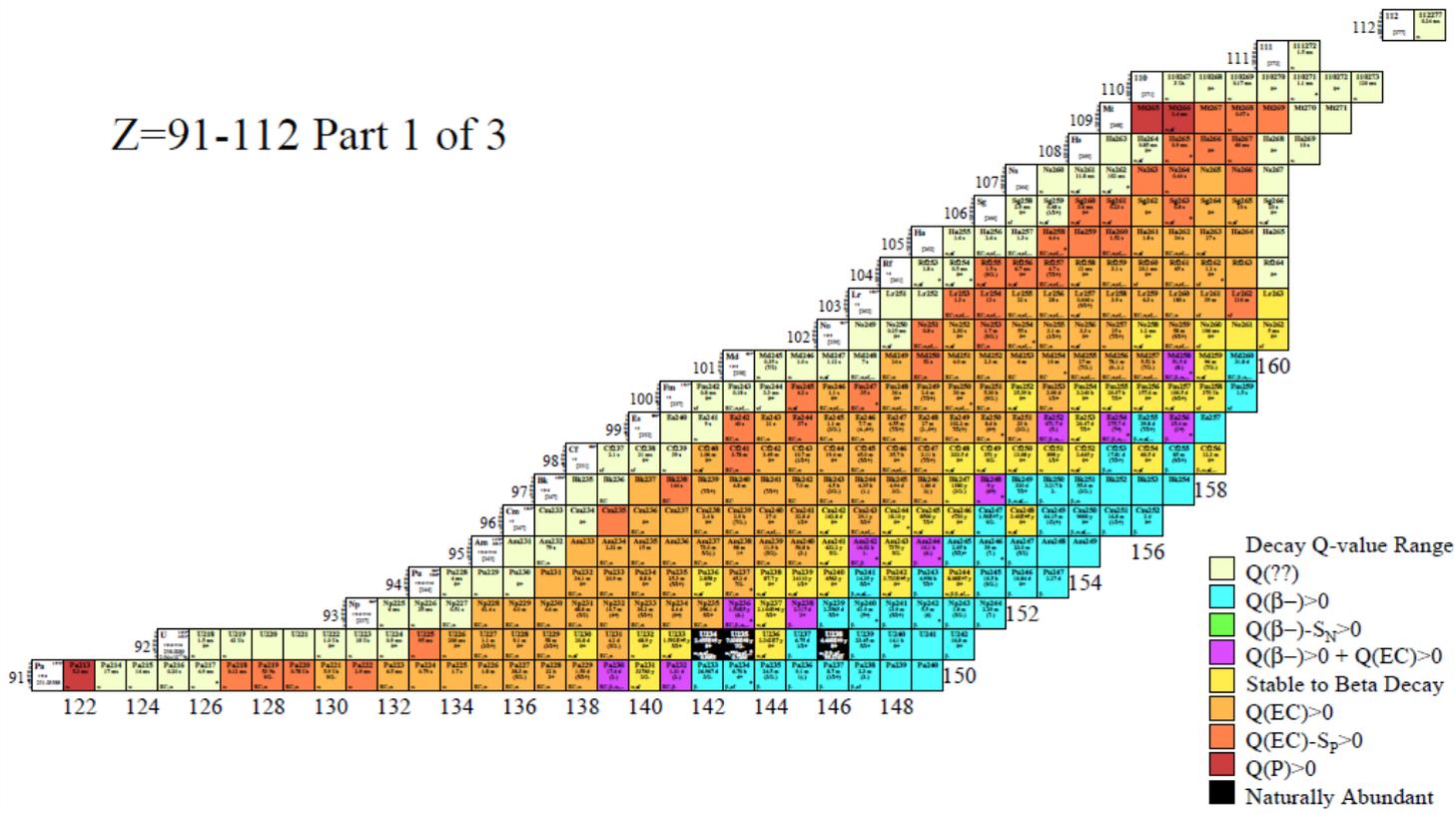
Partie basse de la table des isotopes





Partie haute de la table des isotopes

Z=91-112 Part 1 of 3

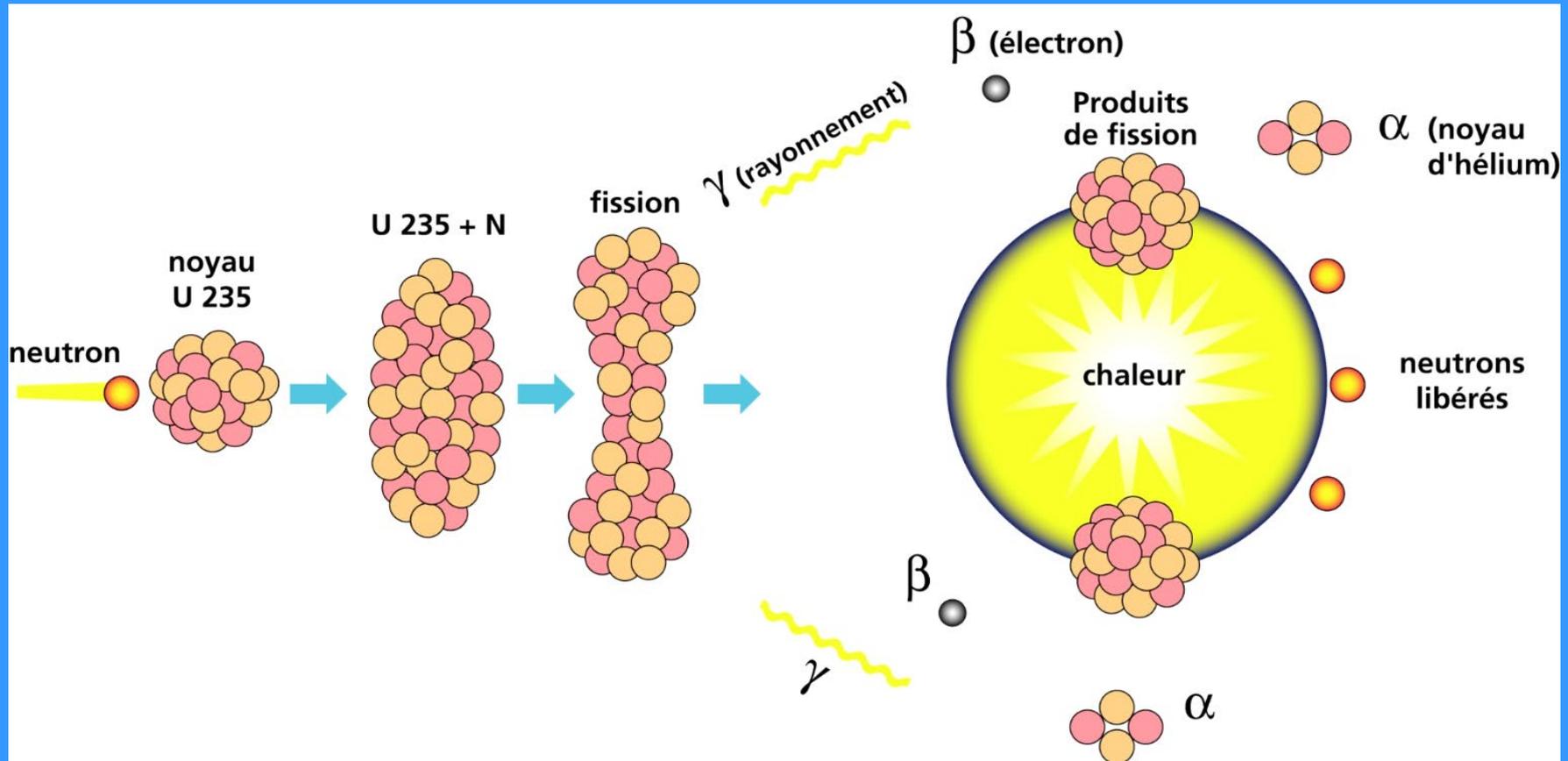


La Fission nucléaire (3)

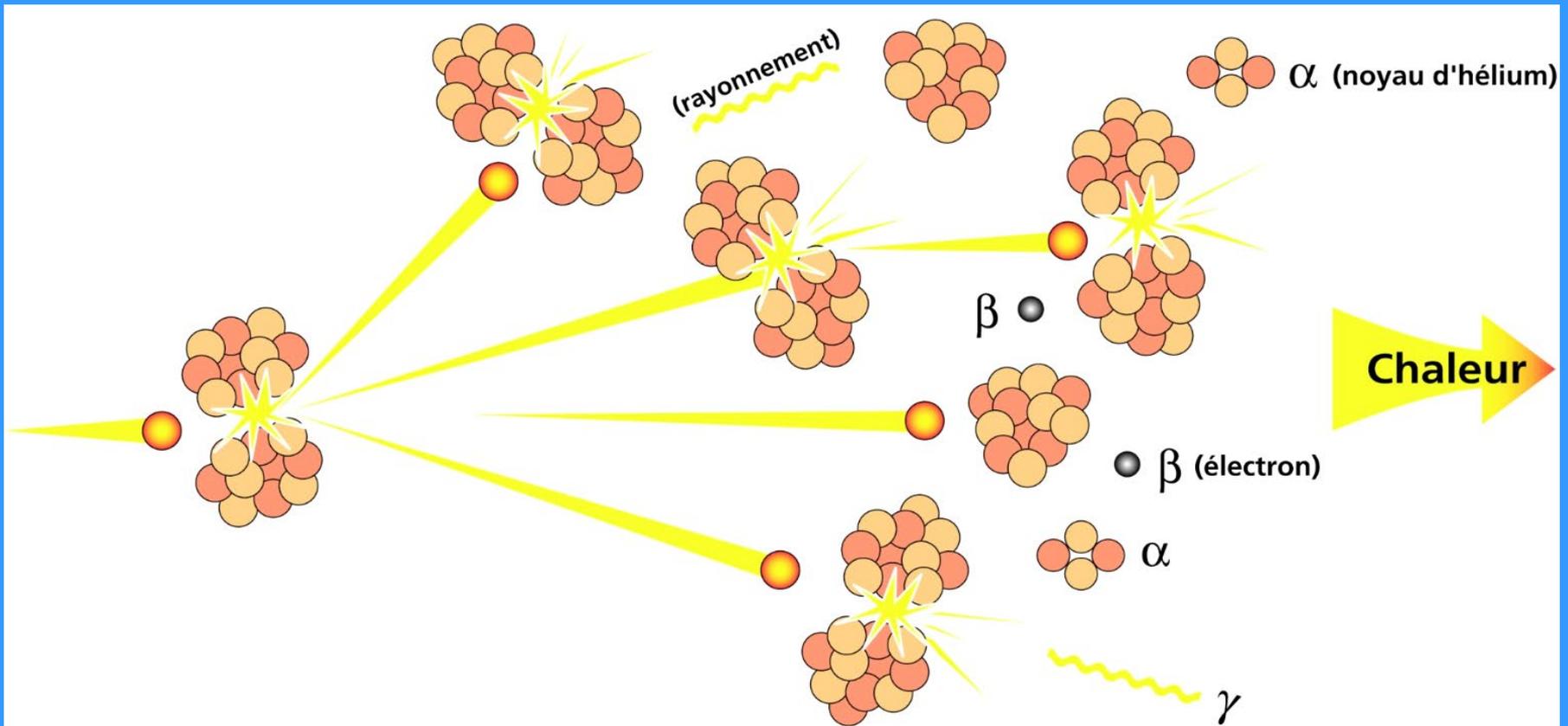
- Les isotopes de l'Uranium

Am236 EC, α	Am237 73.0 m 5/2(-) EC, α	Am238 98 m 1+ EC, α	Am239 11.9 h (5/2)- EC, α	Am240 50.8 h (3-) EC, α	Am241 432.2 y 5/2- α ,sf	Am242 16.02 h 1- * EC, β^-	Am243 7370 y 5/2- α ,sf
Pu235 25.3 m (5/2+) EC, α	Pu236 2.858 y 0+ α ,sf	Pu237 45.2 d 7/2- * EC, α	Pu238 87.7 y 0+ α ,sf	Pu239 24110 y 1/2+ α ,sf	Pu240 6563 y 0+ α ,sf	Pu241 14.35 y 5/2+ β^- , α ,sf,...	Pu242 3.733E+5 y 0+ α ,sf
Np234 4.4 d (0+) EC	Np235 396.1 d 5/2+ EC, α	Np236 1.54E5 y (6-) * EC, β^- , α ,...	Np237 2.144E+6 y 5/2+ α ,sf	Np238 2.117 d 2+ β^-	Np239 2.3565 d 5/2+ β^-	Np240 61.9 m (5+) * β^-	Np241 13.9 m (5/2+) β^-
U233 1.592E+5 y 5/2+ α ,sf	U234 2.455E+5 y 0+ α ,n,sf,.... 0.0055	U235 7.038E+8 y 7/2- α , ²⁰ Ne,sf,.... * 0.7200	U236 2.342E7 y 0+ α ,sf	U237 6.75 d 1/2+ β^-	U238 4.468E+9 y 0+ α , β^- , β^- ,sf,.... 99.2745	U239 23.45 m 5/2+ β^-	U240 14.1 h 0+ β^-

La Fission nucléaire (4)



La réaction en chaîne





Paramètres de la réaction en chaîne

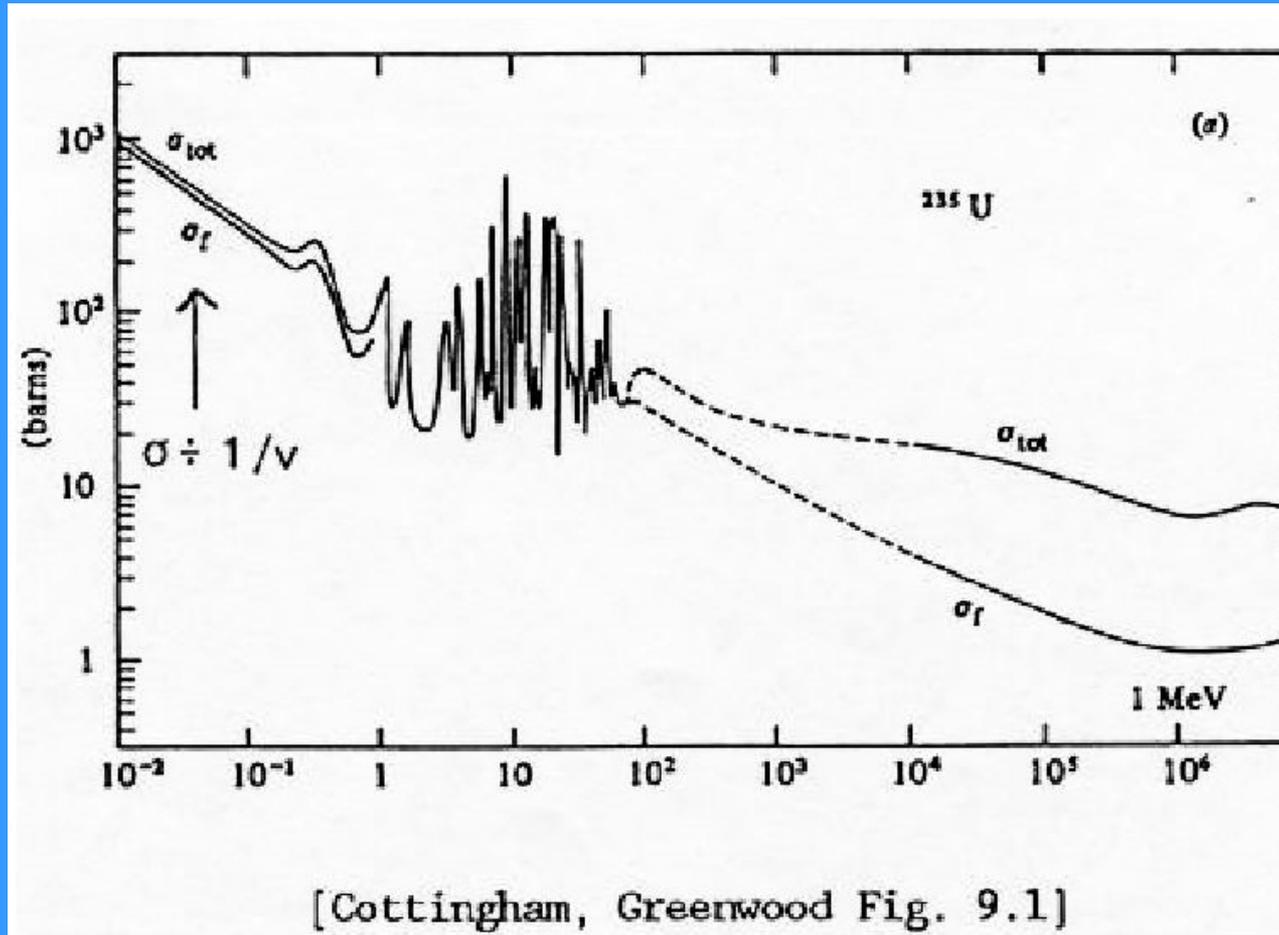
- Notion de section efficace
- Bilan neutronique
- Neutrons rapides et thermiques
- Fonctionnement en régime permanent
- Fonctionnement en régime transitoire
- Les poisons neutroniques



Notion de section efficace

- Probabilité qu'une particule incidente provoque un phénomène donné (ici la fission)
- Cette quantité représente d'une certaine manière la surface du noyau telle qu'elle est vue par la particule incidente. Son unité est le barn ($1\text{barn}=10^{-24}\text{cm}^2=10^{-28}\text{m}^2$). Le symbole utilisé est la lettre grecque σ

Neutrons rapides et lents (thermiques)





Nécessité du modérateur

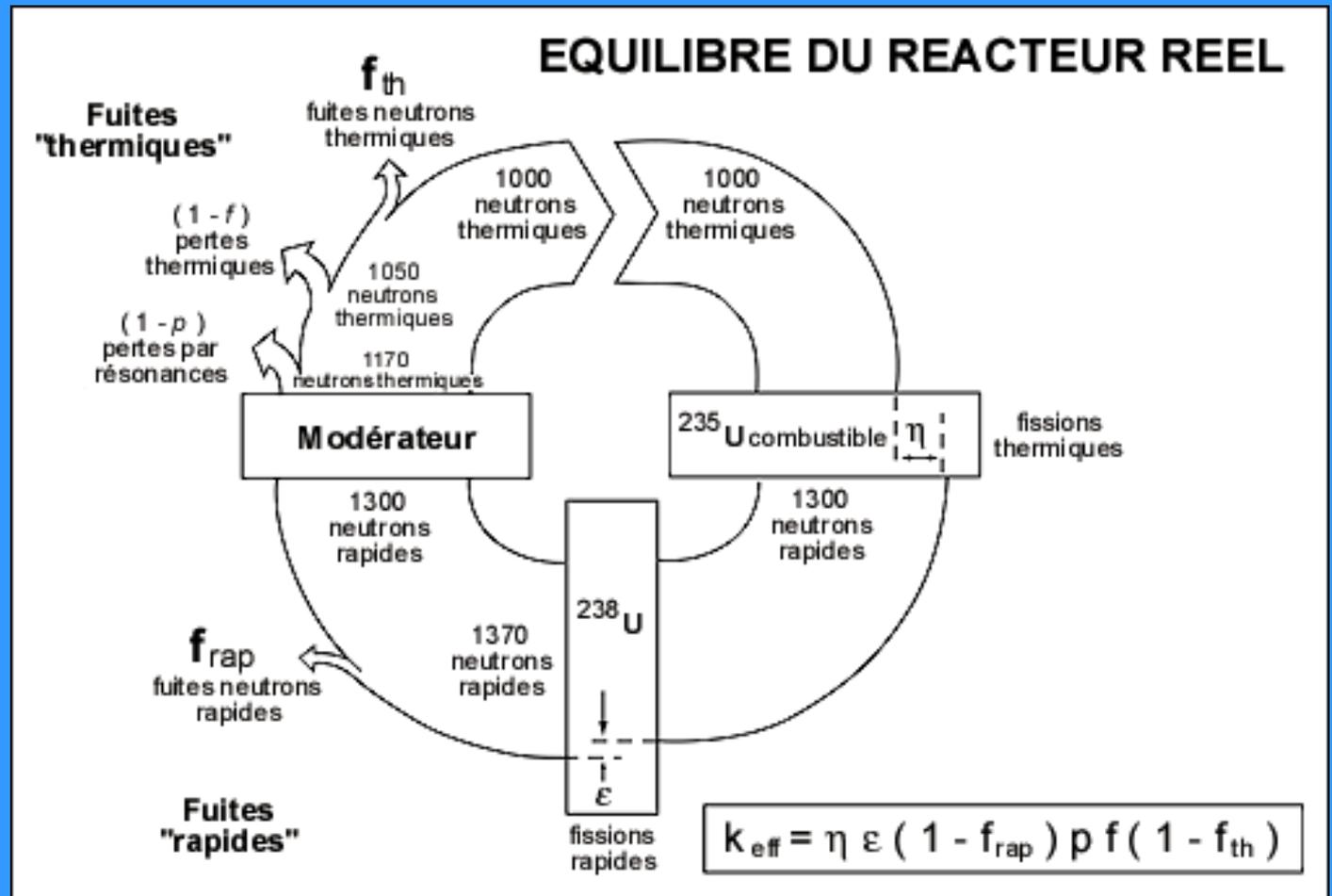
- **modérateur** : matériau formé de noyaux légers qui ralentissent les neutrons par diffusions élastiques. Il doit être peu capturant afin de ne pas "gaspiller" les neutrons et être suffisamment dense pour assurer un ralentissement efficace



Bilan neutronique

- En moyenne, 2,6 neutrons par noyau fissionné
- La réaction est stable si on utilise 1 neutron pour en effectuer une nouvelle
- Le reste représente les fuites, l'absorption et la diffusion élastique et inélastique par l'uranium, le modérateur et les autres matériaux

Bilan neutronique (2)





Fonctionnement en régime permanent

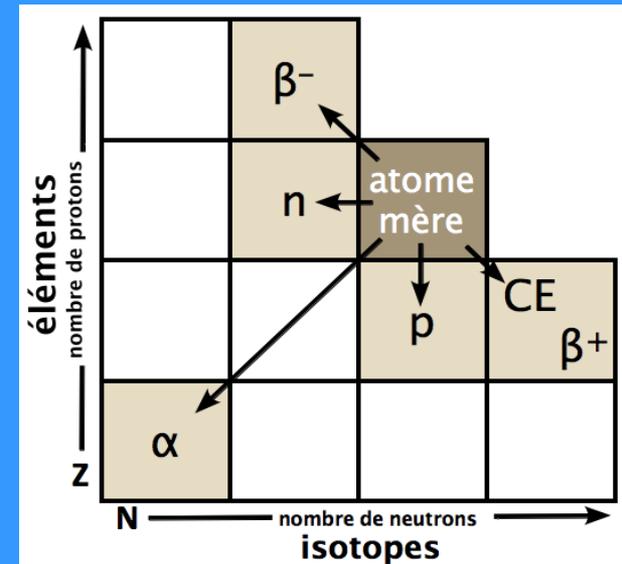
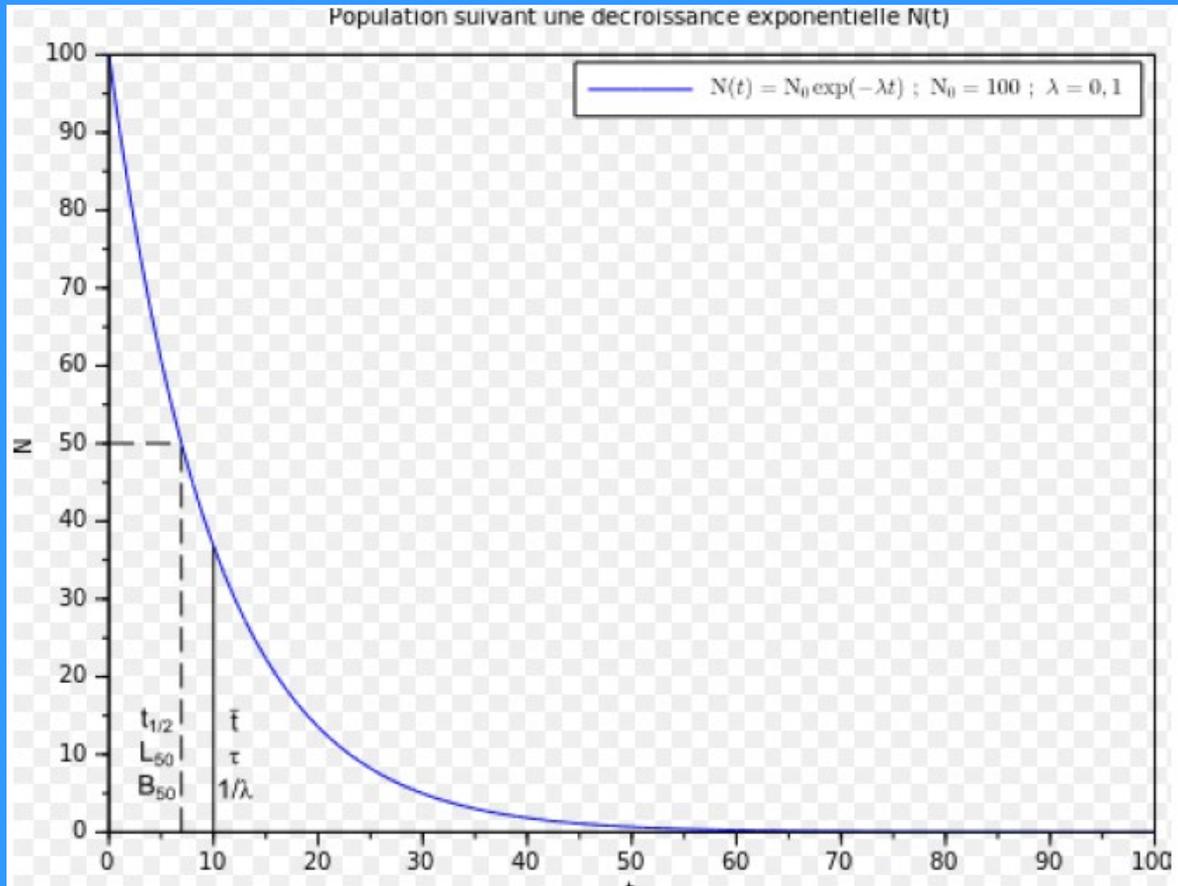
- On adapte le taux d'absorption des neutrons excédentaires par l'introduction de matériaux fortement absorbants (Bore)
- Barres de contrôle
- Stabilité
 - Régulation de la réaction
 - Coefficient de vide
 - Coefficient de température



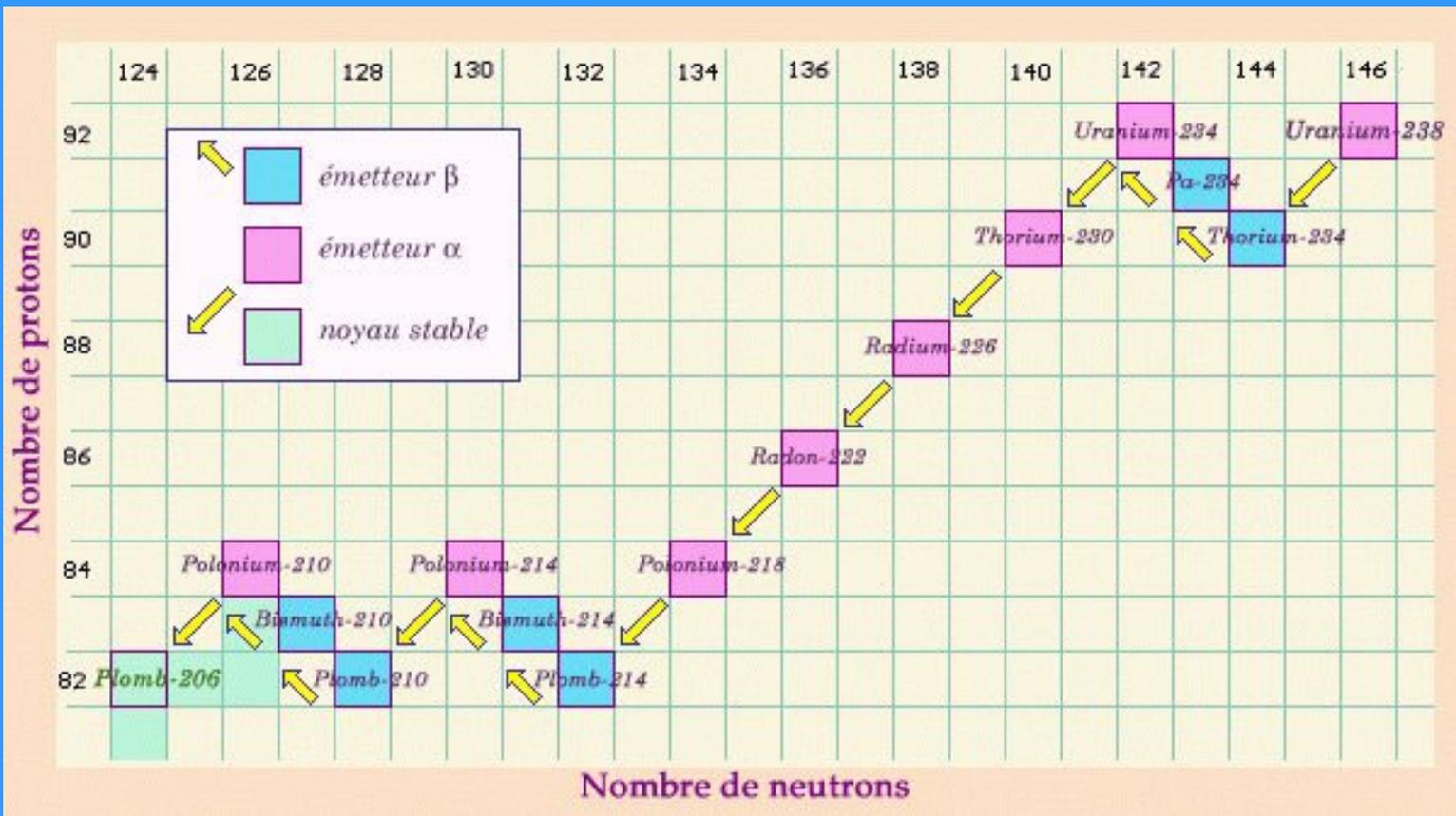
Les types de désintégration

- Désintégration α éjection d'un noyau d'hélium (2N, 2P)
 - Peu énergétique, petite distance d'action
- Désintégration β éjection d'un électron et transformation d'un neutron en proton (1e, 1N \rightarrow 1P) ou éjection du neutron
 - Moyennement énergétique, moyenne distance d'action)
- Désintégration γ rayonnement électromagnétique
 - Très énergétique grand rayon d'action

La décroissance radioactive



Désintégration Uranium





Les neutrons retardés

isotope	$\beta(\%)$	$\beta\tau^r(\text{sec})$
^{232}Th	2.03	0.14
^{233}U	0.26	0.03
^{235}U	0.64	0.06
^{238}U	1.48	0.08
^{239}Pu	0.2	0.02
^{241}Am	0.24	0.013



Fonctionnement en régime transitoire

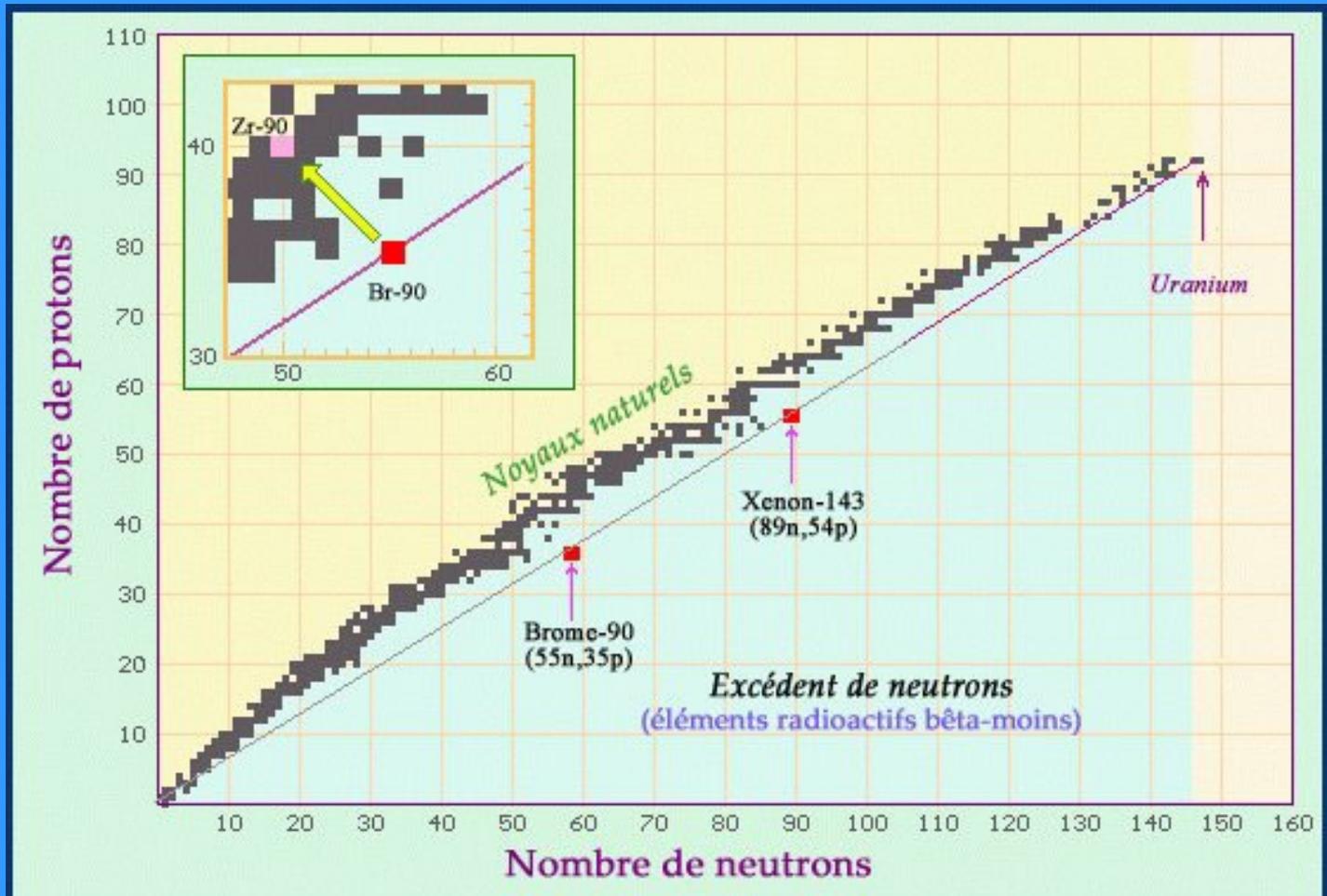
- Suivi de charge par mesure de flux neutronique avec boucle de régulation agissant sur l'enfoncement des barres de contrôle
- Arrêt d'urgence
 - Volontaire
 - Automatique
 - Perte de fluide primaire (LOCA)
 - Perte réseau électrique
 -etc.



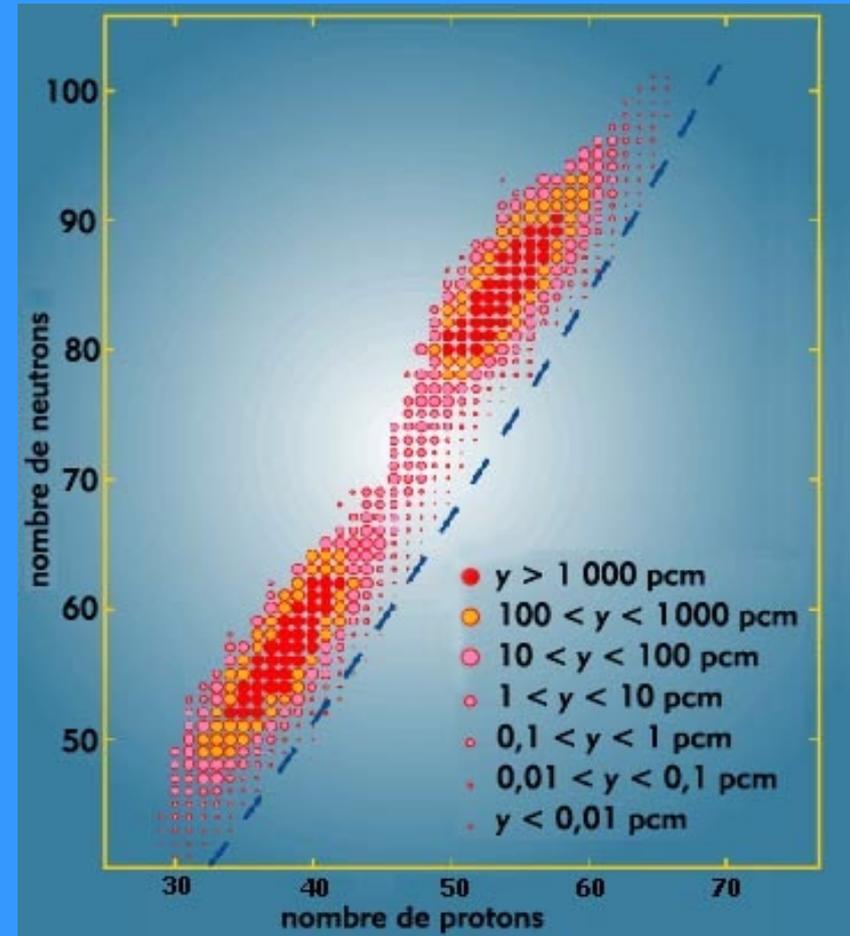
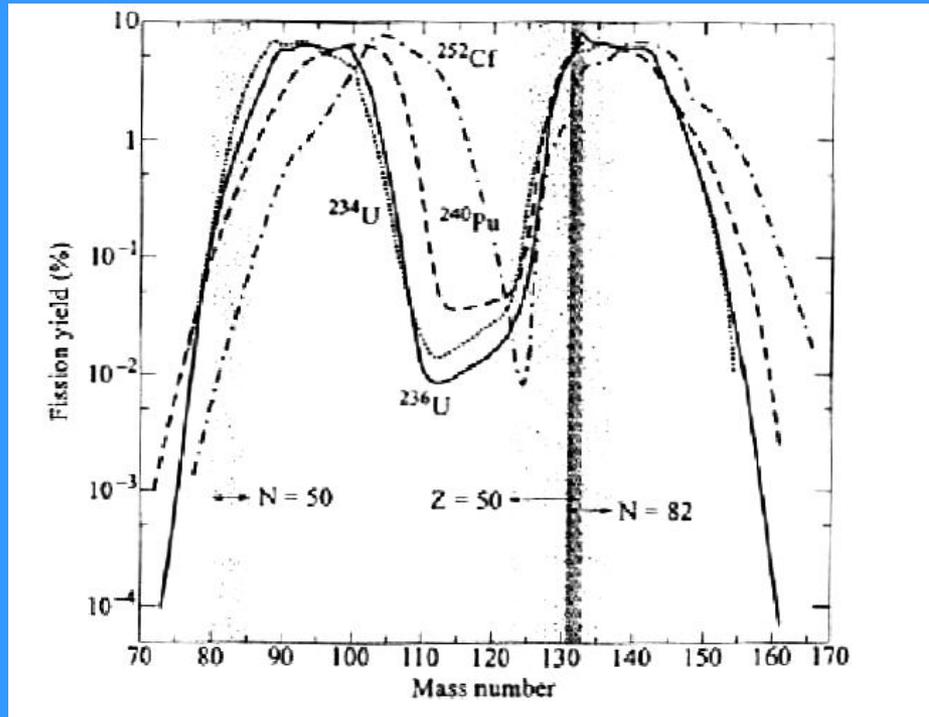
Les poisons neutroniques

- La réaction de fission engendre un grand nombre de noyaux nouveaux, dont certains ont une forte section efficace absorption (exemple Xénon)
- Ces poisons ont un effet transitoire, car ils disparaissent par désintégration successives, mais ils modifient transitoirement la carte de flux
- La régulation de flux doit tenir compte de ces phénomènes

Les poisons neutroniques



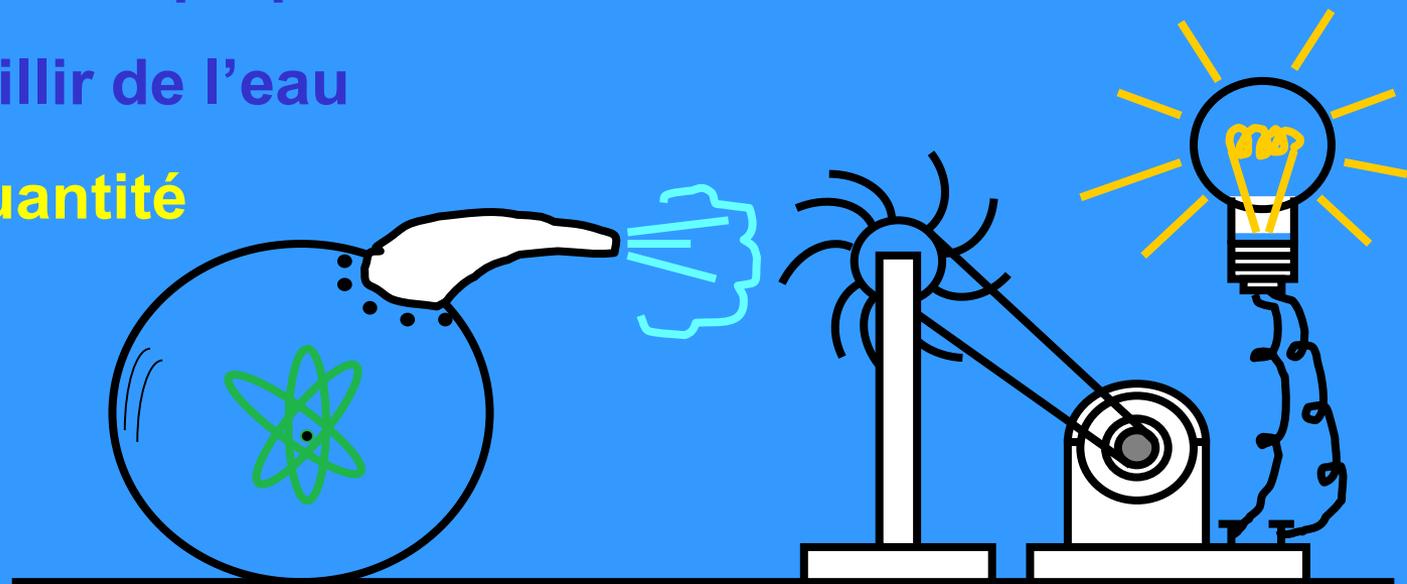
Spectre des produits de fission



L'Énergie nucléaire

L'Énergie Nucléaire
est un procédé compliqué
pour faire bouillir de l'eau

- En grande quantité
- Sans feu
- Pas cher
- Proprement

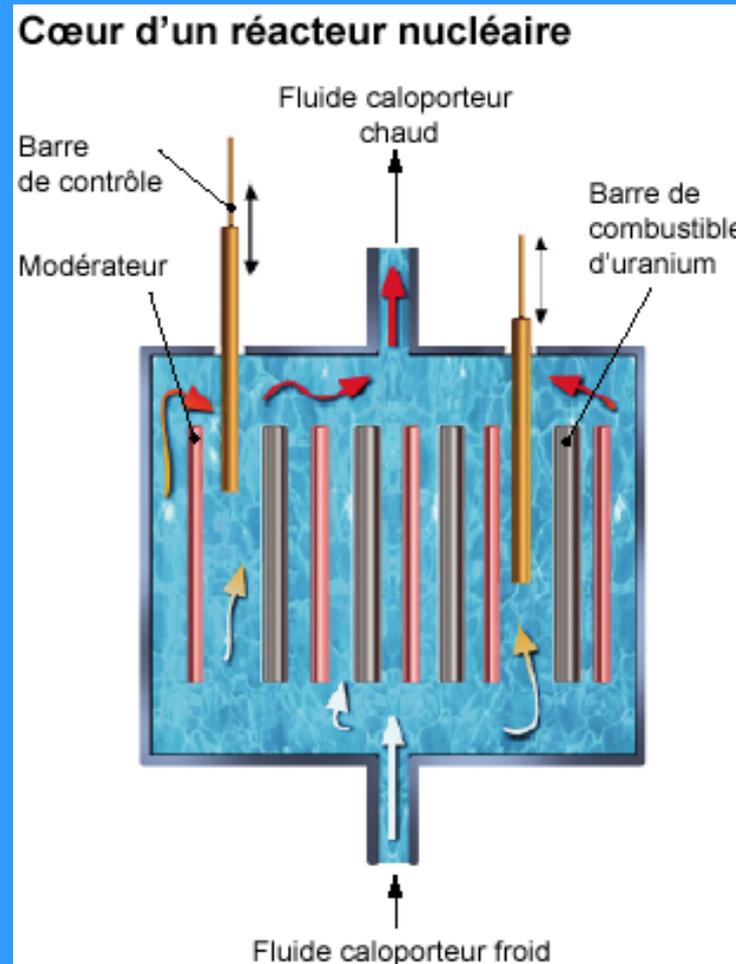




Différents types de réacteurs

- Eau pressurisée (PWR)
- Eau bouillante (BWR)
- Eau lourde (HWR)
- Surrégénérateurs (FBR)
- Haute Température (HTR)

Cœur d'un réacteur nucléaire PWR





Les éléments combustibles PWR

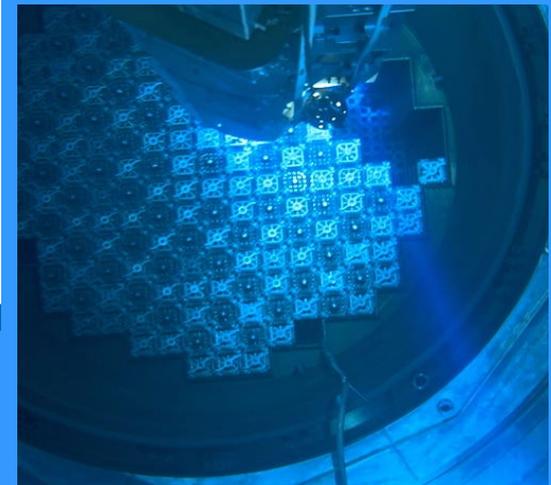
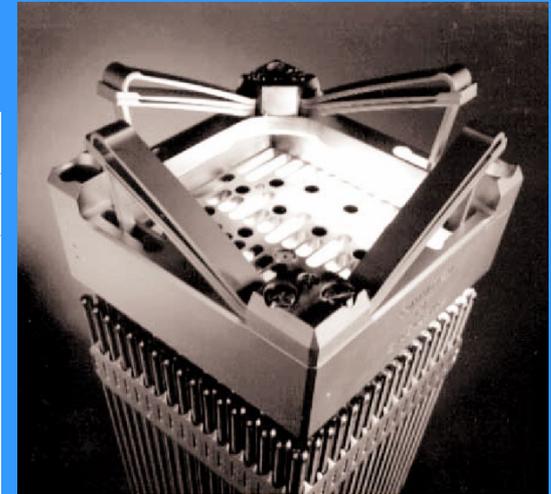
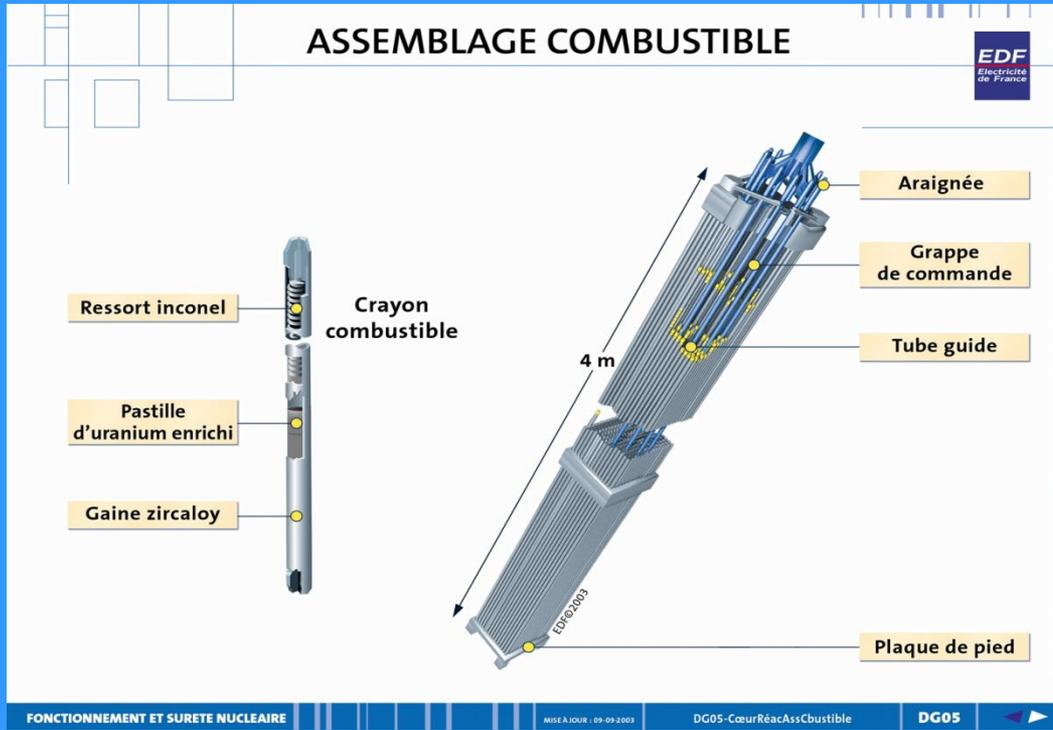
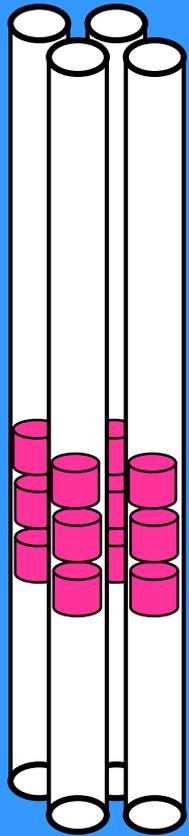


Schéma simplifié de fonctionnement d'une centrale nucléaire

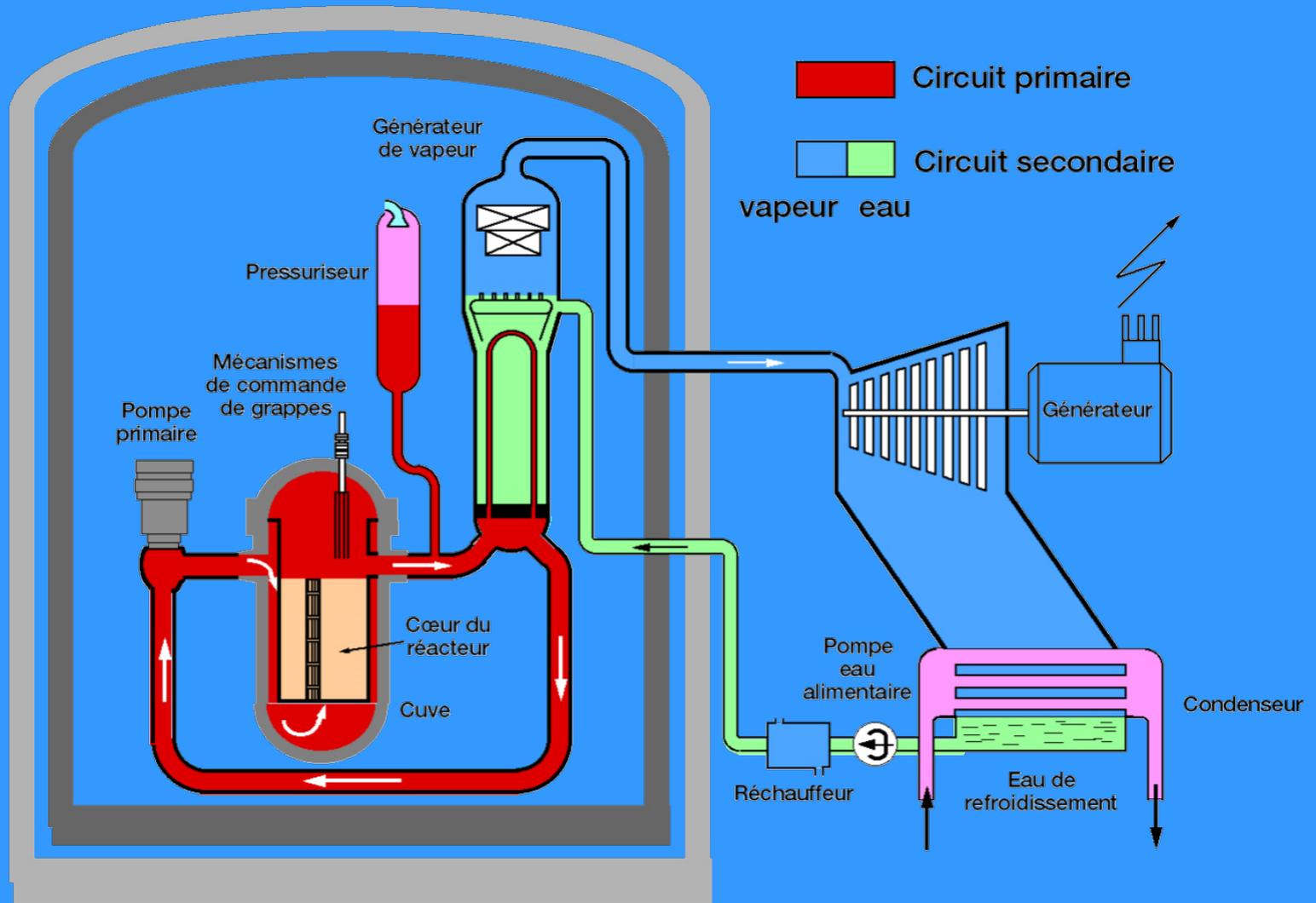
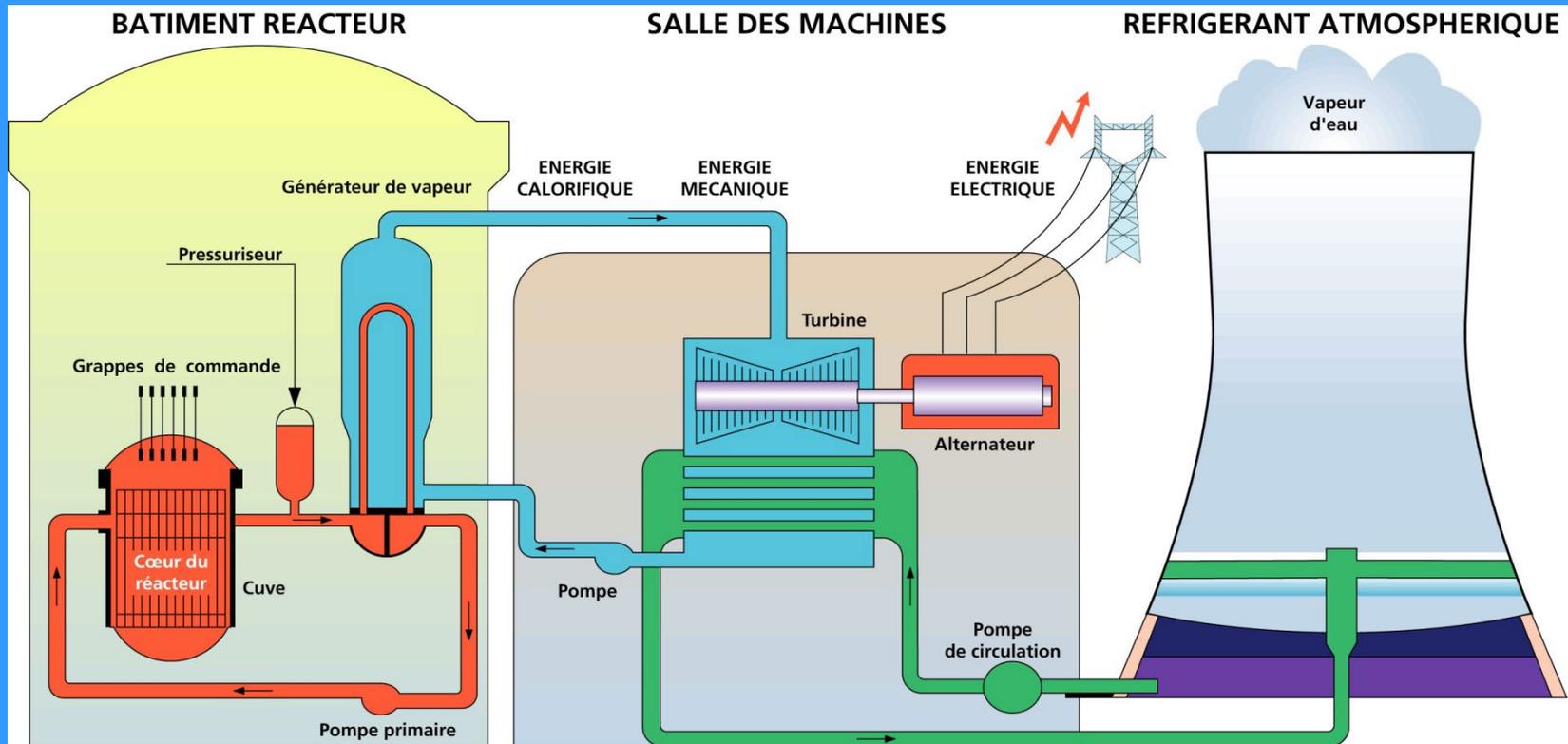
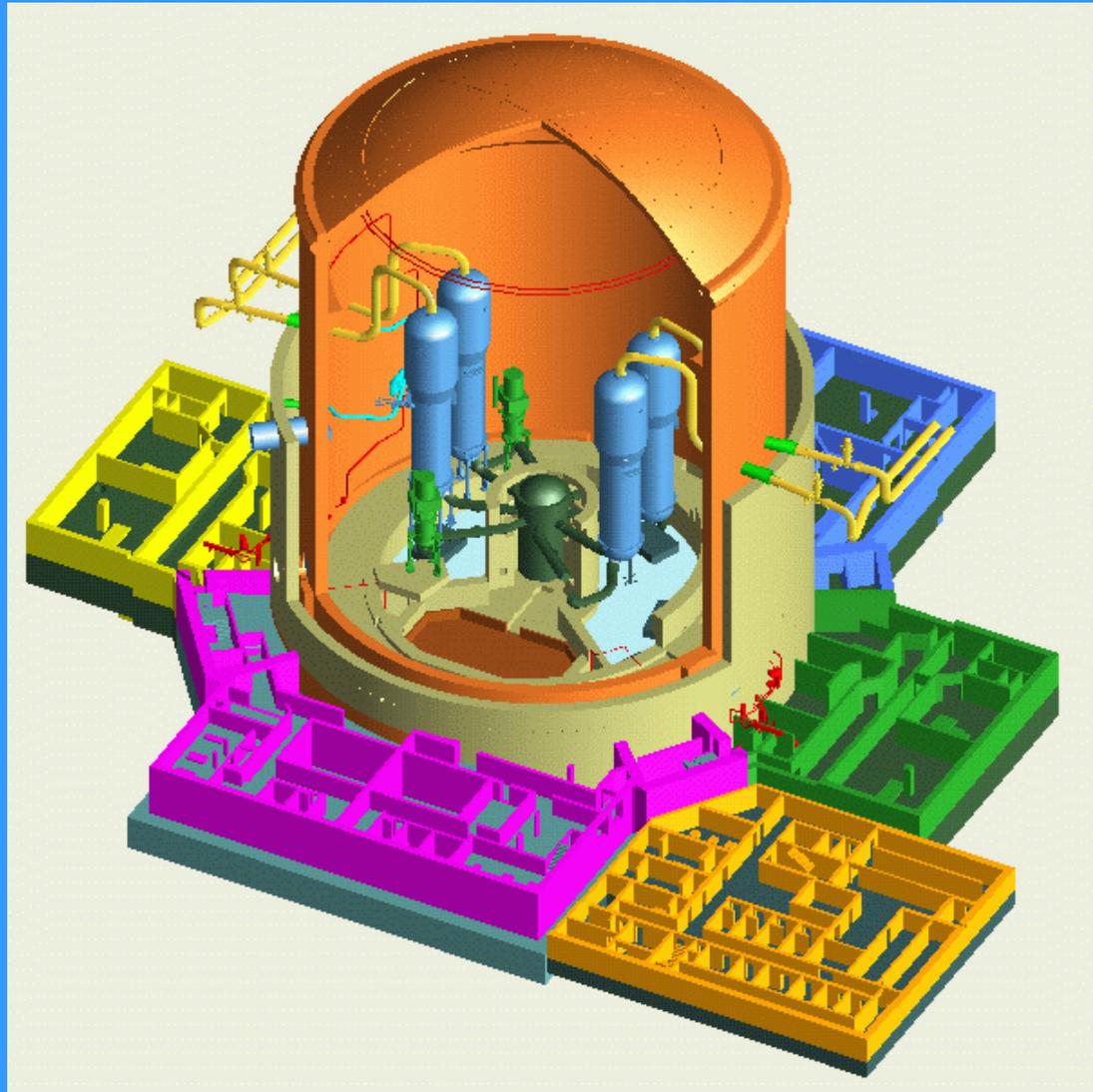


Schéma avec aéro réfrigérant



Le réacteur EPR

Sfen

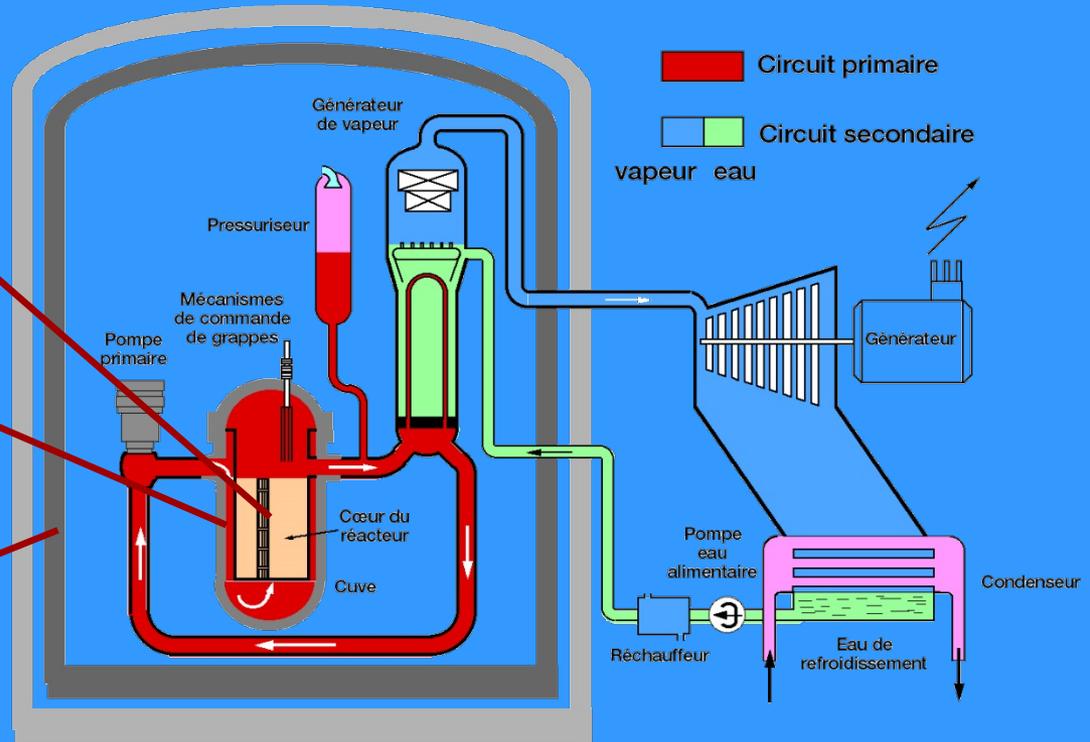


Les barrières de protection

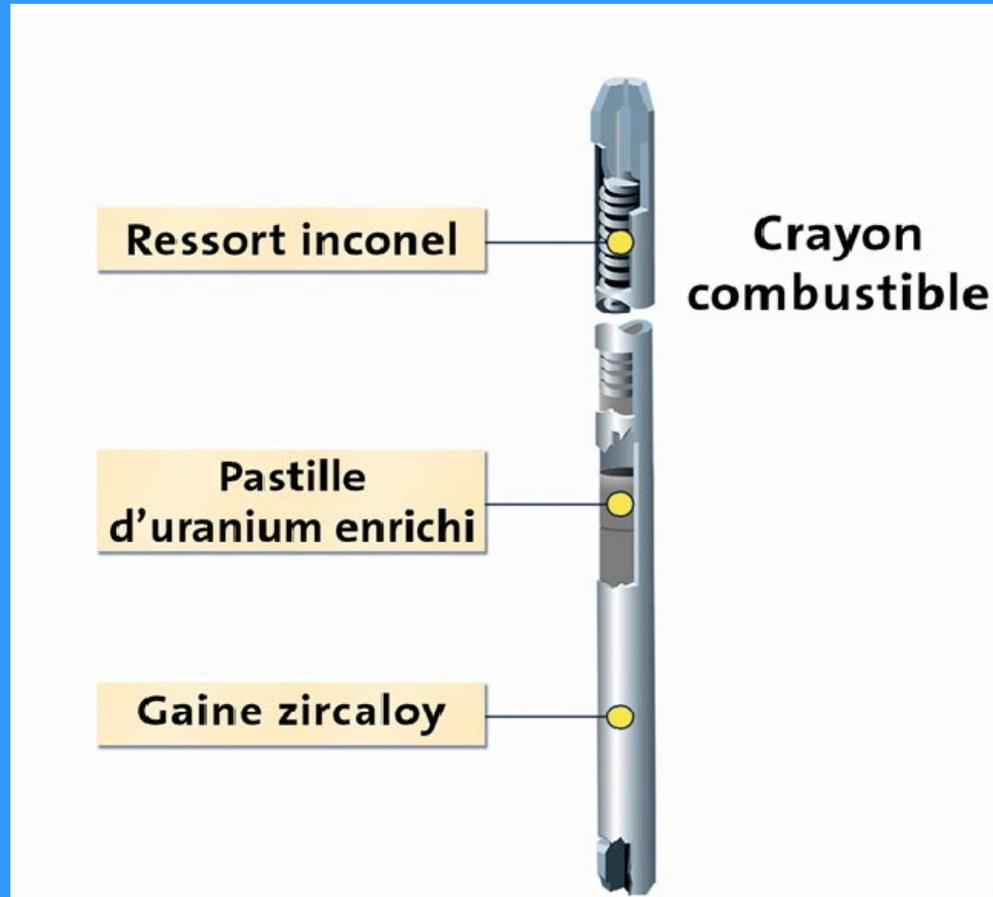
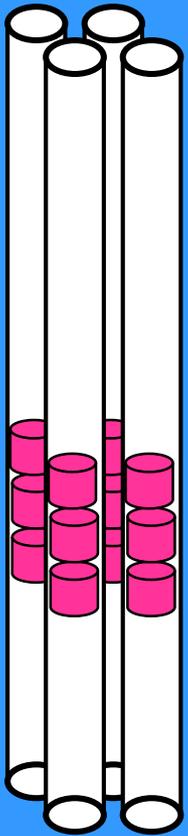
Première barrière : la gaine de l'élément combustible

Deuxième barrière : l'enveloppe du circuit primaire

Troisième barrière : l'enceinte de confinement



La première barrière



- Gaine du combustible



La deuxième barrière

- Cuve du réacteur (tenue dans le temps en fonction de la fragilisation sous rayonnement)
 - Tuyauteries primaires
 - Partie primaire du GV
 - Tube de GV
 - Pompes primaires
 - Pressuriseur
-
- Toutes les parois internes sont en acier inoxydable soit en Inconel

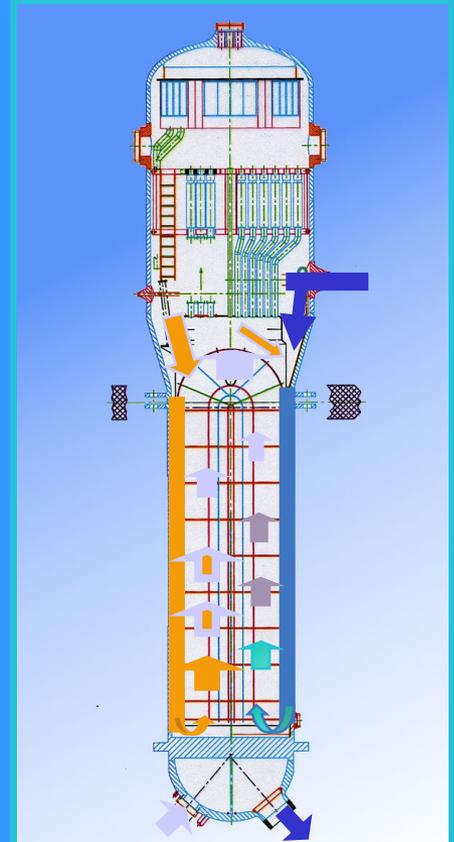
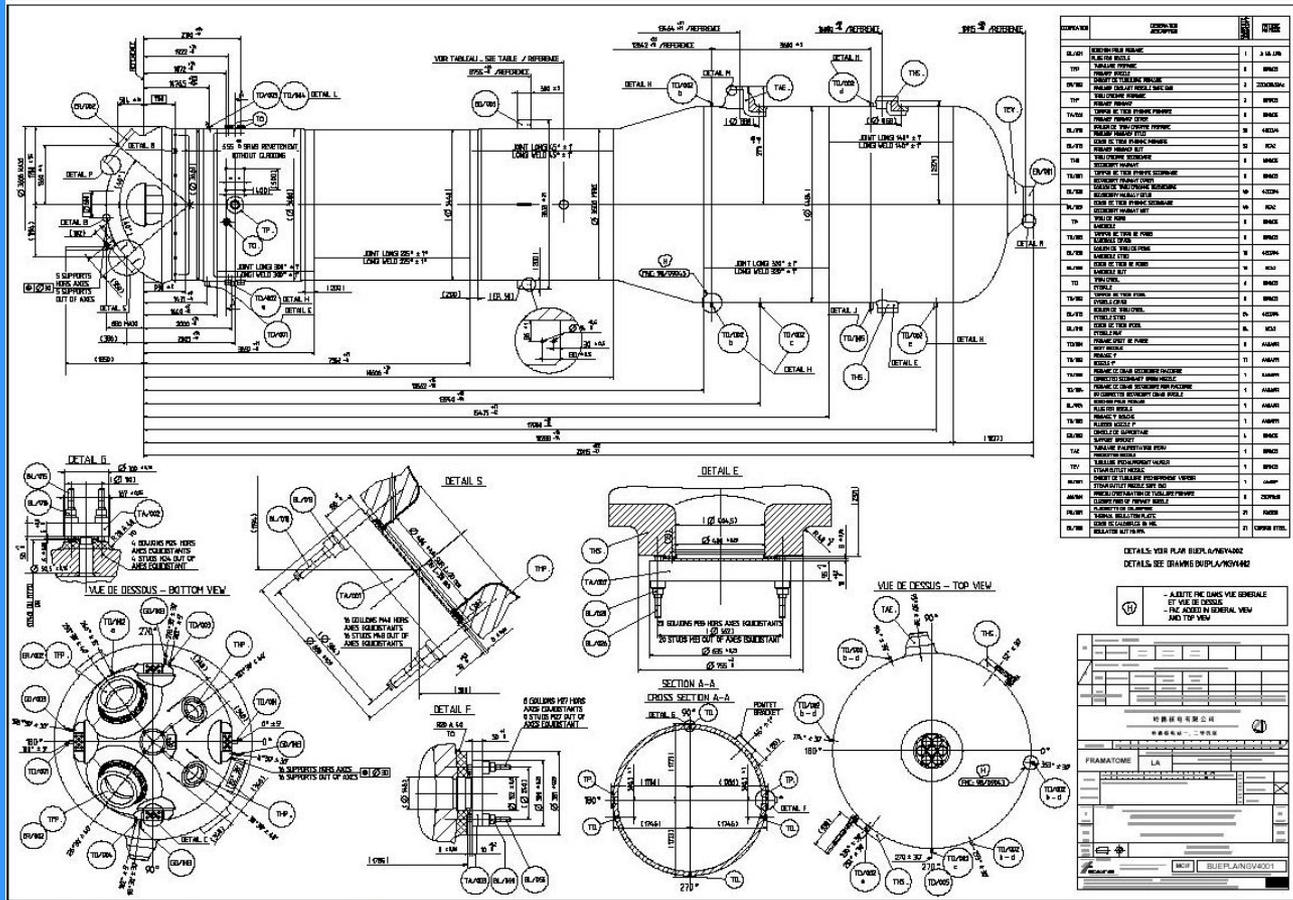


La deuxième barrière primaire secondaire

- Le tube de GV constitue une partie de la barrière primaire secondaire
- Il doit assurer une stricte étanchéité entre les deux milieux
- Il doit tenir à la différence de pression (environ 71 bar) à la température (330 °C) pendant plus de 250000 h.
- Ses mécanismes de dégradation doivent être minimisés
- L'évolution de ces mécanismes doit être contrôlable en service

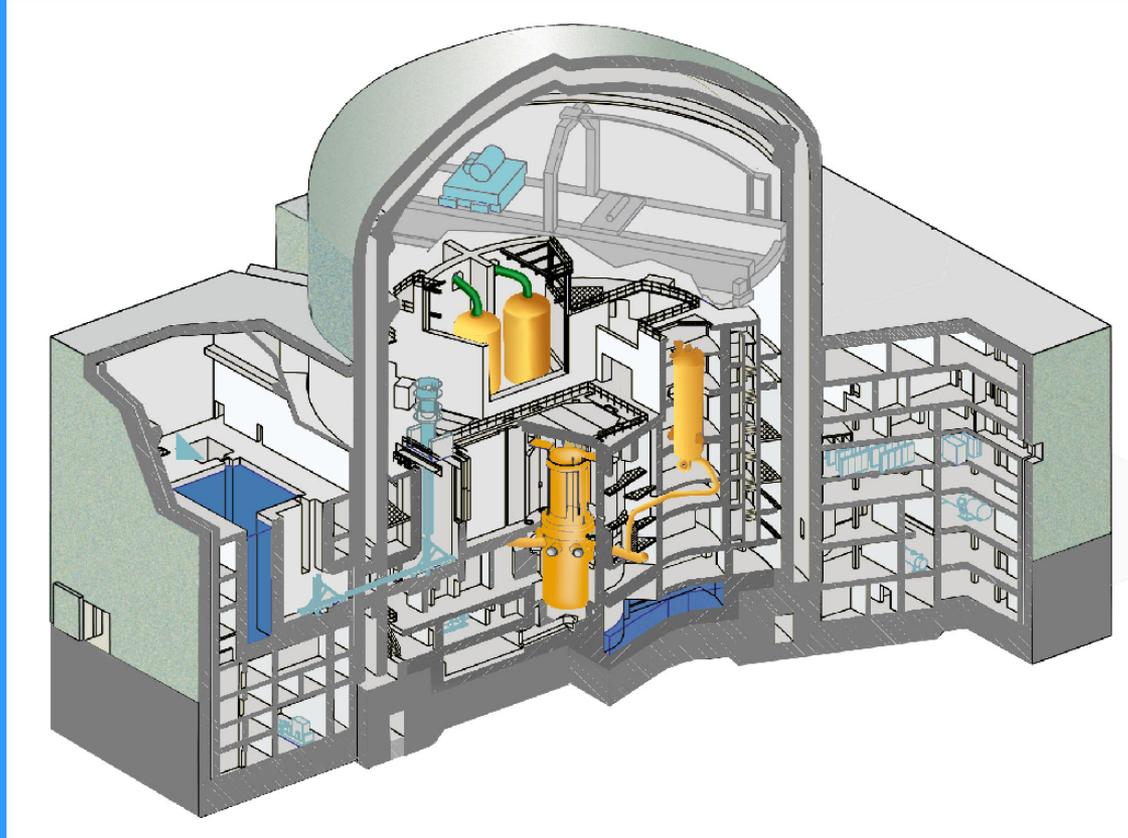


Les générateurs de vapeur

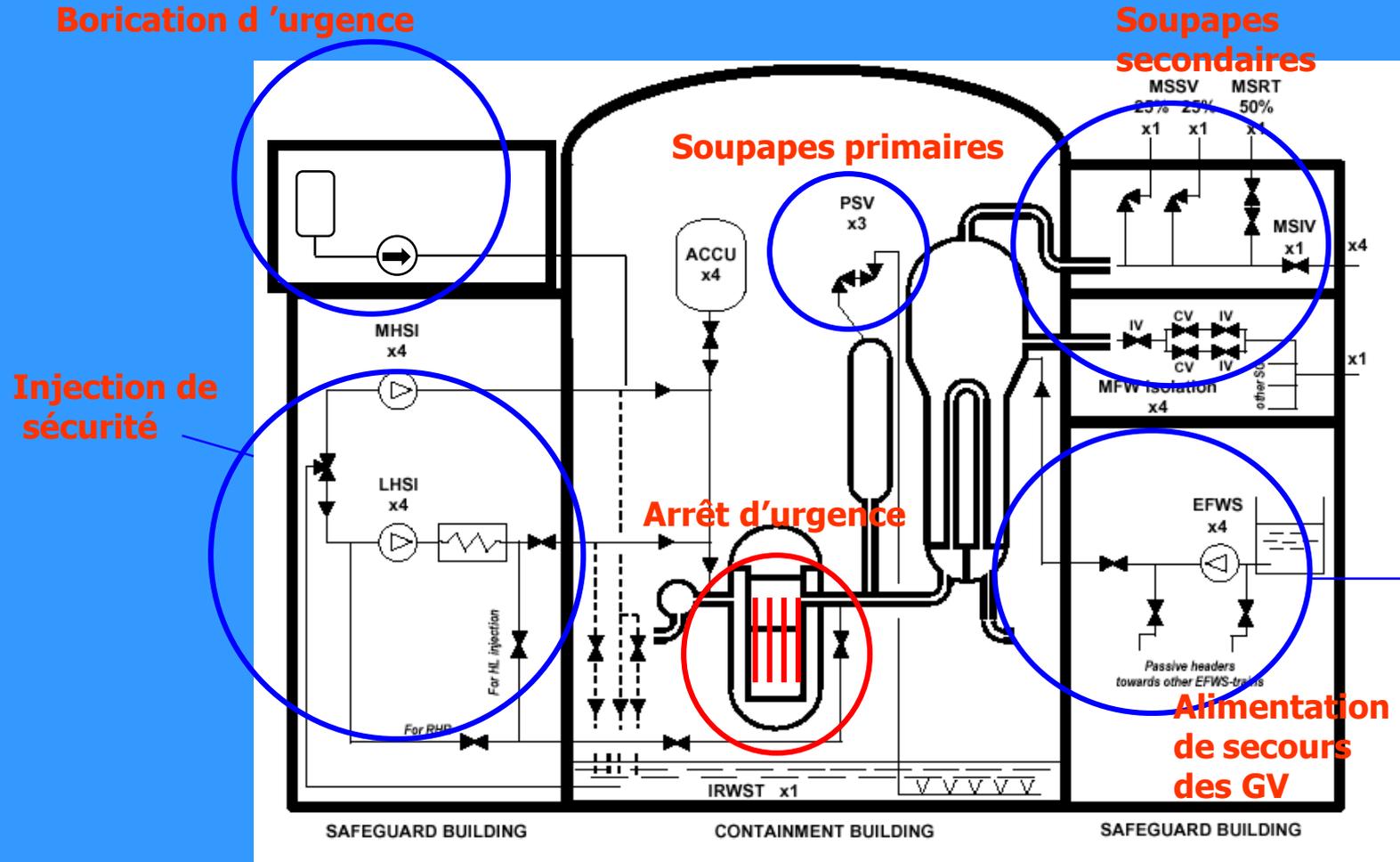


La troisième barrière

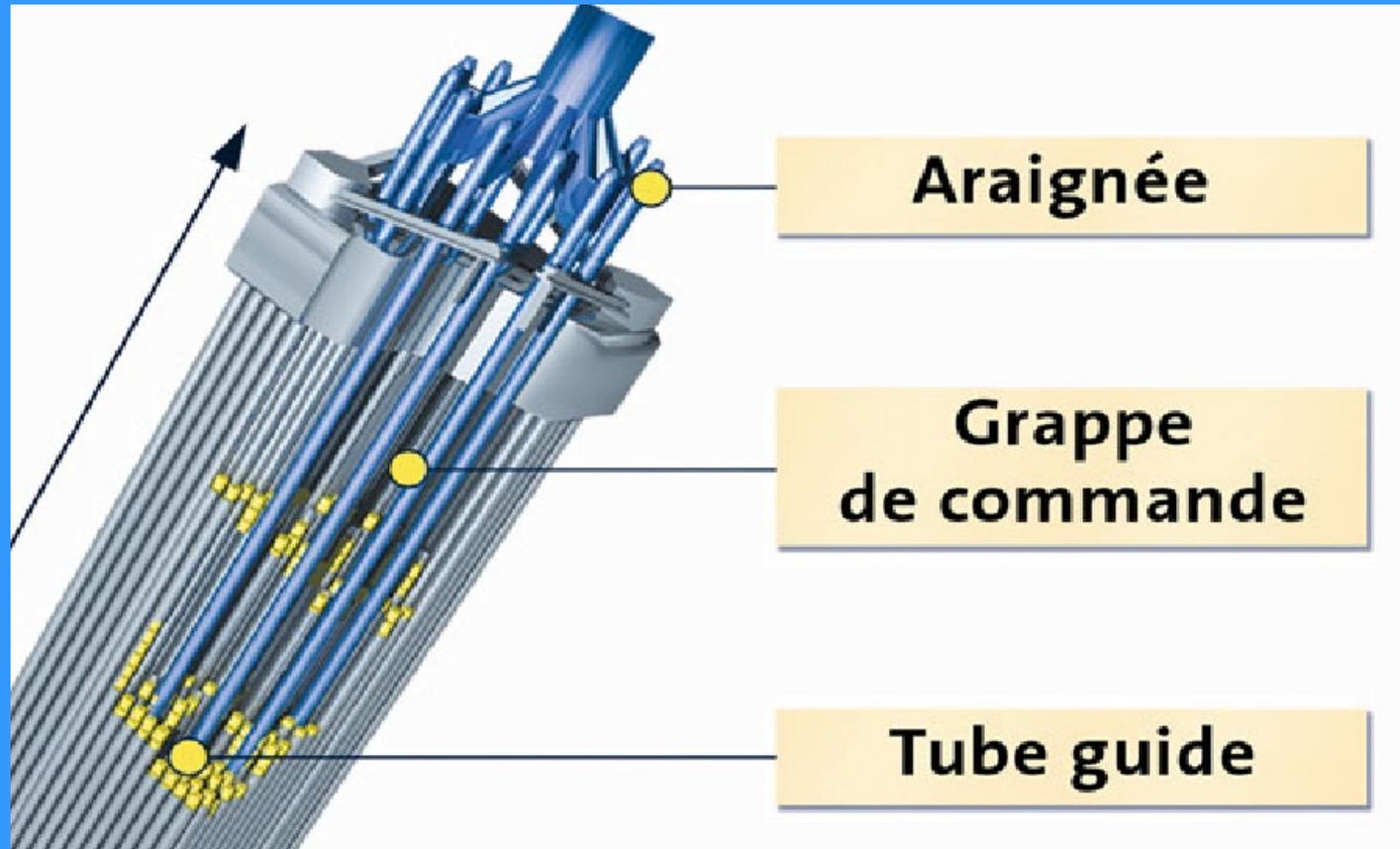
- L'enceinte de confinement



Systemes de sécurité



Barres de contrôle





Injection de sécurité

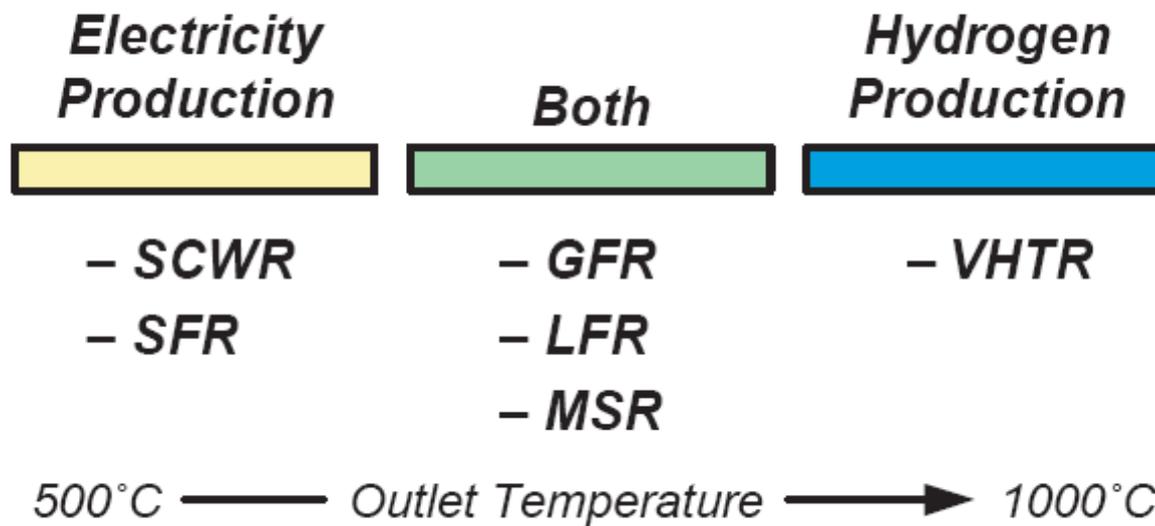
- **INJECTION DE SECURITE :**
injection massive et rapide dans le circuit primaire d'une solution d'acide borique pour arrêter la réaction en chaîne. Cette injection a lieu automatiquement en cas de baisse de pression du circuit primaire.



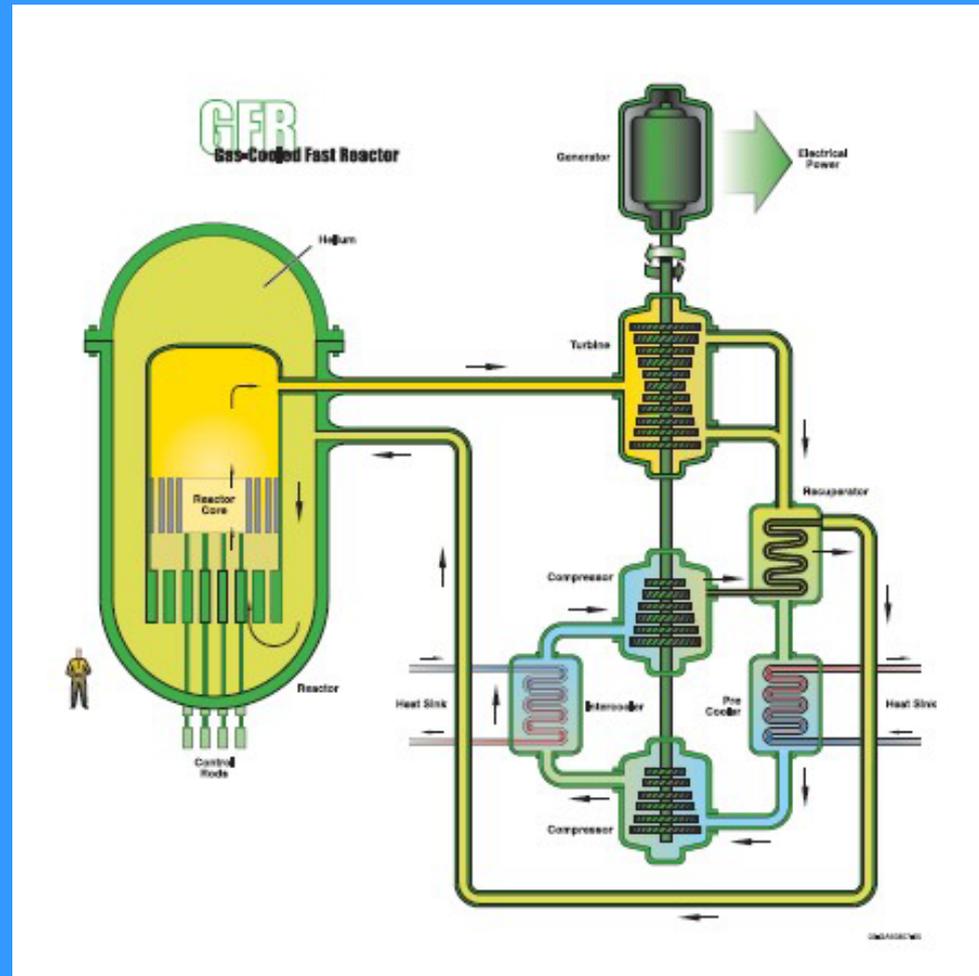
LES NOUVEAUX CONCEPTS

- *GFR – Gas-Cooled Fast Reactor System*
- *LFR – Lead-Cooled Fast Reactor System*
- *MSR – Molten Salt Reactor System*
- *SFR – Sodium-Cooled Fast Reactor System*
- *SCWR – Supercritical-Water-Cooled Reactor System*
- *VHTR – Very-High-Temperature Reactor System*

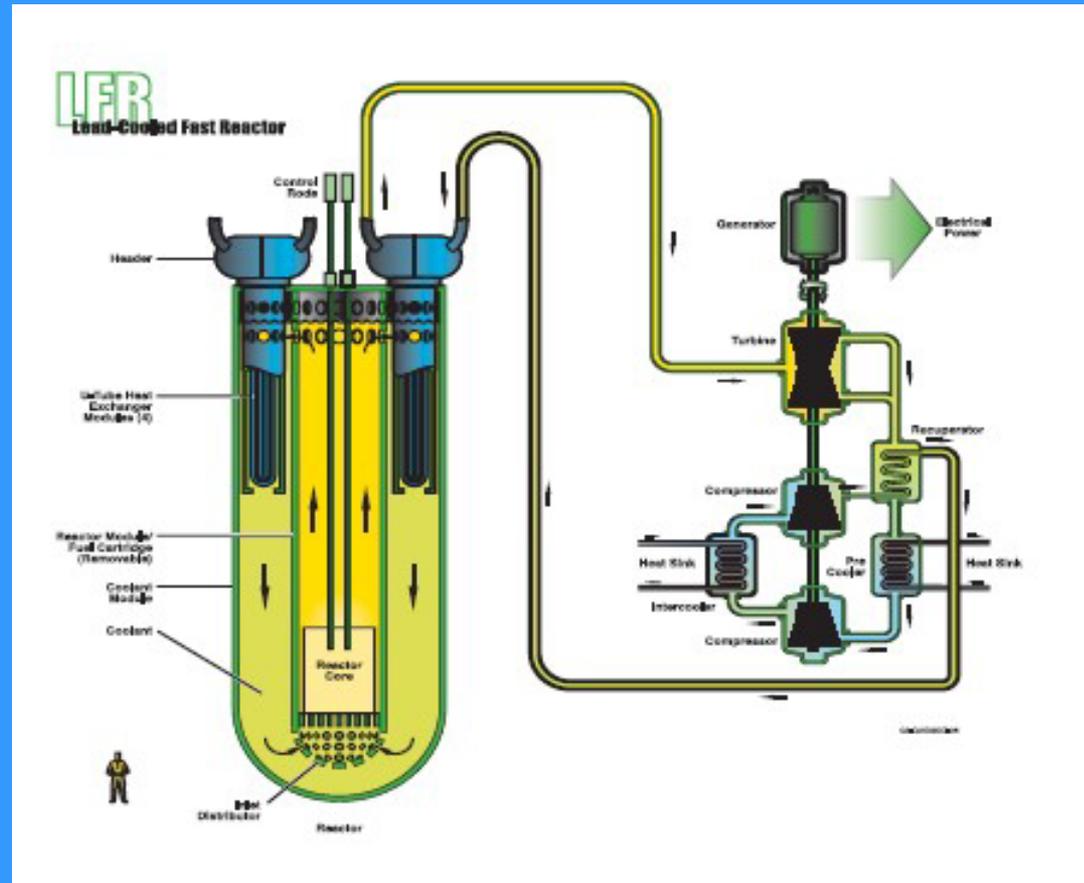
LES NOUVEAUX CONCEPTS LEURS USAGES



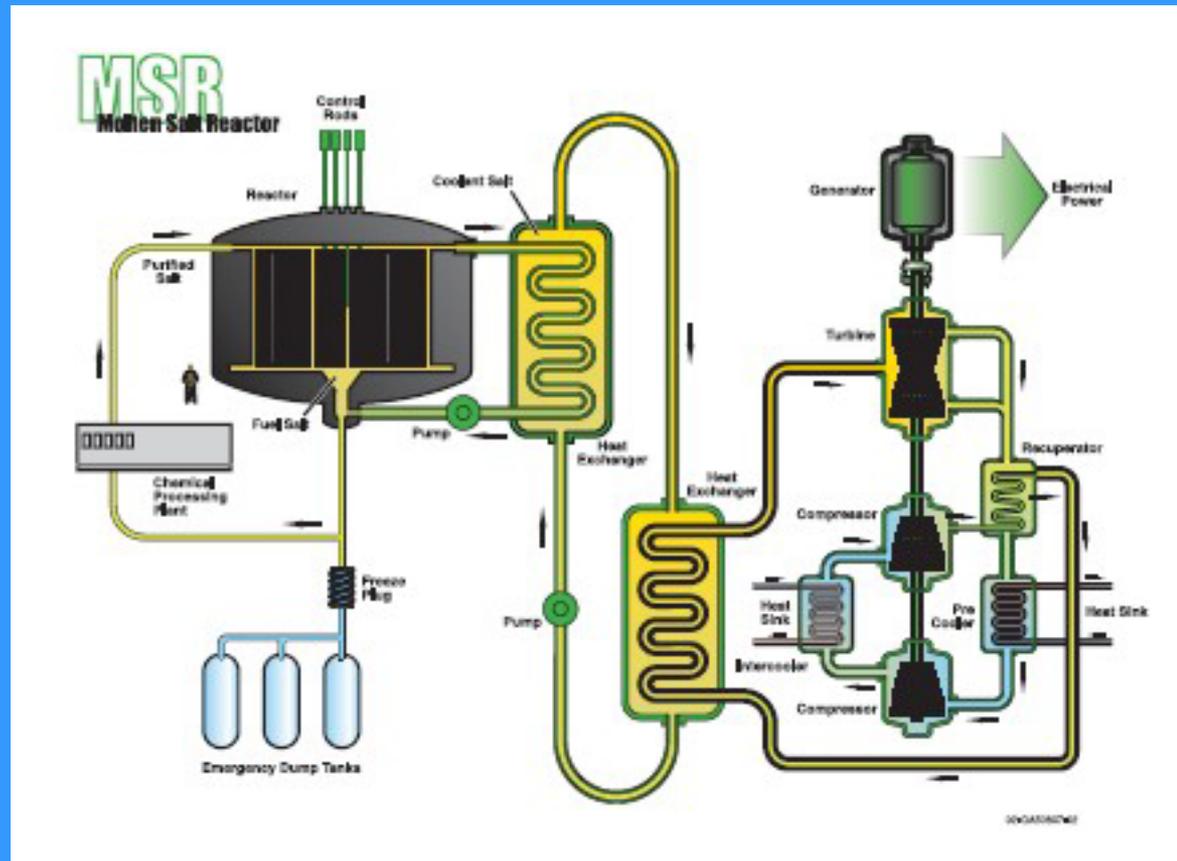
GFR



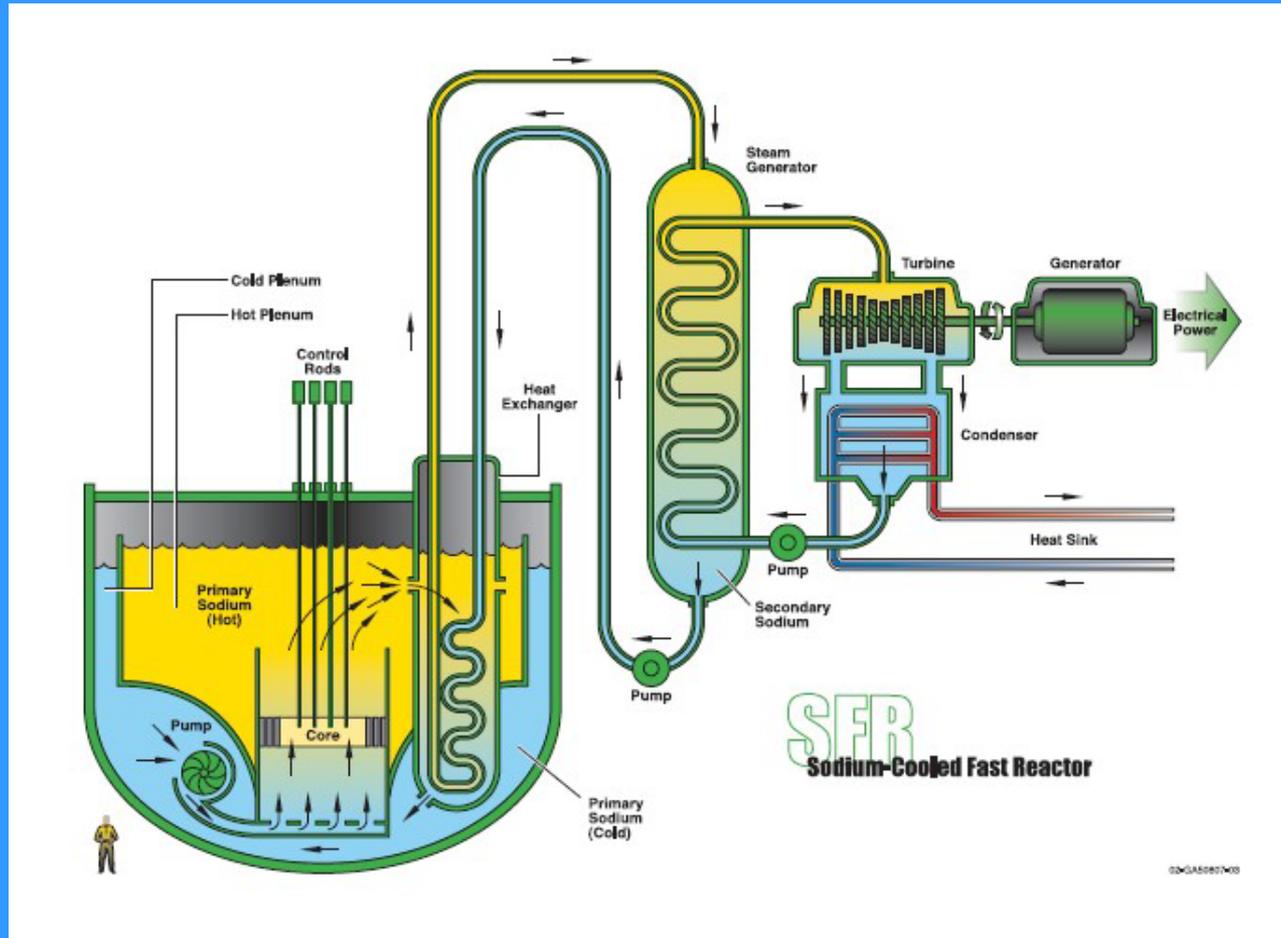
LFR



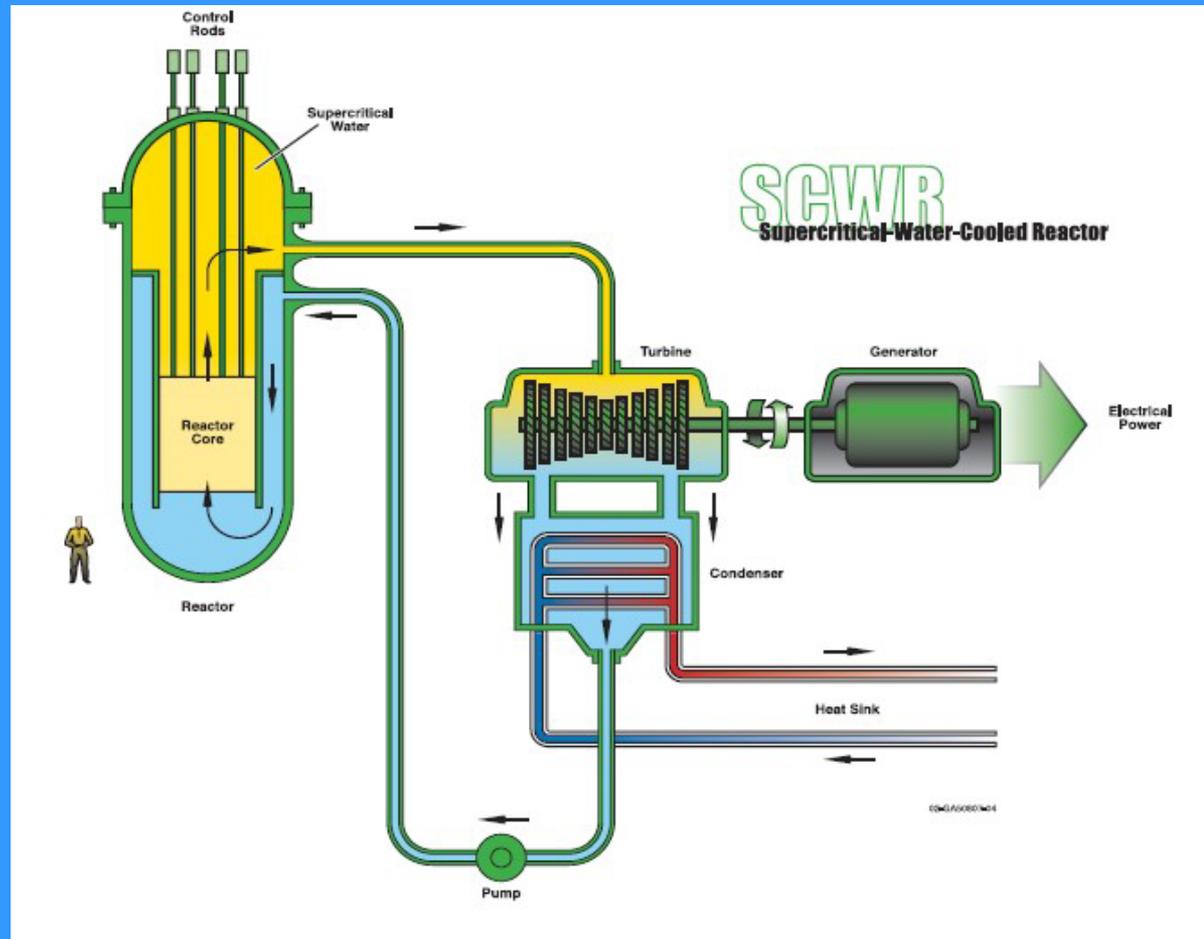
MSR



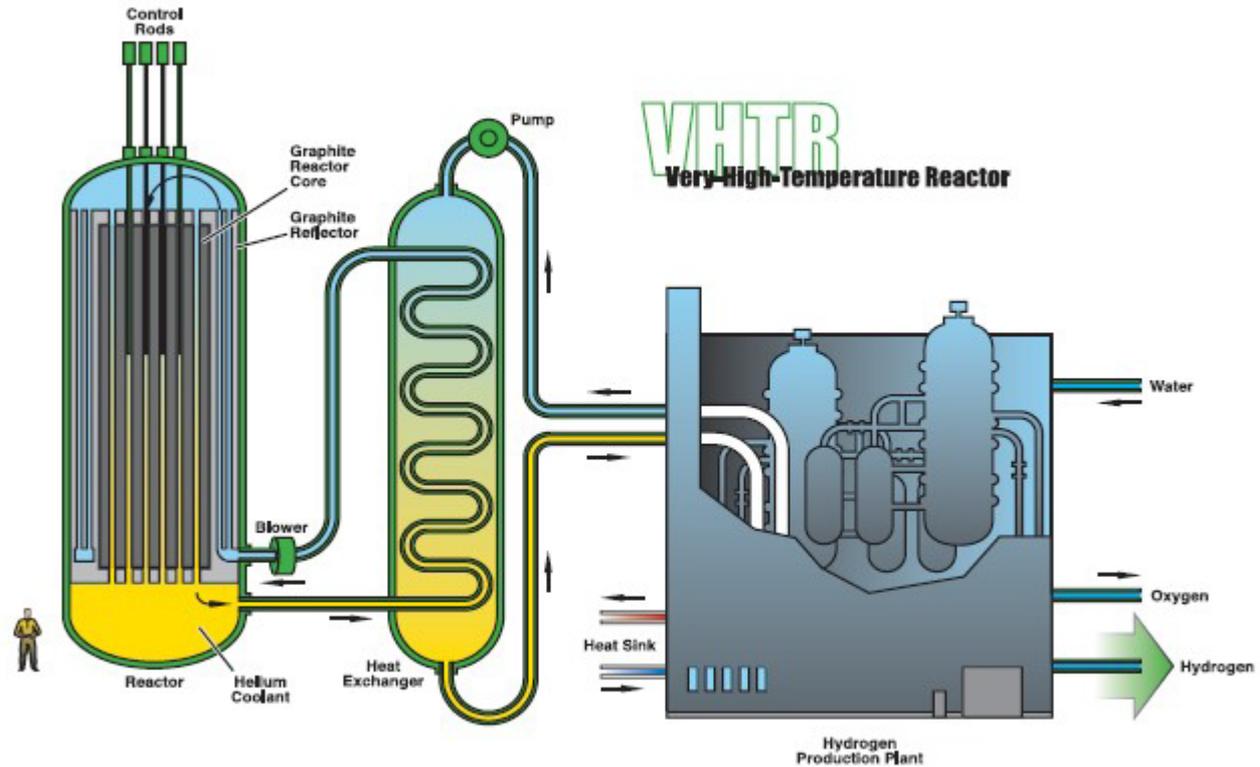
SFR



SCWR



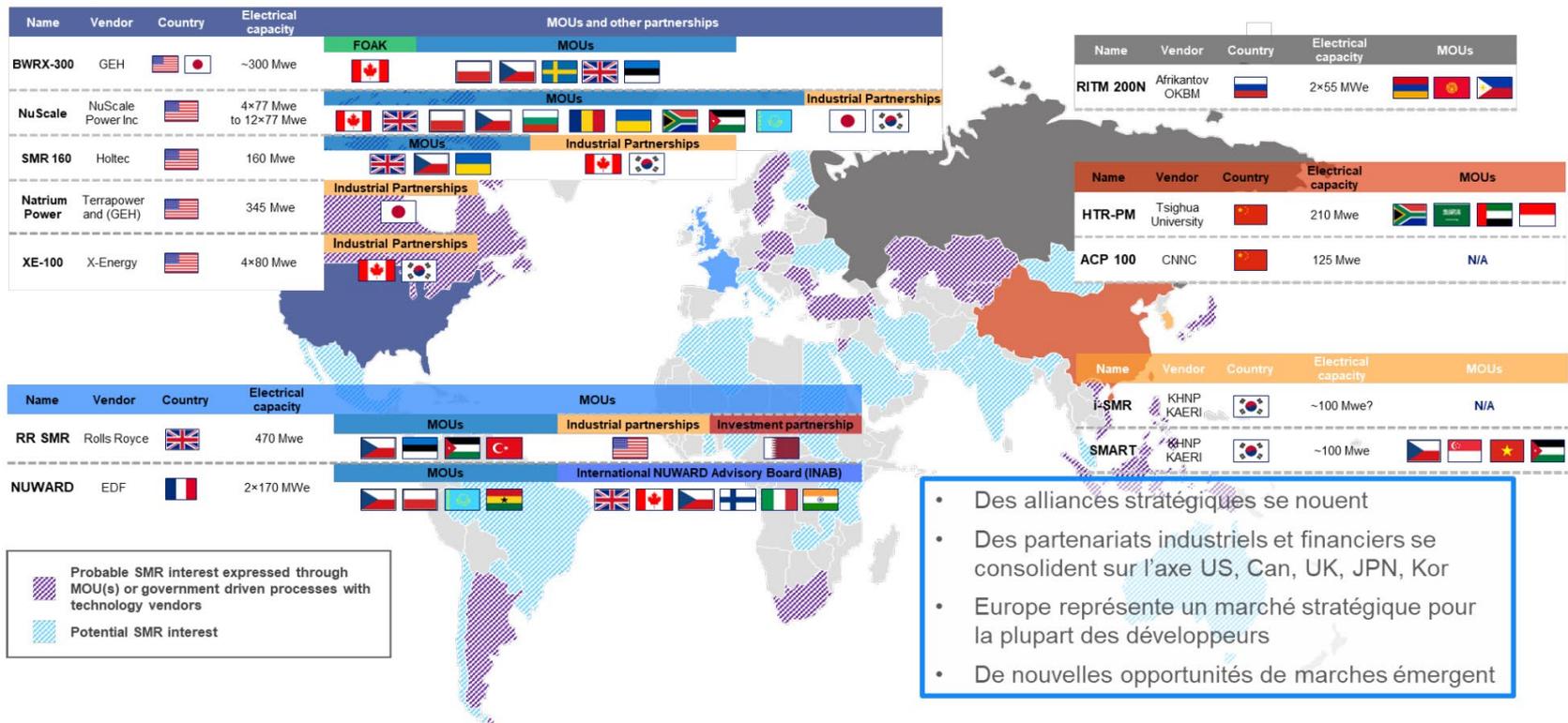
VHTR



Les petits réacteurs dans le Monde



Nouveaux réacteurs : un contexte international très concurrentiel.



Les petits réacteurs en France



Projets et R&D en France dans lesquels le CEA est impliqué

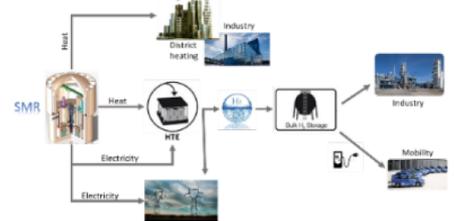
Small Modular Reactors



EDF, CEA,
TA, Fra,
Naval Group
+



+ innovations dans les usages

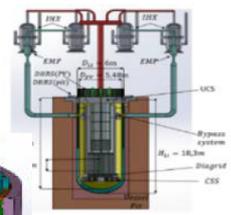
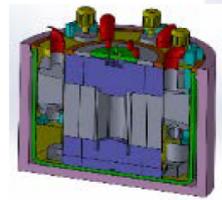


Nouveaux marchés à court et moyen terme

Advanced Modular Reactors

Concepts à neutrons rapides

ATRIUM (RNR-Na)
ANAIS (RNR-Na)



ARAMIS (MSR)
orano

R&D RNR-Na

Matériaux, combustible, accident grave, technologies, simulation

Energie durable et nouveaux usages

Plan de relance « gestion des déchets »

ISAC
Innovative System for Actinides Conversion
Transmutation en MSR
(CEA, EDF, Fra, Orano, CNRS)



Intelligence économique
Micro-réacteurs Spatial

Concepts en rupture

Soutien aux startups



France 2030 : 500 M€ pour l'innovation dans les réacteurs pour financer des startups.



accompagnera les startups qui en feront la demande
essaiera des concepts de réacteur et cas d'usage



CONCLUSIONS

- **L'avenir du nucléaire reste incertain à court terme**
- **Sa contribution paraît devoir rester significative à moyen terme**
- **C'est le processus de décision et son association avec le pouvoir politique qui est en question**
 - International ou national
 - Pouvoir des compagnies d'électricité et des constructeurs
 - Communication vers le public
 - Opposition des verts et d'une partie du public
- **Nécessité de promouvoir le développement de nouvelles technologies**



Liens utiles

<http://www.sfen.org/fr/intro/sommaire.htm>

[fonctionnement centrale nucléaire](#)

[CEA Espace Jeunes](#)

[EDF - Les énergies EDF - Le nucléaire](#)

Et amusant (également informatif)

[Nuclear Tourist! Nuclear Plants Around the World](#)

Morts par source d'énergie (1969-2000)

Filière énergétiques	Pays membres de l'OCDE			Pays non membres de l'OCDE		
	Accidents	Nombre de morts	Nbre de morts/GWe/an	Accidents	Nombre de morts	Nbre de morts/GWe/an
Charbon	75	2 259	0.157	1 044	18 017	0.597
Charbon (statistiques chinoises de 1994 à 1999)				819	11 334	6.169
Charbon (sans Chine)				102	4 831	0.597
Pétrole	165	3 713	0.132	232	16 505	0.897
Gaz naturel	90	1 043	0.085	45	1 000	0.111
GPL	59	1 905	1.957	46	2 016	14.896
Hydraulique	1	14	0.003	10	29 924	10.285
Nucléaire	0	0	0	1	31	0.048
Total	390	8 934	-	1 480	72 324	-