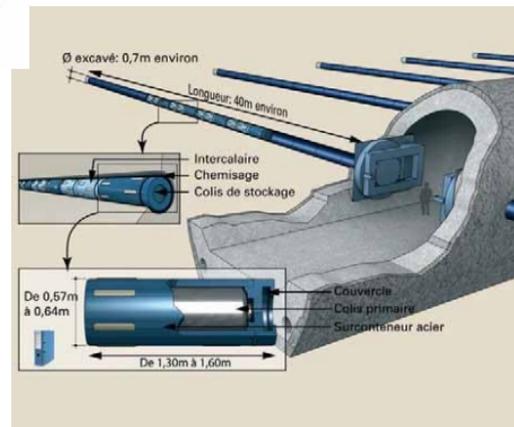
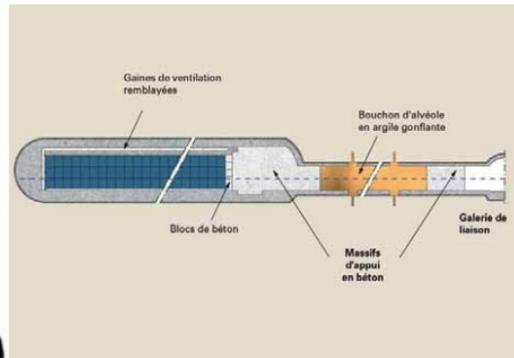
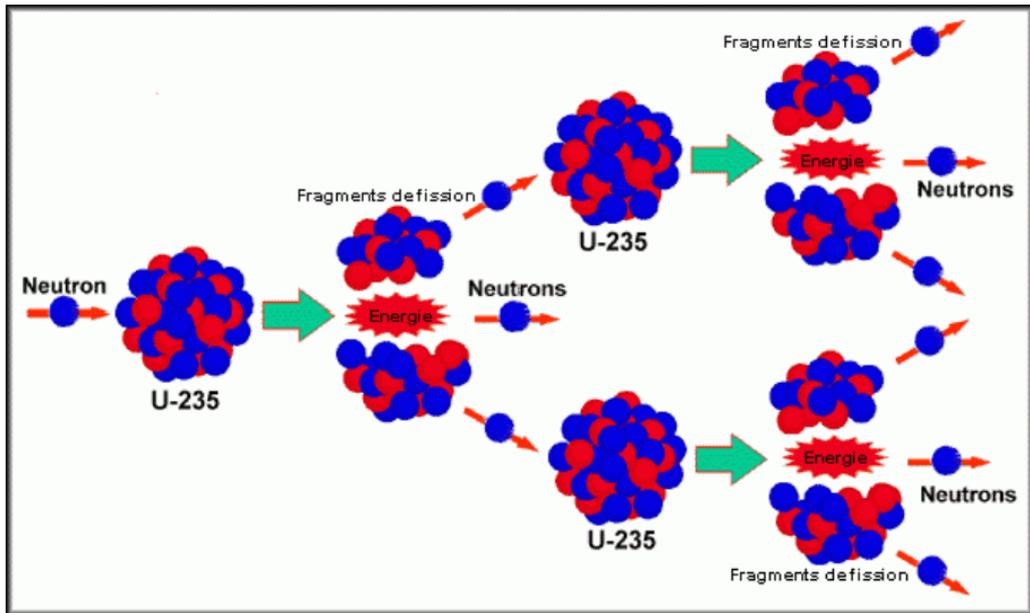


Problème des déchets / stockage géologique

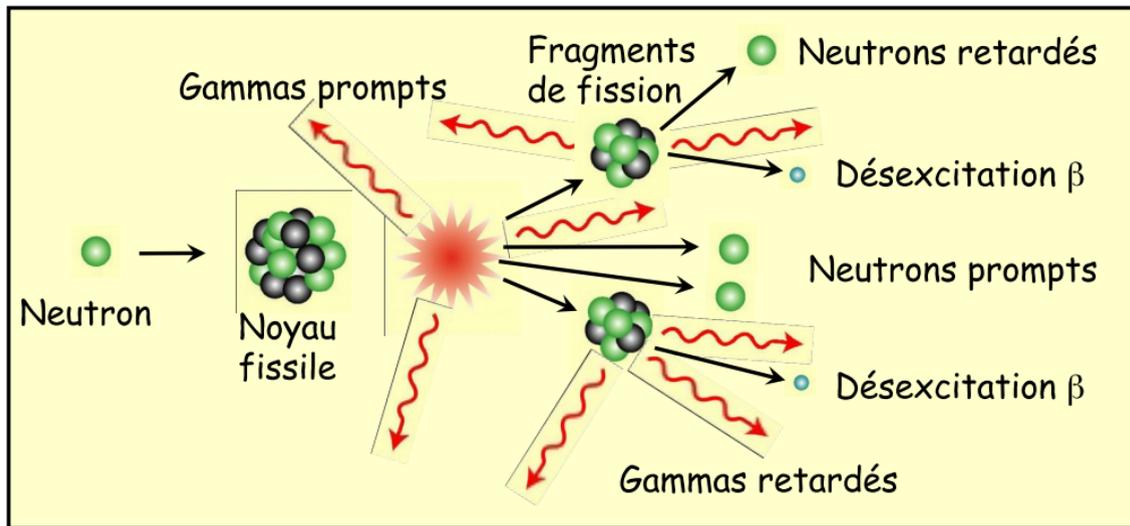
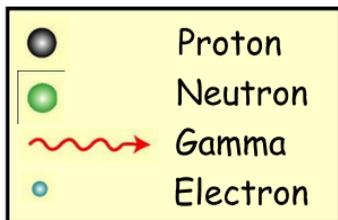


Principe des réactions en chaîne



On dit que l'Uranium 235 est fissile : il peut alimenter directement une réaction en chaîne – utilisable pour un réacteur électrogène ... ou pour une arme nucléaire

Une fission un peu plus réaliste...



Réaction en chaîne : facteur de multiplication et réactivité

Facteur de multiplication k_{eff} défini comme :

$$k_{\text{eff}} = \frac{\text{Nb neutrons produits}}{\text{Nb neutrons absorbés}}$$

Si $k_{\text{eff}} < 1$, la réaction en chaîne ne s'entretient pas
elle s'arrête après avoir produit $1/(1-k)$ neutrons

Si $k_{\text{eff}} > 1$, la réaction diverge (principe des bombes à fission)

Si $k_{\text{eff}} = 1$, la réaction en chaîne s'entretient d'elle même
Principe d'un réacteur CRITIQUE

Réactivité :

$$\rho = \frac{k_{\text{eff}} - 1}{k_{\text{eff}}}$$

Risques spécifiques d'un réacteur nucléaire :

- Stock d'énergie concentrée dans le combustible
- Accumulation de produits radioactifs (danger + chaleur)
- Dégagement significatif d'énergie même après arrêt

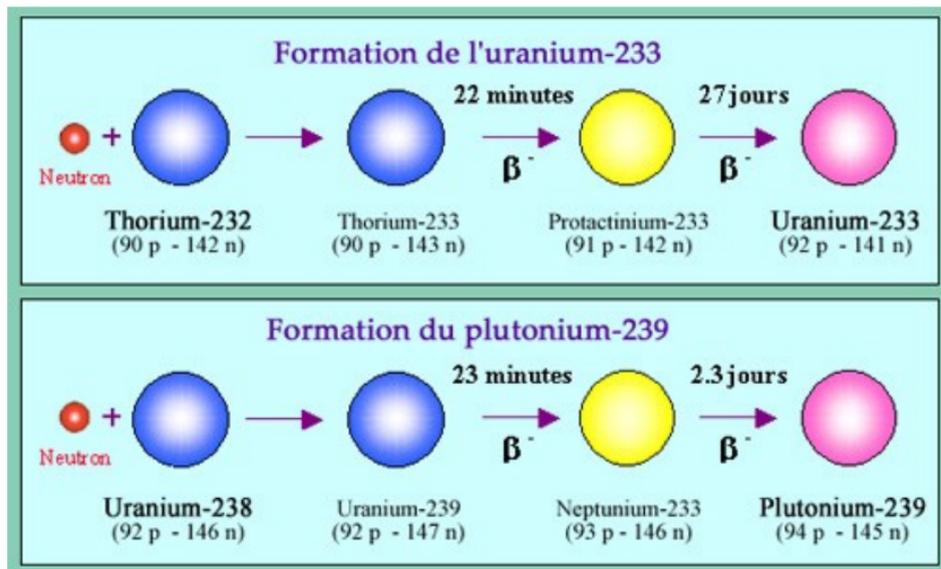
Bases de la sûreté nucléaire = maîtriser le réacteur

- Confiner les produits radioactifs □ 3 barrières
- Maîtriser la réaction en chaîne en tout instant = piloter le réacteur
- Evacuer la puissance y compris après l'arrêt de la réaction en chaîne

Seuls trois éléments sont exploitables dans la nature pour la fission : U235, U238, Th232

U235 est directement *fissile* ... mais il est peu abondant, sa teneur dans l'uranium naturel n'est que 0,72 %, le reste (99,28 %) étant essentiellement de l'U238

U238 et Th232 sont seulement « *fertiles* »



U233

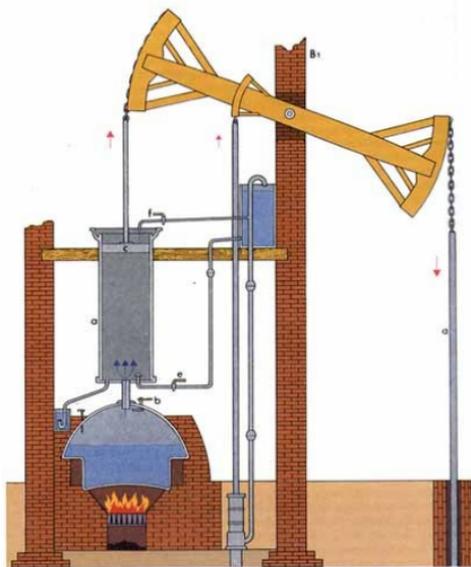
et

Pu239

eux, sont

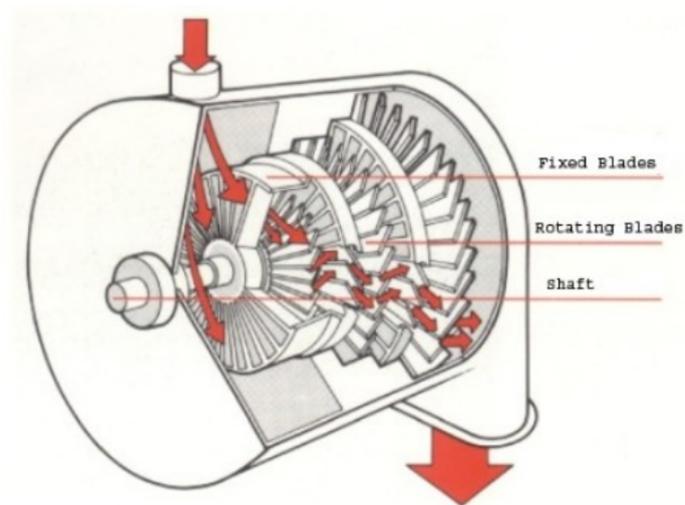
fissiles

Évolution des machines à vapeur



Machine de Newcomen (1712)

Rendement : 0,5 %



Turbine de Parsons (1884)

Rendement : 18 – 20 %

aujourd'hui : 30 – 35 %

Évolution des réacteurs nucléaires

Génération I

Premières réalisations



UNGG
Chooz
Magneux

Génération II

Réacteurs actuels



PWR
AGR
REP 900
REP 1300
N4
BWR
CANDU

Génération III

Réacteurs avancés



AP 600
System 80+
CANDU 6

Génération III+

Réacteurs évolutionnaires



ABWR
ACR1000 AP1000
APWR
EPR
ESBWR

Génération IV

Réacteurs du futur

- Plus économes des ressources naturelles
- Moins de déchets
- Plus respectueux de l'environnement
- Plus économiques
- Plus sûrs et fiables
- Plus résistants vis-à-vis des risques de prolifération
- Mieux protégés contre les agressions externes

1950 1960 1970 1980 1990 2000 2010 2020 2030

Gén I

Gén II

Gén III

Gén III+

Gén IV

% d'utilisation du combustible :

0,5 %

1,5 %

2,5 %

4 % ?

> 50 %

Le rêve des physiciens nucléaires :

- un réacteur sûr, qui ne puisse en aucun cas connaître d'accident susceptible de disperser de la radioactivité, ceci quelles que soient les circonstances extérieures
- des ressources de combustible abondantes (des milliers d'années, ou plus !)
- une production de déchets très faible
- un réacteur non proliférant : la possibilité de le détourner pour produire des armes nucléaires doit être quasiment exclue

Ce sont les critères demandés pour les réacteurs dits de Génération IV (forum international années 2000)

Nous y ajouterons :

- des réacteurs fournissant une énergie compétitive avec les énergies « sales » comme le charbon, si possible même moins chère, de façon à pouvoir s'y substituer

La bonne nouvelle : un tel réacteur semble possible !



Un pionnier du
nucléaire :
Alvin Weinberg
1915 – 2006
Directeur ORNL
Oak Ridge



Modérateur graphite
du MSRE à Oak Ridge (1965)

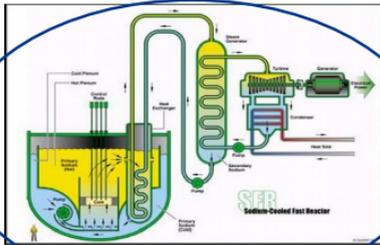
Forum International Génération 4

Forum international d'experts (GIF) créé en 2000 à l'initiative des USA pour définir les réacteurs de 4^{ème} génération

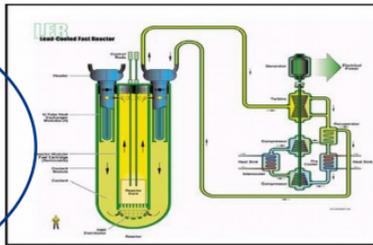
Critères de sélection:

- Économiser les ressources naturelles
- Améliorer encore la sûreté
- Minimiser la production de déchets
- Réduire les risques de prolifération
- Réacteurs économiquement rentables

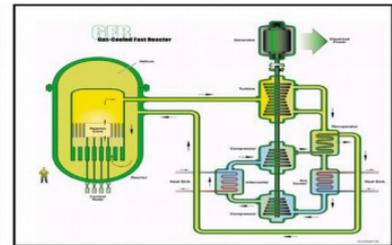
⇒ 6 concepts ont été retenus



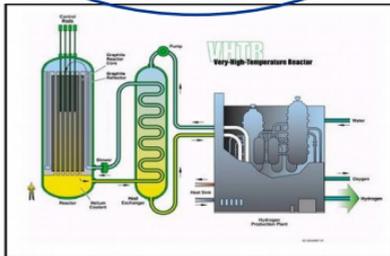
Réacteur rapide au Sodium



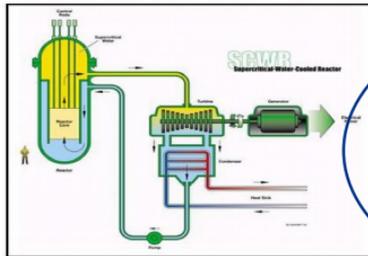
Réacteur rapide au Plomb



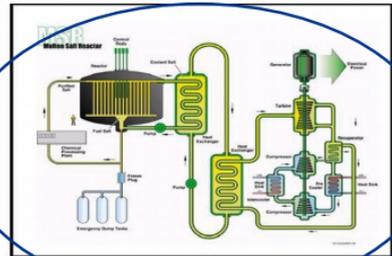
Réacteur rapide à gaz



Réacteur à gaz, Très Haute Température

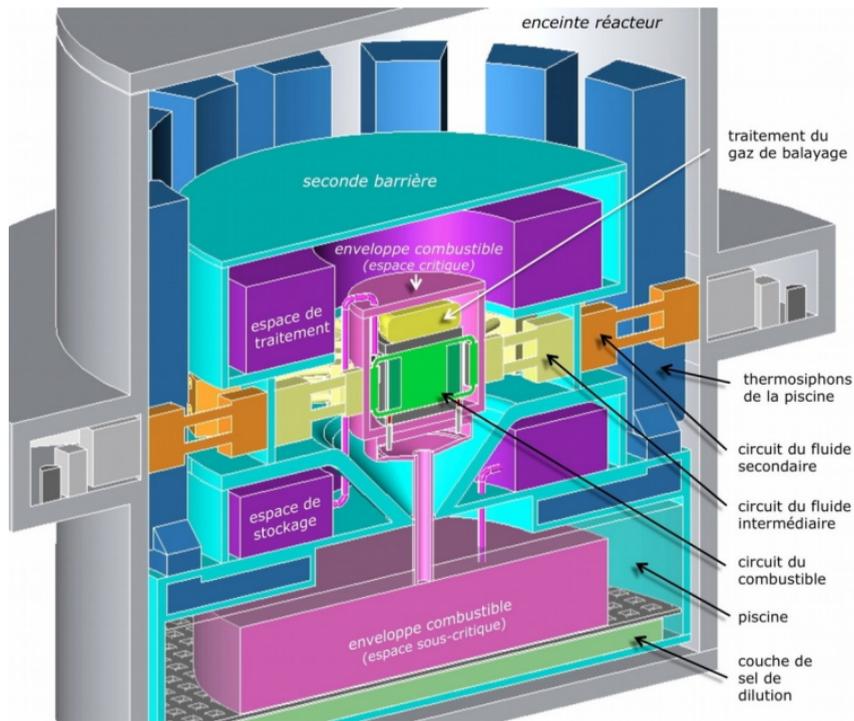


Réacteur à eau supercritique



Réacteur à sels fondus

Réacteur à sels fondus en cycle thorium (Th232 – U233)



MSFR : design de réacteur à neutrons rapides proposé par le CNRS (LPSC Grenoble) au forum international Gen IV

Principales caractéristiques :

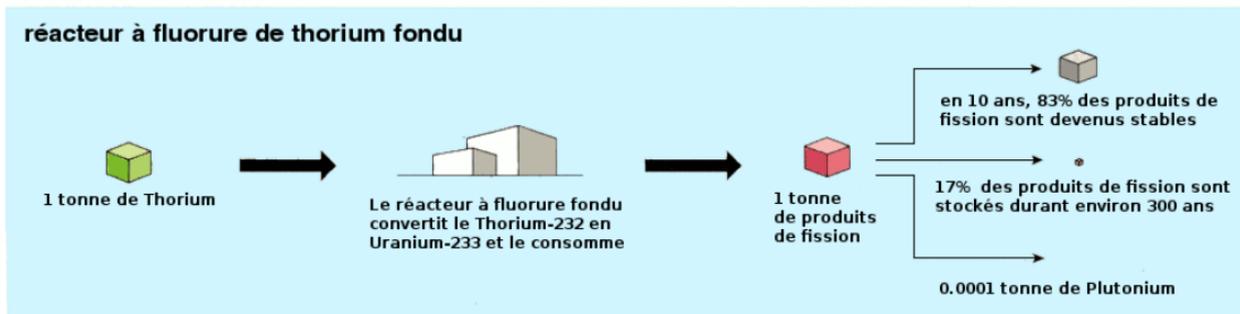
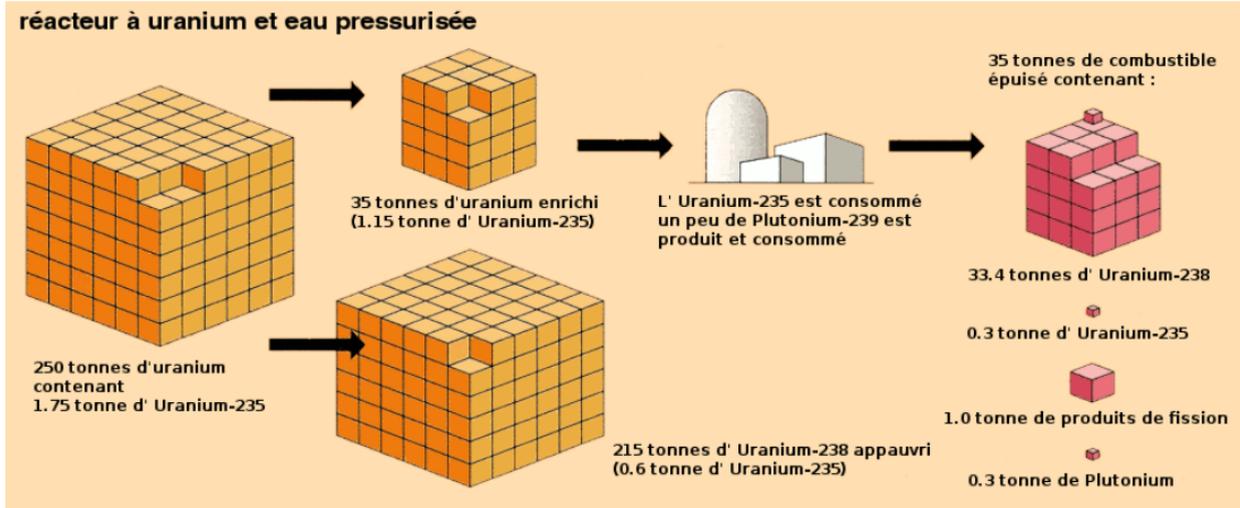
- Les sels fondus (LiF + fluorures d'éléments fissiles/fertiles U, Pu, Th, ...) servent aussi de fluide caloporteur : le circuit primaire ne contient pas d'eau et fonctionne donc à pression atmosphérique
→ **sécurité très accrue**
- Les produits de fission sont retraités « en ligne » par des procédés physico-chimiques (bullage hélium...) à l'intérieur même du réacteur : celui-ci est donc en permanence beaucoup plus « propre » que les réacteurs actuels.
- Le combustible liquide étant homogène, celui-ci peut être utilisé en quasi-totalité (au delà de 99%), il n'y a plus de « pertes »
- Presque tous les produits de fission sont à durée de vie courte ou assez courte (moins de 30 ans) ; le réacteur ne produit

pratiquement plus de « transuraniens », déchets radioactifs à longue vie (de 1000 à 10000 fois moins!)

→ le besoin de stockage géologique est extrêmement réduit

- Le MSFR est capable d'incinérer en grande partie les transuraniens produits par les centrales nucléaires actuelles, donc de les valoriser tout en les éliminant !
- Le combustible irradié est impropre à la fabrication d'armements (présence d'U232 aboutissant à Tl208 → rayonnements gamma)
- Les coefficients de vide et de contre-réaction thermique sont négatifs : le réacteur est intrinsèquement stable
 - un accident de criticité de type Tchernobyl est impossible
- En cas d'arrêt du réacteur, une vidange par gravité des sels et un refroidissement thermique passif suffisent
 - un accident de type Fukushima est impossible

Comparaison de la production de déchets (REP vs MSFR)



Retraitement chimique en ligne et bullage

