

Les Réacteurs du futur

cours numéro 11

H.Nifenecker

Projets actuels GEN3

Advanced Thermal Reactors being marketed

Country and developer	Reactor	Size MWe	Design Progress	Main Features (improved safety in all) <ul style="list-style-type: none"> Evolutionary design. More efficient, less waste. Simplified construction (48 months) and operation. Simplified construction and operation. 3 years to build. 60-year plant life. Evolutionary design. High fuel efficiency. Flexible operation Evolutionary design. Short construction time. Hybrid safety features. Simplified Construction and operation. Evolutionary design. Increased reliability. Simplified construction and operation.
US-Japan (GE-Hitachi, Toshiba)	ABWR	1300	Commercial operation in Japan since 1996-7. In US: NRC certified 1997, FOAKE.	
USA (Westinghouse)	AP-600 AP-1000 (PWR)	600 1100	AP-600: NRC certified 1999, FOAKE. AP-1000 NRC certification 2005, many units planned in China.	
France-Germany (Areva NP)	EPR US-EPR (PWR)	1600	Future French standard. French design approval. Being built in Finland and France, planned for China. US version developed.	
USA (GE- Hitachi)	ESBWR	1550	Developed from ABWR, under certification in USA, likely construction there.	
Japan (utilities, Mitsubishi)	APWR US-APWR EU-APWR	1530 1700 1700	Basic design in progress, planned for Tsuruga US design certification application 2008.	
South Korea (KHNP, derived from Westinghouse)	APR-1400 (PWR)	1450	Design certification 2003, First units expected to be operating c 2013.	

Fonctions d'un réacteur

- Générer des fissions: **Élément combustible**
- Extraire les calories: **Caloporteur+Echangeurs**
- Contrôle de la réactivité: **Barres, Eau borée...**
- Ajustement de la vitesse des neutrons: **Ralentisseur**

Génération IV

Partenaires:

- Argentina
- Brasil
- Canada
- France
- Japan
- South Africa
- South Korea
- USA
- UK

Interêt: China, India, Russia

Conditions à remplir

- Sûreté
 - Systèmes « pardonnants »
 - Systèmes passifs
 - Confinement
- Non proliférants
 - Pas de matière fissile pure dans le cycle
- Résistance au terrorisme
 - Sûreté
 - Transports
- Production de déchets minimum
 - Minimisation des Transuraniens
- Optimiser l'utilisation du combustible
 - Burn-up élevé
 - Sur génération

Types de Réacteurs

- Réacteurs à eau:
 - Eau supercritique
 - A tubes de force
- Réacteurs à gaz
 - Neutrons lents, très haute température
 - Neutrons rapides, surgénérateurs U-Pu, Th-U
- Réacteurs refroidis par métal liquide
 - Sodium liquide, U-Pu, Th-U
 - Plomb fondu (Bismuth) U-Pu, Th-U
- Réacteurs à sels fondus
 - neutrons lents, surgénérateurs Th-U
- Réacteurs Hybrides
 - Accélérateur, sous-criticalité

Stabilité du réacteur à long terme

Un modèle : un corps fissile (U235) et un corps absorbant (Bore)
On oublie le reste

$$1 = \frac{\eta n_{fis}(0) \sigma_{fis}}{n_B(0) \sigma_B + n_{fis}(0) \sigma_{fis}}$$

$$n_B(0) = n_{fis}(0) (\eta - 1) \frac{\sigma_{fis}}{\sigma_B}$$

$$1 = \frac{\eta n_{fis}(t) \sigma_{fis}}{n_B(t) \sigma_B + n_{fis}(t) \sigma_{fis}}$$

$$n_B(t) = f(t) \exp(-\sigma_B \phi t)$$

$$f(t) = \exp(\phi t (\sigma_B - \sigma_{fis}))$$

Exemple

$$\sigma_F(U235, \text{thermique}) = 566 \text{ barns} \quad \sigma_F(B10, \text{thermique}) = 384 \text{ barns}$$

Temps caractéristique $\frac{1}{\phi (\sigma_{fis} - \sigma_B)} = 20 \text{ mois} \quad \phi = 10^{14} \text{ n/cm}^2/\text{s}$

Modèle à 3 noyaux

Noyaux fertiles : n_{cap}

Noyaux fissiles : n_{fis}

Produits de fission: n_{fp}

On suppose d'abord que le nombre de noyaux fissiles est constant

Modèle à 3 noyaux

$$\frac{dn_{cap}}{dt} = -n_{cap}\sigma_{cap}^{(a)}\varphi + S(t)$$

$$\frac{dn_{fis}}{dt} = n_{cap}\sigma_{cap}^{(a)}\varphi - n_{fis}\sigma_{fis}^{(a)}\varphi$$

$$\frac{dn_{fp}}{dt} = n_{fis}\sigma_{fis}^{(f)}\varphi$$

Evolution de la réactivité

- Réacteurs régénérateurs $\frac{dn_{fiss}}{dt} = -n_{fiss}\sigma_{fiss}\varphi + n_{cap}\sigma_{cap}\varphi$

- Equilibre $\frac{n_{fiss}}{n_{cap}} = \frac{\sigma_{cap}}{\sigma_{fiss}}$

- Mais criticité nécessaire $k = \eta \frac{n_{fiss}\sigma_{fiss}}{n_{fiss}\sigma_{fiss} + n_{cap}\sigma_{cap}} > 1$

- Condition à l'équilibre $\eta > 2$

- Exemple REP $\eta = 1,8$ $\frac{\sigma_{fiss}(Pu9)}{\sigma_{cap}(U8)} = \frac{101}{1}$

Contexte et objectifs

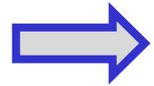
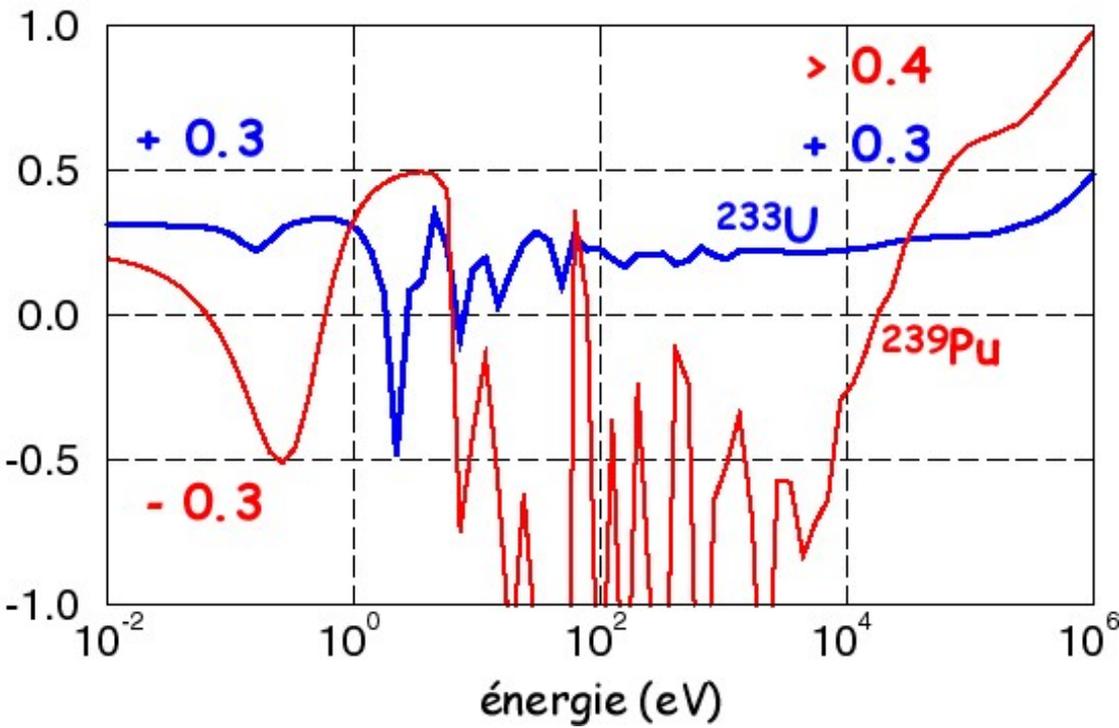
eta

S
U
O
J
↓
n
e
u

- *Sobriété : comment surgénérer la matière fissile ?*

ν	<i>neutrons produits par fission</i>	(2.5)	} valeurs types de l' ²³³ U
- 1	<i>nouvelle fission pour criticité</i>		
- α	<i>capture parasite sur fissile</i>	(0.1)	
- $(1+\alpha)$	<i>capture sur fertile pour régénération</i>	(1.1)	

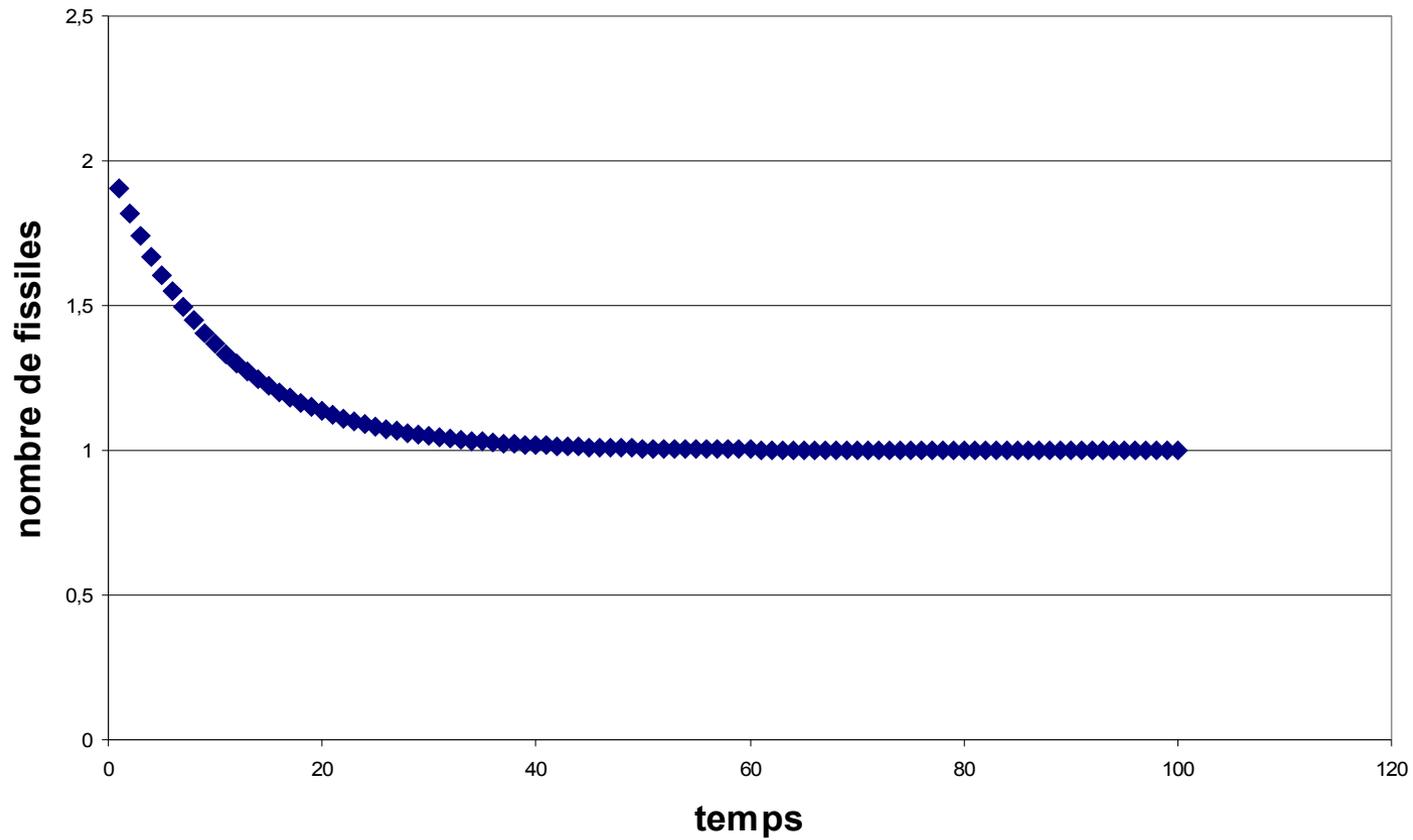
$\nu - 2(1+\alpha)$ « neutrons disponibles » par fission (0.3)



cycle U/Pu en spectre rapide
ou
cycle Th/U (rapide ou thermique)

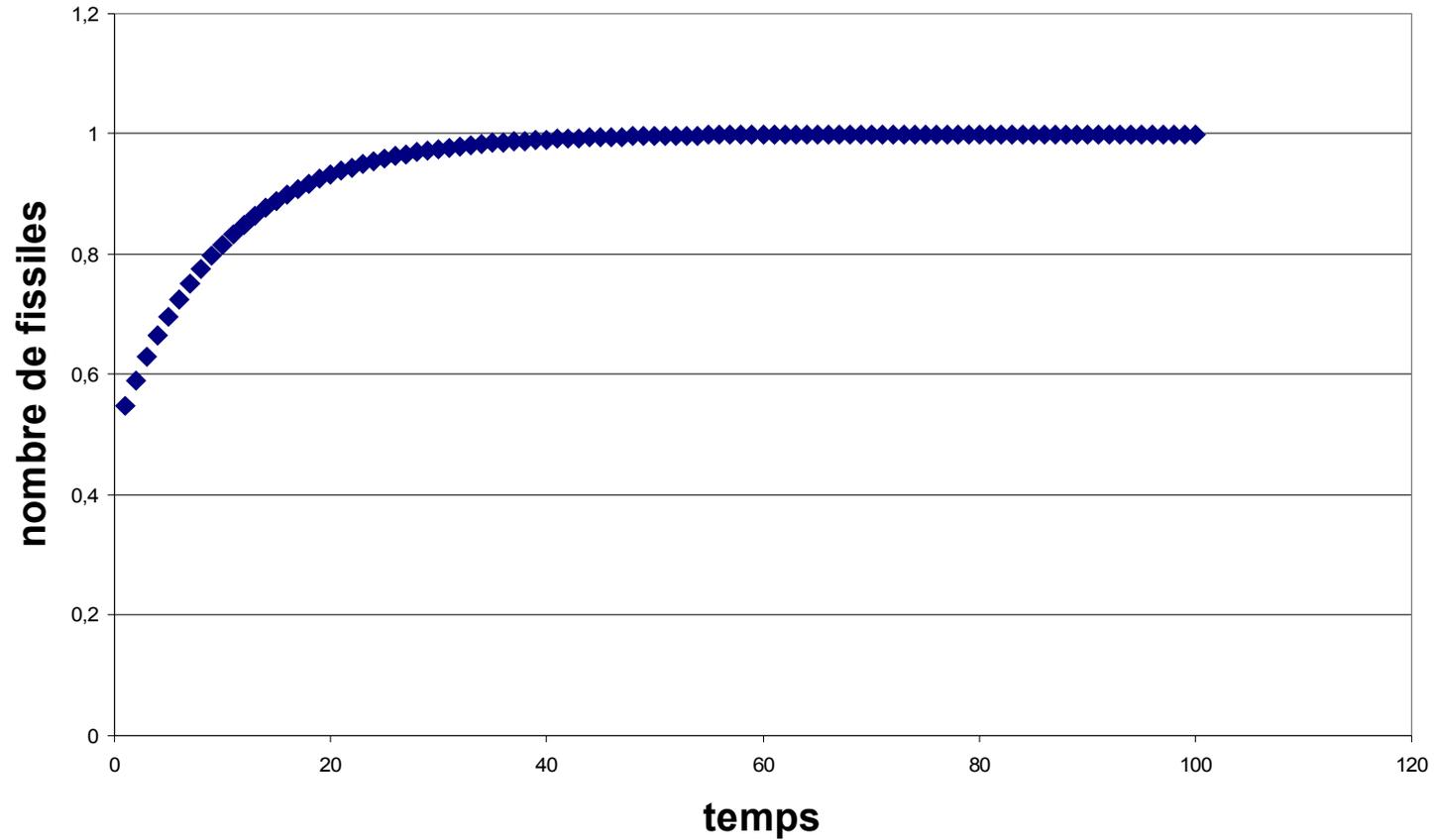
Evolution vers l'équilibre

Initial supérieur à équilibre



Evolution vers l'équilibre

inférieur à l'équilibre



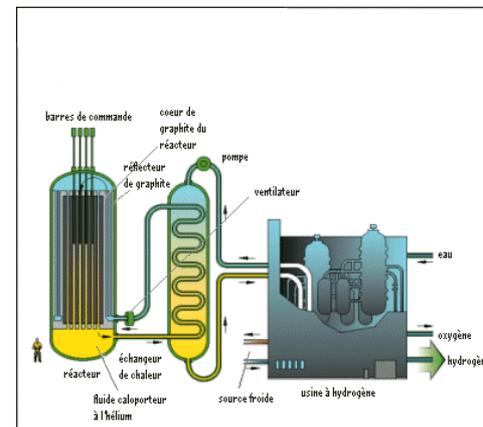
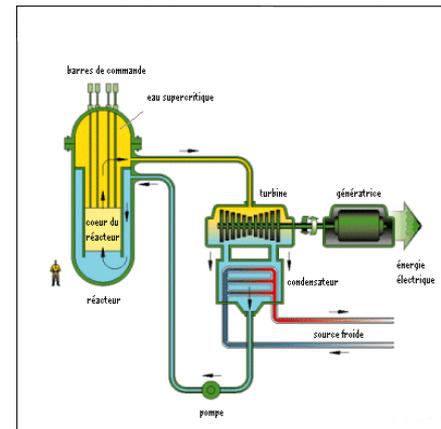
Condition initiale

$$k_{equ} = \frac{\eta}{2}$$

$$k_{ini} = \eta \frac{\frac{n_{fiss}}{n_{fis}^{eq}}}{\frac{n_{fiss}}{n_{fis}^{eq}} + 1} > 1 \quad \frac{n_{fiss}}{n_{fis}^{eq}} > \frac{1}{(\eta - 1)}$$

Les systèmes intermédiaires

- Eau super critique: eau, rendement, corrosion, stabilité, régénérateur (?)
- VHTR: combustibles, matériaux, hélium HT, retraitement, turbines

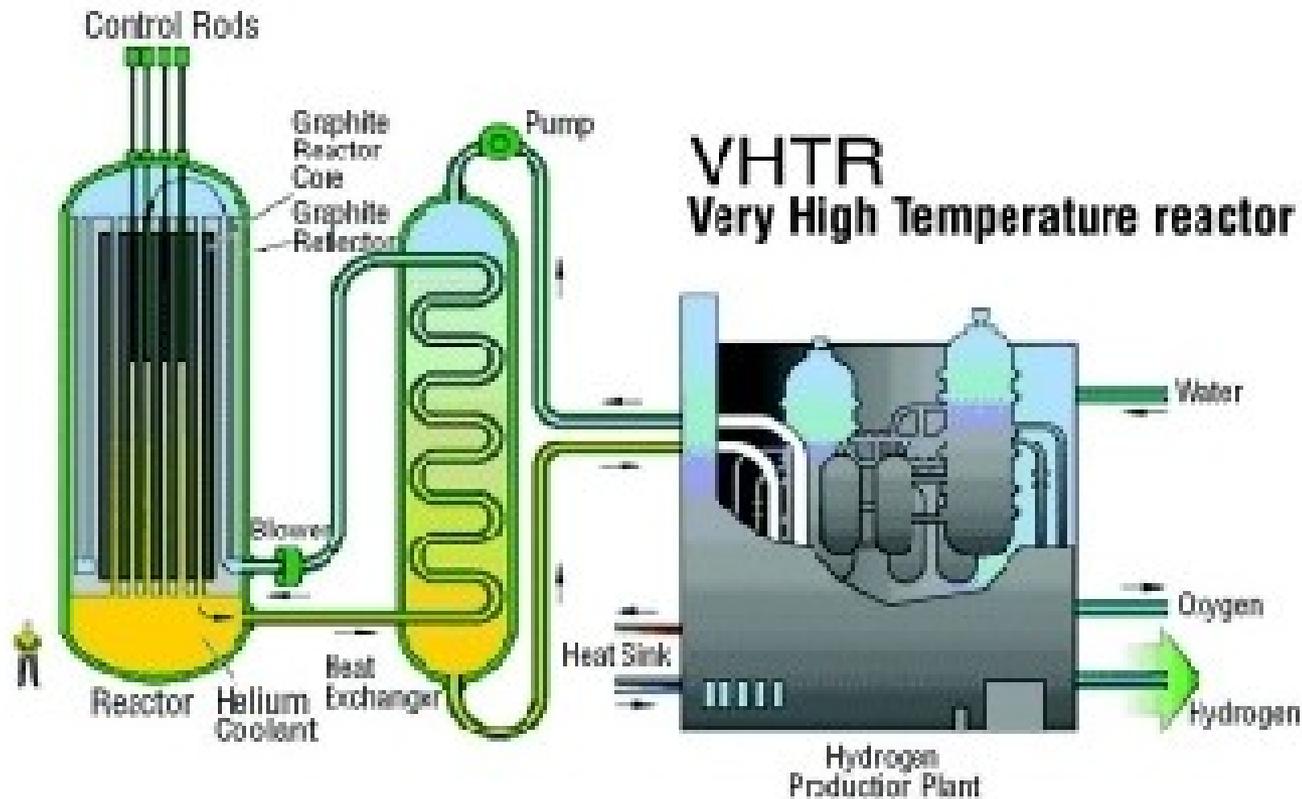


Réacteurs à gaz

Très hautes températures

- Combustible très réfractaire
- Refroidissement de secours par radiation
- Pas de fusion de coeur possible (petits réacteurs)
- Très bon rendements
- Co-génération possible
- Production d'hydrogène
- « burn-up » élevé
- Non proliférant
- Retraitement difficile

Très haute température 2

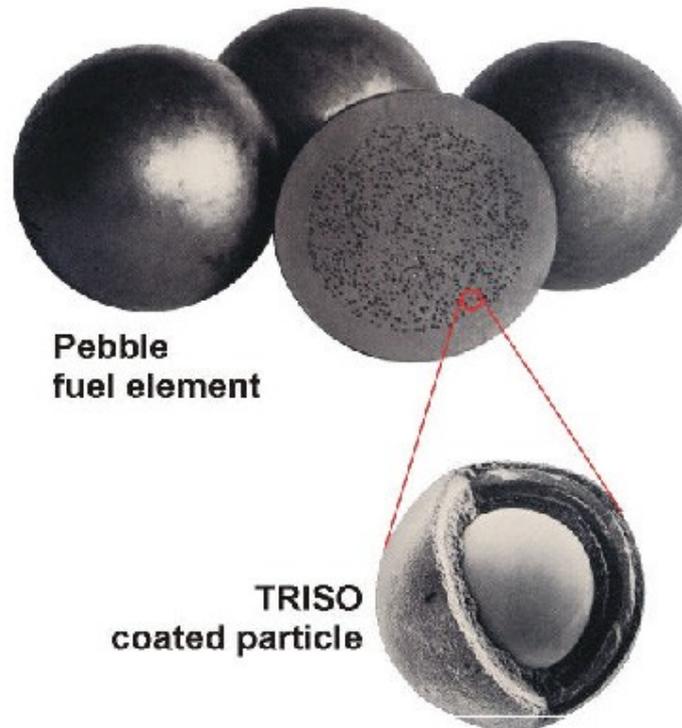


Combustible boulet

Technical Working Group 2 – Gas Cooled Reactor Systems

PBR Fuel

- Pebbles are 60 mm



Allegro

- Proposition CEA
- 50-80 MWth
- Rapide
- Combustibles céramiques (850 d°C)
 - Chaleur
 - Production H₂
- MO_x (600 d°C). ???

Projets de HTR

- Chine: 2x250 MWth=210 MWe
- Afrique du Sud: PBMR, 80 MWe (200 MWth)
- General Atomics : GT-MHR 250 MWe (600 MWth)

Autres Projets petits réacteurs

- **BREST** 300 MWe LMR RDIPE, Russia
- **SVBR** 100 MWe LMR Rosatom/En+, Russia
- **FUJI** 100 MWe MSR ITHMSO, Japan-Russia-USA
- Hyperion Pb-Bi 15 MWe anciennement UH3
ralentissement dépendant de la température +-H
- Petits réacteurs russes de type PWR (300 MWe) sur barge

Réacteurs refroidis avec des
métaux fondus

Réacteurs rapides

Surgénérateurs

1. Caloporteur Sodium Liquide

BN600, Phénix, Monju...

1. Caloporteur Plomb-Bismuth fondu

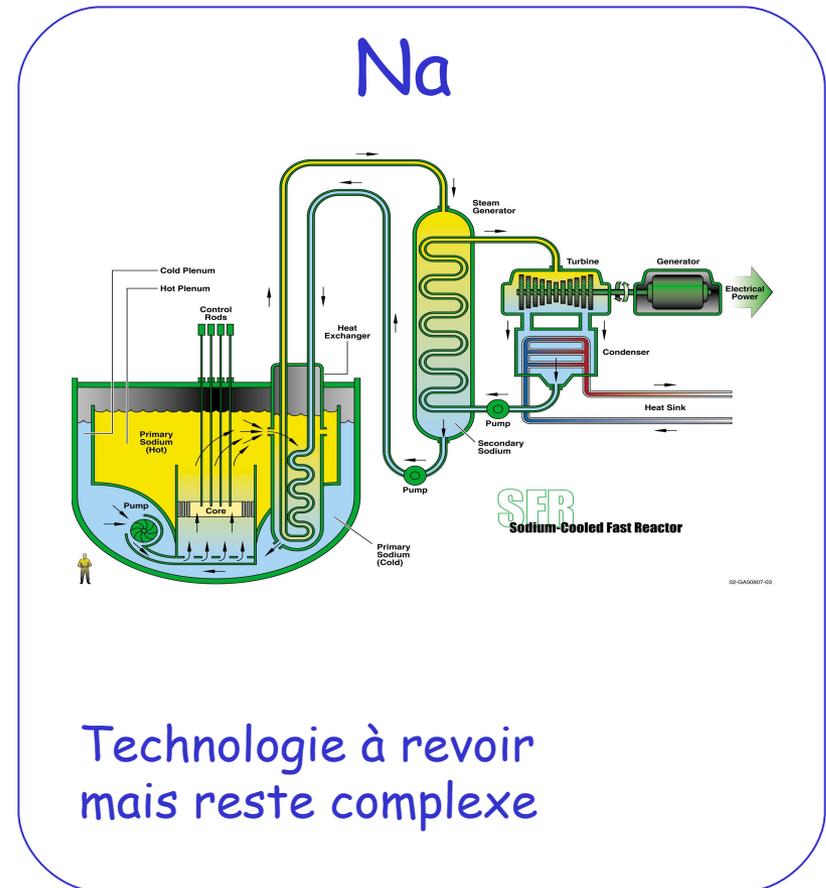
Sous-marins Russes

1. Caloporteur Gaz?

Réacteurs à Neutrons Rapides U/Pu

- **Besoin 2 neutrons**
- **Pas de Noyaux légers**
- **2 charges pour retraiter**
- **Pu et A.M.**

- **Sodium: conception, sûreté, Inspection, rendement**



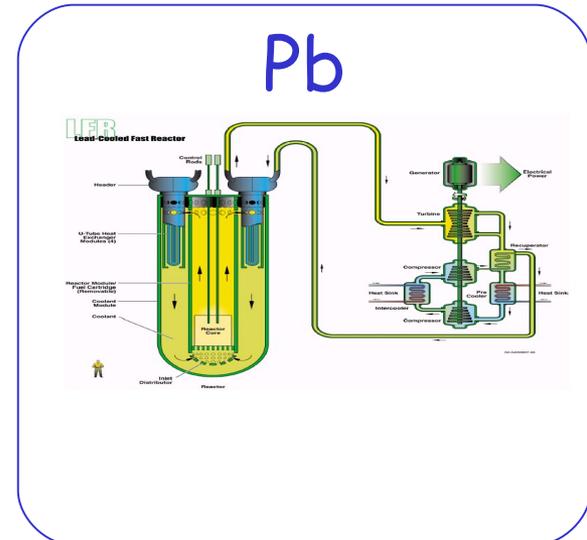
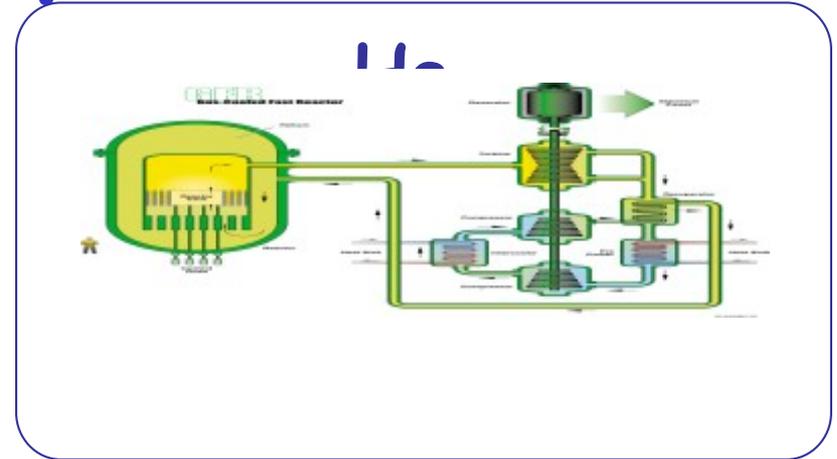
Réacteurs rapides U/Pu

➤ Rapides Gaz He:

- Combustibles et enveloppe
- Matériaux
- Pertes caloporteur

➤ Rapides plomb:

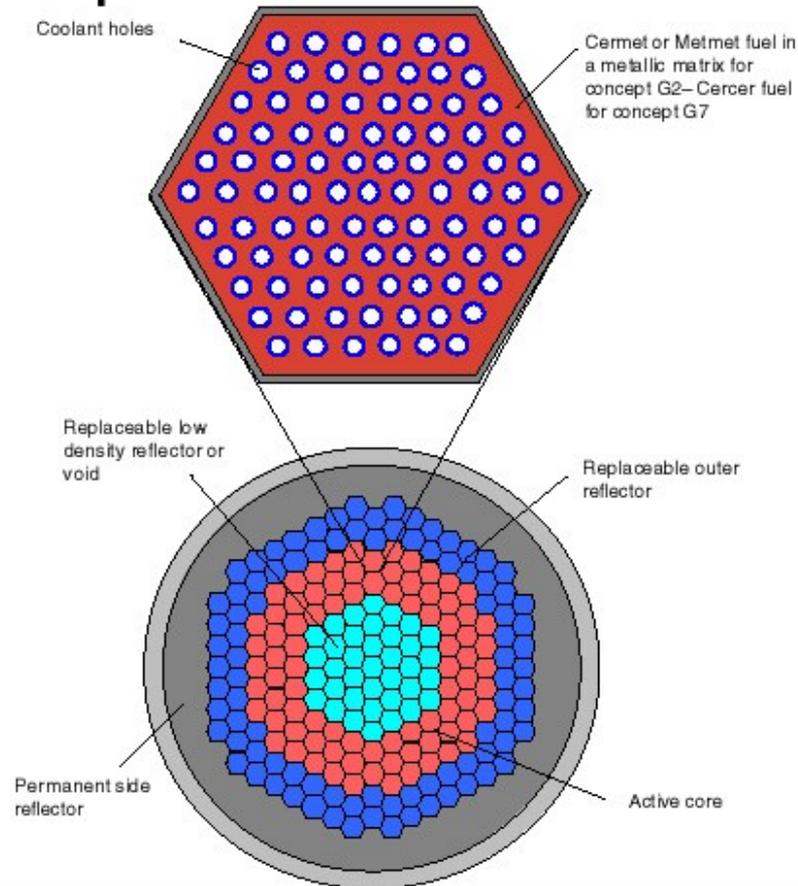
- Corrosion
- Conception
- Dimensionnement



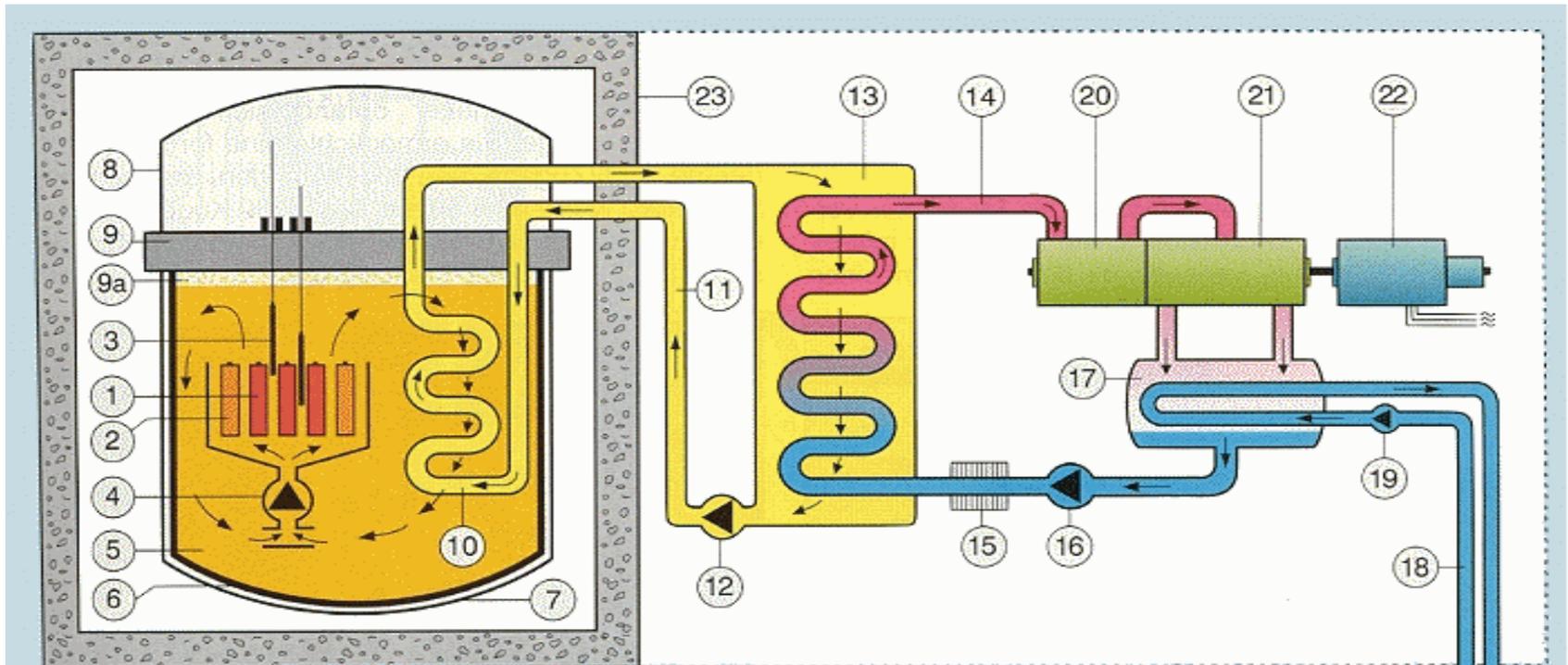
Combustible prisms

Technical Working Group 2 – Gas Cooled Reactor Systems

Example GFR Prismatic Fuel



RNR Sodium 1



- 1 - élément combustible fissile
- 2 - élément combustible fertile
- 3 - barre de contrôle
- 4 - pompe de circulation du sodium
- 6 - cuve du réacteur (acier inoxydable)
- 7 - cuve de sécurité
- 8 - enceinte de confinement
- 9 - couvercle
- 9a - Atmosphère de gaz de protection (Argon)
- 10 - échangeur de chaleur intermédiaire (1 parmi 4)
- 11 - circuit de sodium secondaire
- 12 - pompe de circulation du sodium secondaire

- 13 - Générateur de vapeur (1 parmi 4)
- 14 - vapeur
- 15 - pré-réchauffeur
- 16 - pompe à eau d'alimentation
- 17 - condenseur
- 18 - eau de refroidissement (fleuve)
- 19 - pompe à eau froide
- 20 - turbine haute pression
- 21 - turbine basse pression
- 22 - génératrice
- 23 - bâtiment réacteur

Fleuve

RNR2

- pression : 2 bar ;
- température : 600°C ;
- Réacteur piscine.
- combustible: MO_x U238, 14-20% Pu
- Echangeurs Na-H₂O
- Eau secondaire propre
- Burnup >120000 MWd/tU

$$\frac{dk}{dT} < 0$$

$$\frac{dk}{d\rho} < 0$$

RNR3

- Grande inertie thermique de la piscine Na
- Refroidissement passif possible de la chaleur résiduelle
- Production d'hydrogène par réaction
Eau-Na
- Empêcher une explosion hydrogène
- Feu de Na

Effet de Vide

Augmentation de température ou des fuites :

- Diminue la proportion de caloporteur et de ralentisseur par rapport au combustible
- Augmente les fuites
- Réacteurs thermiques : Durcissement du Spectre et augmentation de l'absorption ont des effets opposés :
 - REP: Effet Spectre dominant: la réactivité décroît
 - RBMK: diminution de l'absorption dominante: augmente la réactivité (ralentissement par le graphite)
- Réacteurs rapides: Compétition entre diminution de l'absorption et augmentation des fuites:
 - Grand réacteur(Super-Phénix: augmentation de la réactivité
 - Réacteurs plus petits (Phénix: décroissance de la réactivité

ASTRID

- Projet du CEA
- Incinération du Pu et des AM
- Peu ou pas surgénérateur
- N'intéresse ni la Chine ni l'Inde
- 600 MWe
- Pas de couvertures
- Résistance à la prolifération
- Grand burnup: mauvais Pu

PRISM

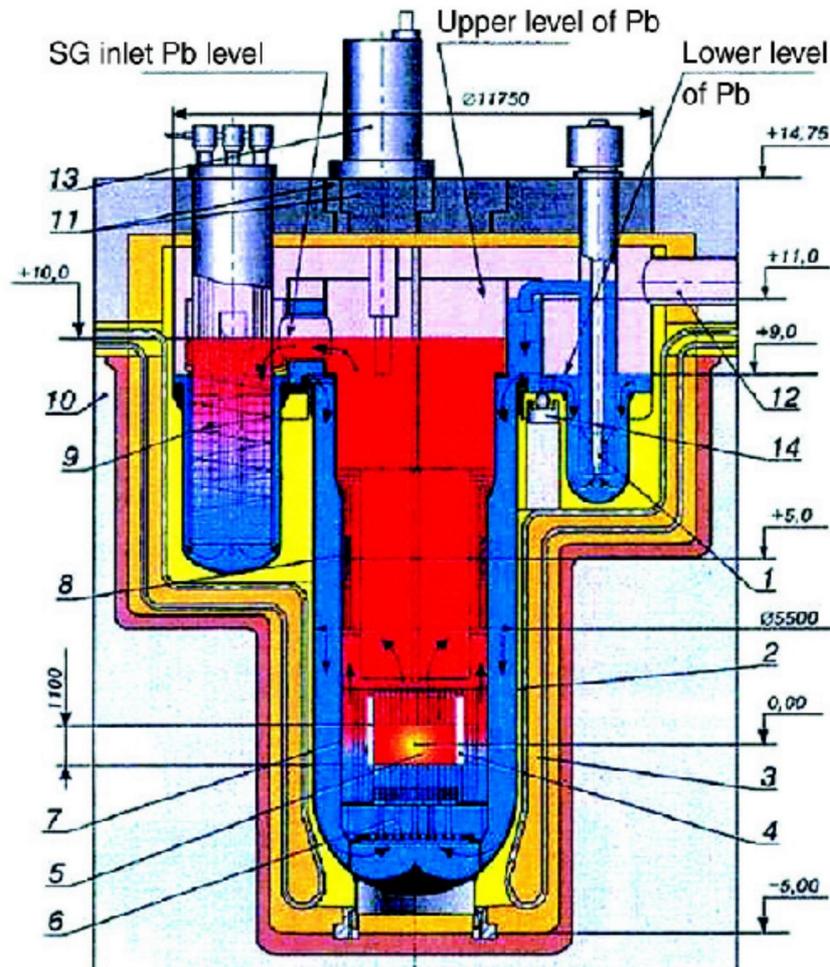
- Système rapide refroidi par métal liquide
- Refroidissement passif à l'arrêt
- Ensemble modulaire: 2 modules de 300 MWe dans la même piscine

Russie

- BN 600 Excellentes performances
 - Devenu incinérateur du Pu militaire
- BN 800 en construction.
 - Proche du dessin BN 600
 - Taux de surgénération de 1,3
 - Combustibles Nitrures, MOx, Métal
 - 2 vendus en Chine, construction débute en 2011
- Projet BREST 300
 - Refroidi au Pb (550 d°C)
 - Retraitement sur place

Réacteurs à plomb liquide

Réacteur au Plomb



Exemples Pb

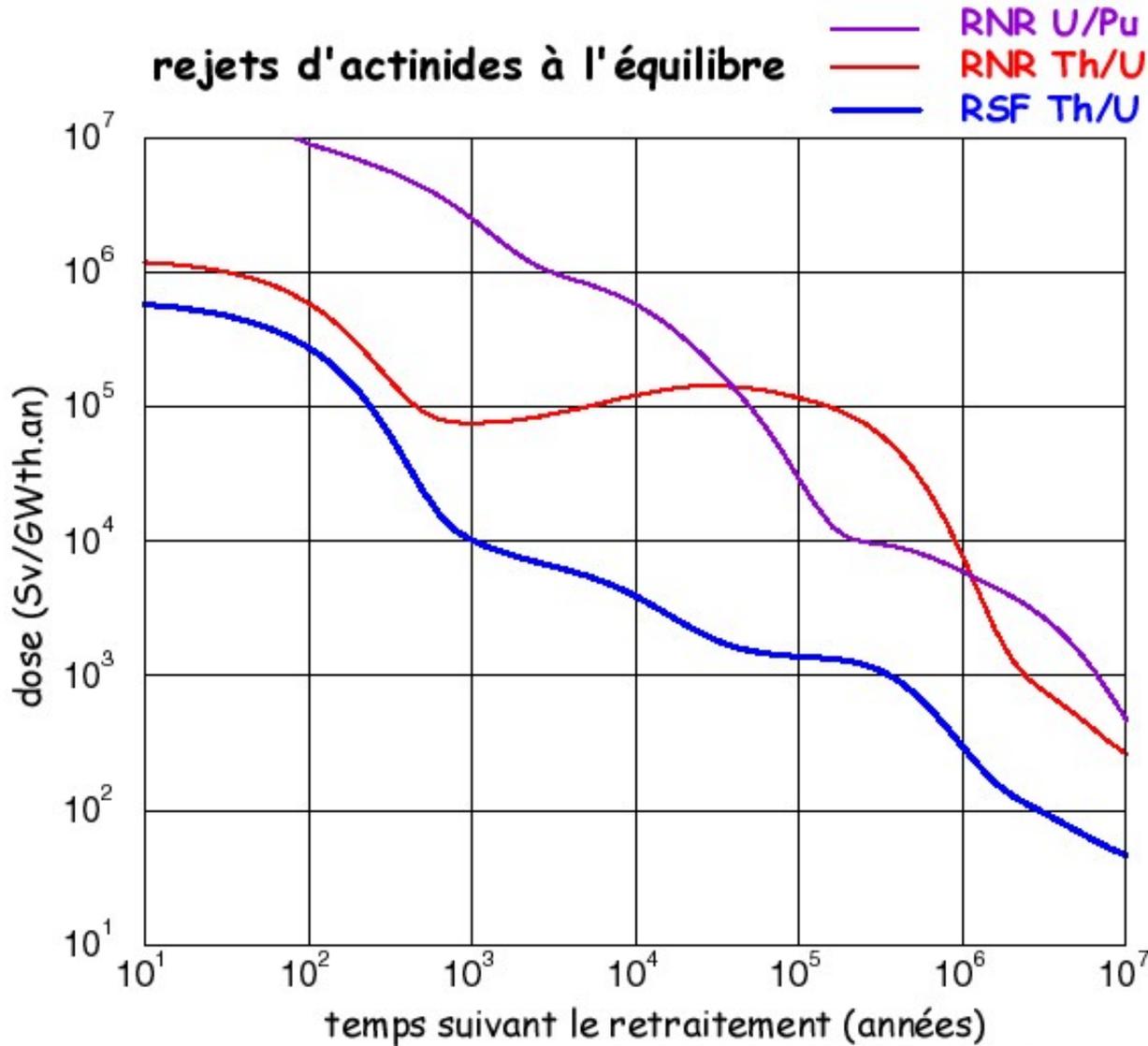
- Projet BREST 300 Russie
 - Refroidi au Pb (550 d°C)
 - Retraitement sur place
- Projet ELSY (600 MWe) Italie (ANSALDO) Pb ou Pb-Bi

Autres Projets petits réacteurs

- **BREST** 300 MWe LMR RDIPE, Russia
- **SVBR** 100 MWe LMR Rosatom/En+, Russia
- **FUJI** 100 MWe MSR ITHMSO, Japan-Russia-USA
- Hyperion Pb-Bi 15 MWe anciennement UH3
ralentissement dépendant de la température +-H
- Petits réacteurs russes de type PWR (300 MWe) sur barge
Extension de la durée entre déchargements (15 ans)
- Co-génération d'électricité et de chaleur(russes)

- Actinide Radiotoxicities

radiotoxicités



• radiotoxicities

$$R(t) = \sum_i r_i \lambda_i N_i(t)$$

r_i = dose factor (Sv/Bq)

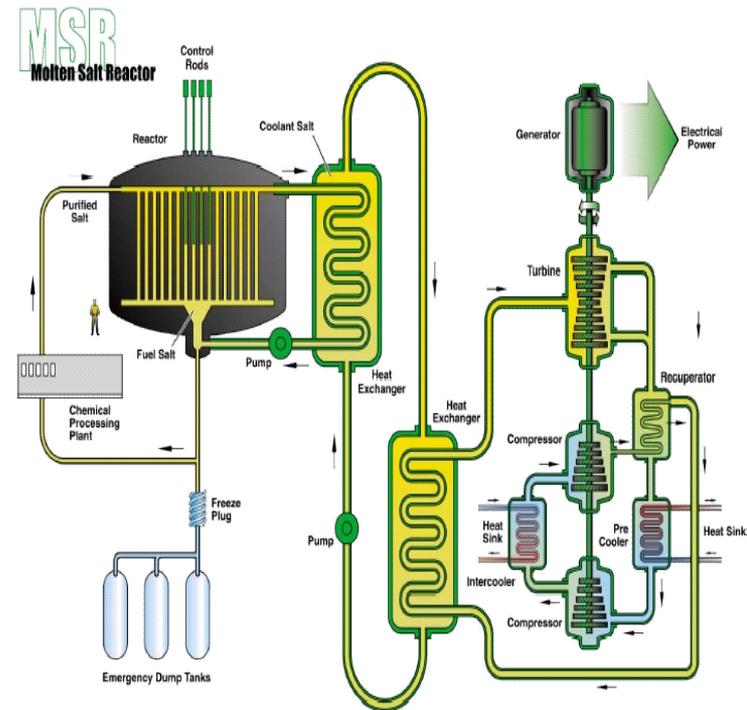
Réacteurs à sels fondus

Combustibles liquides

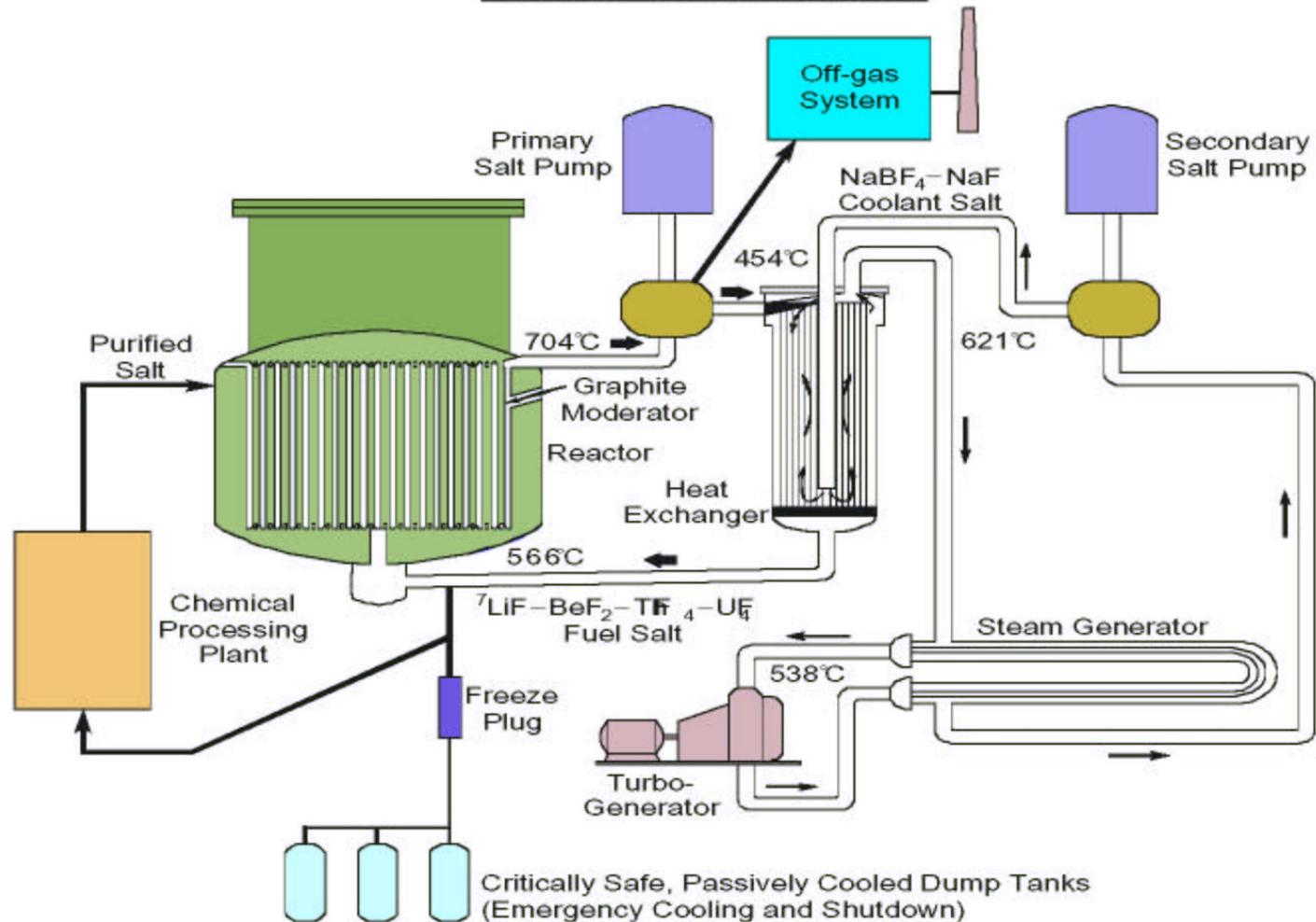
- Mélanges de fluorures d'actinide, de berylium et de lithium
 - Extraction (Quasi) continue des F.F. et addition de Fertile-Fissile
 - Contrôle de la réactivité
 - Très bonne sûreté envers les accidents de criticité
 - Possibilité d'incinérer les fissiles burning sans régénération à partir de fertile
 - Petit inventaire possible pour les systèmes thermiques
- Faible expérience
- Difficultés avec les contraintes de sûreté

Réacteurs à sels fondus

- Sels fondus fluorures: excellents caloporteurs HT sans pression solvant des actinides
- Thorium: abondant, peu d'A.M., pas de contrainte de spectre mais régénération difficile



Molten Salt Reactor



1. Réévaluation d'un projet de RSF surgénérateur

a. Présentation et modélisation

- *L'unité de retraitement :
3 extractions successives*

- **Fluoruration préalable de l'U**

- $UF_4 + F_2 \rightarrow UF_6$ volatile
- Extraction de l'U à 99%

- **Procédé intéressant**

- Inventaire d'U minimisé
- Autres avantages à suivre

- **Extraction préalable des NL**

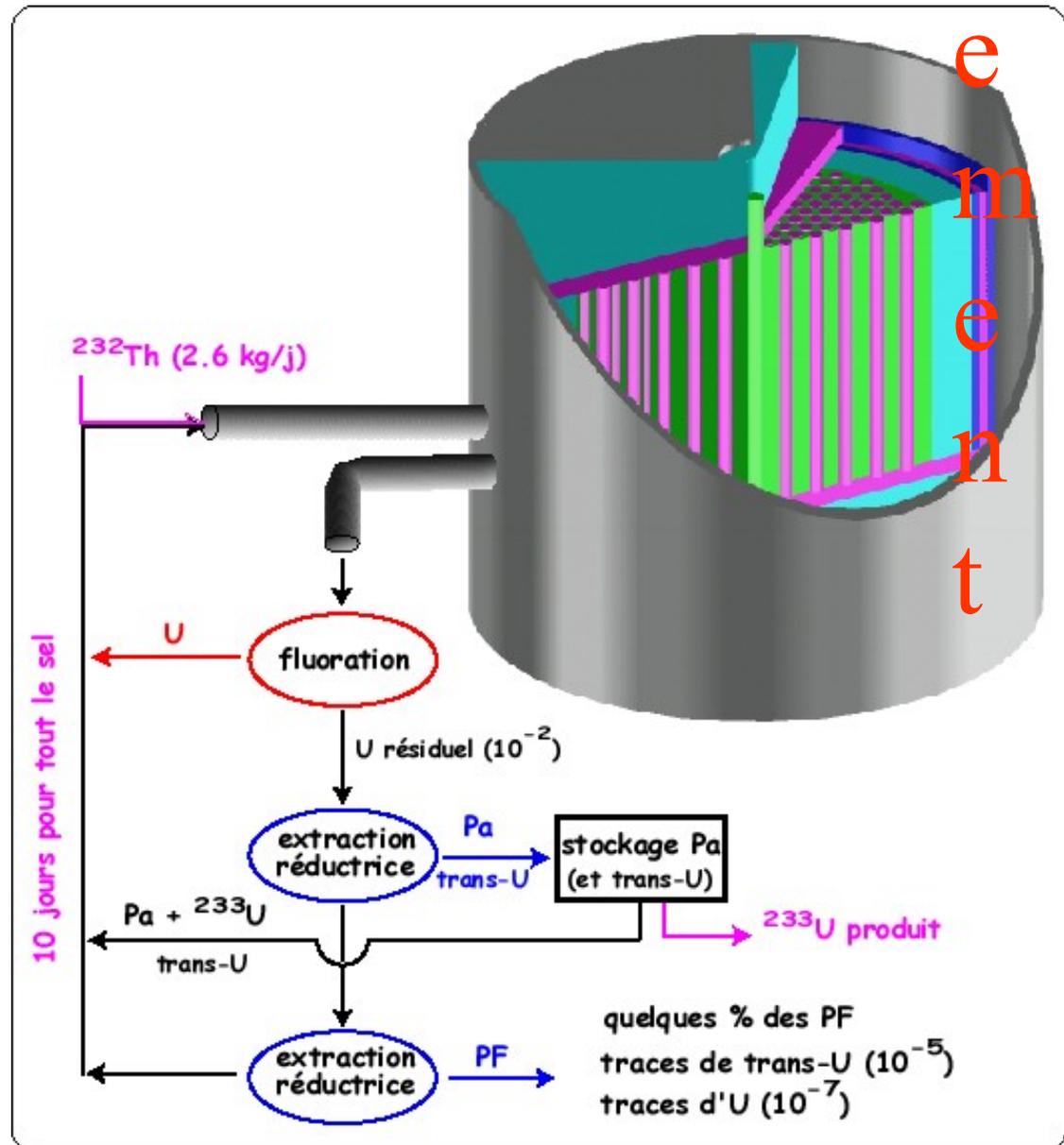
- **Décroissance du ^{233}Pa**

- Au moins 3×27 jours
- Extraction ^{233}U surgénéré
- Réinjection du reste

- **Extraction des PF (T = 10 j)**

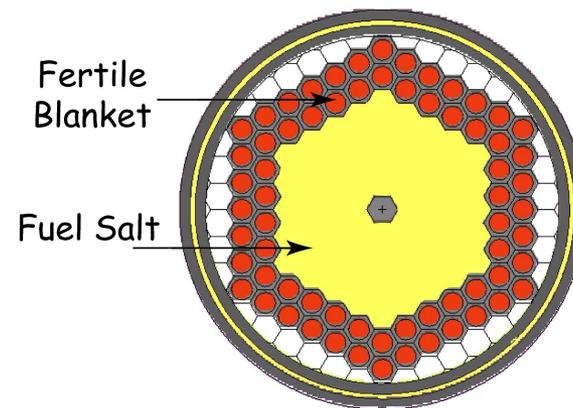
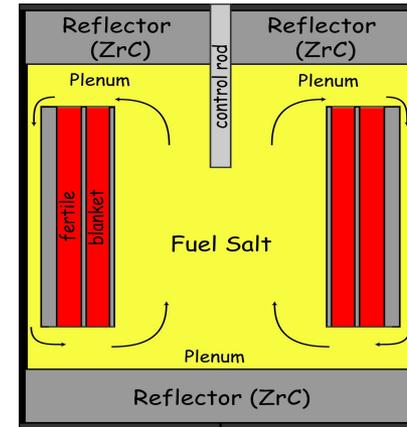
- Bullage d'hélium (gaz)
- Extraction réductrice
 - Terres rares à 20%
 - Th maintenu en sel

- **Ajout de Th (inv. NL constant)**



Réacteurs à sels fondus

- TMSR sans modérateur:
- **Sûreté passive:** pas de réserve de fissile, très bons coefficients
- **Traitement en ligne simplifié**
- **Possibilité de démarrer avec du Pu et A.M. des REP**



Parametric study

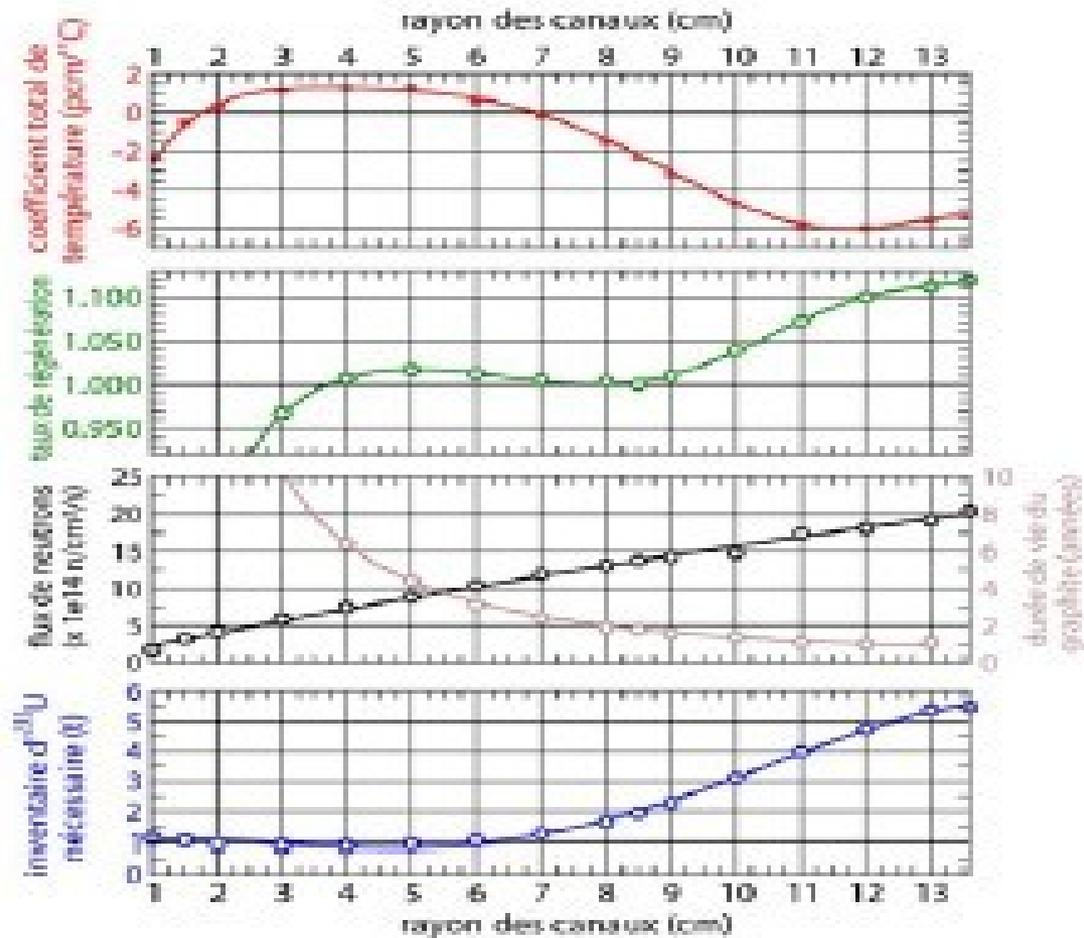
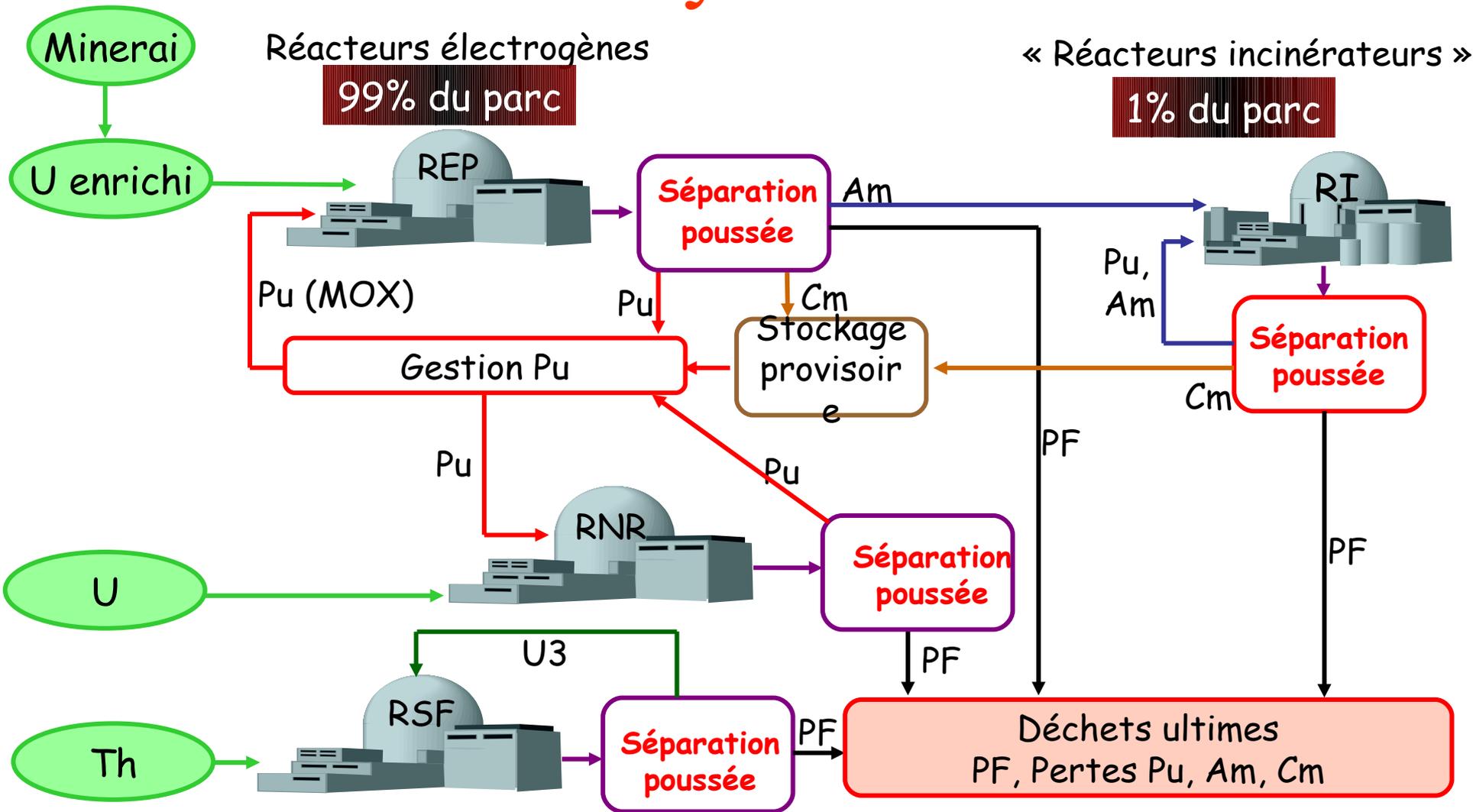


Figure 2 : Évolution de différents paramètres en fonction du rayon des canaux de sel.

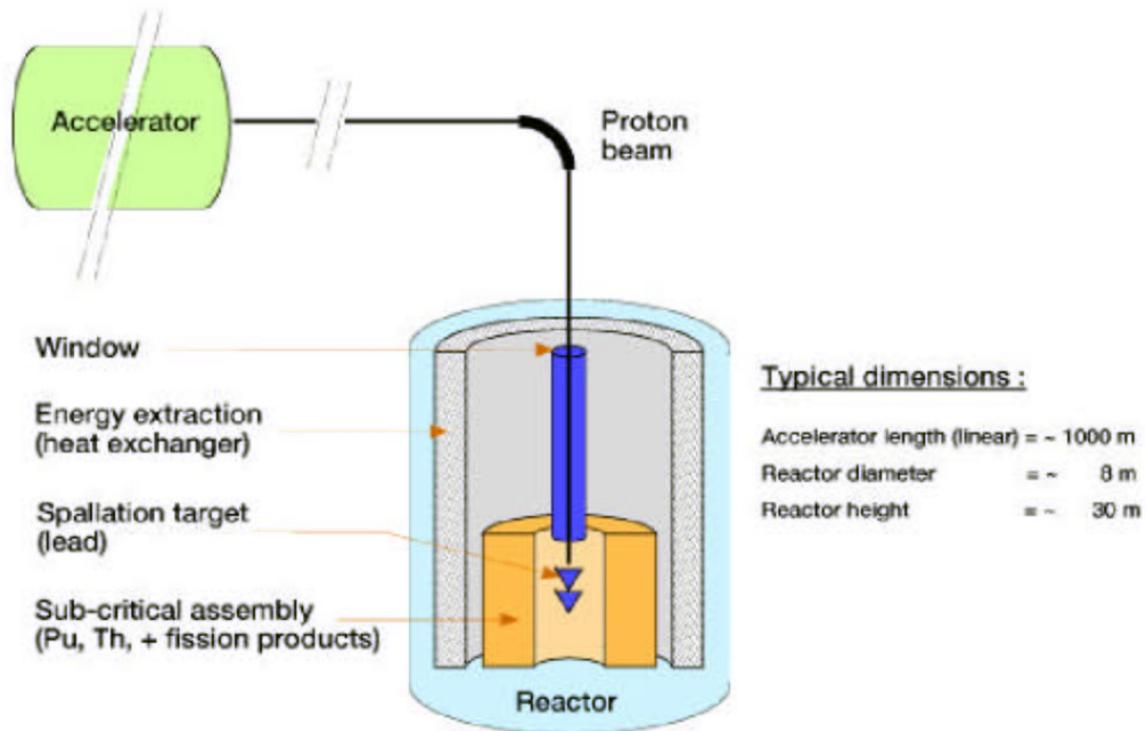
cycle



Systemes hybrides

- Faisceau de protons haute énergie sur cible Pb:
Produit 30n/proton de 1 GeV
= Source de neutrons
- Réacteur sous-critique $k=0,9..0,98$
- Gain en neutrons: 10..50
- 300..1500 n/p
- 60..3000 GeV/GeV proton
- Incinération des actinides mineurs
- Test de nouveaux systèmes

SCHÉMA DE PRINCIPE DE L'ADS



CANDU 2

- Moderateur: D2O
- Caloporteur: D2O ou H2O pressurisé
- Tubes de force
- Combustible: Uranium naturel possible
- Surgénération Thorium?
- Machine de déchargement en ligne
- Burn-up: 5 MWd/ton U
- Proliférant Pk, In
- Bons paramètres de sûreté