



Nucléaire : La 4^{ème} Génération Forum International (GIF)

Jacques Bouchard

Conseiller de l'Administrateur Général du CEA

Ex-Président du Forum International GEN IV



Les Motivations pour le Futur

- **Besoins croissants d'énergie**
 - Principalement dans les pays en développement.
 - La croissance continuera pour deux ou trois décennies.
 - Quelques délais dus à la crise.
- **La disponibilité et l'économie.**
 - Forte augmentation des coûts des hydrocarbures
 - Les ressources fossiles ne sont pas infinies
 - Les sources non-conventionnelles aident provisoirement
 - Les renouvelables ont leurs propres limites
- **Les Risques Climatiques**
 - Préoccupation croissante depuis Kyoto
 - Les nécessaires économies d'énergie ne suffiront pas
 - Toutes les sources non-carbonées sont à développer.



Les Limites du Nucléaire Actuel

- Une faible utilisation de l'uranium naturel (<1%) avec des conséquences sur les ressources et les déchets.
- L'uranium est abondant mais sa récupération à faible coût est limitée.
- La partie non utilisée de l'uranium naturel est entreposée mais pose à terme un problème de déchets si elle n'est pas valorisée.
- Le plutonium et les autres actinides créés dans le combustible des réacteurs à eau devraient à terme être également traités comme déchets, le recyclage MOX ne faisant que différer l'échéance.



Bref Historique de la 4^{ème} Génération

- En 1999, le Congrès Américain demande au DOE de lancer les études d'une 4^{ème} génération. Objectifs: faire face à une croissance prévisible de la demande et relancer la suprématie US.
- En 2000, Poutine dans un discours aux cérémonies du millenium, propose une collaboration internationale sur les idées russes de 4^{ème} génération (BREST).
- La même année, le DOE invite les principaux pays nucléaires à participer à l'initiative américaine.
- En 2001, le forum international GIF est créé avec neuf pays signataires d'une charte. Quatre autres rejoindront entre 2002 et 2005. Aujourd'hui, 10 sont actifs et 3 en veille.

Generation IV International Forum

Fourth Generation Nuclear Systems for a Sustainable Energy Development



Argentina



U.S.A.



United Kingdom



Brazil



Canada



China



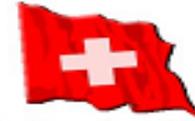
E.U.



France



Japan



Switzerland



South Korea



South Africa



Russia



Les Principes du Forum

- **Un accord général entre les pays participants (Traité) signé par les gouvernements (avec ratification si nécessaire) et mis en application par le ou les organismes publics désignés (en France, le CEA)**
- **Une coopération en recherche et développement sur des systèmes identifiés avec les principes suivants:**
 - Un encadrement juridique (accords système et projet) garantissant la confidentialité et le respect de la propriété intellectuelle;
 - Tous les apports sont en nature (background ou résultats de travaux) et comptabilisés;
 - Thèmes de recherche et modalités de réalisation décidés en commun au niveau adapté (forum, système ou projet);
 - Secrétariat technique assuré par l'AEN/OCDE.

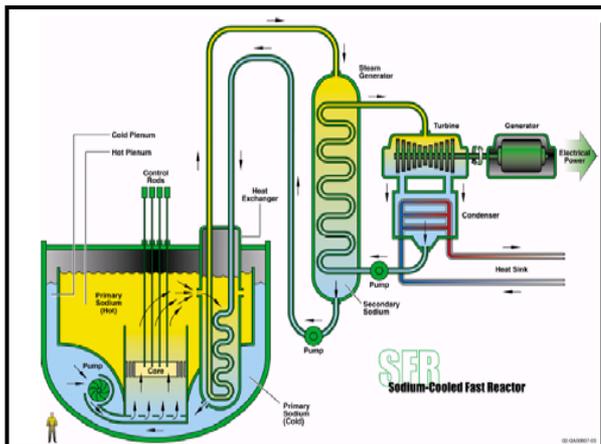


Les Objectifs du Forum Génération IV

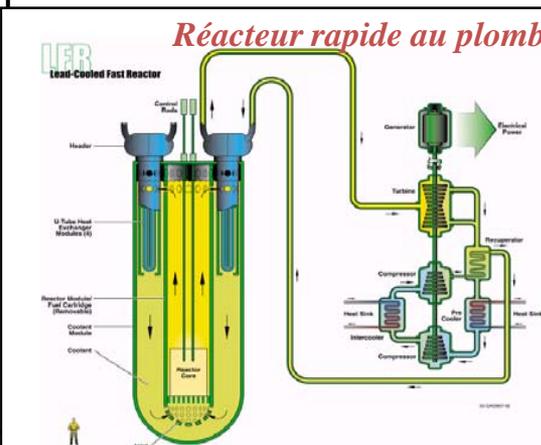


- **Une maturité technique vers 2030**
- **Des progrès en continuité**
 - **Compétitivité économique**
 - **Sûreté et fiabilité**
- **Des avancées significatives :**
 - **Minimisation des déchets**
 - **Economie des ressources**
 - **Sécurité : non prolifération, protection physique**
- **Une ouverture à d'autres applications :**
 - **Chaleur à haute température pour l'industrie**
 - **Vecteur hydrogène, eau potable**

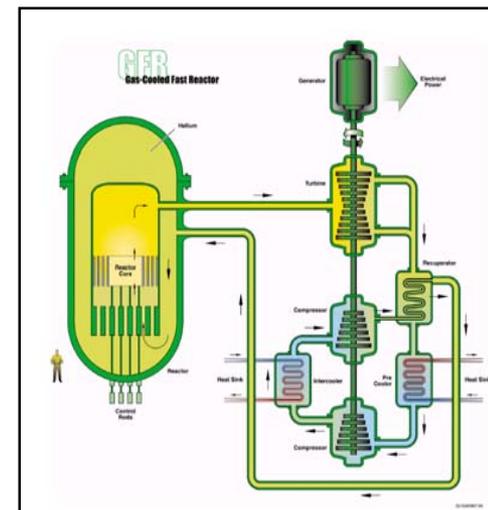
Les six concepts retenus



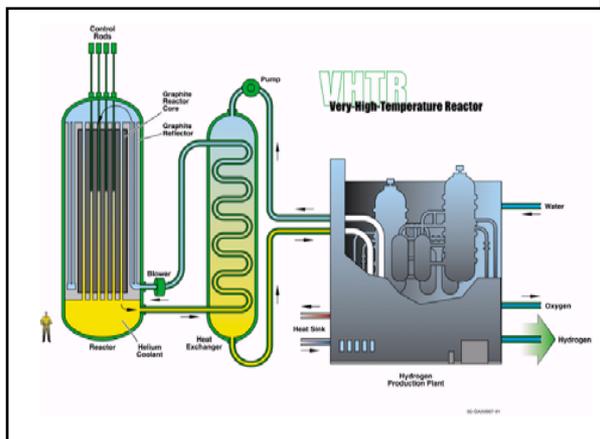
Réacteur rapide Sodium



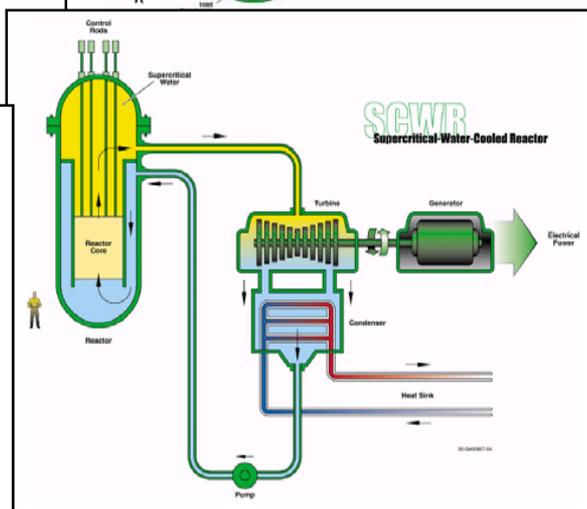
Réacteur rapide au plomb



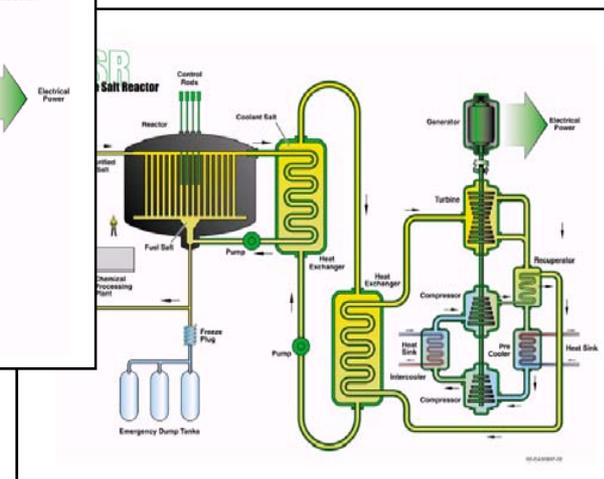
Réacteur rapide à gaz



Réacteur à gaz, Très Haute Température



Réacteur à eau supercritique



Réacteur à sels fondus



Les grands thèmes de développement



- **Conception des réacteurs rapides**
- **Recyclage global des actinides**
- **Production d'hydrogène**
- ***Réacteurs pour pays émergents***



Conception des réacteurs à neutrons rapides

Quoi de neuf ?

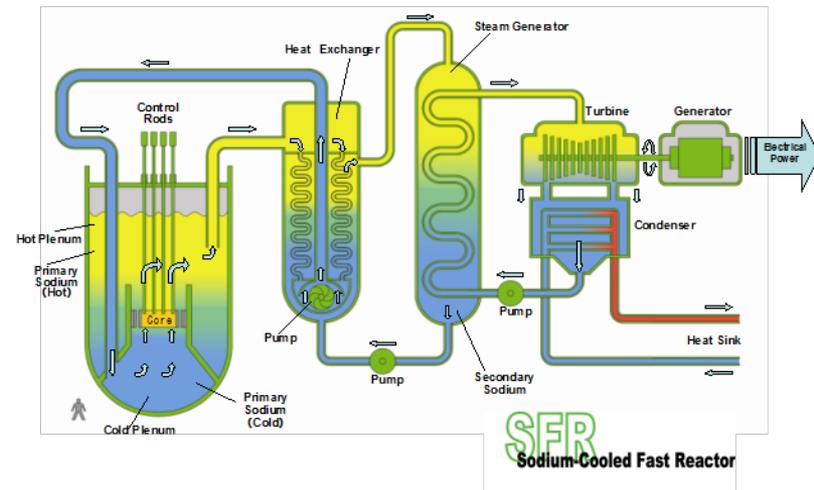
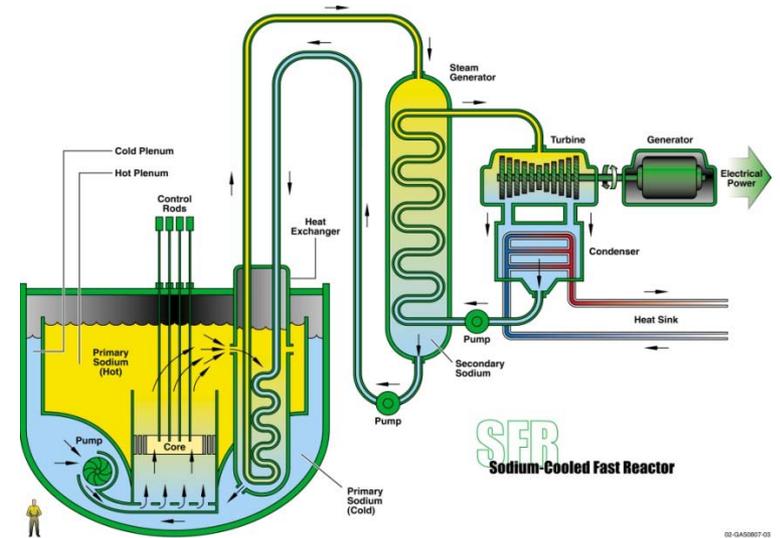


- **Un choix de caloporteur qui doit rester ouvert**
 - Sodium
 - Plomb ou plomb – bismuth
 - Gaz
 - Eau supercritique

- **De nouvelles spécifications**
 - Coût d'investissement réduit
 - Sûreté niveau 3^{ème} génération
 - Inspection en service
 - Résistance à la prolifération

SFR: Le RNR à Caloporteur Sodium

- **Recyclage global des actinides**
- **Approche de sûreté passive**
- **Réduction du coût d'investissement**
- **Inspection en service**
- **Choix du fluide secondaire**
- **Combustible avec actinides**



SUPERPHENIX



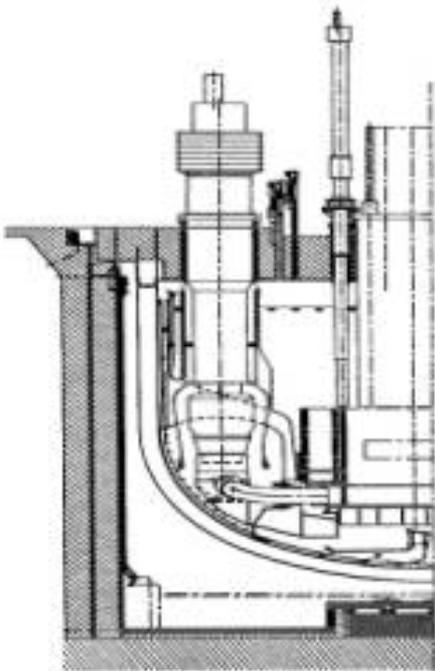
Réacteur de 1200 MWe à Creys-Malville (France)
Démarrage: 1985; Arrêt définitif: 1997



Les évaluations économiques EFR (1998)

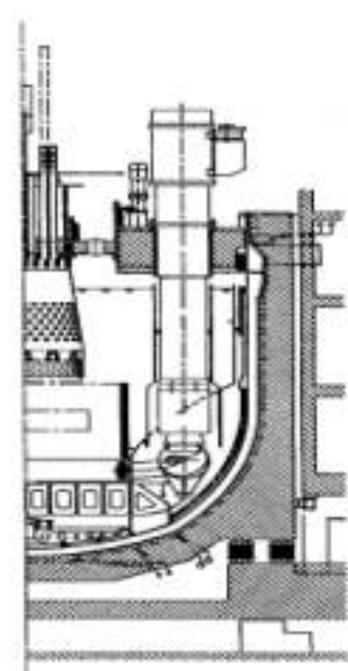
3000 MWth
1180 MWe net

3600 MWth
1470 MWe net



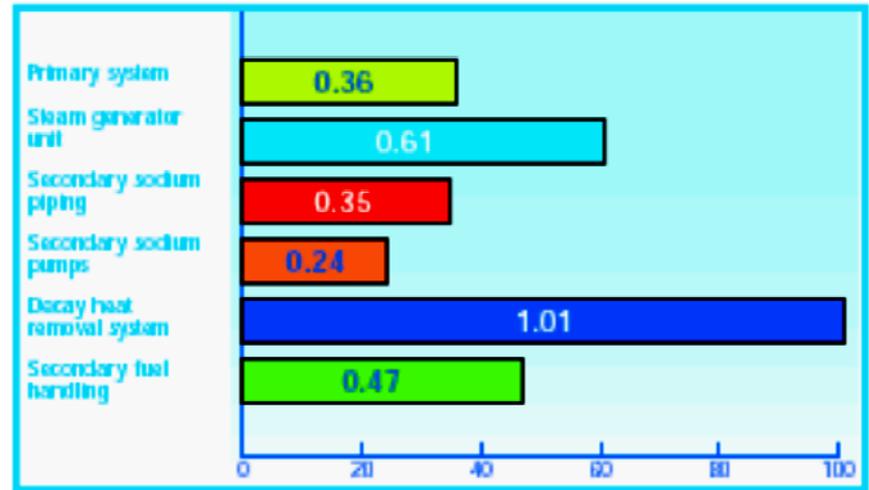
Superphénix

Cuve principale ø 21m
SPX1



EFR

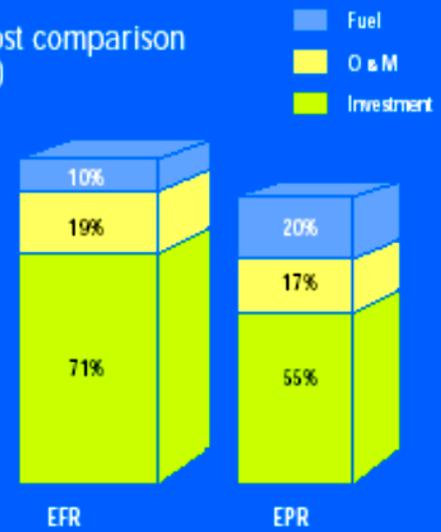
Cuve principale ø 17.2m
EFR



EFR vs SPX1: Comparison of specific steel weight in t/kWe

EFR vs EPR generating cost comparison (Costs normalised to 100% for EFR)

These data are for series built plants in comparable industrial and marketing conditions. The first-of-a-kind EFR should have higher construction cost, lesser availability performance and higher fuel cycle costs due to the lack of FR dedicated fuel fabrication and reprocessing facilities.



Le réacteur russe BN 600

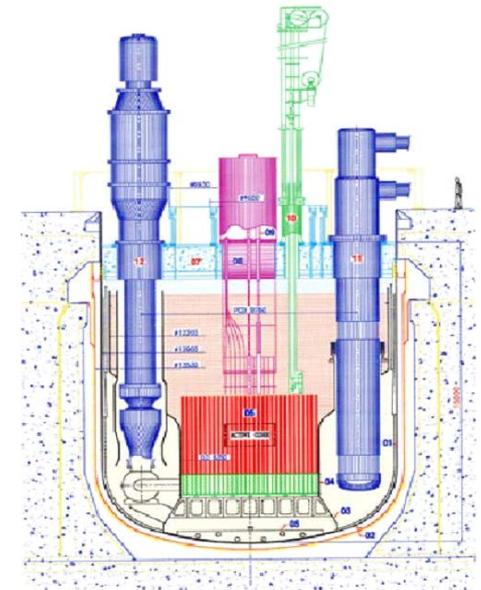


Centrale de Beloyarsk,
Réacteur de 600 Mwe, concept intégré, refroidi au sodium

Nouvelles réalisations



PFBR (India)



BN 800 (Russia)



CEFR (China)

Thèmes de Développement pour SFR

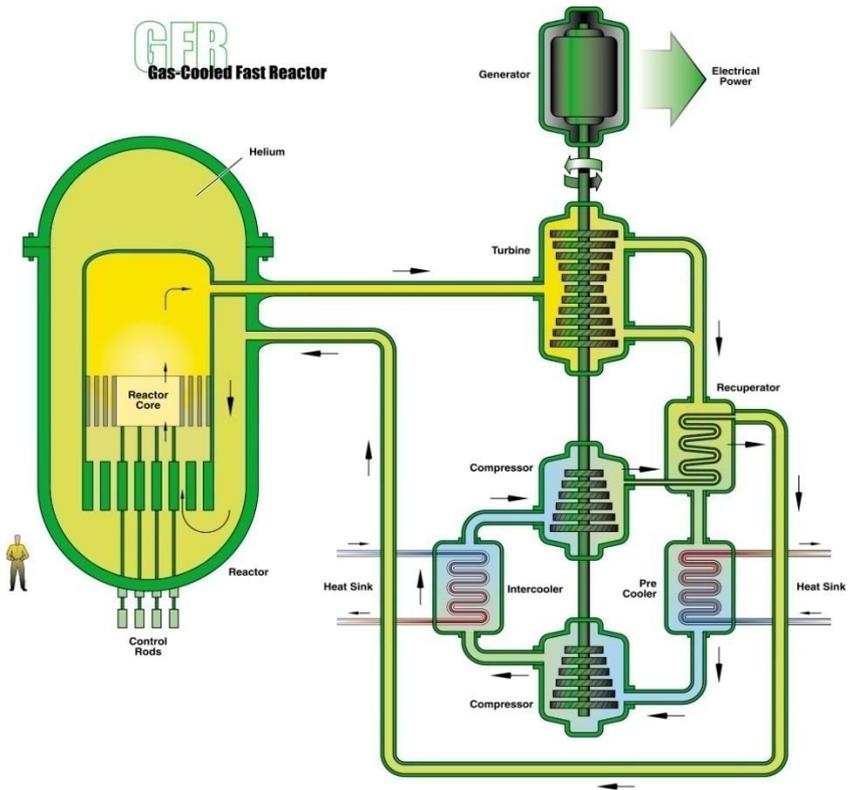
- **Combustible**
 - Nature et fabrication
 - Matériaux de gainage
 - Teneur en actinides mineurs
- **Conversion d'énergie**
 - Cycle vapeur ou cycle gaz
 - Conception des échangeurs
- **Manutention**
- **Sûreté**
 - Accidents graves
 - Inspection en service
 - Feux sodium

A
S
T
R
I
D

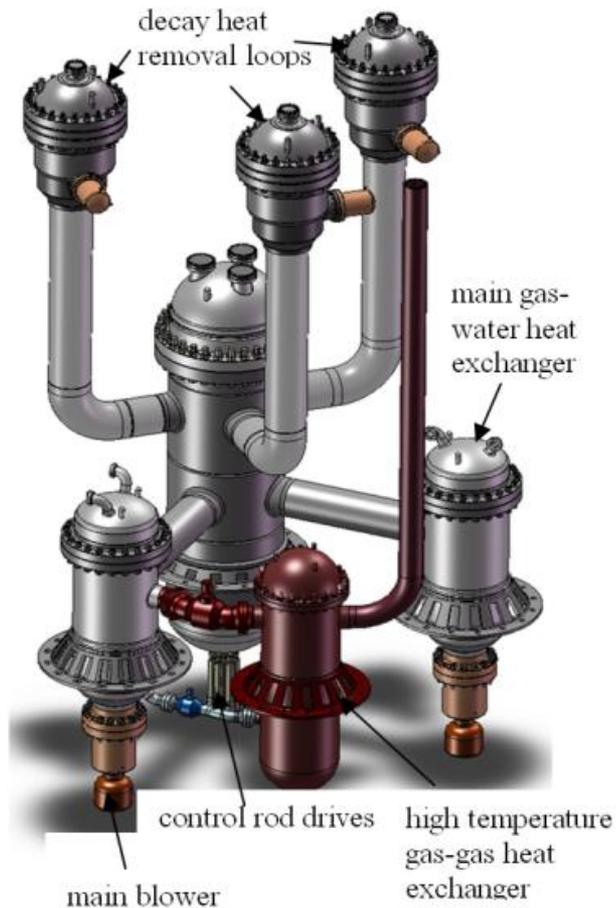
GFR : Un RNR avec Caloporteur Hélium

- Une alternative au RNR avec caloporteur métal liquide
- Gamme de puissance: 300 – 1200 MWe
- Température de sortie hélium {850-1000°C}

- Combustible robuste
- Approche sûreté passif + actif
- Cogénération électricité + hydrogène



Projet de Réacteur Expérimental ALLEGRO



Réacteur Expérimental # 50 MWth

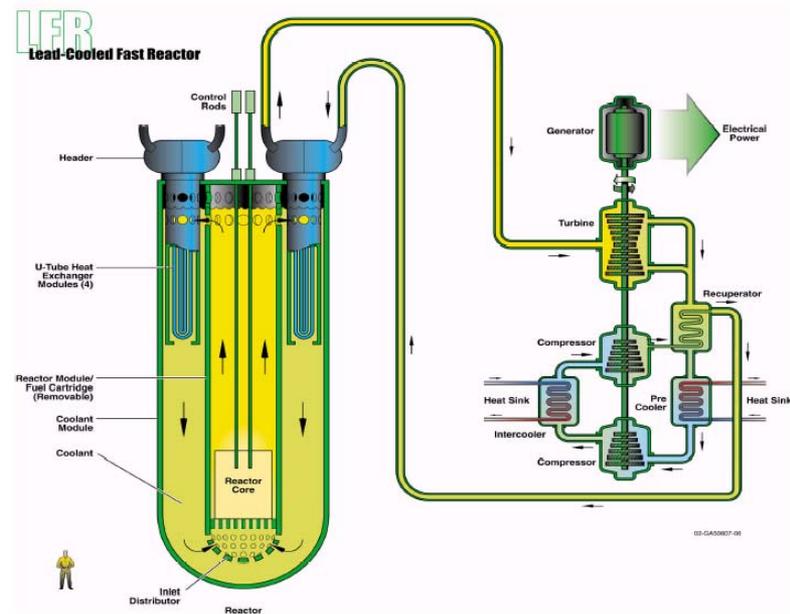
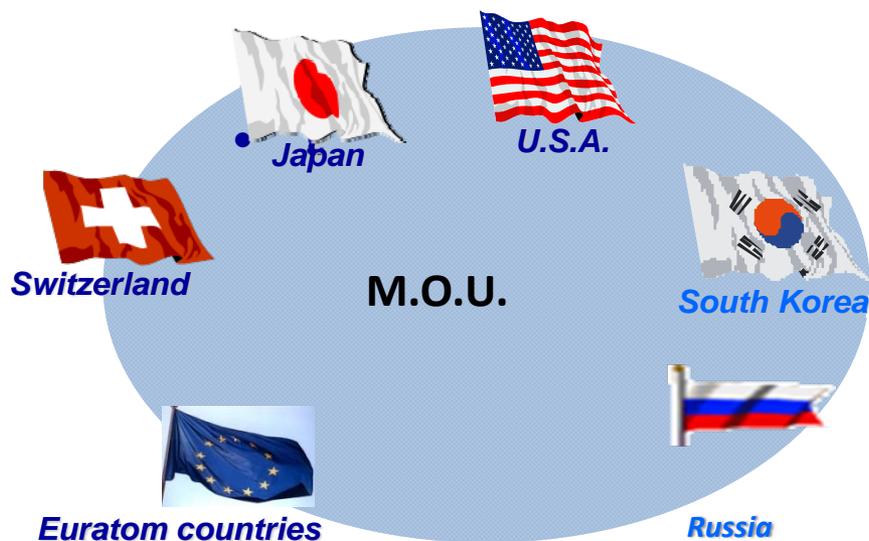
Coopération Européenne
(décision de choix en 2012)

Construction envisagée en Hongrie
ou République Tchèque

Possibilité de tester les choix de
combustible et les options de sûreté

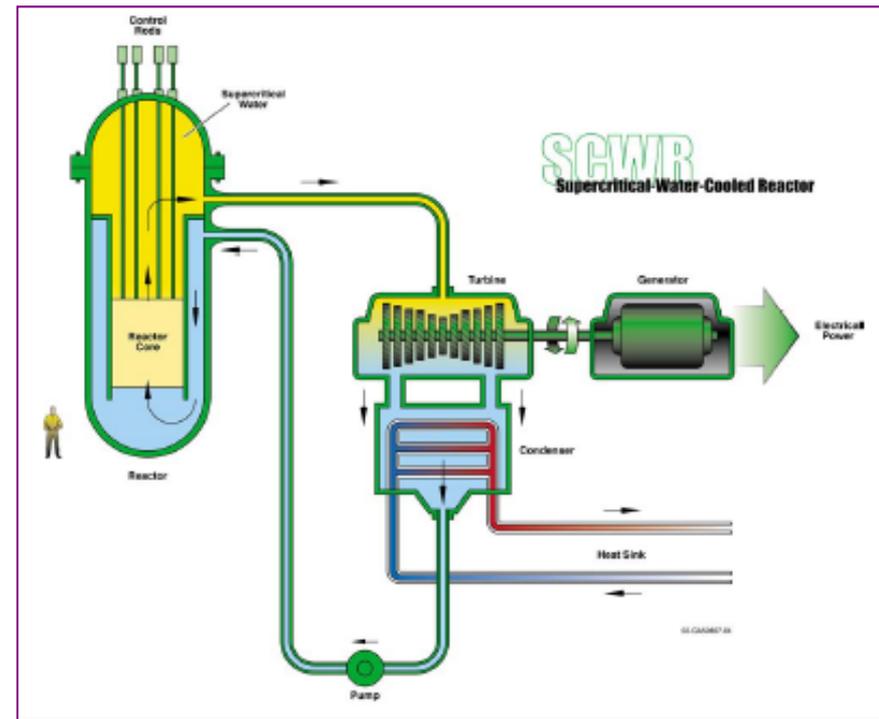
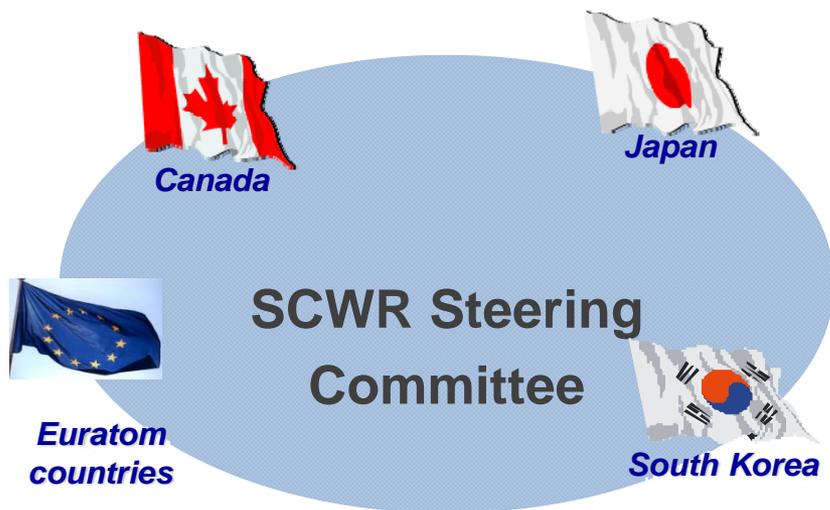
LFR : Le Réacteur Rapide au Plomb

- Réacteurs de puissance : 1200 MWe
- Réacteurs modulaires : 300-400 MWe
- Nuclear Battery : 50-100 MWe
- Caloporteur Pb ou Pb-Bi
- Matériaux résistant à la corrosion par le Pb à 550-800 ° C
- Comb avec actinides (métal ou nitrure)
- cycle de 10-30 ans

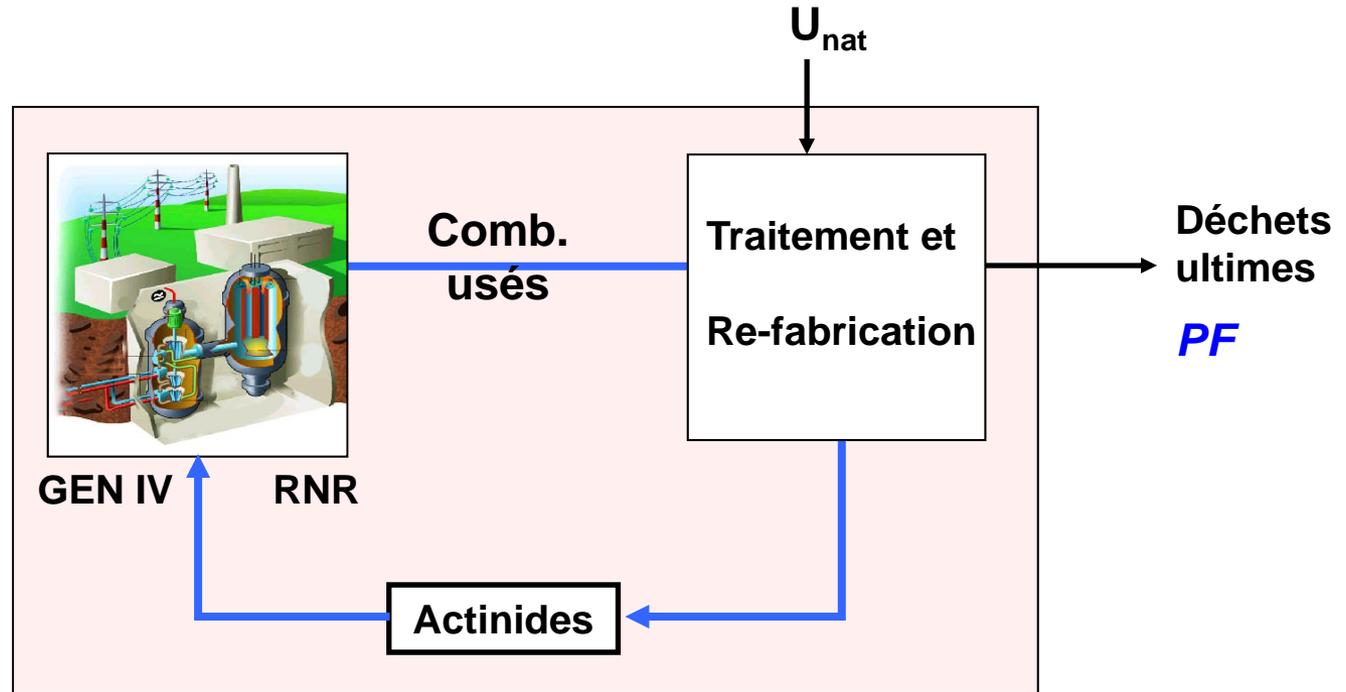


Réacteur à Eau Supercritique (SCWR)

- Simplicité de principe ($> 22.1 \text{ MPa}$, 374 °C)
- Intérêt économique ($\eta \sim > 44 \%$ à 550 °C - 25 MPa , compacité)
- Neutrons thermiques et cycle ouvert (Gen III)
- Neutrons rapides et cycle fermé (Gen IV)
- Stabilité ? Corrosion ?



Le Recyclage global des actinides



- **Economie de ressources en uranium**
- **Minimisation des quantités et radiotoxicité des déchets**
- **Assurance d'une bonne résistance à la prolifération**

Recyclage global des actinides

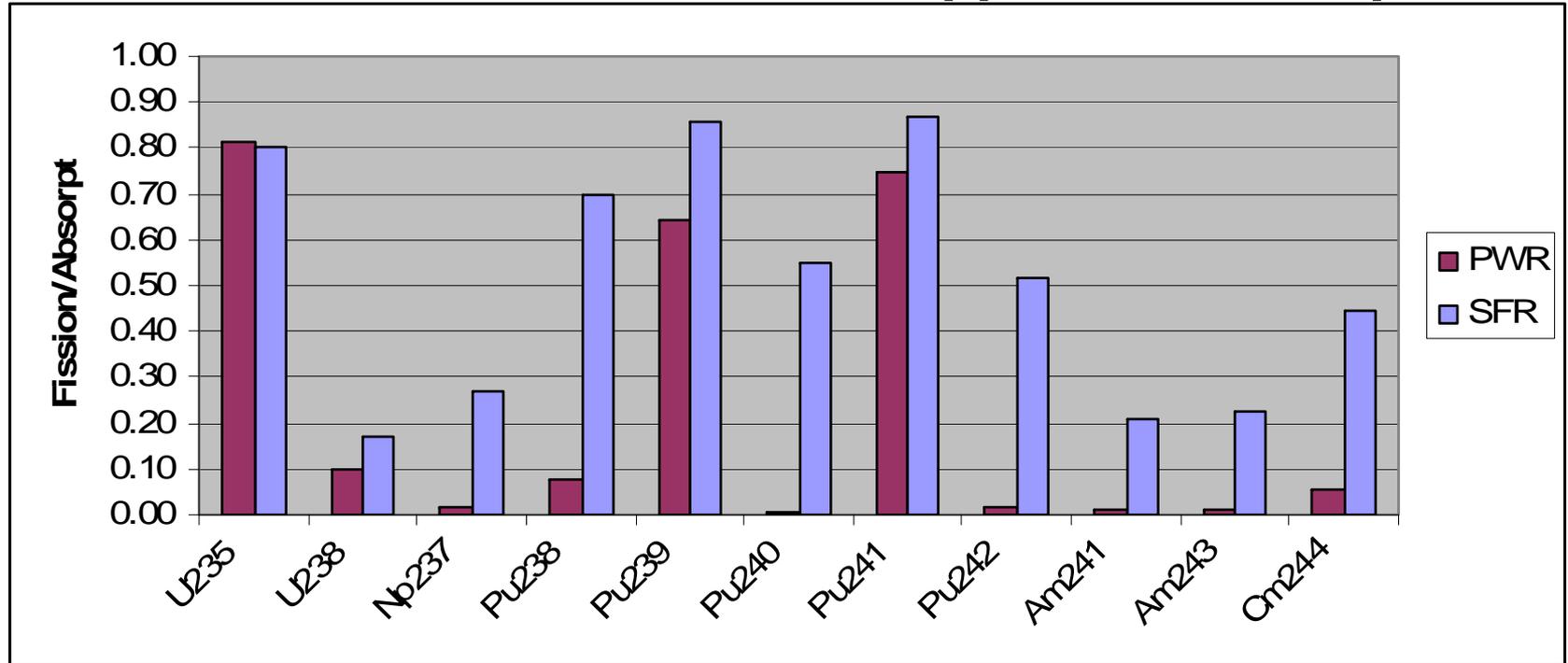
Les spécifications

- **Pas de séparation d'éléments purs, en particulier le Plutonium**
- **De très faibles quantités résiduelles d'actinides dans les déchets ultimes**
- **Une réelle combustion (par fission) des actinides dans les réacteurs, pour éviter un inventaire croissant en éléments lourds**



Pourquoi les RNR pour brûler les Actinides ?

Rapport fission/capture



*La part de la fission est plus élevée en spectre rapide
(jusqu'à 50% pour le Pu-240)*

(plus de neutrons en excès, moins d'actinides lourds)

Destruction des actinides en RNR

Isotope	²³⁹Pu	²⁴⁰Pu	²³⁷Np	²⁴¹Am	²⁴³Am	²⁴⁴Cm	²⁴⁵Cm
années							
Période Radioactive	24400	6500	2. 10 ⁶	430	7400	18	8700
Disparition en RNR	2.7	6.8	3.2	2.1	3.4	5.4	1.8

Une Démonstration Globale

«Prouver à une échelle significative que les RNR peuvent brûler tous les actinides produits en réacteurs (majeurs et mineurs) et que les technologies associées sont maîtrisées»

Une échelle significative:

Un assemblage de MONJU,
1,5 kg A.M.

Technologies associées:

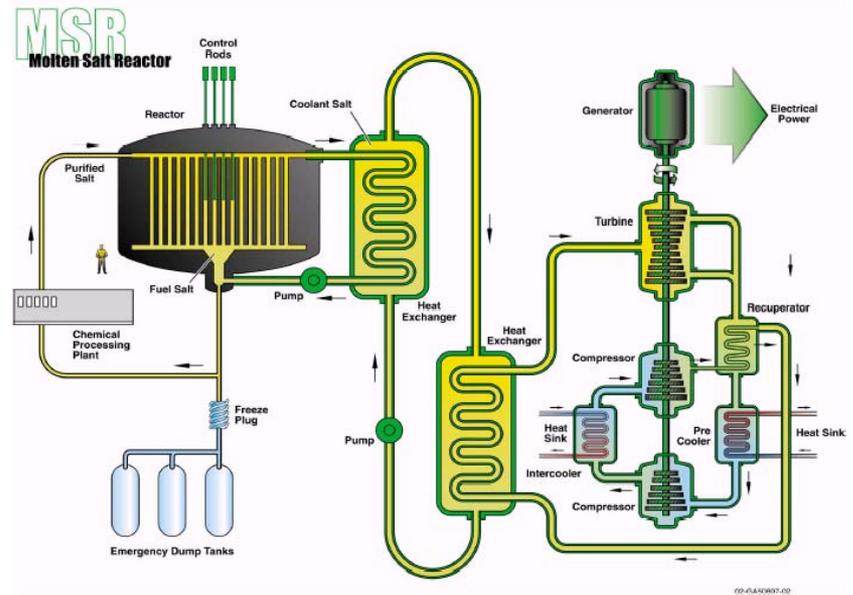
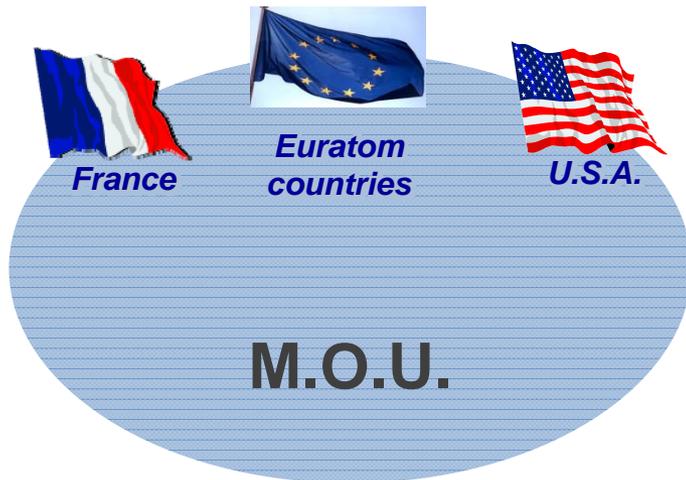
Ensemble du cycle,
(séparation, fabrication...)

Projet GACID



Réacteur à Sels Fondus (MSR)

- Régénération avec cycle U-Th
- Neutrons épithermiques
- 1700 MWth - 800 °C
- Couplage aux applications sans perméation du tritium
- Capacité effective de régénération ?
- Corrosion des matériaux de structure
- Traitement du sel usé





Production d'hydrogène: Choix des procédés



✚ Conclusions analyse américaine multicritères publiée en 2001 → quatre cycles se détachent :

- Un cycle purement thermochimique : Iode - Soufre
- Trois Cycles Hybrides (Westinghouse, ISPRA, UT3)

✚ Analyse complémentaire CEA resserrée sur les critères relatifs au développement industriel

- Deux cycles retenus : **Iode - Soufre** en première priorité et **Westinghouse** comme solution alternative
- D'autres **cycles innovants** à évaluer sur le principe ainsi que l'**EHT** notamment à titre de point de comparaison

Réacteur à très haute température (VHTR)

Objectifs:



- Production d'hydrogène
- 600 MWth - $t \text{ He} > 1000 \text{ }^\circ\text{C}$
- Approche de sûreté passive
- Production H₂ par décomposition H₂O par cycle thermochimique ou électrolyse HT
- Production de 200 t/jour H₂ ($\eta \sim 50 \%$)

