



# Les Réacteurs Nucléaires de Quatrième Génération

*Jacques BOUCHARD*

**Commissariat à l'Énergie Atomique  
Président du Forum International Génération IV  
Président du Groupe SFEN Bourgogne**

# L'énergie nucléaire



**440 réacteurs dans 30 pays produisent  
~ 16% de l'électricité mondiale.**

**88% Réacteurs à eau**

**~ 30 réacteurs en construction**

# Les atouts de l'énergie nucléaire



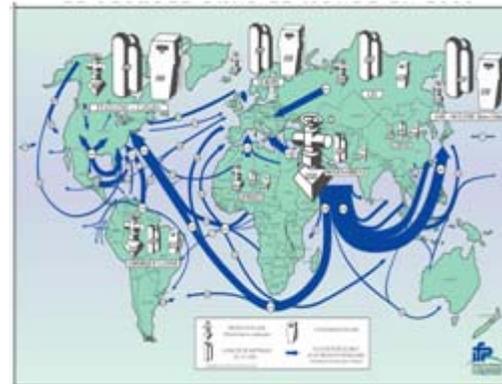
- **Source d'énergie compétitive**
- **Très bonne sûreté avec encore des améliorations**



- **Pas d'émission de CO2 ;**
- **Pas de contribution à l'effet de serre**



- **Perspectives pour la production d'hydrogène**



- **Sécurité d'approvisionnement**

# Les réacteurs à eau existants

---

cea



Civaux

## Une expérience irremplaçable :

- ✓ 80% du parc mondial soit environ 360 réacteurs
- ✓ 10 000 années.réacteurs d'expérience

**Les Réacteurs à eau  
resteront prépondérants  
pendant plusieurs décennies**

# Energie nucléaire: Quelques défis

---



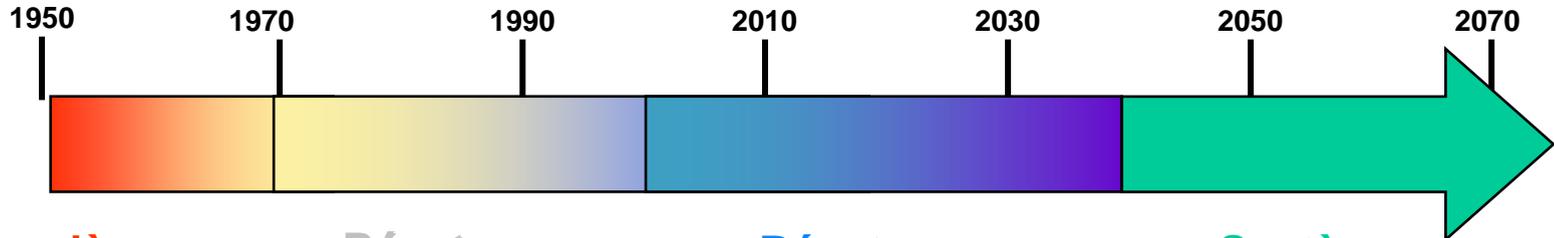
Pour le développement durable de l'énergie  
nucléaire

- **Gestion des déchets hautement radioactifs**
- **Maîtrise des risques de prolifération**
- **Souplesse pour des applications variées**

# Les générations de réacteurs nucléaires



*Pourquoi une 4<sup>ème</sup> génération?*

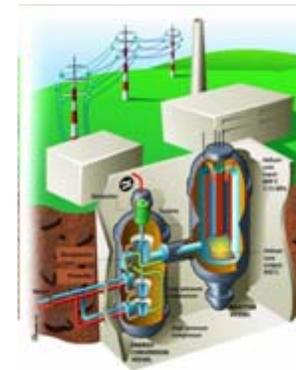


**Premières réalisations**

**Réacteurs actuels**

**Réacteurs avancés**

**Systèmes du futur**



**UNGG  
CHOOZ**

**REP 900  
REP 1300  
N4**

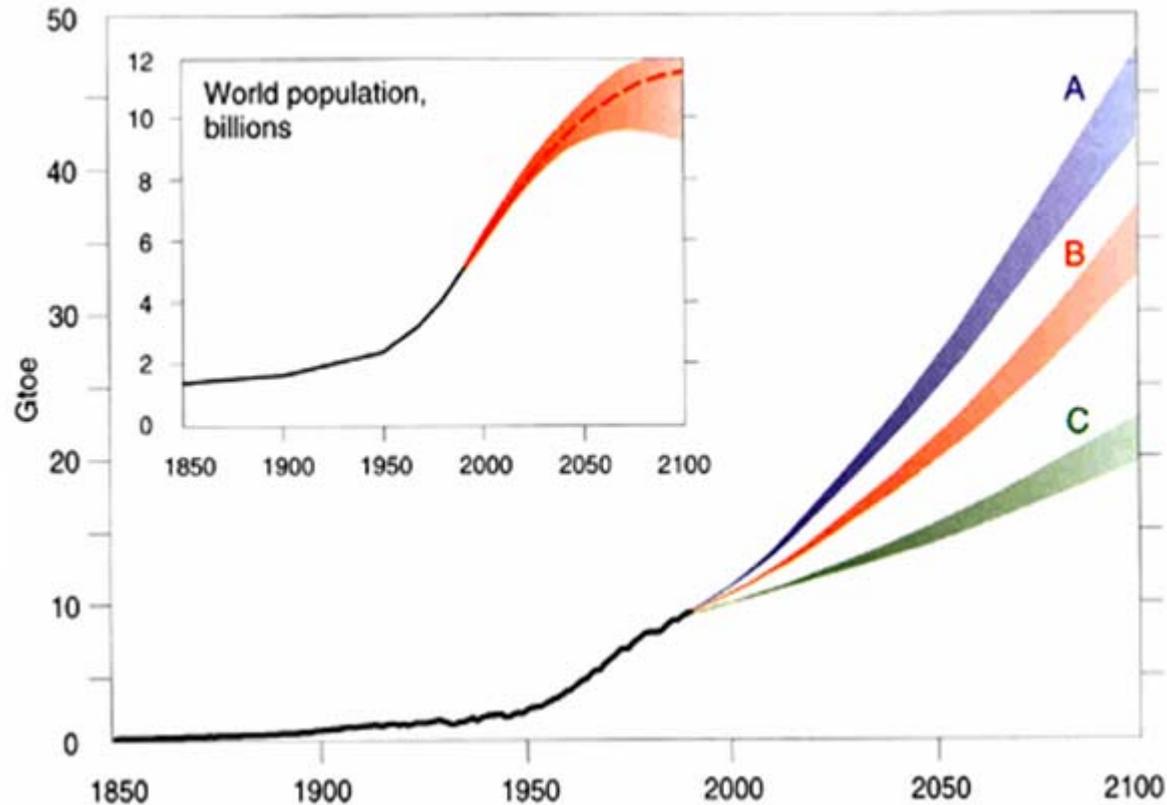
**EPR**

**?**

# Croissance de la demande énergétique



Gtep/an



**A : Croissance forte**

**B : Croissance modérée**

**C : Scénario écologique**

Source : Etude IIASA/WEC, « Global Energy Perspectives », 1998

# L'effet de serre



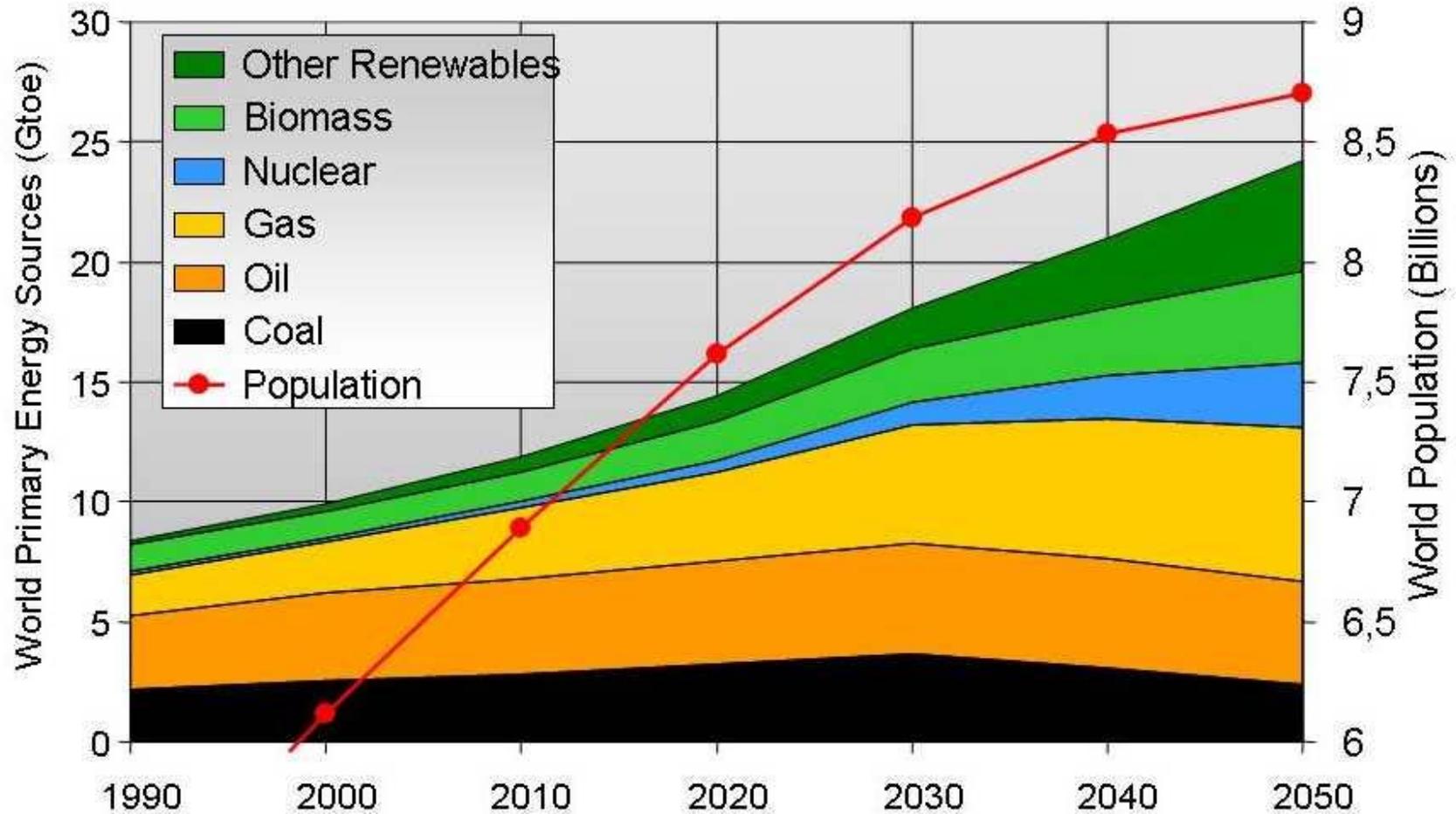
cea

- S'il n'y avait pas d'effet de serre la température moyenne de la terre serait à  $-18^{\circ}\text{C}$  alors qu'elle est de  $+15^{\circ}\text{C}$ .



- Notre planète utilise en moyenne  $240 \text{ W/m}^2$  pour se réchauffer.
- Depuis le début de l'ère pré-industrielle l'effet de serre a augmenté de  $2,45 \text{ W/m}^2$ , soit 1%.
- Entre 1850 et 1995, la température moyenne a augmenté de  $0,3$  à  $0,5^{\circ}\text{C}$ .
- Si l'on ne fait rien on prédit que la température moyenne augmentera de  $1,5$  à  $5,8^{\circ}\text{C}$  entre aujourd'hui et 2100 (source IPCC)

# Scénario OCDE/AIE 2003



Source IEA : Energy to 2050 -  
Scenarios for a Sustainable Future

# Les choix pour le futur

---

cea



行動を伴わない構想は夢であり、  
構想の無い行動は悪夢である。

日本の格言

Une vision sans action est du rêve,  
De l'action sans vision est un cauchemar

Proverbe Japonais

# Un scénario plausible



- Demande d'énergie croissante ;
- Part du nucléaire augmentant après 2030;
- Les réacteurs à eau avec combustible uranium restent dominants.

	2005	2025	2050
Besoins en énergie (Gtep)	10	15	20
Energie primaire nucléaire (Gtep)	0.7	1.2	2.5
Capacité nucléaire (GWe)	360	650	1400
Capacité réacteurs à eau (GWe)	320	550	1200

# Un Scénario Réaliste ?



Palier N4 EDF



	2005	2050
<b>Amérique du Nord</b>	<b>110</b>	<b>300</b>
<b>Europe (y.c. Russie)</b>	<b>160</b>	<b>400</b>
<b>Japon + Corée</b>	<b>65</b>	<b>100</b>
<b>Chine + Inde</b>	<b>15</b>	<b>500</b>
<b>Autres</b>	<b>10</b>	<b>100</b>



## Les réacteurs de 3<sup>ème</sup> génération

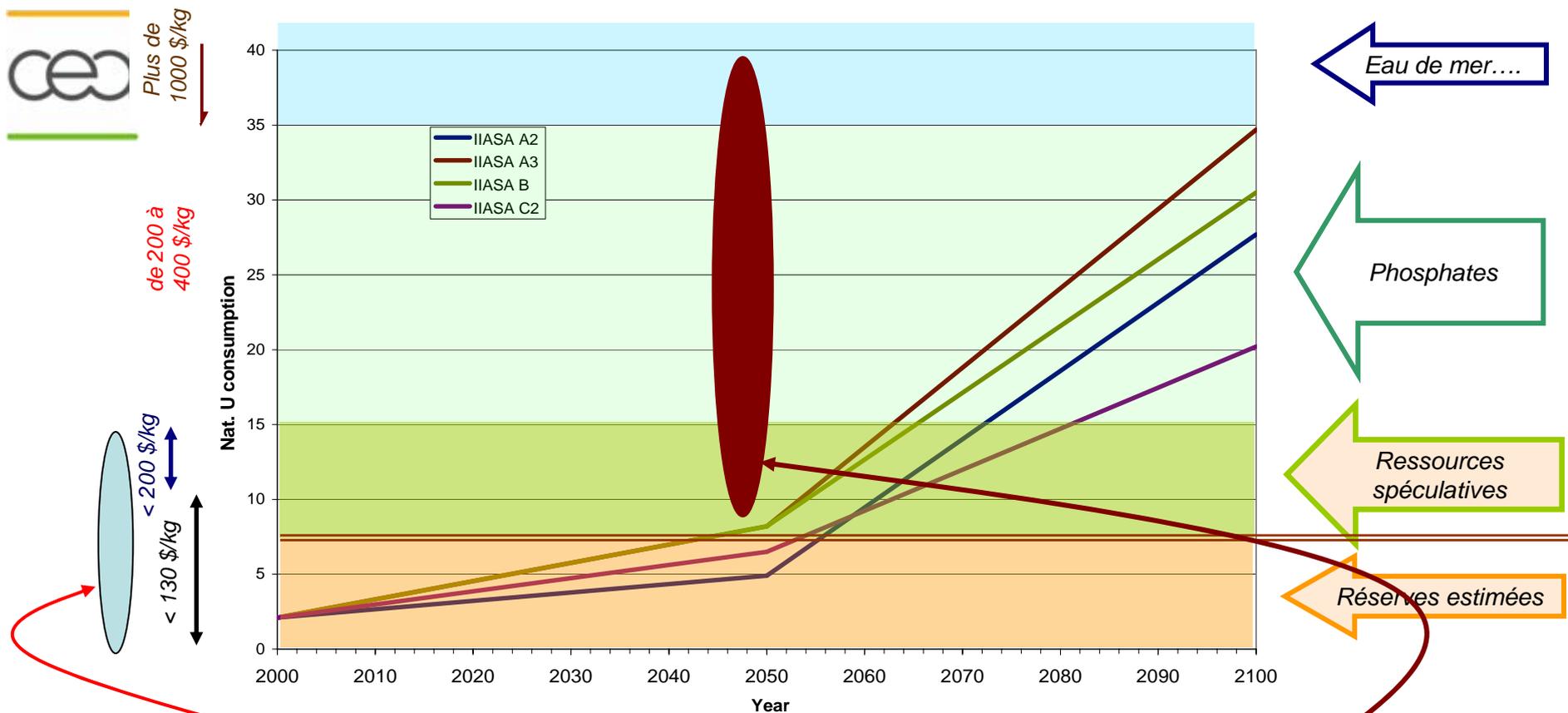
- ⊙ Pressurisés →
  - EPR, AP 1000, VVER AES 92
  - CE 80+ (APR 1400), APWR, ...
- ⊙ Bouillants →
  - ABWR, BWR 90+
  - SWR 1000, ESBWR,
- ⊙ Les faibles puissances n'émergent pas vraiment →
  - AP 600, IRIS ?, NP 300 ?, ...

Si tous ces réacteurs appartiennent à la génération 3, ils présentent néanmoins des différences notables en terme de puissance, de capacité à brûler du MOX, d'aptitude à permettre de la maintenance en marche, de moyens à faire face aux accidents graves et aux agressions internes et externes.

**L'EPR a une bonne longueur d'avance car il est en cours de construction en Finlande à Okiluoto et en France à Flamanville.**



# Besoins et ressources en uranium



**2050: 17 millions de tonnes engagées**

**2100 : de 50 à 60 millions de tonnes engagées**

# Les déchets nucléaires



Des quantités faibles mais des risques spécifiques

**Quelques ordres de grandeur**, par habitant et par an , en France

- Déchets inertes et ménagers : **2 200 Kg**
- Déchets industriels : **800 Kg** dont  
100 kg à haute toxicité
- Déchets nucléaires : **1 Kg**

Vie courte, faible activité :  
> 90% volume,  
< 1% de la radioactivité

Vie longue, haute activité :  
< 1% volume : 10g  
> 90% de la radioactivité



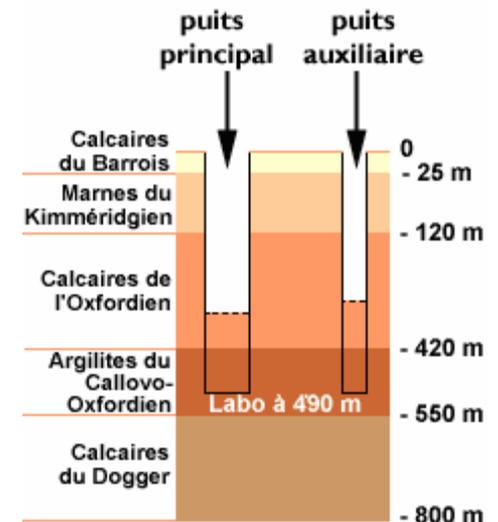
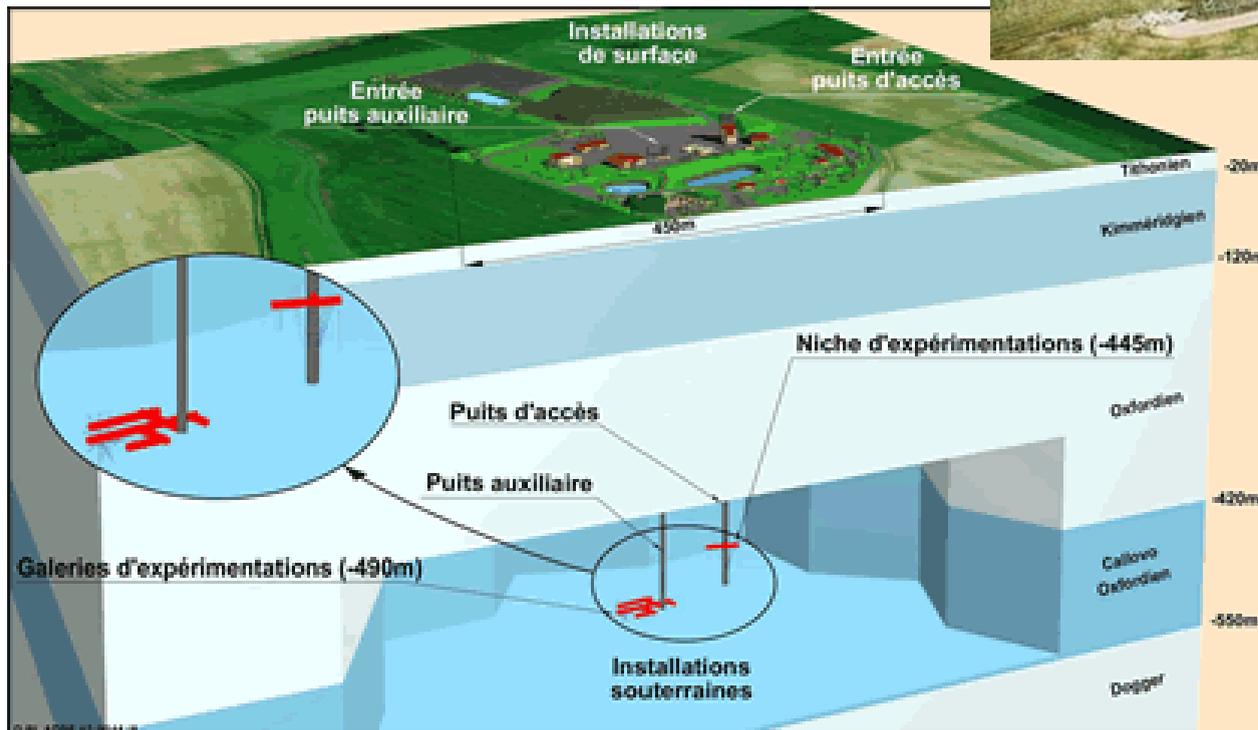
# Le stockage géologique profond



## Laboratoire sous-terrain de Meuse-Haute-Marne



### Architecture générale du Laboratoire



# Réacteurs à eau: un défi pour les autres

---



- Depuis le début les scientifiques et les ingénieurs ont cherché à développer d'autres technologies pour surmonter les deux difficultés des réacteurs à eau:

- un rendement thermodynamique limité,
- une consommation très faible de l'uranium.

- Deux voies principales ont été et continuent d'être explorées, les réacteurs à haute température et les réacteurs à neutrons rapides.

- D'autres technologies peuvent améliorer l'un ou l'autre des paramètres, en particulier les systèmes à eau supercritique ou les réacteurs à sels fondus, mais n'ont pas atteint le même niveau de développement.

# Le Forum International Génération IV



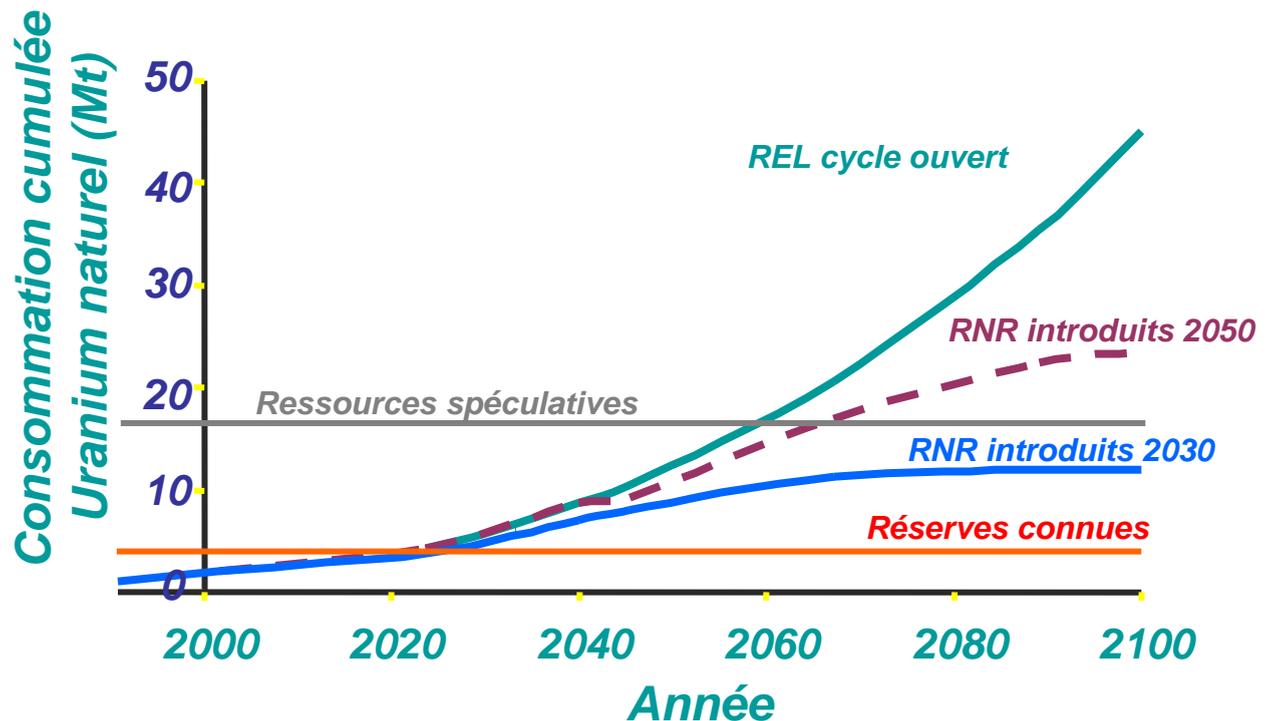
Des systèmes nucléaires de 4<sup>ème</sup> génération pour un développement énergétique durable



# Les critères de développement durable

## 1 – Mieux utiliser les ressources naturelles

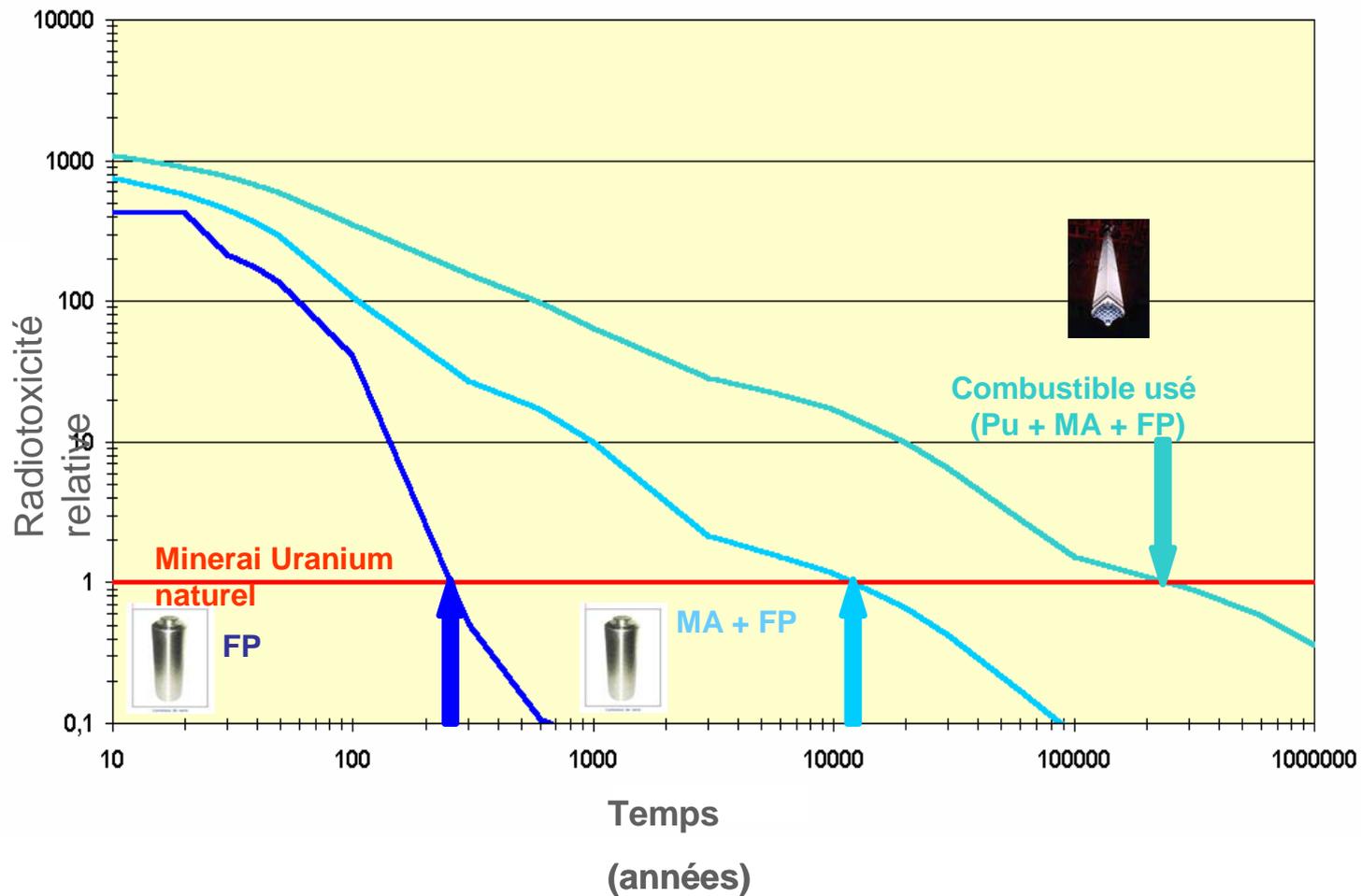
- Fermer le cycle du combustible a un impact majeur
- Etendre à plus de 1000 ans la ressource en combustible



# Les critères de développement durable



## 2 – Réduire la production de déchets de longue vie





## 3 – Améliorer la sécurité

- **Résistance à la prolifération**
  - Limiter l'enrichissement de l'uranium
  - Durcir l'aval du cycle
  - Adapter la conception des réacteurs
- **Risques liés au terrorisme**
  - Résistance aux agressions externes
  - Protection physique

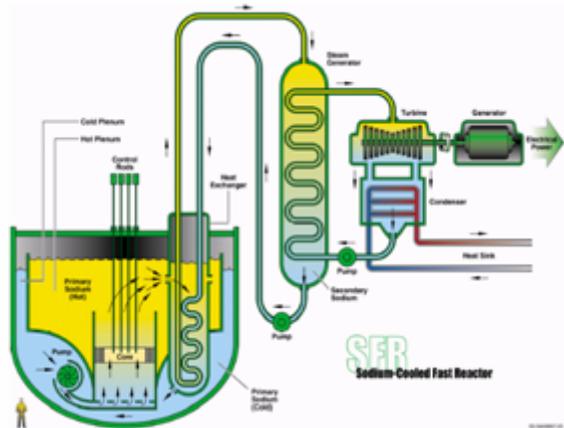
# Les Objectifs du Forum Génération IV

---

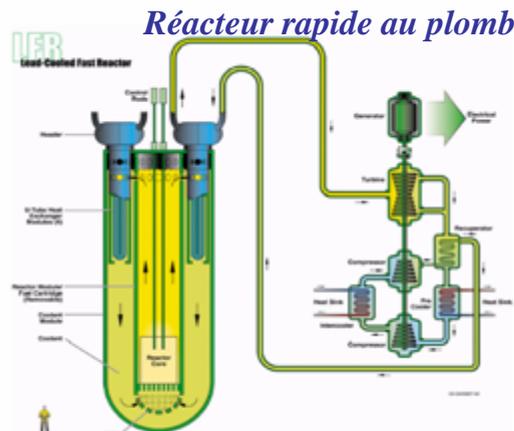


- **Une maturité technique vers 2030**
- **Des progrès en continuité**
  - **Compétitivité économique**
  - **Sûreté et fiabilité**
- **Des avancées significatives :**
  - **Minimisation des déchets**
  - **Economie des ressources**
  - **Sécurité : non prolifération, protection physique**
- **Une ouverture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

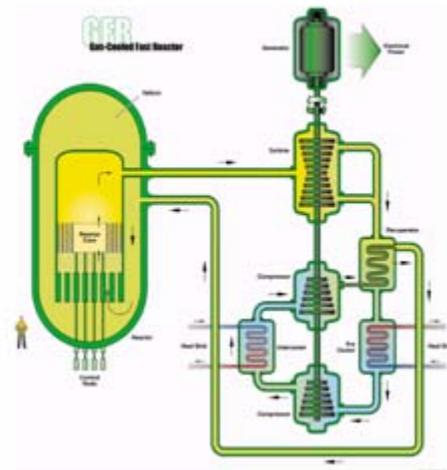
# Les six concepts retenus



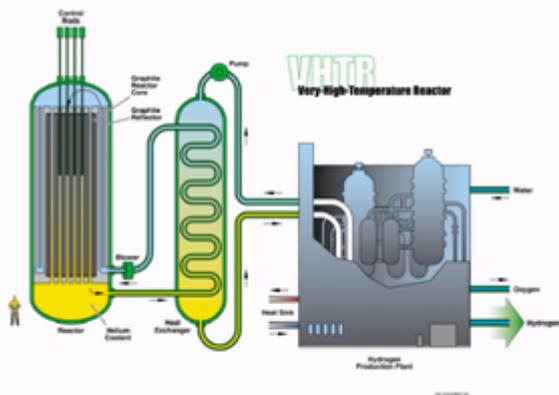
Réacteur rapide Sodium



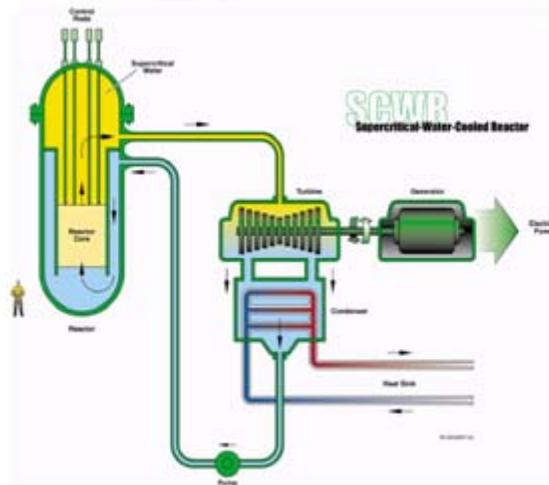
Réacteur rapide au plomb



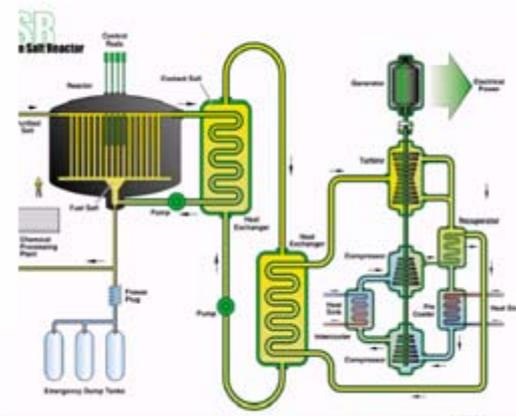
Réacteur rapide à gaz



Réacteur à gaz, Très Haute Température



Réacteur à eau supercritique



Réacteur à sels fondus

# Les grands thèmes de développement

---



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

# Accumulation de combustibles usés et de Pu



- 'Le scénario plausible';
- RNR uniquement dans quelques pays;
- Implantation des systèmes Gen IV progressive à partir de 2040

	2005	2025	2050
Capacité nucléaire (GWe)	360	650	1400
Capacité en REL (GWe)	320	550	1200
Comb. usés entreposés ( Mt)	0,2	0,5	1,0
Quantité de plutonium (t)	1500	4000	8500

# Le recyclage du plutonium dans les REP



## Une réalité industrielle

La HAGUE reprocessing plant

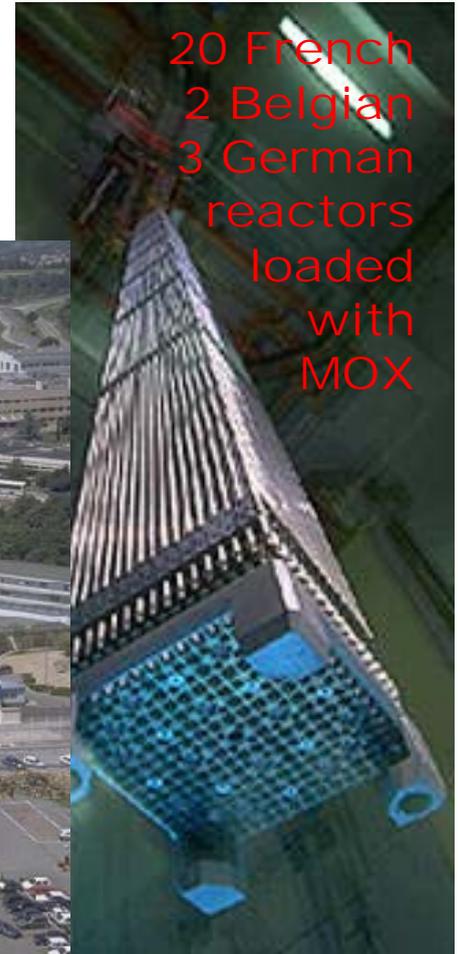


MELOX : MOX Fabrication Plant

Since 1987  
1800 MOX fuel assemblies  
delivered by Framatome



20 French  
2 Belgian  
3 German  
reactors  
loaded  
with  
MOX



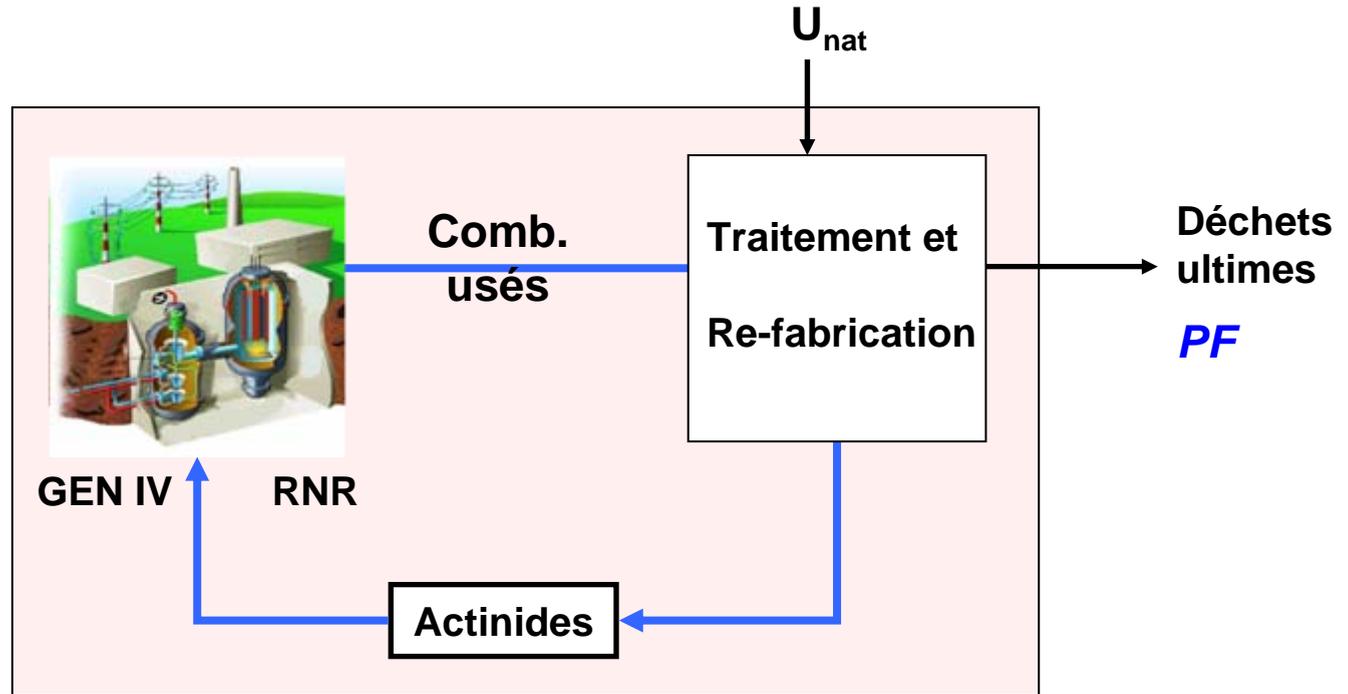


## Les spécifications

- **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**



# Le recyclage global des actinides



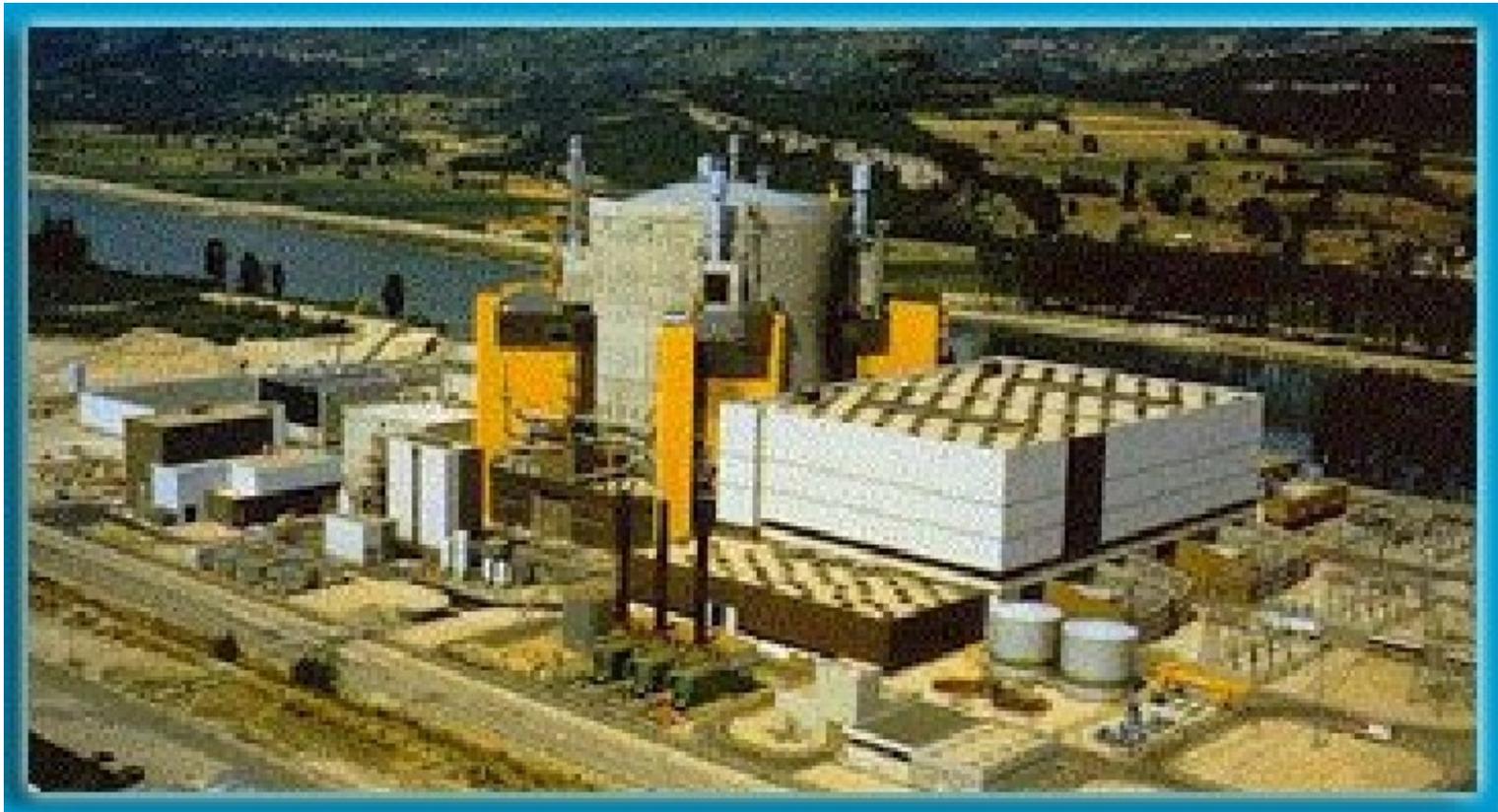
- **Economie de ressources en uranium**
- **Minimisation des quantités et radiotoxicité des déchets**
- **Assurance d'une bonne résistance à la prolifération**

# SUPERPHENIX

---



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



# 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
  - Inspection en service
  - Résistance à la prolifération

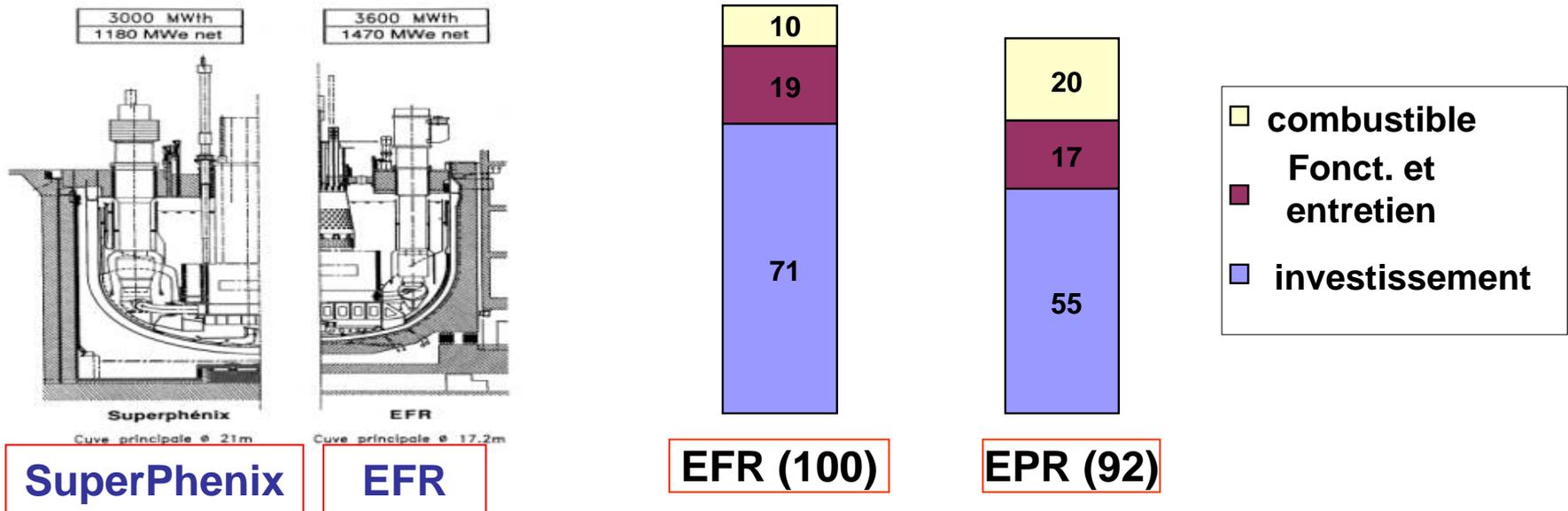
# Economie des RNR sodium



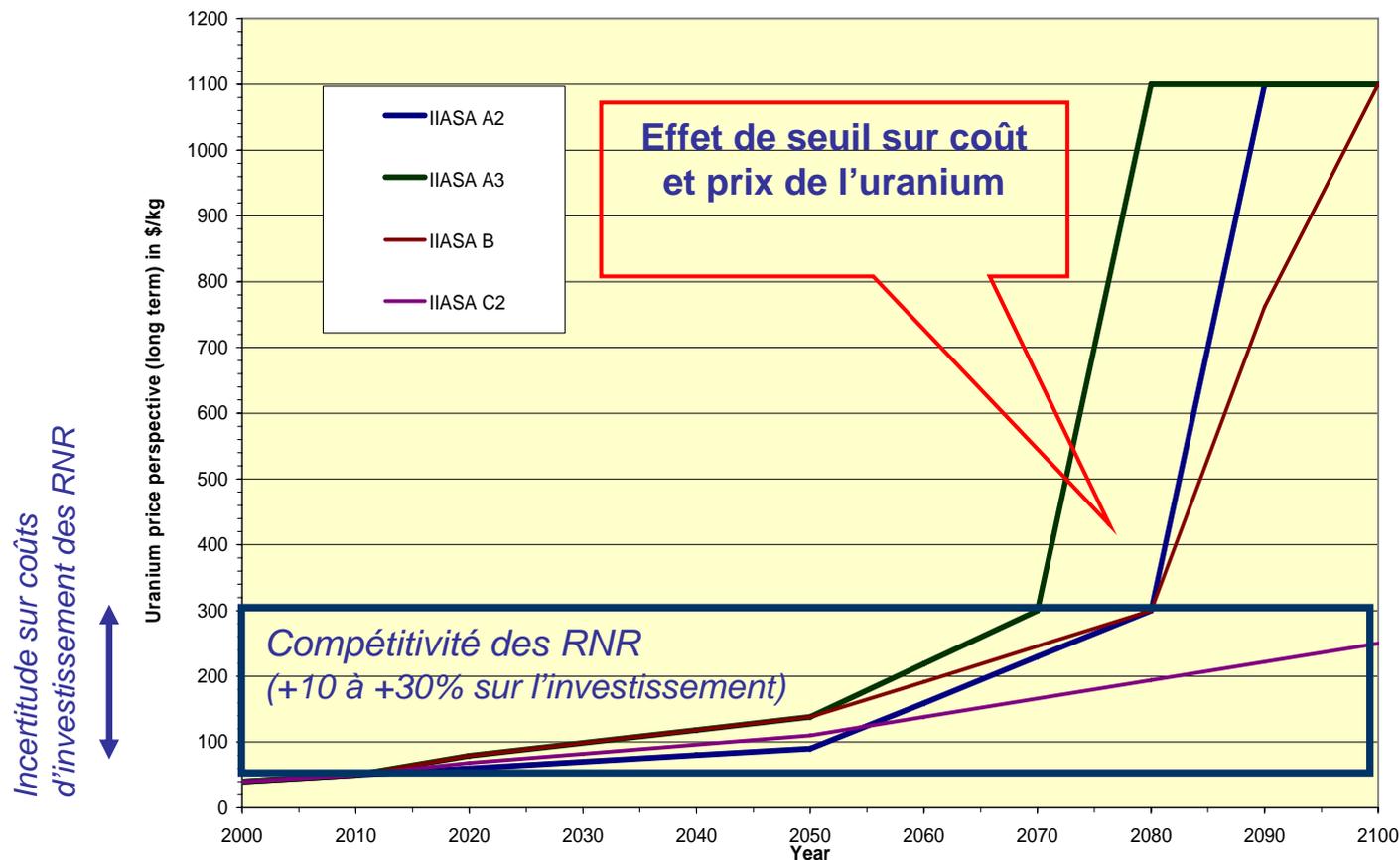
## ➤ European Fast Reactor (EFR) (→ 1998)

- Sûreté conforme aux recommandations des experts européens-  
Adaptation au cahier des charges des électriciens européens
- Améliorations pour inspection en service (ISIR)
- Optimisation de la compétitivité et des performances

### Comparaison de coûts de production EFR et EPR (kWh)

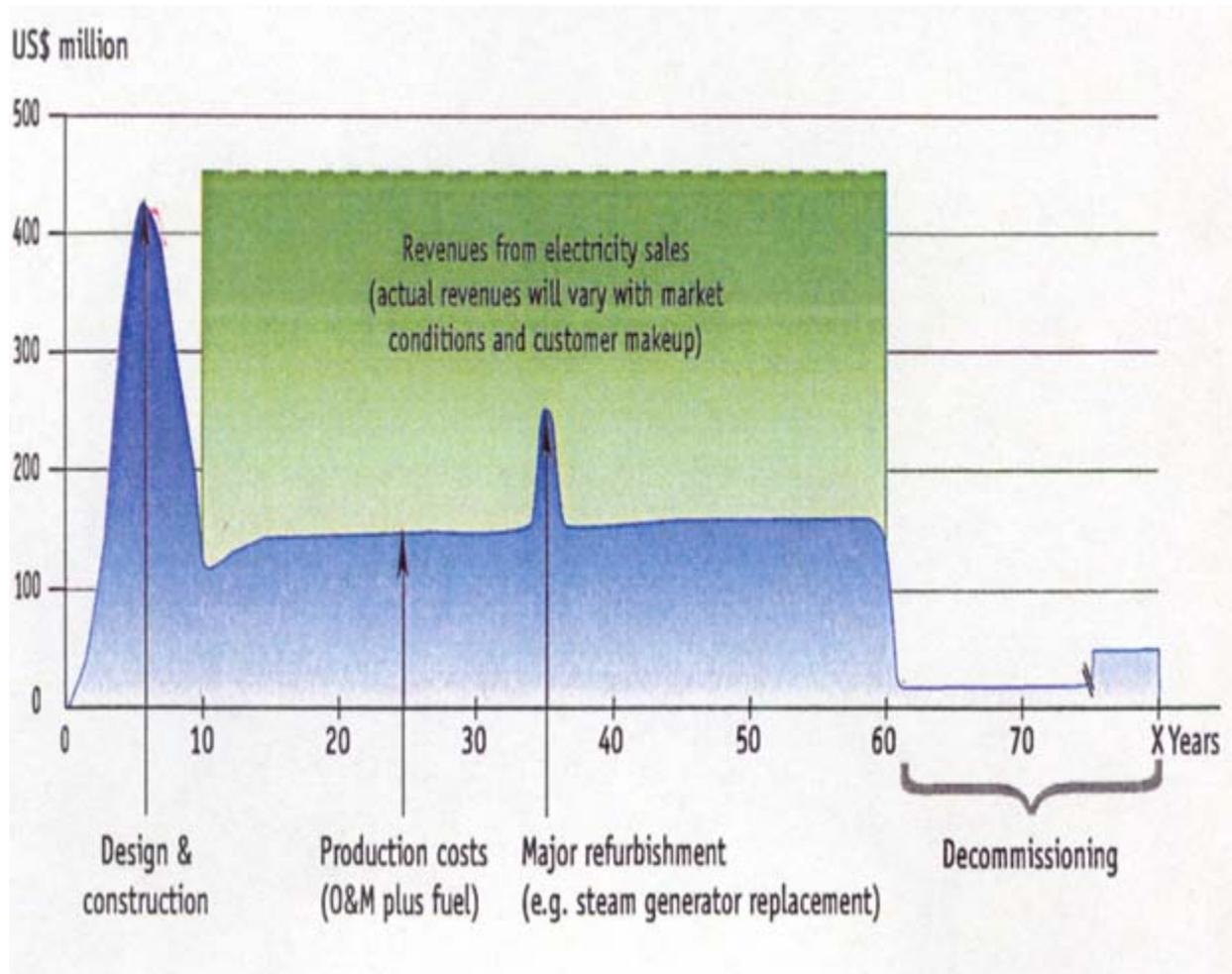


# Consommation d'uranium et compétitivité des RNR



Le coût de production des RNR pourrait être compétitif en 2050 / 2070, même si les coûts de construction sont plus élevés (+20 à +30% par rapport à EPR)

# Coût d'investissement du nucléaire



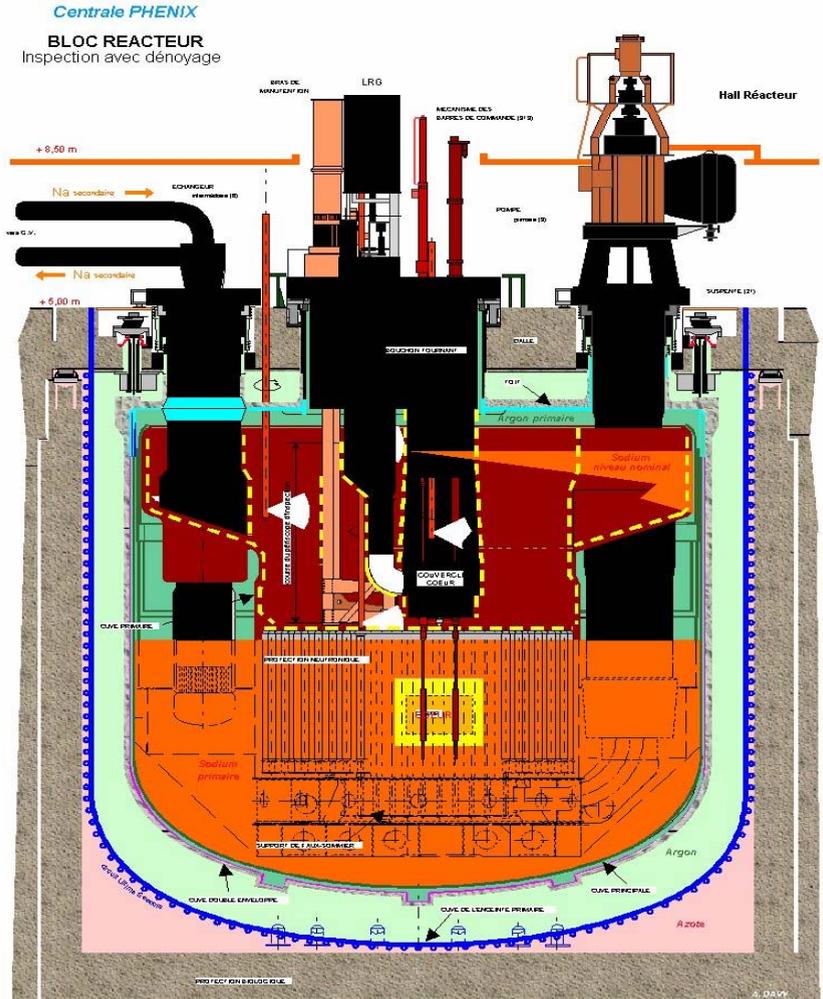
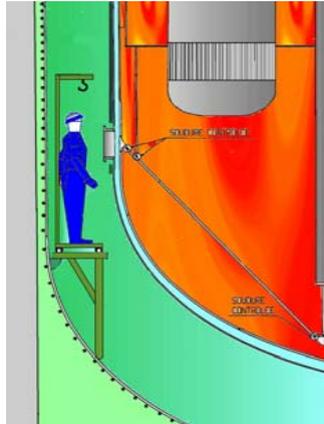
# Le réacteur PHENIX à Marcoule



Réacteur prototype de 250 Mwe, concept intégré, refroidi au sodium  
Démarrage 1973, arrêt définitif prévu en 2009

# Phenix: inspection visuelle des structures internes

Vidange partielle du sodium dans la cuve principale pour inspection du bouchon couvercle cœur



# Le réacteur russe BN 600

---



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

# Le réacteur MONJU au Japon

---

cea



Prototype de 300 Mwe, réacteur à boucles refroidi au sodium  
Démarrage 1995, Fuite sodium, redémarrage prévu 2008

# Le Projet Japonais JSFR



-1500 MWe, 2 boucles « top entry »

- temp Na : 395 / 550

- combustible MOX

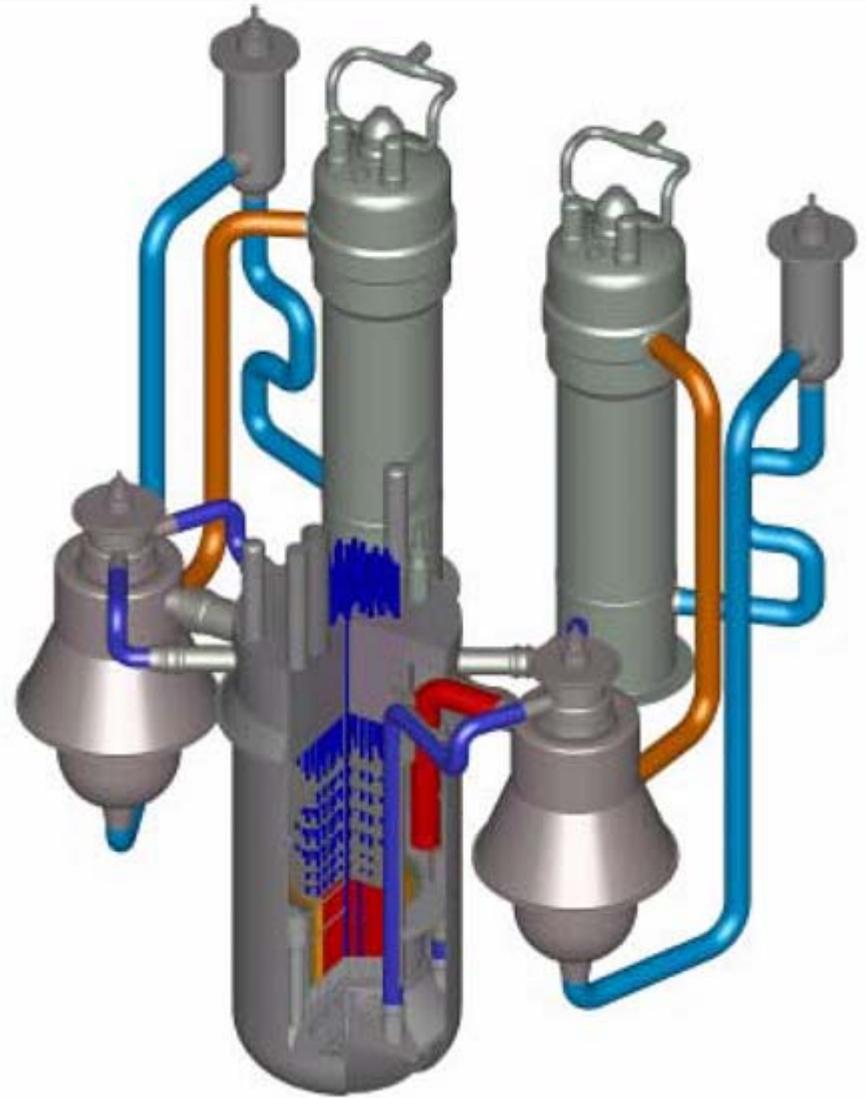
- composants intégrés : PP et EI

- GV forte puissance (1800 MW)

- tuyaux courts (acier 12 Cr)

- système anti recriticité

- dessin compact et manutention simplifiée



# FBTR, réacteur expérimental en Inde

cea

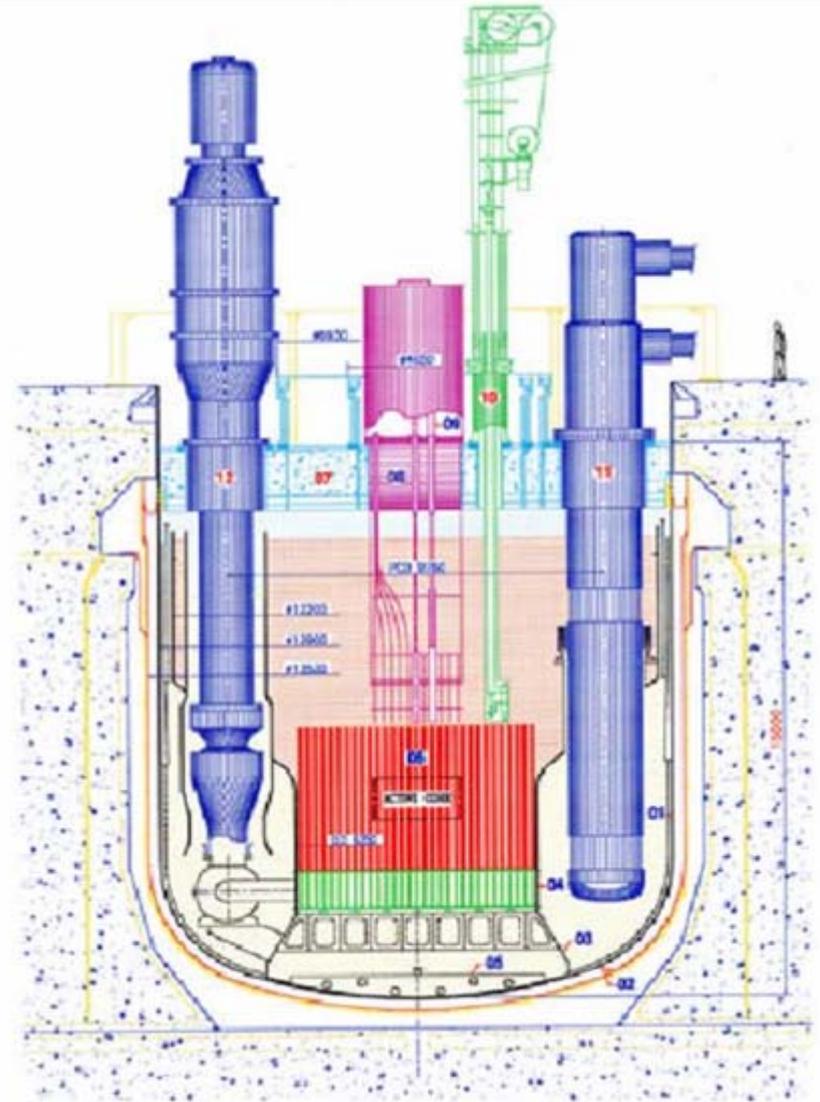


# Réacteur PBFR indien en cours de construction



- début construction : 2003  
divergence : 2010

- 500 MWe, intégré , 2 boucles ,
  - combustible MOX,
  - aciers 316 LN et 9Cr 1 Mo, fabrication et soudage développés, nombreux composants déjà testés
  - atelier pilote de traitement du combustible
- réelle maturité technique



# CEFR, réacteur expérimental chinois

en cours de construction, démarrage prévu 2009

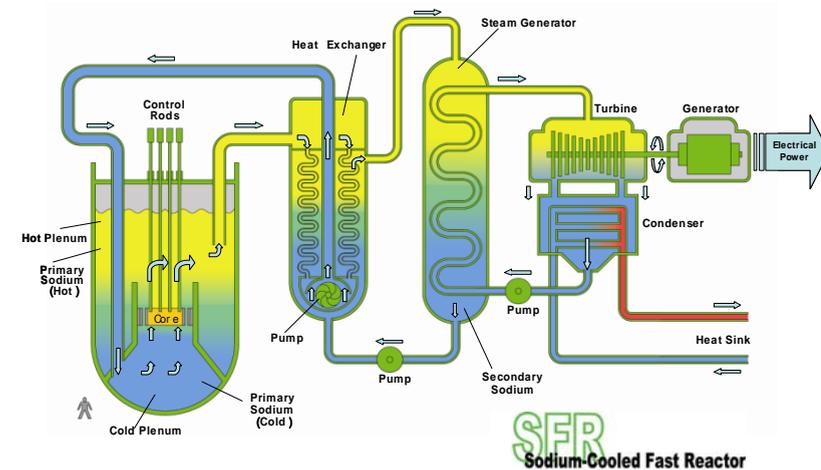
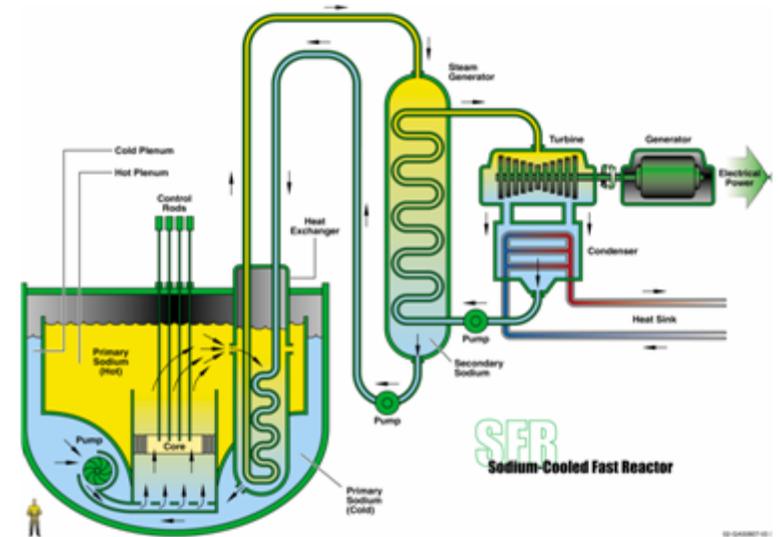


# Le réacteur rapide à caloporteur sodium (SFR)



## Objectifs:

- Recyclage intégral des actinides
- Approche de sûreté passive
- Réduction du coût d'investissement
- Inspection en service
- Fluide secondaire
- Combustible tous actinides



# RNR sodium: d'autres études

---



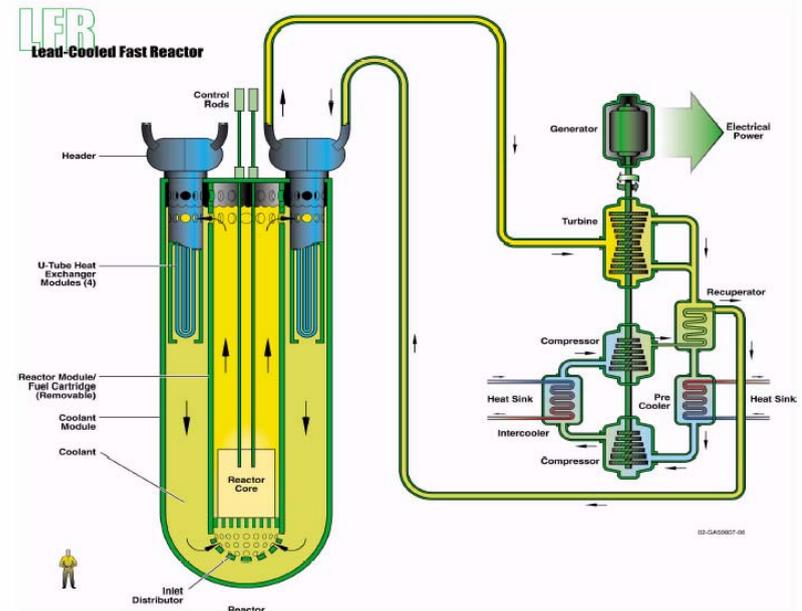
- **Changement de fluide secondaire?**
  - CO<sub>2</sub> supercritique ?
  - Autre gaz?
  - Suppression ou réduction du circuit intermédiaire ?
  - Double échangeur intégré?
  
- **Combustible pour recyclage global des actinides**
  - Fabrication?
  - Autre choix que l'oxyde?
  - Taux de combustion et pertes au recyclage

# Le réacteur rapide à caloporteur plomb ( LFR )

## Objectifs :



- Nuclear Battery 50-100 MWe – cycle de 10-30 ans
- Réacteurs de puissance de 1200 MWe
- Réacteurs modulaires de 300-400 MWe
- Caloporteur Pb ou eutectique Pb-Bi
- Matériaux résistants à la corrosion par Pb à 550-800 °C
- Combustible tous actinides (métal ou nitrure)



# RNR : Caloporteur Plomb ou plomb-bismuth

---



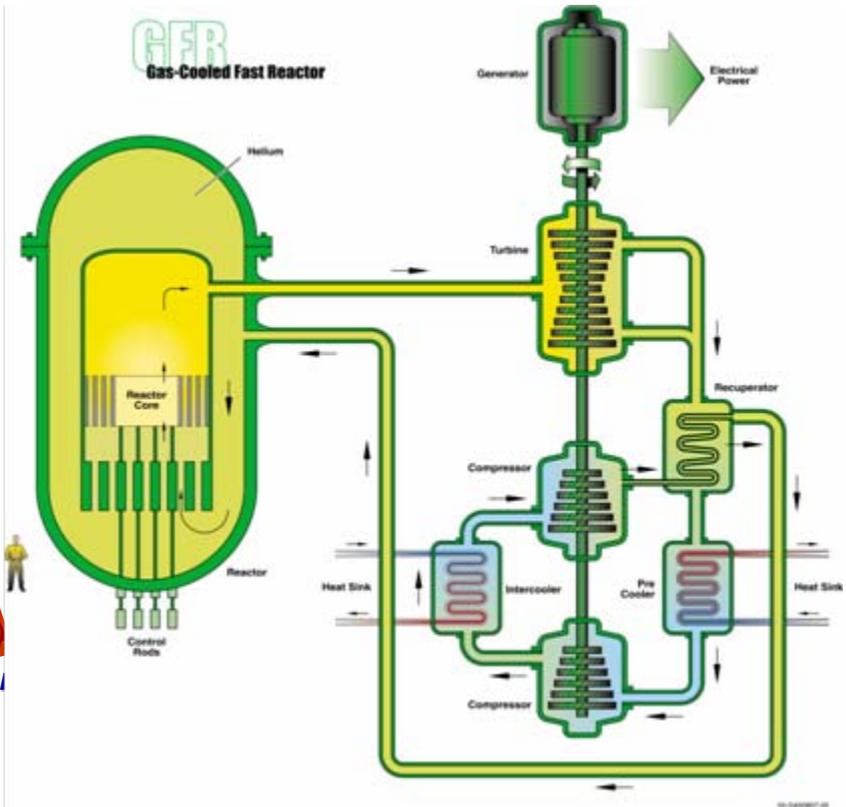
- Intérêt d'éviter les risques associés à la réactivité chimique du sodium (réactions Na-H<sub>2</sub>O ou feux sodium)
- Un caloporteur beaucoup moins favorable (thermodynamique risques de corrosion).
- L'alliage plomb-bismuth pour réduire les risques de corrosion mais d'autres inconvénients.
- Une expérience limitée aux applications russes dans la propulsion navale.

# Le réacteur rapide à caloporteur gaz ( GFR )



## Objectifs :

- Le gaz : une alternative aux métaux liquides pour les réacteurs rapides
- Gamme de puissance 300 – 1200 MWe
- Température sortie hélium ~ 850 °C
- Combustible robuste (réfractaire)
- Approche de sûreté active + passive
- Cogénération électricité + hydrogène



# RNR : Caloporteur Hélium

---



- **Le gaz est un caloporteur moins efficace qu'un métal liquide.**
- **Le développement d'un RNR à caloporteur hélium nécessite la mise au point d'un nouveau combustible.**
- **La technologie des circuits hélium est aussi étudiée pour les VHTR.**
- **Des questions de sûreté très spécifiques doivent être clarifiées.**
- **L'enjeu est double: alternative au sodium et accès aux hautes températures avec un RNR).**

# Conception du combustible pour RNR He



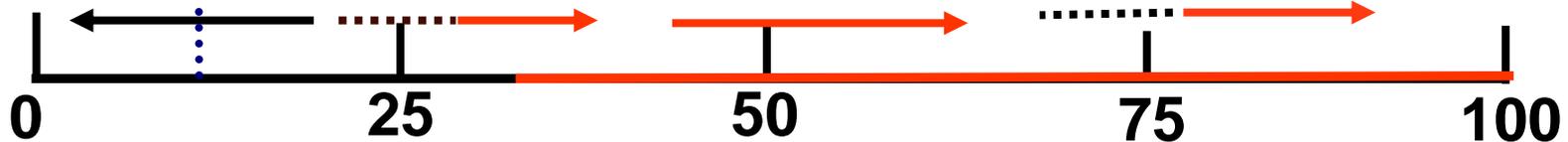
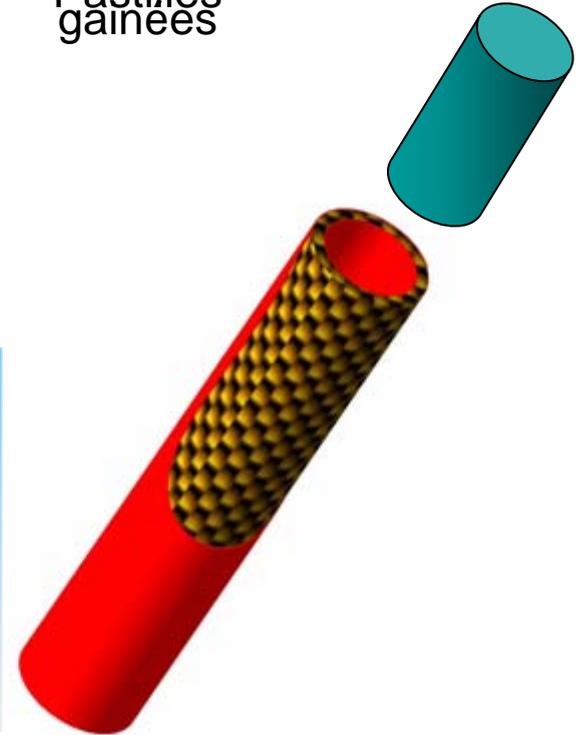
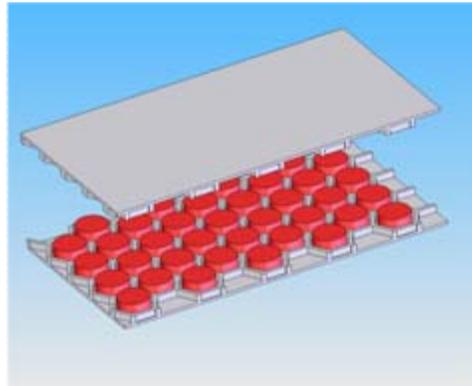
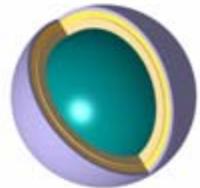
RRG

Particules avancées

Plaquettes compartimentées à haute densité

Pastilles gainées

HTRs



%vol. de composé d'actinides dans le vol. réservé au combustible

# Le déploiement des réacteurs rapides

---



- Il faut environ 10 tonnes de plutonium pour démarrer un réacteur rapide de 1000 MWe;
- Au départ, il n'est pas nécessaire d'avoir des gains de régénération importants;
- Le développement de véritables surgénérateurs nécessitera de nouvelles solutions pour la résistance à la prolifération.

# Accumulation de combustibles usés et de Pu



- 'Le scénario plausible';
- RNR uniquement dans quelques pays;
- Implantation des systèmes Gen IV progressive à partir de 2040

	2005	2025	2050
Capacité nucléaire (GWe)	360	650	1400
Capacité en REL (GWe)	320	550	1200
Comb. usés entreposés ( Mt)	0,2	0,5	1,0
Quantité de plutonium (t)	1500	4000	8500

# Production d'hydrogène

## Choix des procédés à étudier



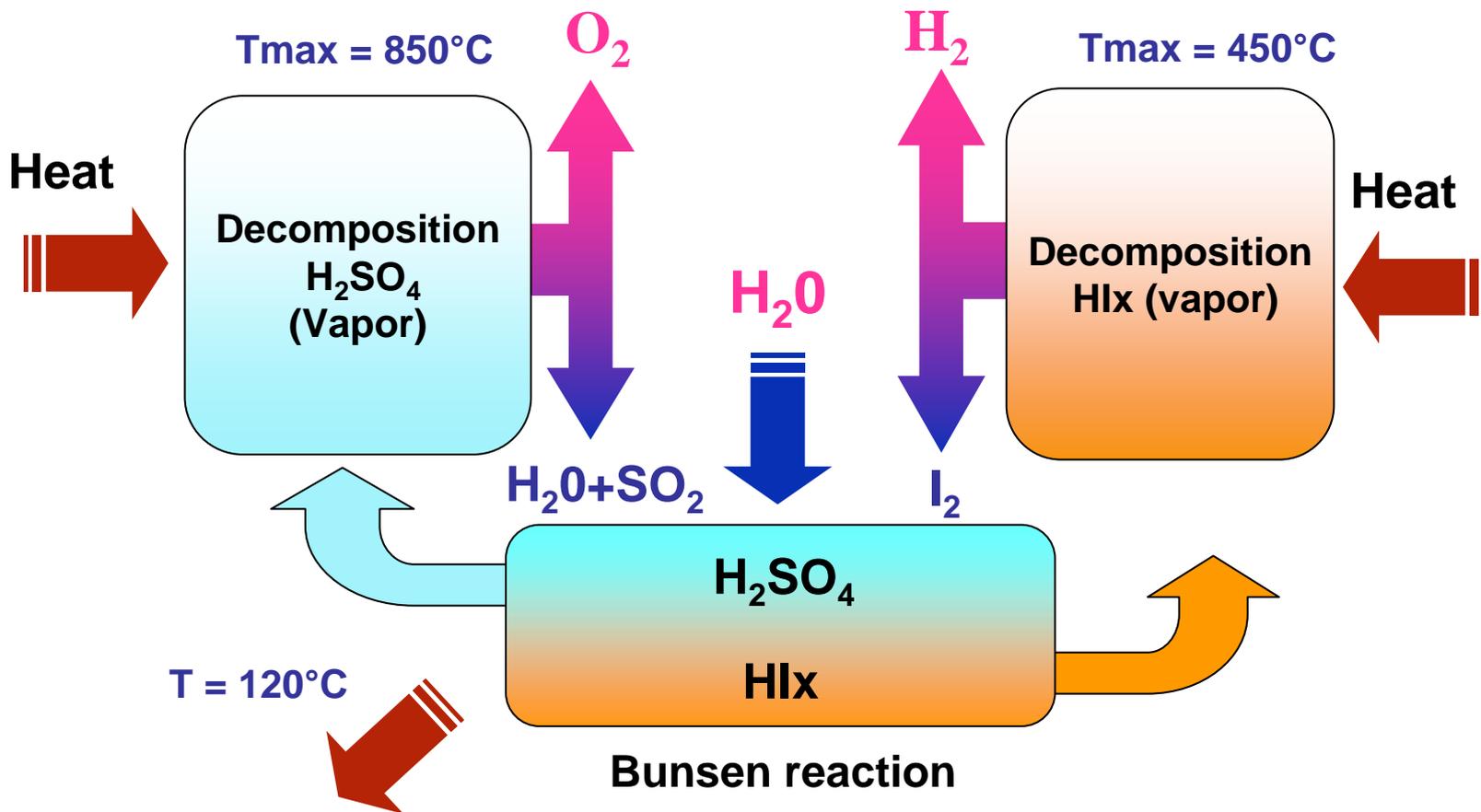
✚ Conclusions analyse américaine multicritères publiée en 2001 → quatre cycles se détachent :

- 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

# Le Procédé Iode Soufre

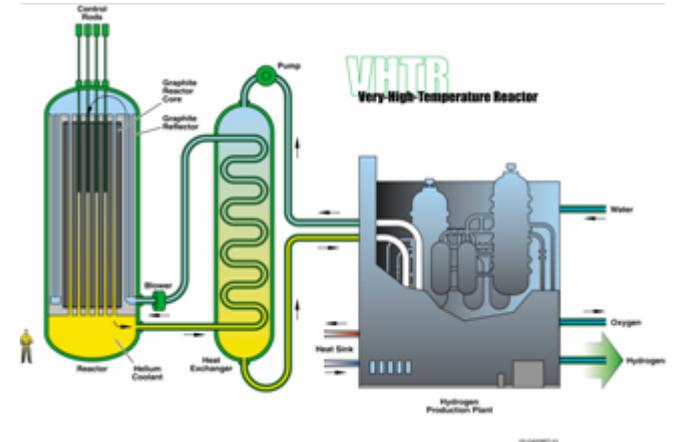
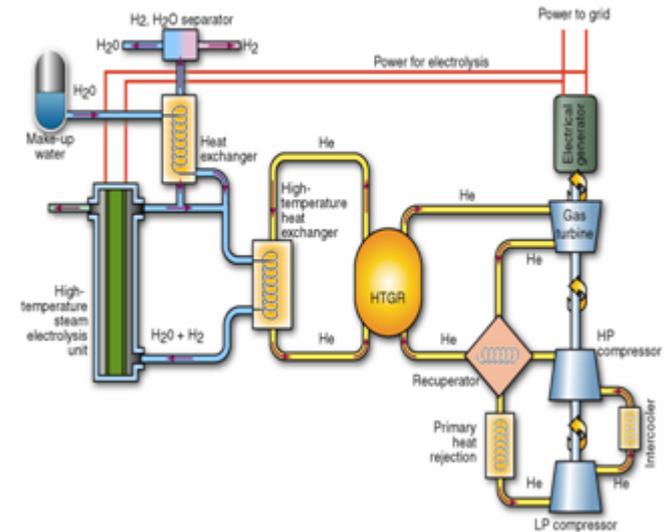


# Réacteur à très haute température (VHTR)

## Objectifs:



- Production d'hydrogène
- 600 MWth - t He >1000 °C
- Approche de sûreté passive
- Production H<sub>2</sub> par décomposition H<sub>2</sub>O par cycle thermochimique ou électrolyse HT
- Production de 200 t/jour H<sub>2</sub> ( $\eta \sim 50\%$ )



# Le réacteur HTR de Fort St Vrain (USA)

cea

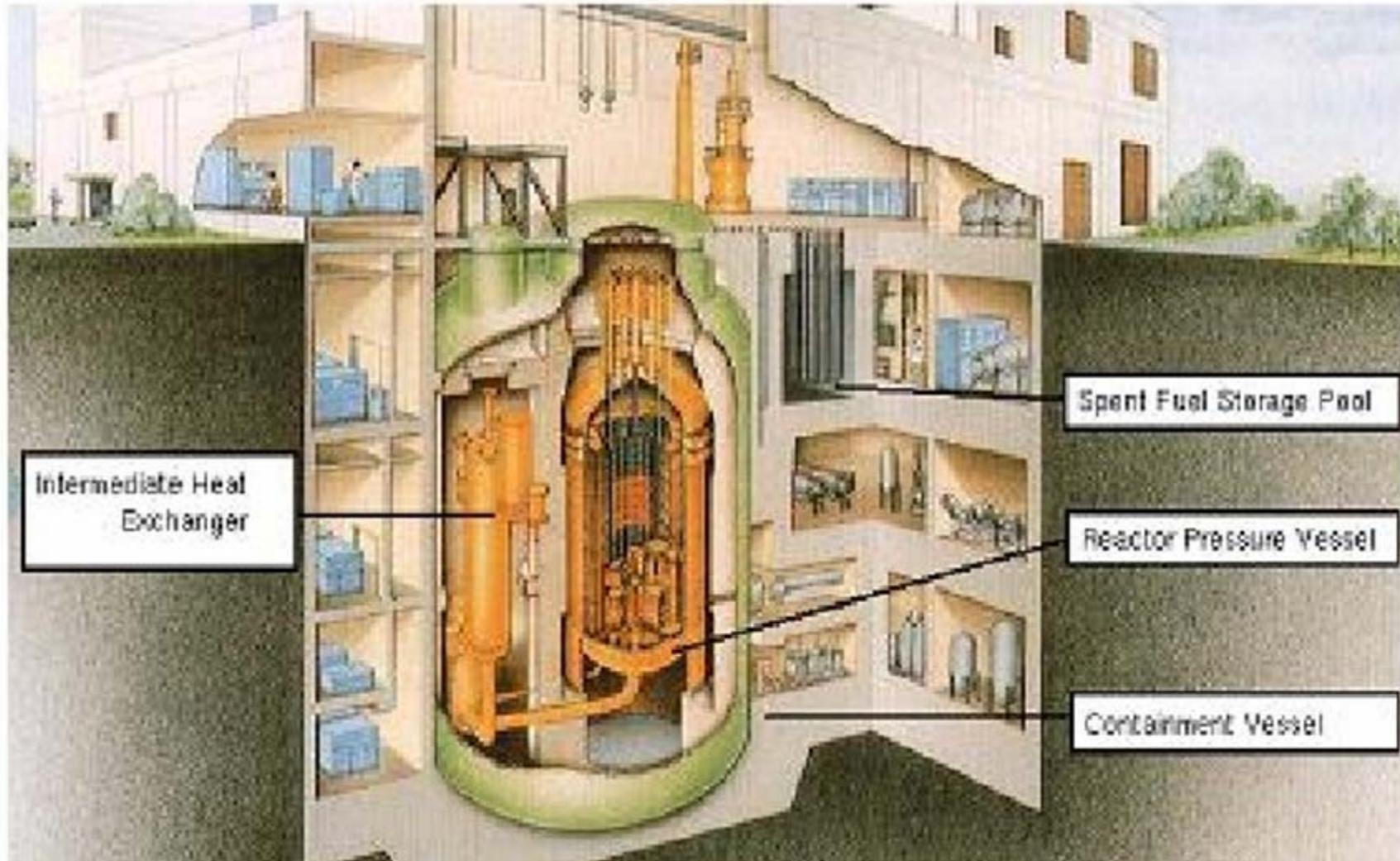


Réacteur prototype HTR de 300 Mwe refroidi hélium  
Démarrage 1976, arrêt définitif 1989

# Le HTR experimental du Japon

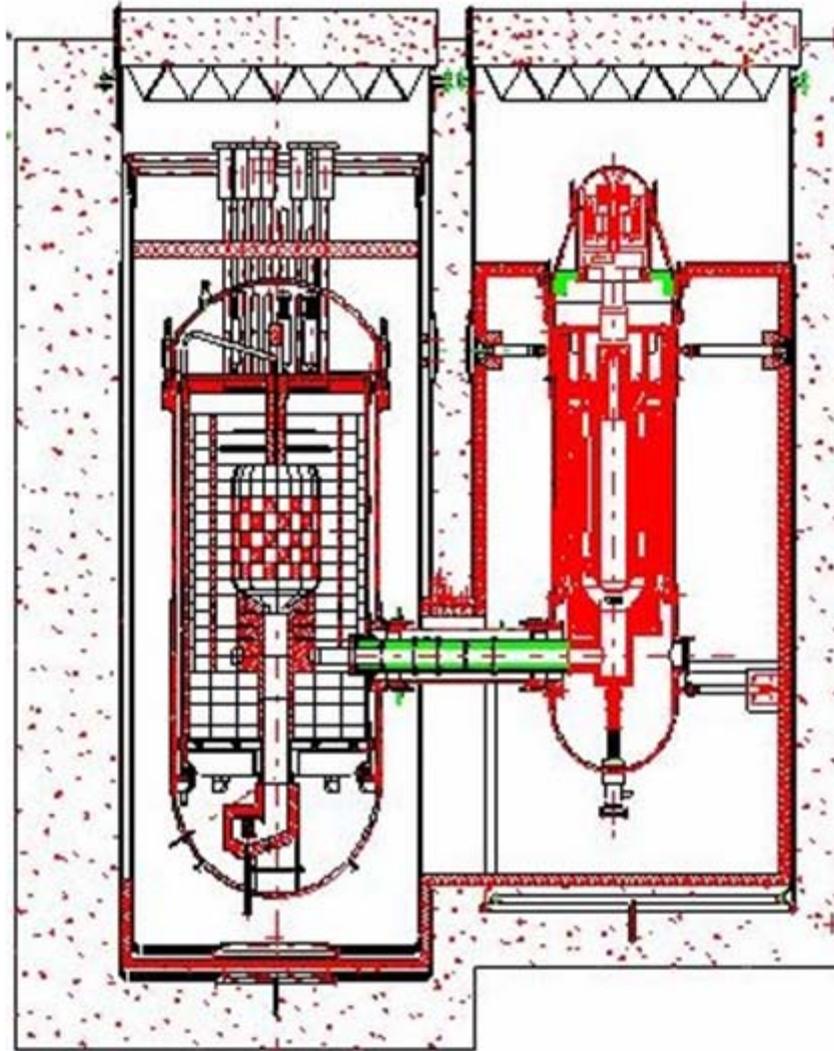
## HTTR (Japan)

cea



# Le HTR expérimental chinois

## HTR 10 (China)

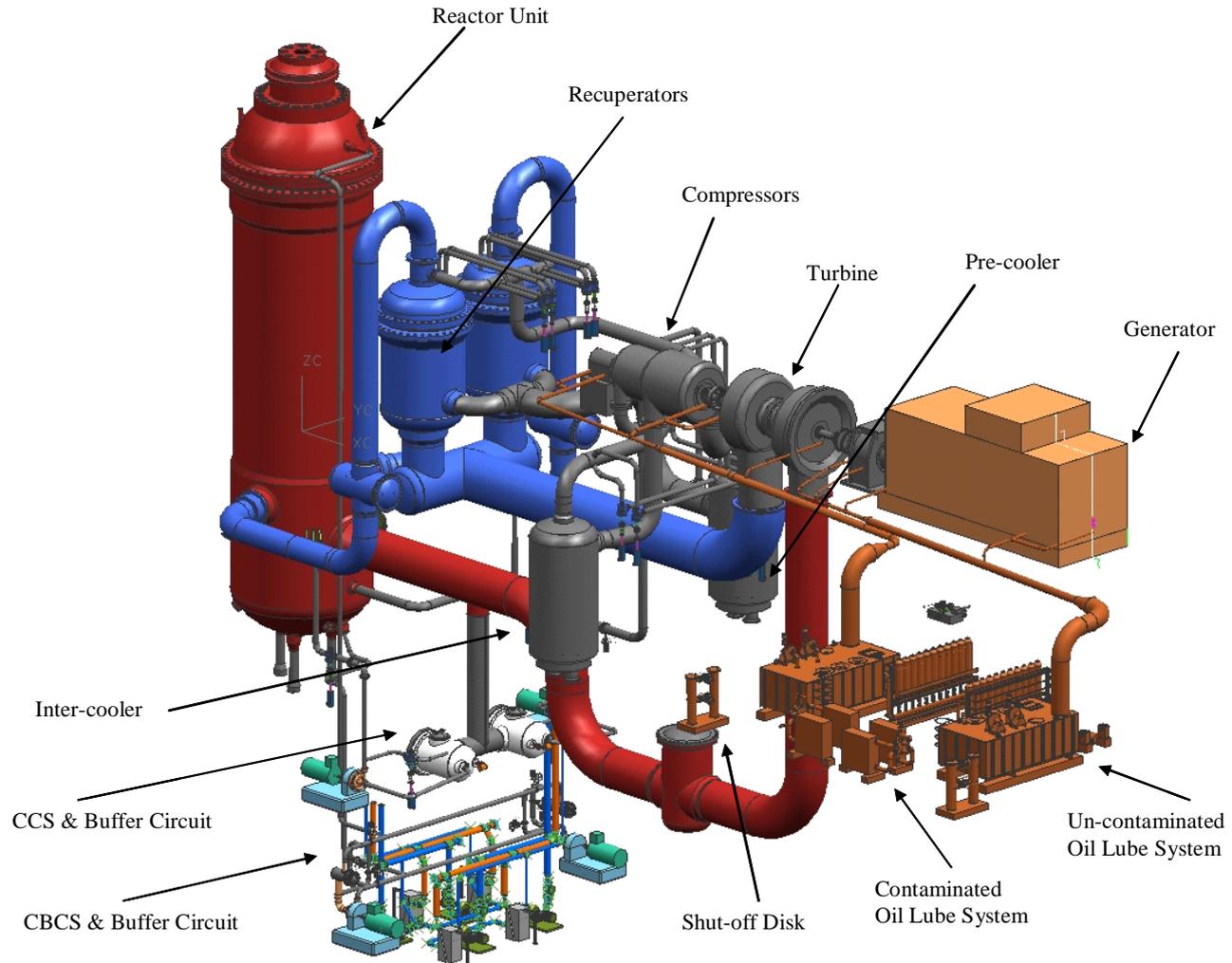


# Le Projet PBMR Sud Africain



## PBMR (South Africa)

### Main Power System

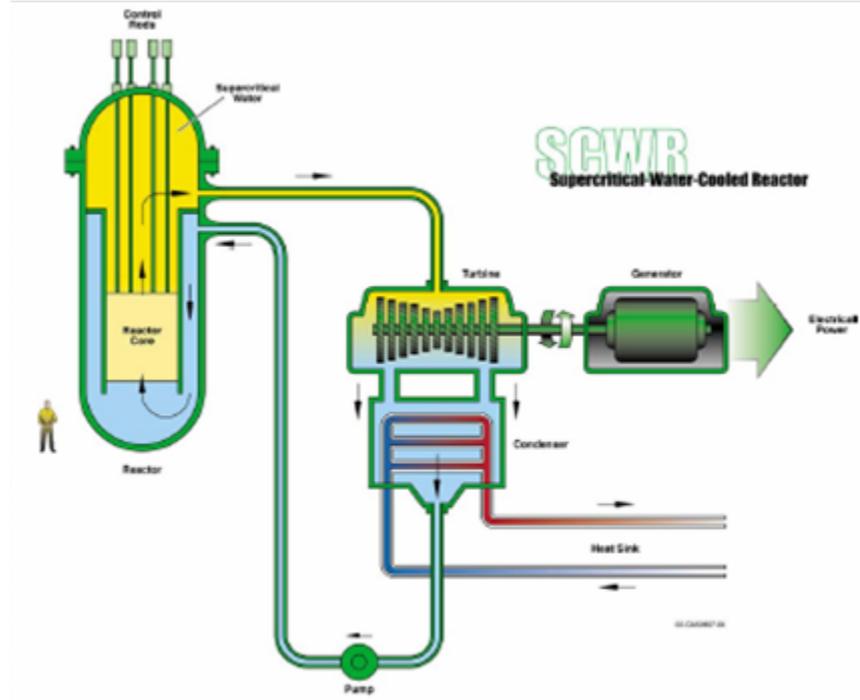


# Réacteur à Eau Supercritique (SCWR)



## Objectifs :

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



# Réacteur à Sels Fondus (MSR)

Objectifs :



- 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

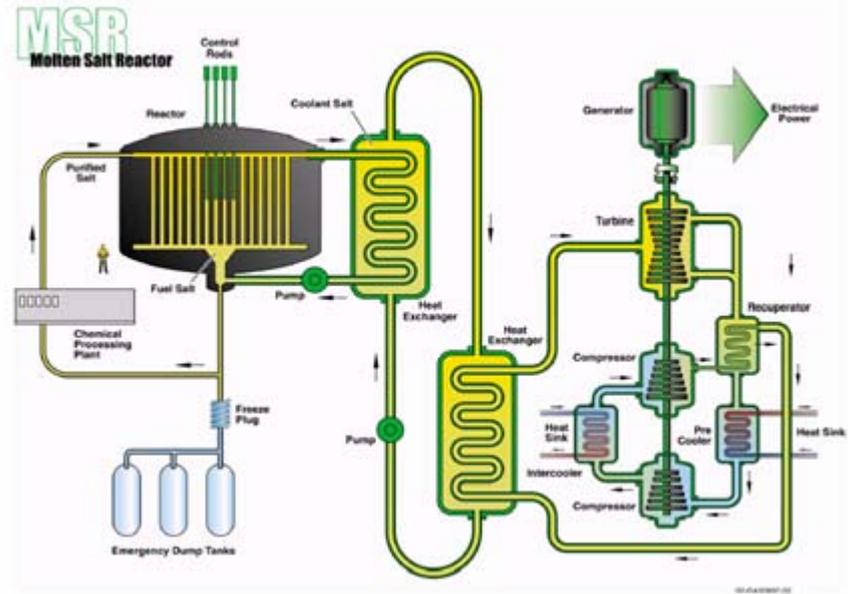


France

Euratom  
countries

U.S.A.

MSR Steering  
Committee



# Technologie Nucléaire Robuste

---



**pour implantation dans les pays émergents**

- **Résistance aux risques de prolifération**
- **Haut niveau de sûreté (en partie intrinsèque)**
- **Maintenance simplifiée**
- **Compétitivité économique avec d'autres sources dans des conditions comparables**
  
- **Petites ou moyennes puissances?**
- **Cœur longue durée de vie?**
- **Technologie éprouvée ou recherche de simplification?**

# Bientôt les premiers prototypes de Gen IV

---



- NGNP : Prototype de VHTR pour production mixte électricité et hydrogène; IDAHO (USA); études de faisabilité en cours; objectif 2018.
- ABR : Prototype de SFR en version brûleur pour démo de combustion des actinides; USA; appel à propositions en cours; objectif 2020
- XXX : Prototype de RNR 4ème génération annoncé par le Président Chirac en Jan 2006; définition en cours; objectif 2020.
- JSFR : Prototype de RNR surgénérateur; JAPON; test des solutions développées sur le RNR à boucles; objectif 2025.



**La meilleure période pour planter  
un arbre, c'était il y a cent ans**

**A défaut, c'est aujourd'hui!**

Vieux Proverbe Chinois

**Merci de votre attention.**