

# Typologie des réacteurs

H.Nifenecker

# Optimisation des energies des neutrons

- Probabilité relative de fission plus grande pour les neutrons lents
- Quantité de noyaux fissiles plus faibles pour les neutrons lents

MAIS

- Contrôle plus facile avec les neutrons rapides
- Surgénération plus facile avec les neutrons rapides

# Neutrons disponibles

- $\nu$  neutrons par fission de fissile
- $\eta$  neutrons par capture de fissile

$$\eta = \nu \frac{\sigma_f}{\sigma_f + \sigma_c}$$

- Bsoins:
  - 1 neutron pour la fission
  - 1 neutron pour la régénération
  - 0.2 neutrons perdus
- $(\eta - 2.2)$  neutrons disponibles

# Energie Nucléaire Durable

- Conditions pour la durabilité :
  - Incinération des actinides
  - Surgénération
  - Transmutation de Fragments de Fission à vie longue?
- Cycle Uranium-Plutonium
  - Spectre thermique  
 $H=2.11$        $n_{av}=2.11-2.2=-0.09$
  - Spectre rapide  
 $\eta=2.61$        $n_{av}=2.61-2.2=0.41$
- Cycle Thorium-Uranium
  - Spectre thermique  
 $\eta=2.28$        $n_{av}=2.28-2.2=0.08$
  - Spectre rapide  
 $\eta=2.3$        $n_{av}=2.30-2.2=0.1$

# Réacteurs thermiques 1

- Produire des fissions: Combustible
- Extraire la chaleur: Caloporteur+ échangeurs
- Contrôle de la Réactivité : Barres, eau borée...
- Ajustement de la vitesse des Neutrons : ralentisseur

# Réacteurs thermiques 2

## Modérateur Graphite

1. Magnox: caloporteur CO<sub>2</sub> (metal U naturel)
2. AGR: caloporteur CO<sub>2</sub> (UO<sub>2</sub> enrichi 2,5-3,5%)
3. RBMK: caloporteur H<sub>2</sub>O (enrichi 2-2,4%)

## Modérateur Eau lourde

1. CANDU:  
Caloporteur D<sub>2</sub>O  
Uranium naturel

# Réacteurs thermiques 3

Enrichissement du combustible 3 à 5%

Modérateur H<sub>2</sub>O

Caloporteur H<sub>2</sub>O

1. REP: Eau Pressurisée
2. REB: Eau bouillante

# Réacteurs thermiques 4

## Modérateur Graphite

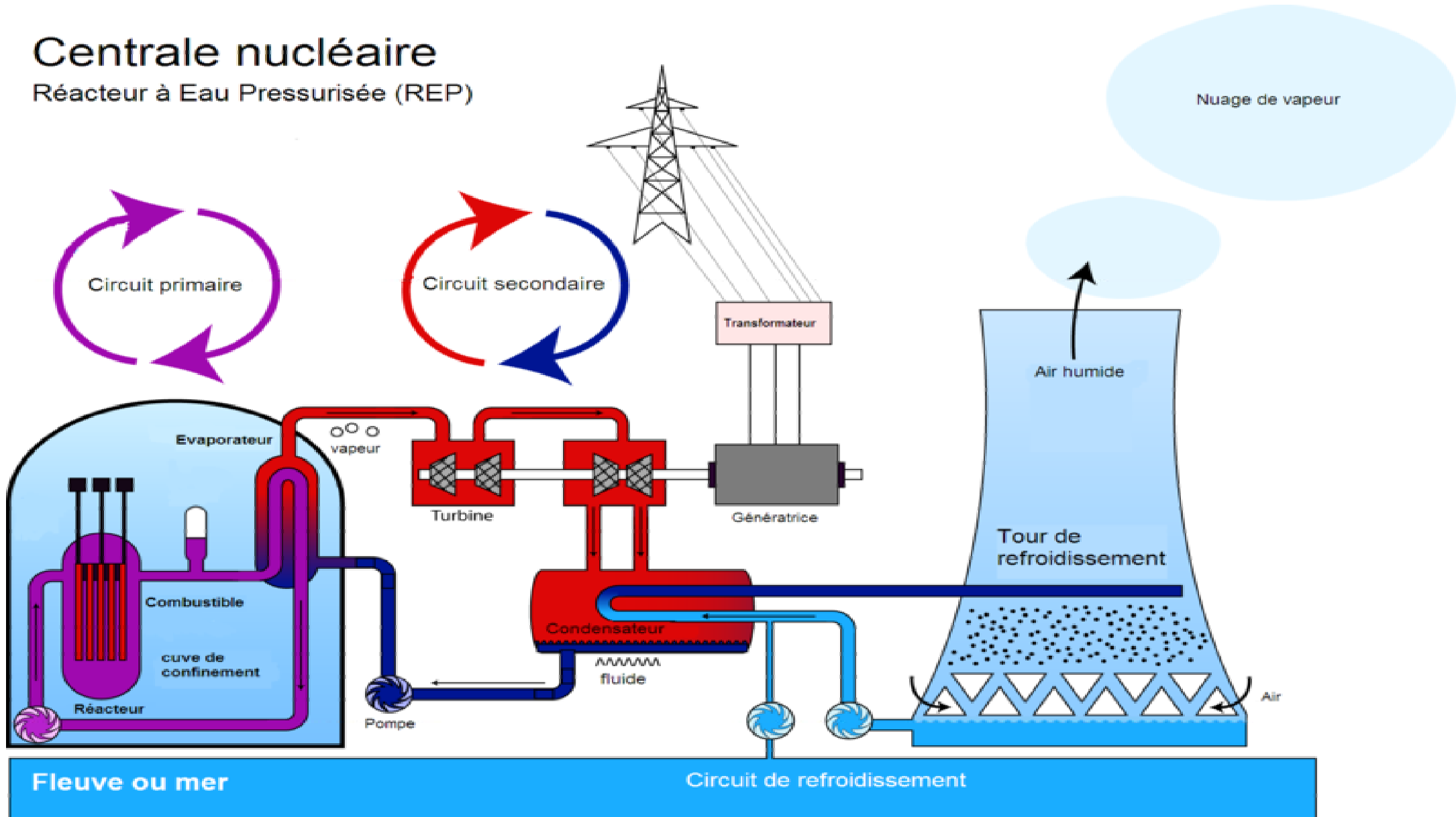
1. Caloporteur sel fondu, combustible sel fondu
2. Très Haute Température (boulets)



# REP1

## Centrale nucléaire

Réacteur à Eau Pressurisée (REP)



# REP2

- pression : 155 bar ;
- température : 300°C ;
- débit : 60 000 m<sup>3</sup>/h.
- combustible: 235U enrichi 3-5%
- Combustible Mox possible : U238-Pu 5%
- Eau secondaire “propre”
- Burnup >40000 MWd/tU

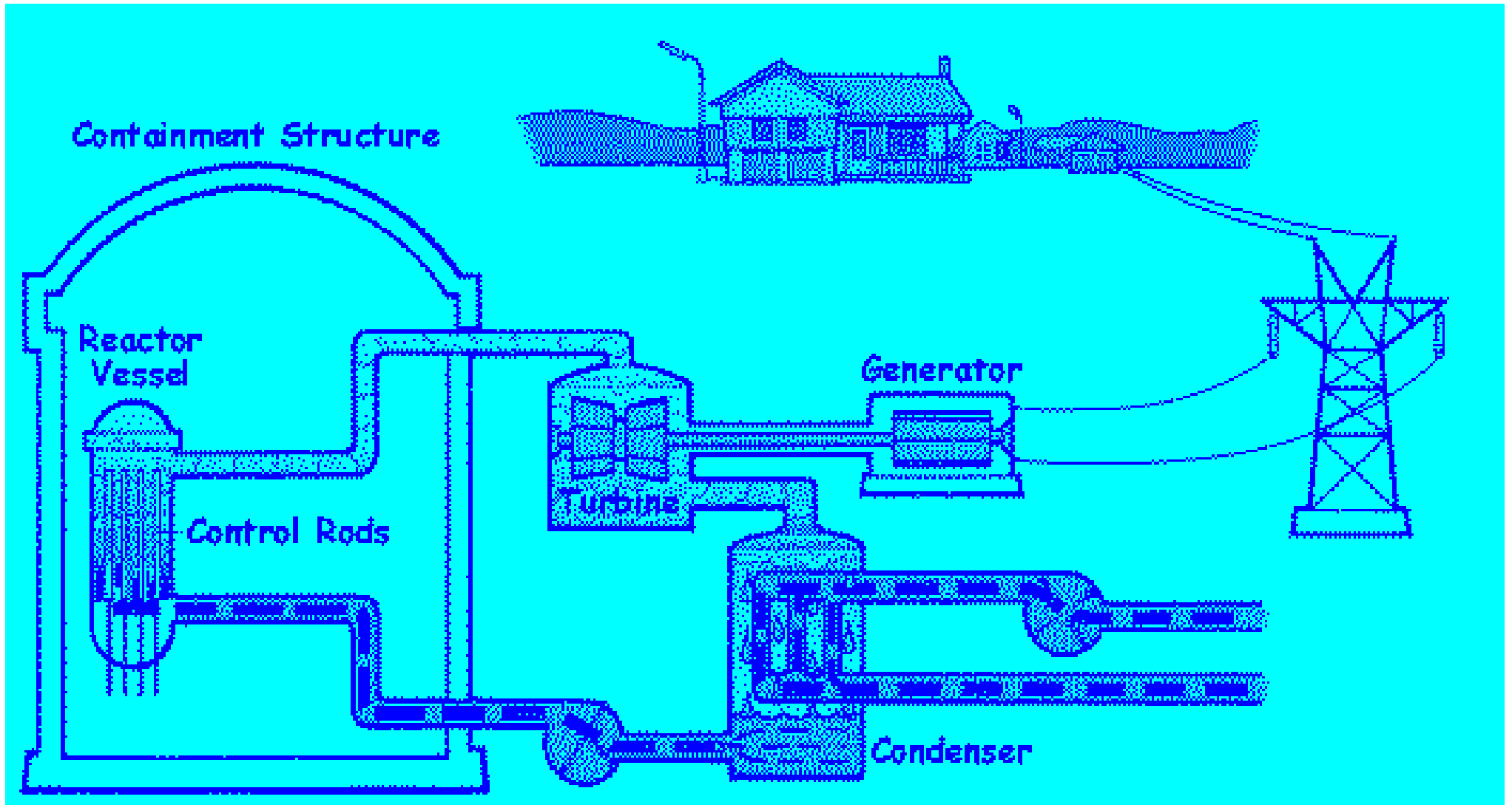
$$\frac{dk}{dT} < 0$$

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

# REP3

- Excursion fortement critique impossible  
L'ébullition arrête le réacteur
- La fusion du Coeur est possible à cause  
de la chaleur résiduelle
- Production d'hydrogène par la réaction  
de la vapeur avec le Zr
- Empêcher l'explosion hydrogène
- Exemple: TMI

# REB 1



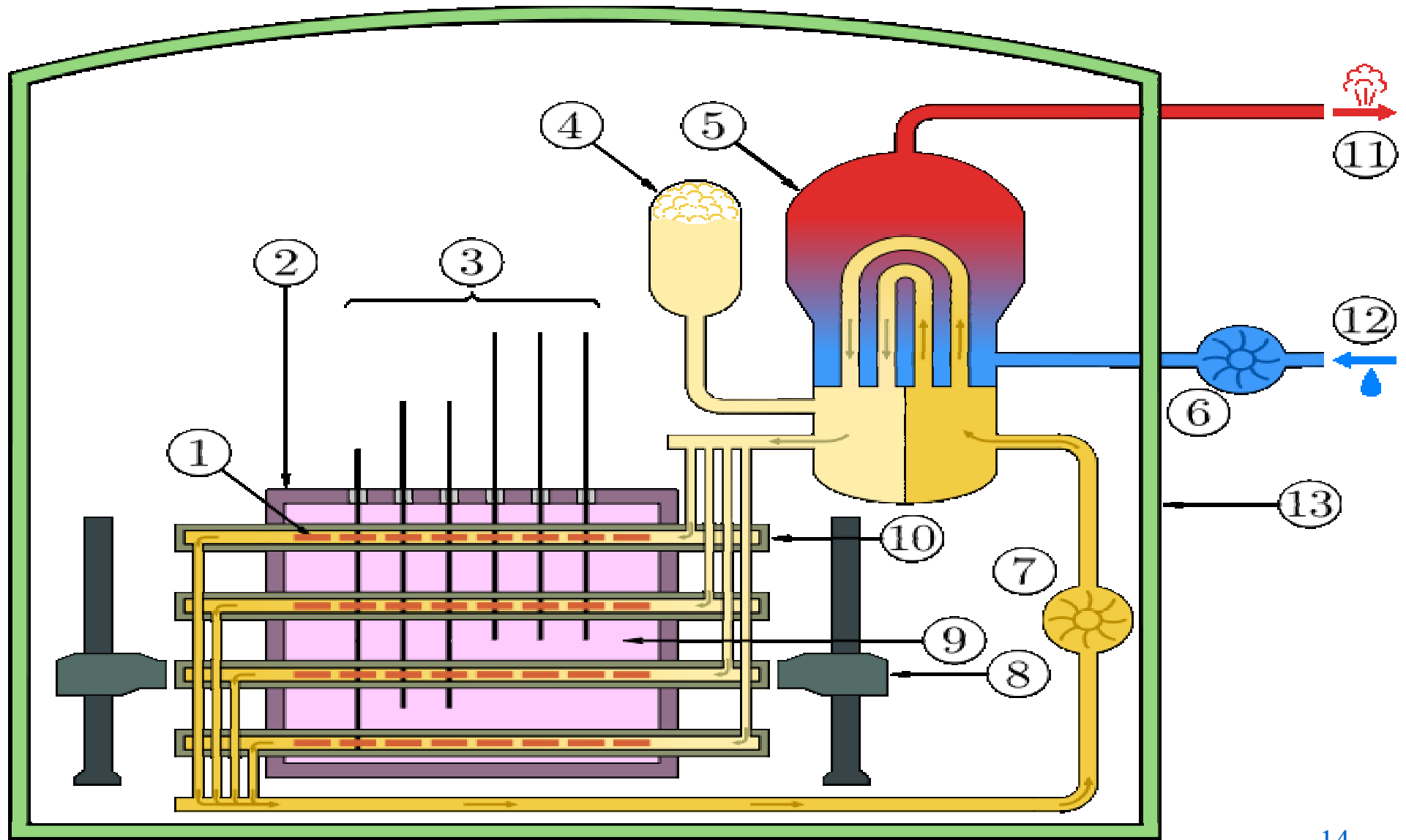
# REB 2

- pression: 80 bars
- pas d'échangeur
- pas de circuit secondaire
- Moins cher

Mais

- Vapeur active
- système diphasique
- Turbine active
- interventions plus difficiles

# CANDU 1



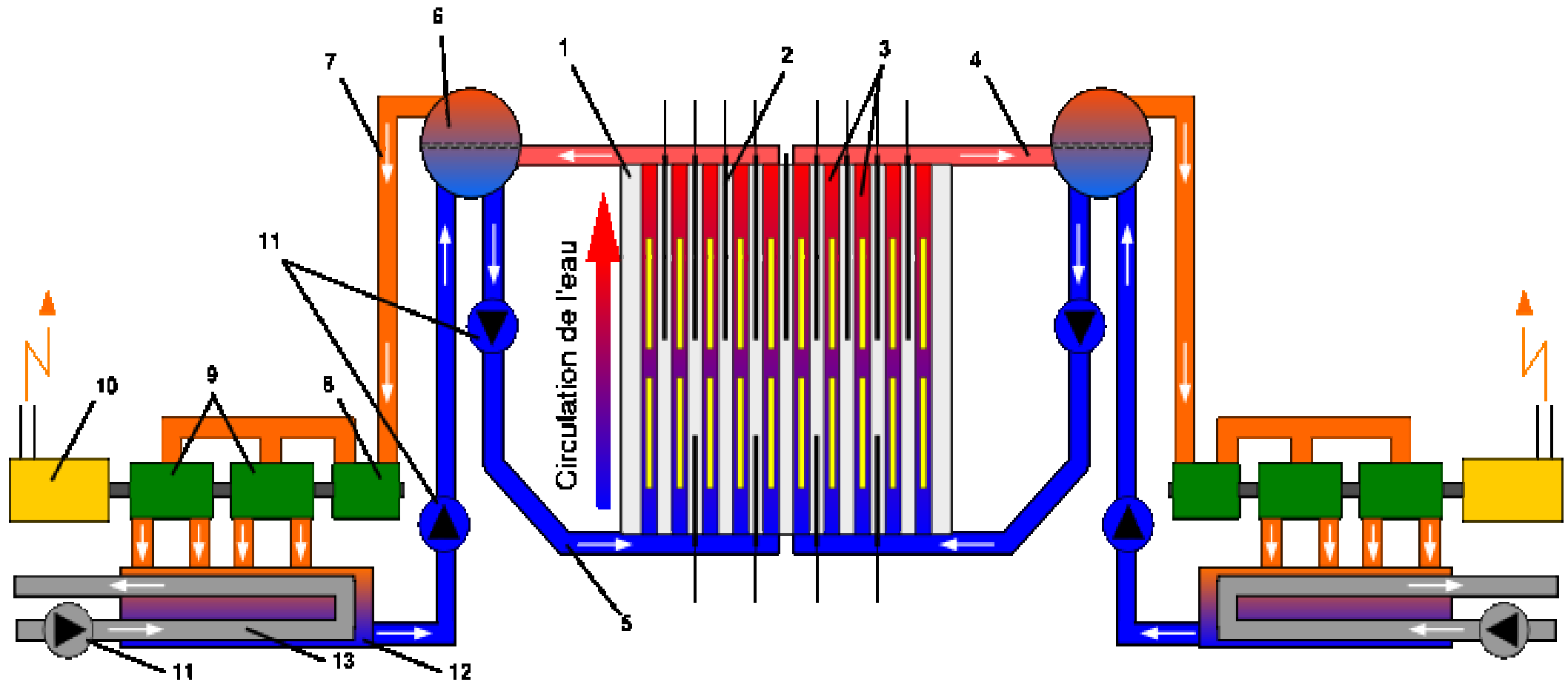
# CANDU 2

- Modérateur: D2O
- Caloporteur: D2O or H2O sous pression
- Tubes de Force
- **Combutible: Uranium naturel possible**

## **Régénération Thorium?**

- Machine de re-déchargement marchant en ligne
- Faible taux de combustion: 5 MWd/ton U
- **Proliférant Pk, In**
- Bon Paramètres de sûreté

# RBMK 1



## Légende :

- |  |   |
|--|---|
| 1. Cœur du réacteur modéré au graphite     | 8. Turbine à vapeur haute pression          |
| 2. Barres de contrôle                      | 9. Turbine à vapeur basse pression          |
| 3. Tubes de force contenant le combustible | 10. Générateur électrique                   |
| 4. Mélange eau/vapeur                      | 11. Pompes                                  |
| 5. Eau légère                              | 12. Condensateurs                           |
| 6. Séparateur de vapeur                    | 13. Eau de refroidissement (fleuve, mer...) |
| 7. Vapeur entrante                         |   |



# RBMK 2

- Modérateur: Graphite
- Caloporteur: H<sub>2</sub>O sous pression
- Tubes de force
- Combustible: Uranium enrichi
- Machine de déchargement travaillant en ligne.  
Production de Pu Militaire

• Instabilité Xénon

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

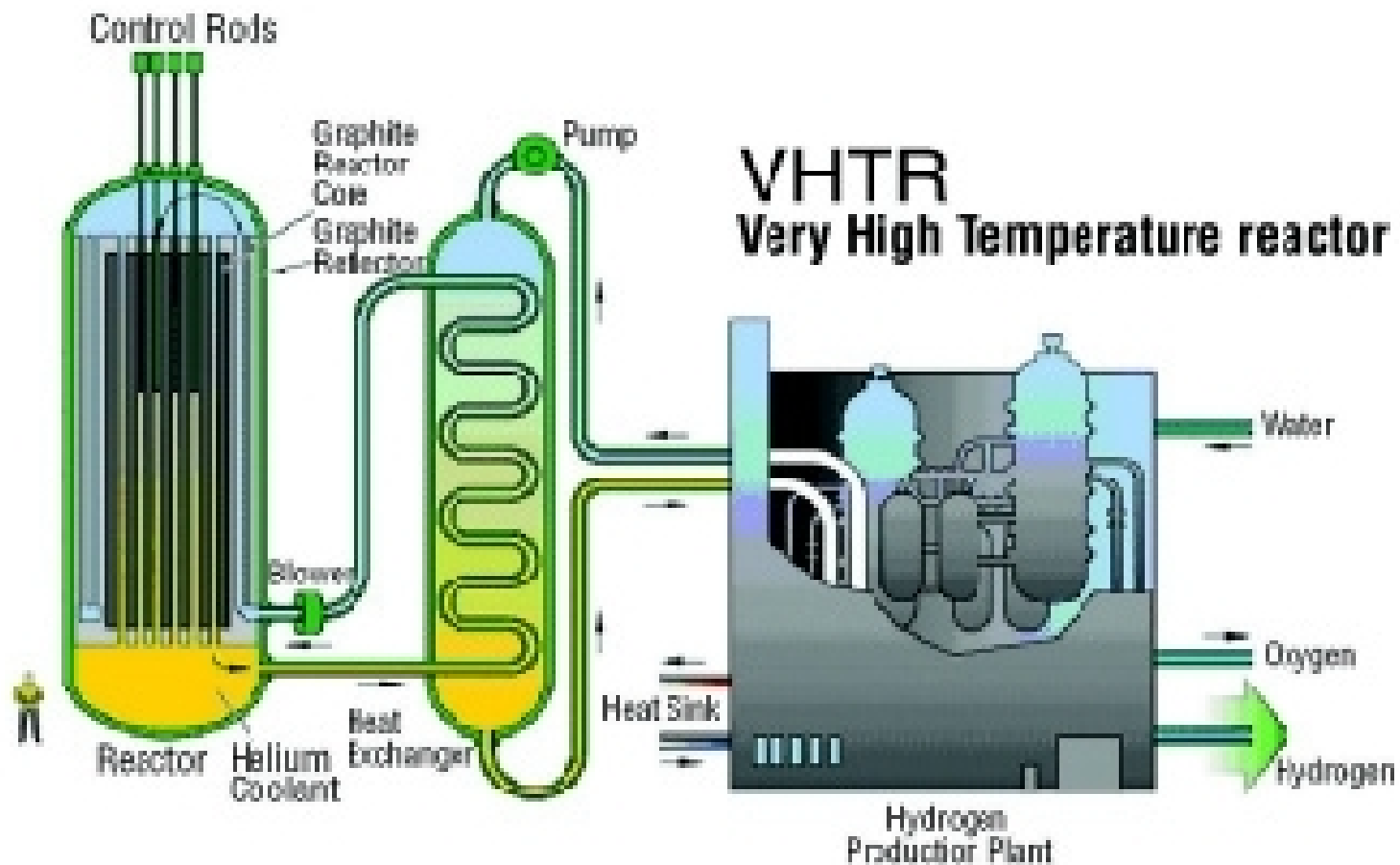
• Barres de contrôle mal conçues

# Réacteurs à Gaz

# Très Haute Température 1

- Combustible très réfractaire
- Refroidissement d'urgence par radiation
- Pas de fusion de coeur possible (petits réacteurs)
- Très bon rendement
- Co-génération électricité-chaleur
- Production d'hydrogène
- Fort taux de combustion
- Non-proliférant
- Retraitement difficile

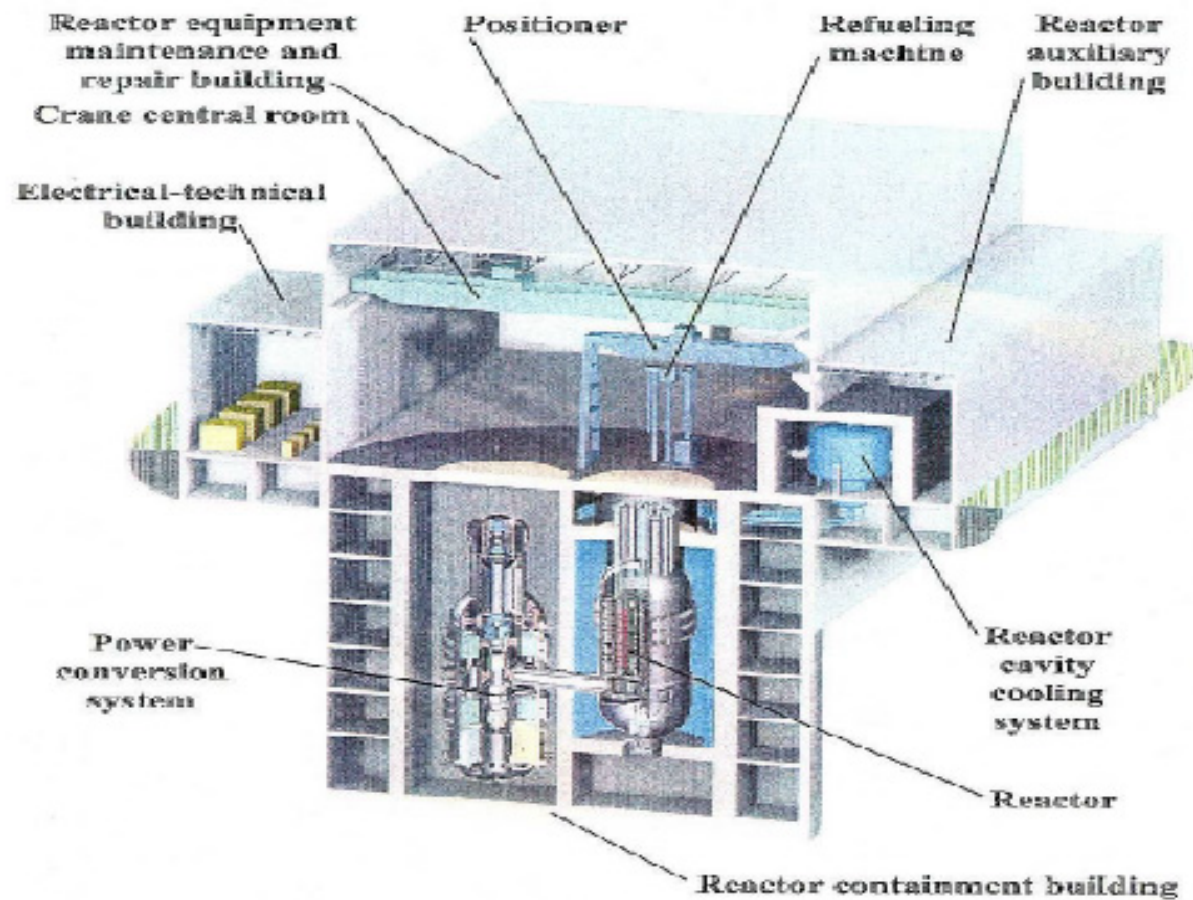
# Très Haute Température 2



# Réacteur boulet

Technical Working Group 2 – Gas Cooled Reactor Systems

## Conceptual PMR

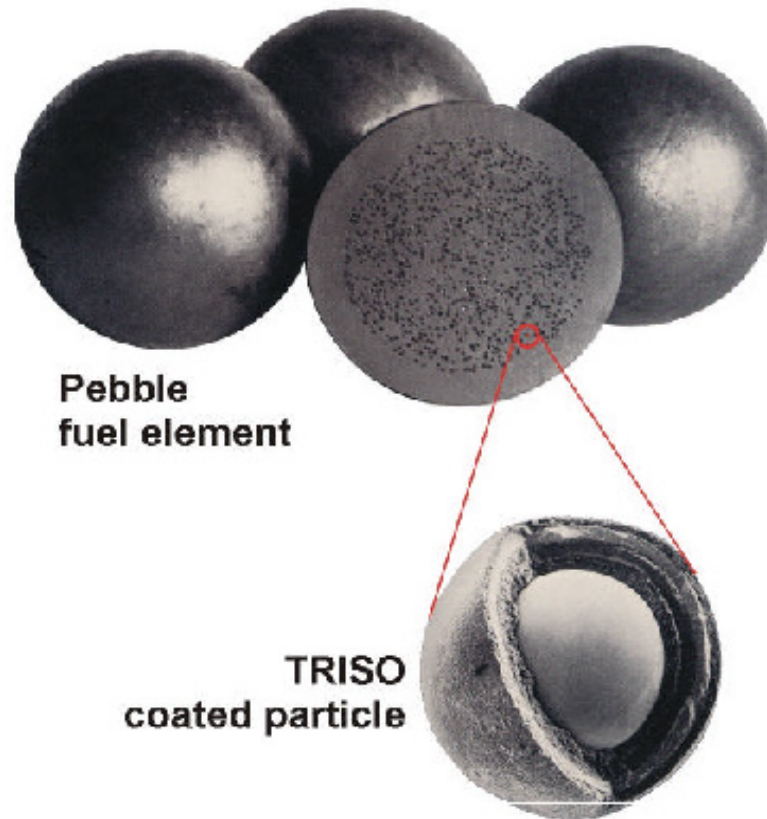


# Combustible Boulet

Technical Working Group 2 – Gas Cooled Reactor Systems

## PBR Fuel

- Pebbles are 60 mm

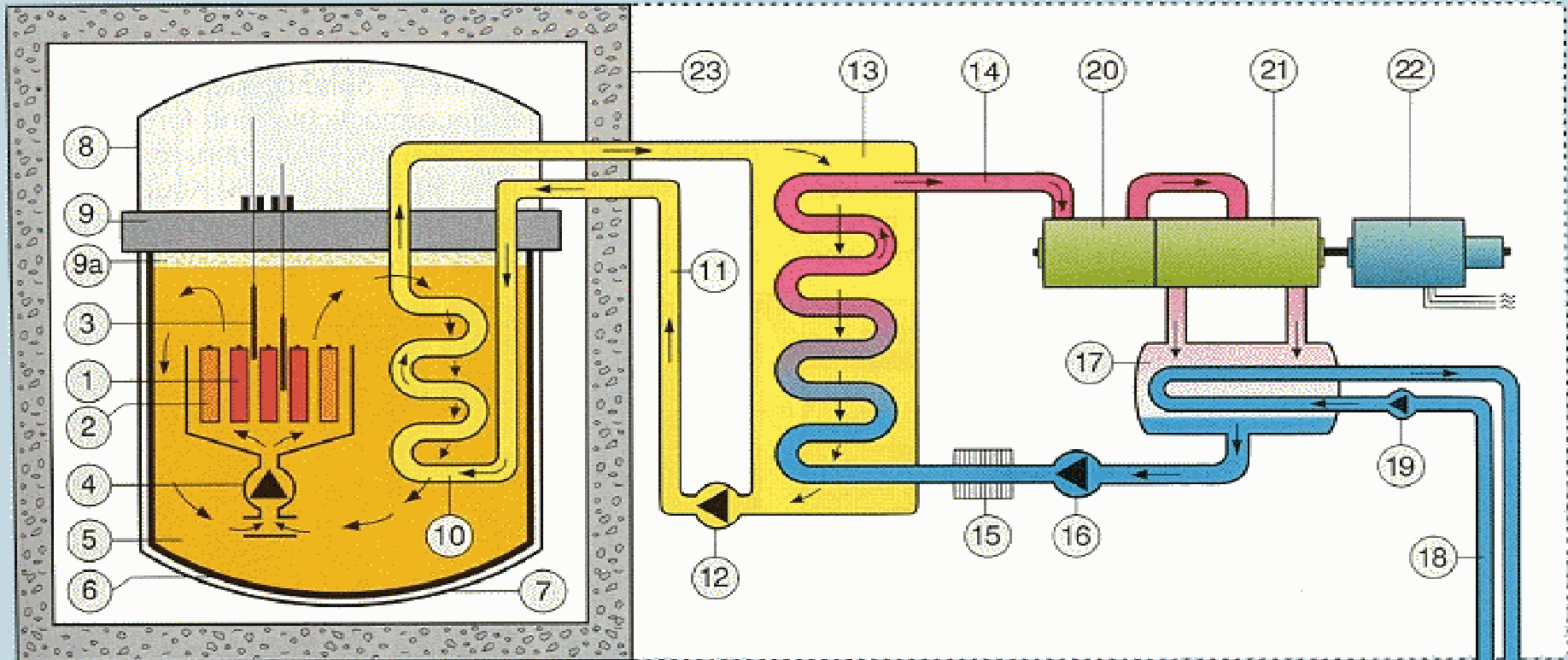


# Réacteurs rapides 2

## Surgénérateurs

1. Caloporteur Sodium Liquide  
BN600, BN800, Phénix, Monju...
2. Caloporteur Plomb fondu  
Sousmarins Russes
3. Caloporteur Gaz ?

# 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



# RNR2

- pression : 2 bar ;
- température : 600°C ;
- Piscine.
- Combustible: MO<sub>x</sub> U238, 14-20% Pu
- Echangeurs Na-H<sub>2</sub>O
- Eau secondaire propre
- Burnup >120000 MWd/tU

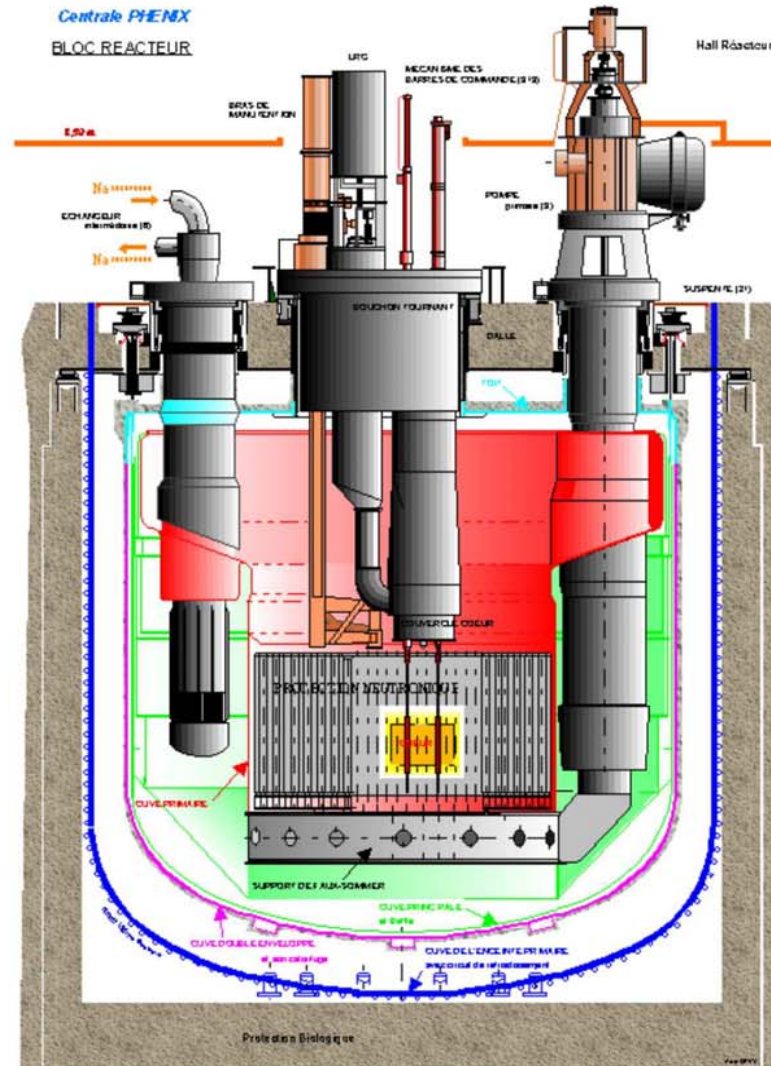
$$\frac{dk}{dT} < 0$$

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

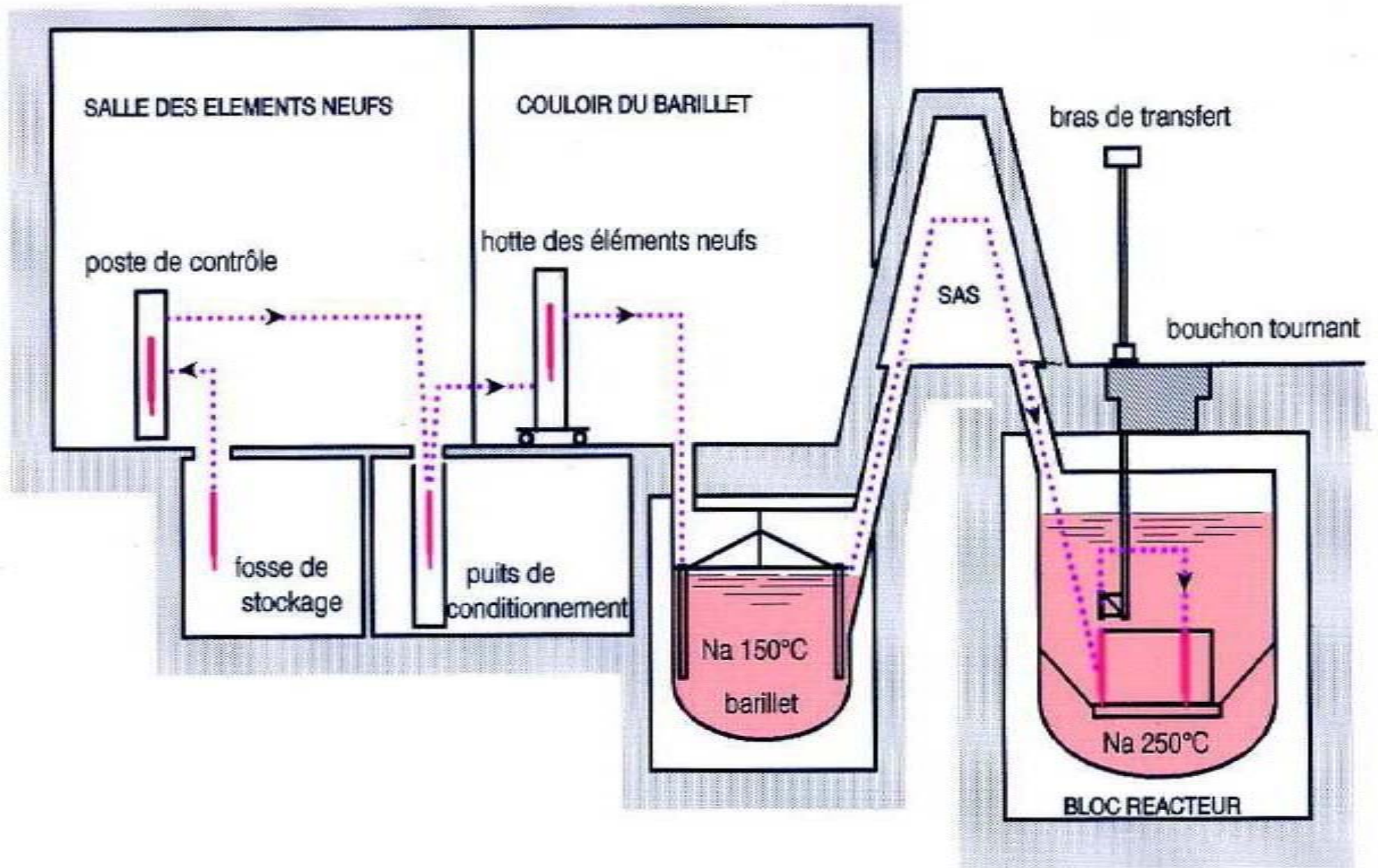
# RNR3

- Grande inertie thermique de la piscine Na
- Refroidissement passif résiduel possible
- Production d'hydrogène par réaction  
vapeur d'eau-Na
- Eviter l'explosion hydrogène
- Feu de Na

# Phénix

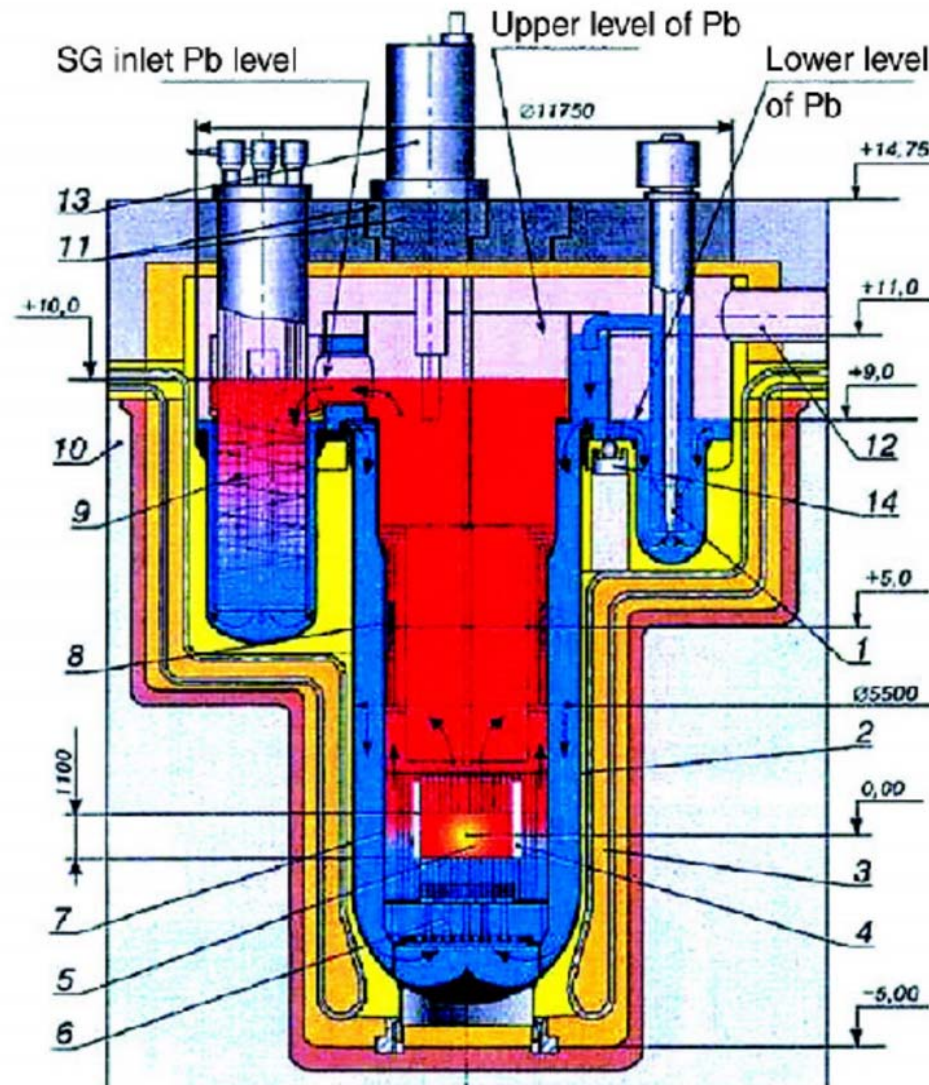


# Chargement-déchargement Phénix



# Réacteurs à plomb liquide

# Réacteurs au Plomb



# Réacteurs à sels fondus

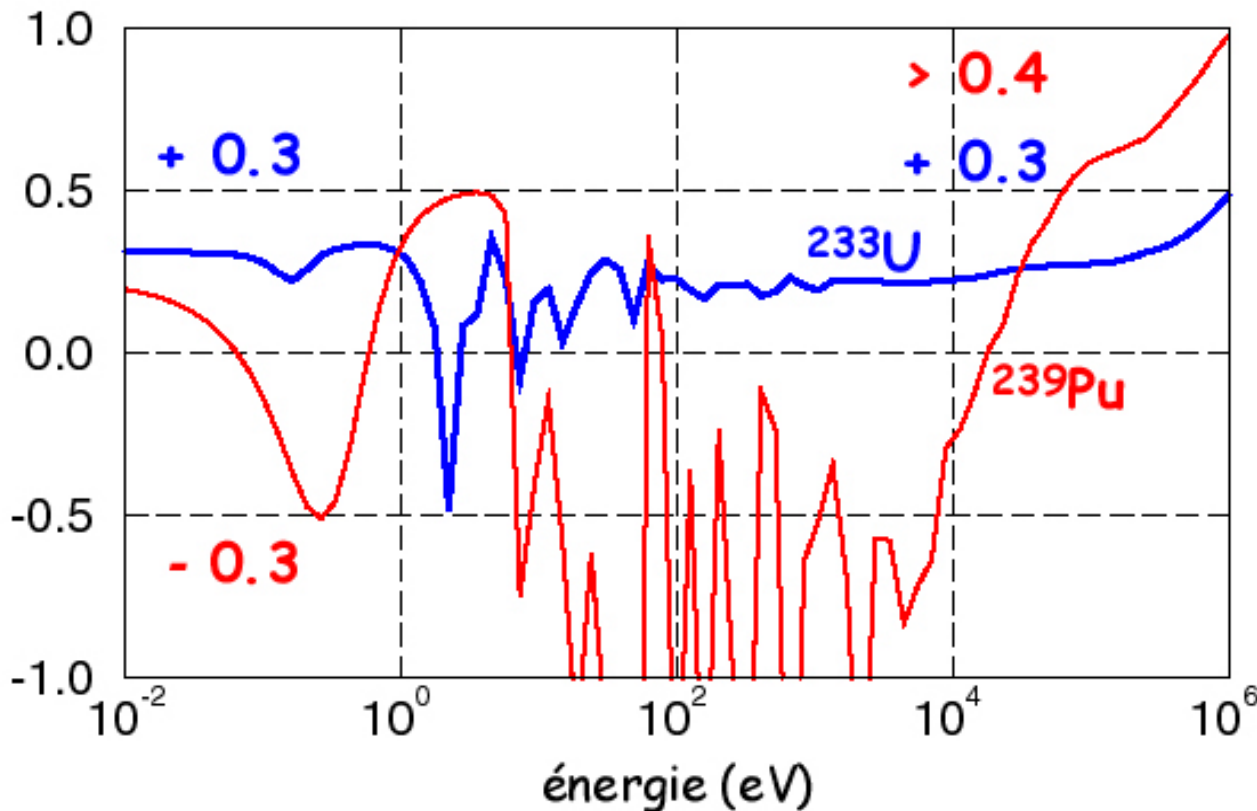
## FAST REACTORS OPERATIONAL DATA 2006

Reactor (country)	Thermal Power (MW)	First criticality	Final shut-down	Operational period (years)
EBR-I (USA)	1.4	1951	1957	6
BR-5/BR-10 (Russia)	8	1958		44
DFR (UK)	60	1959	1977	18
EBR-II (USA)	62.5	1961	1991	30
EFFBR (USA)	200	1963	1972	9
Rapsodie (France)	40	1967	1983	16
BOR-60 (Russia)	55	1968		38
SEFOR (USA)	20	1969	1972	3
BN-350 (Kazakhstan)	750	1972	1999	27
Phenix (France)	563	1973		33
PFR (UK)	650	1974	1994	20
JOYO (Japan)	50-75/100	1977		29
KNK-II (Germany)	58	1977	1991	14
FFTF (USA)	400	1980	1993	13
BN-600 (Russia)	1470	1980		23
SuperPhenix (France)	3000	1985	1997	12
FBTR (India)	40	1985		21
MONJU (Japan)	714	1994		12
BN-800 (Russia)	2000	Under construction		
CEFR (China)	65	Under construction		
PFBR (India)	1250	Under construction		
<b>Total All Fast Reactors</b>				<b>373</b>



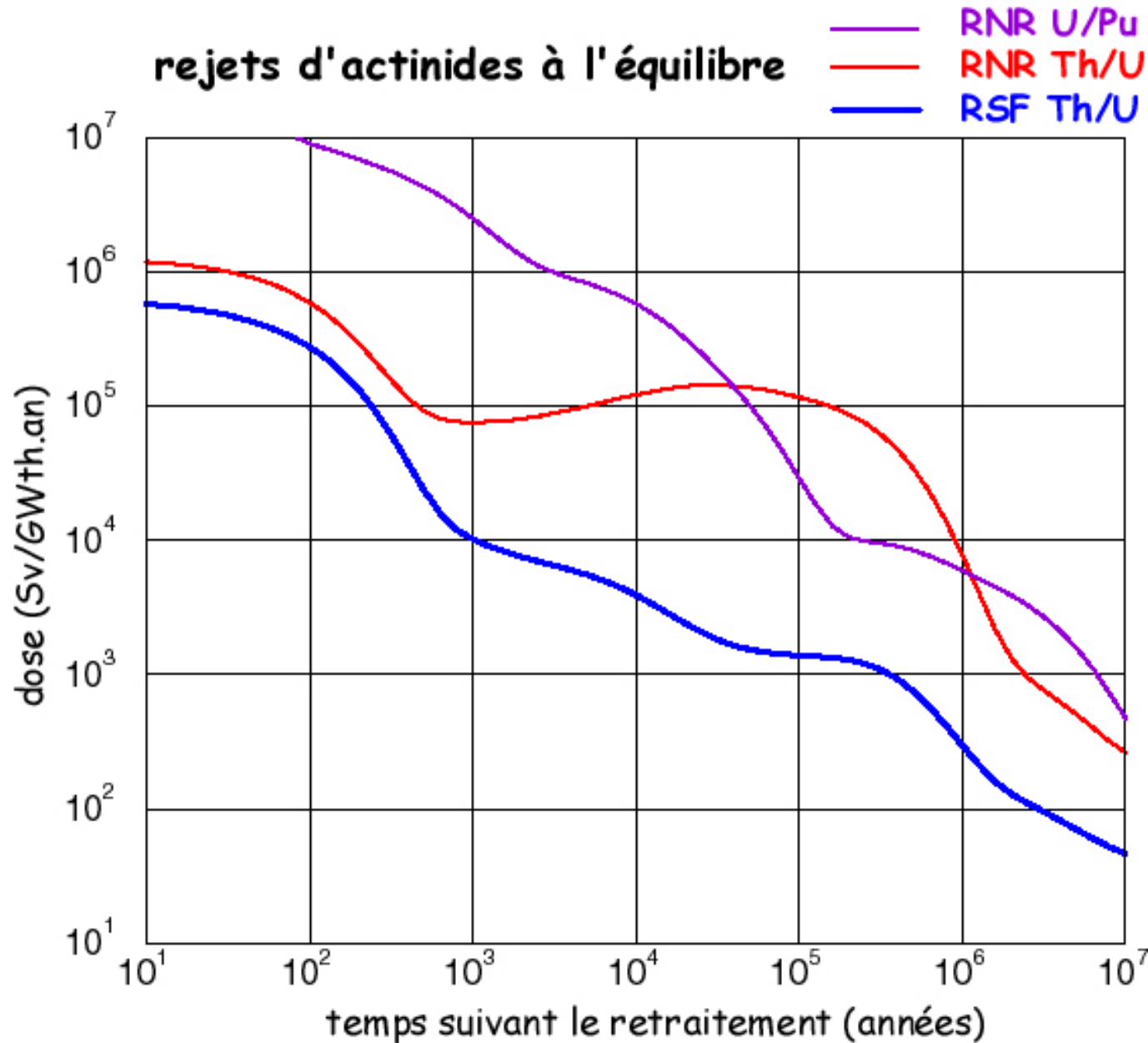
*-Neutron balance*

$\nu$	<i>neutrons per fission</i>	(2.5)	} Typical values for $^{233}\text{U}$
$-1$	<i>Needed for chain reaction</i>		
$-\alpha$	<i>Parasitic capture on fissile</i>	(0.1)	
$-(1+\alpha)$	<i>fertile capture for regeneration</i>	(1.1)	
$= \nu - 2(1+\alpha)$		<i>« available neutrons » per fission</i>	(0.3)



U/Pu cycle  
Fast neutrons  
  
or  
  
Th/U cycle  
(fast or thermal)

- Actinide Radiotoxicities



• radiotoxicities

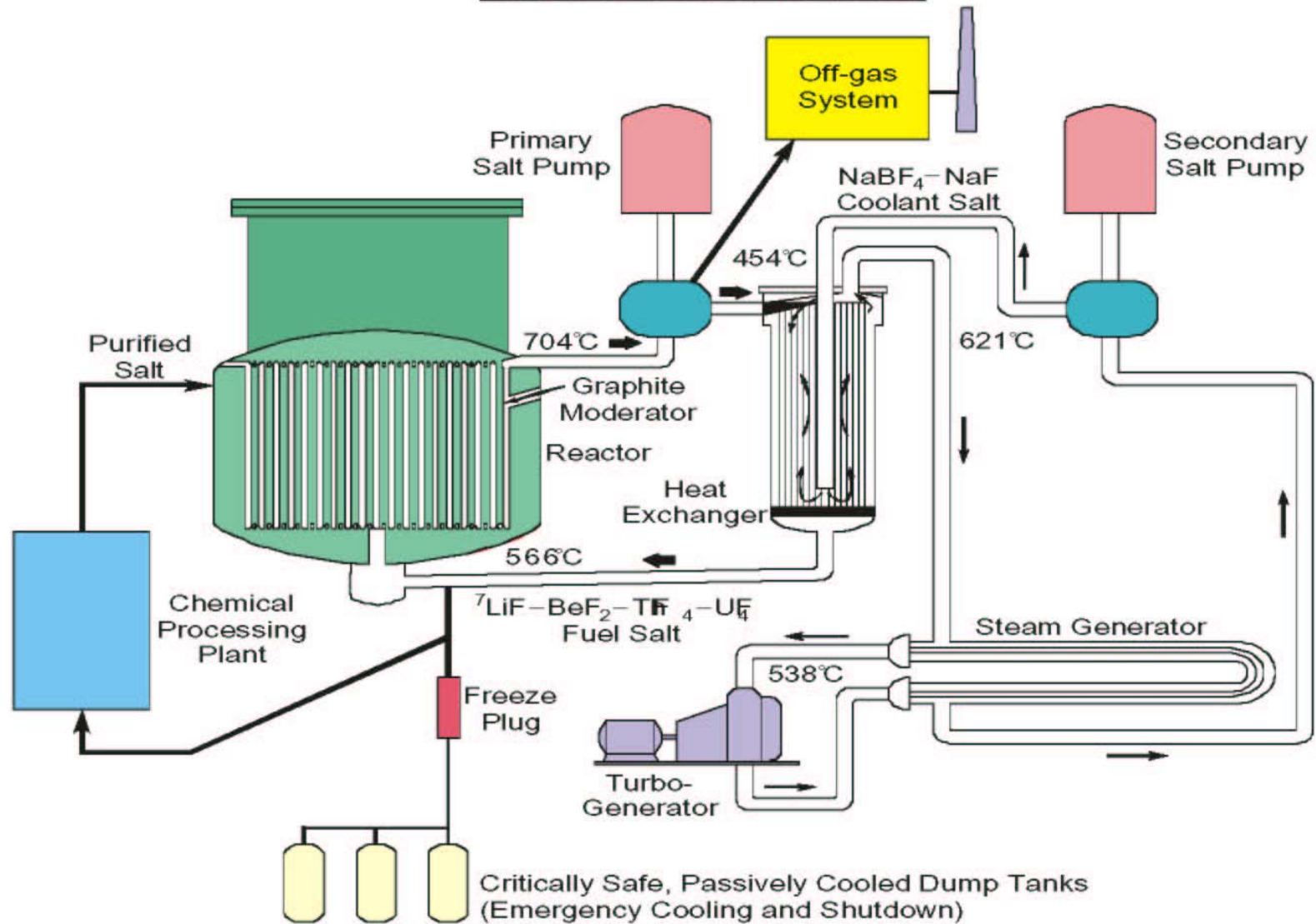
$$R(t) = \sum_i r_i \lambda_i N_i(t)$$

$r_i$  = dose factor (Sv/Bq)

# Combustibles Liquides

- Mélanges d'Actinide, fluorures de Berylium et Lithium.
  - Extraction (Quasi)continue des F.F. et alimentation de Fertile-Fissile
  - Contrôle de la réactivité
  - Très bonne sûreté envers les accidents de criticité
  - Possibilité d'incinération des fissiles sans régénération à partir des fertiles
  - Faible inventaire possible pour de systèmes thermiques
- Technique mal documentée
- Les contraintes de sûreté difficiles?

## Molten Salt Reactor



# Retraitement

# RSF

- *Reprocessing* :  
3 steps

## - U Fluoration

- $UF_4 + F_2 \rightarrow UF_6$  volatile
- 99% U extraction

## - Procédé intéressant

- Minimisation of U inventory

## - Pa+trans U extraction

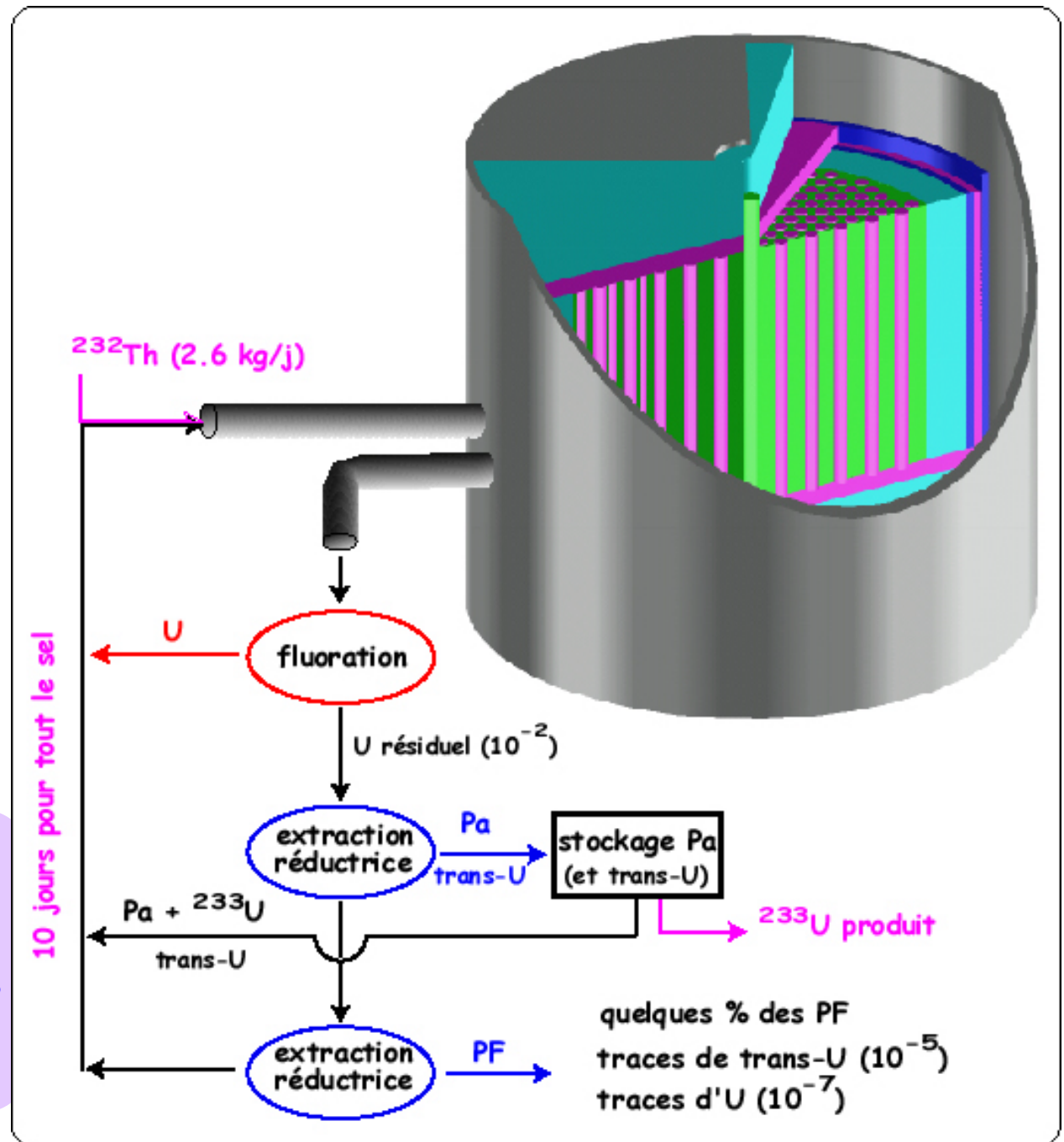
## - $^{233}\text{Pa}$ désintégration

- 3 x 27 jours minimum
- Bred  $^{233}\text{U}$  extraction
- 

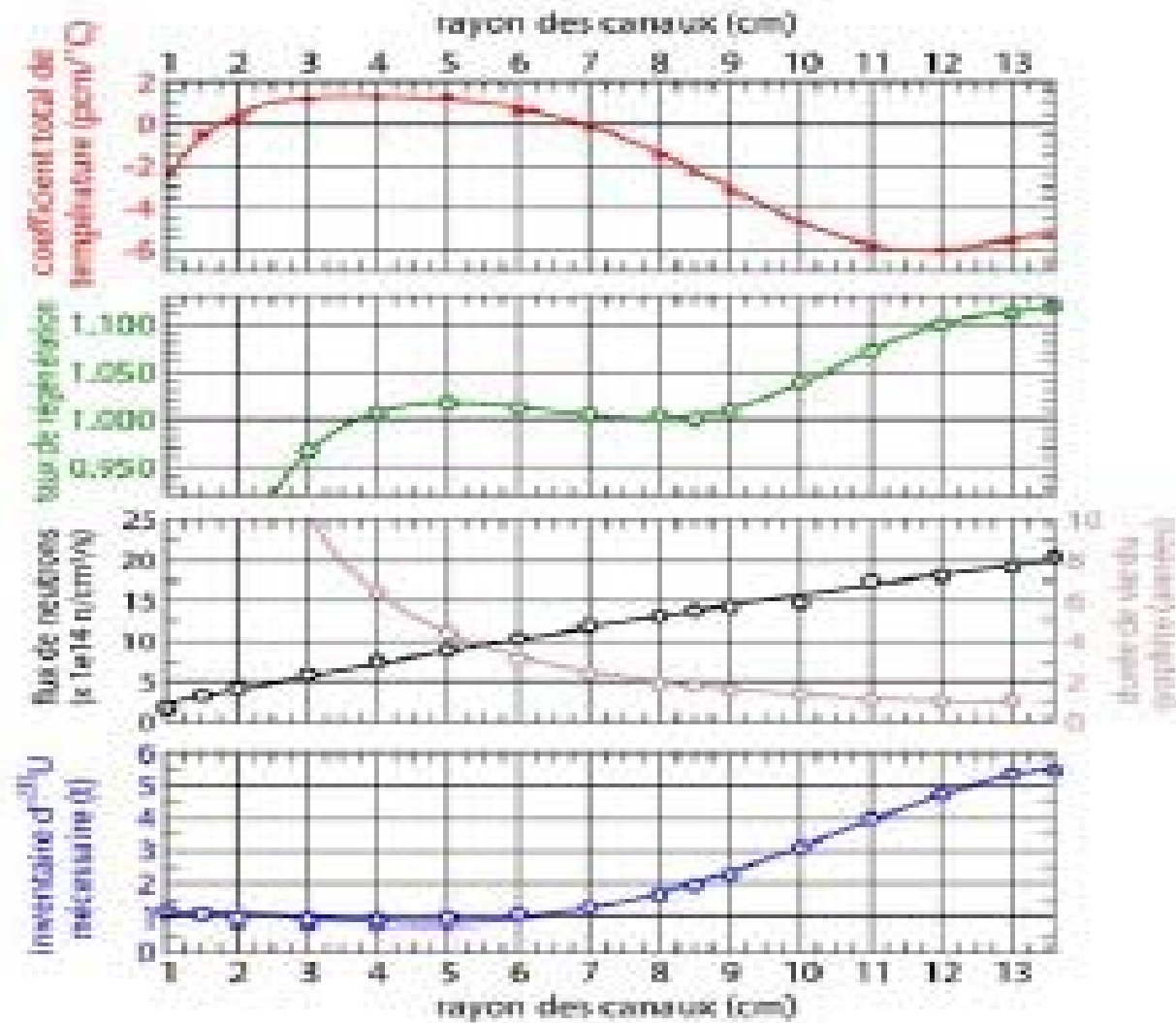
## - FP Extraction (T = 10 j)

- helium bullage (gaz)
- Extraction Reductrice
  - Terres rares jusqu'à 20%
  - Th laissé dans le sel

## - Addition de Th



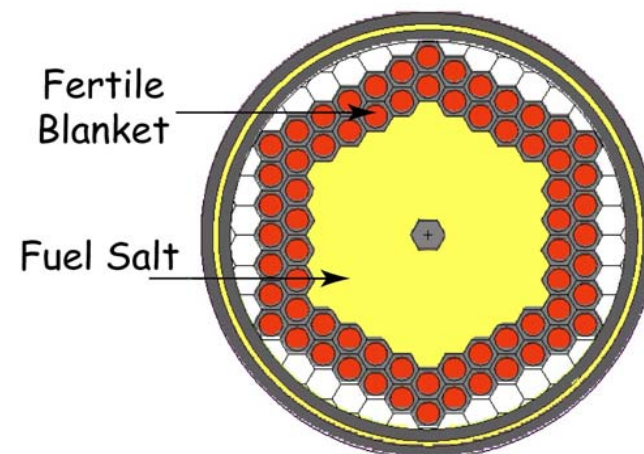
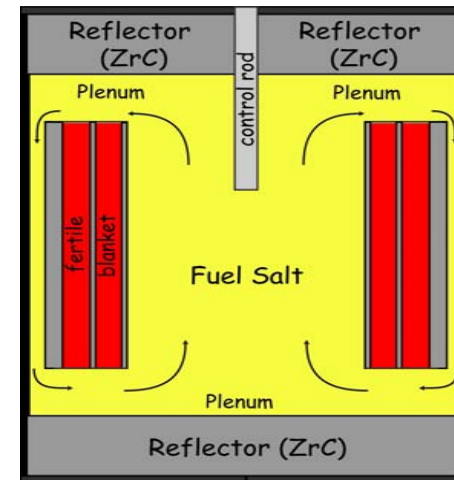
# Etude Paramétrique



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

# Réacteurs à sels fondus et neutrons rapides

- Pas de graphite:
- Sûreté Passive:  
pas de réserve fissile, très bons coefficients
- Retraitement en ligne simple, charge initiale Pu-AM possible



# Génération IV

## Partenaires:

- Argentina
- Brasil
- Canada
- Chine
- France
- Japan
- Russie
- South Africa
- South Korea
- USA
- UK
- UE

## Intérêt: Inde



# Conditions à remplir

- Sûreté
  - Systèmes pardonnants
  - Systèmes passifs
  - Confinement
- Non prolifération
  - Pas de matériel fissile pur dans le cycle
- Résistance au terrorisme
  - Sûreté
  - Transports
- Minimiser la production de déchets
  - Minimisation de la production de Transuraniens
- Optimiser l'utilisation du combustible
  - Grand taux de combustion
  - Surgénération

# Types de Réacteurs

- Réacteurs à eau:
  - Eau supercritique
  - 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 surgénérateurs
  - Plomb (Bismuth) fondu U-Pu, Th-U
- Réacteurs à sel fondu
  - neutrons lents, surgénérateurs Th-U
- Réacteurs hybrides
  - Accélérateur, sous-criticité