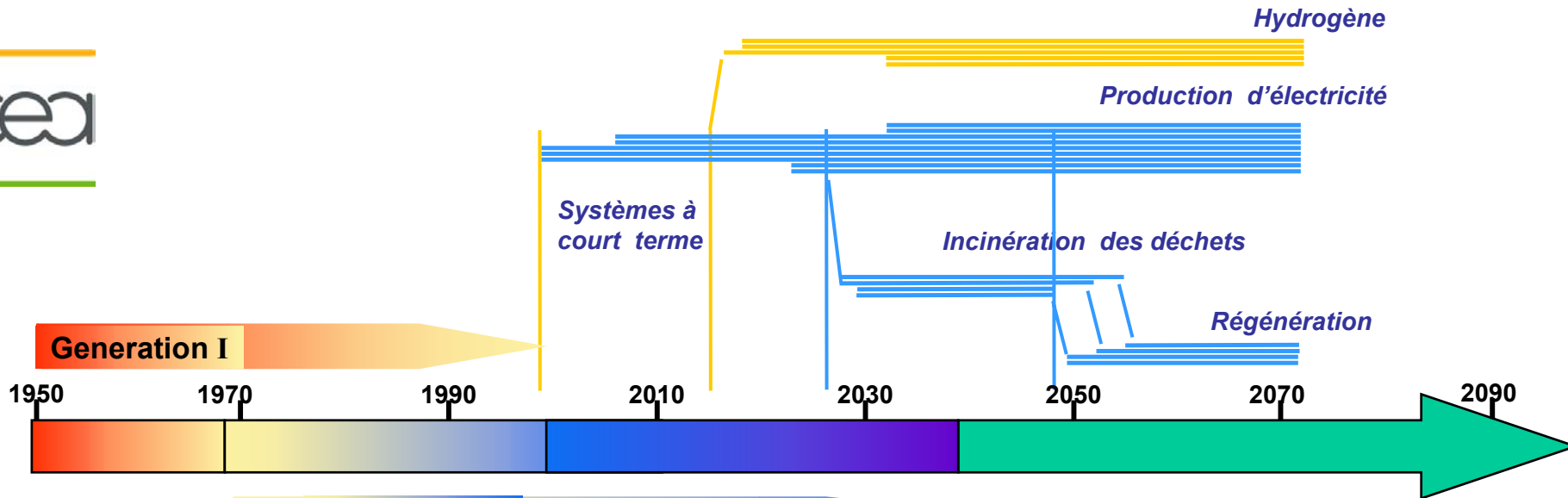


Les Systèmes Nucléaires du futur

Le Forum international Generation IV et les axes de R&D du CEA

Frank Carré
DEN/DDIN/Systèmes du futur

L'enchaînement des générations



Premières réalisations

Generation II

Réacteurs actuels

Generation III

Réacteurs avancés

Generation IV



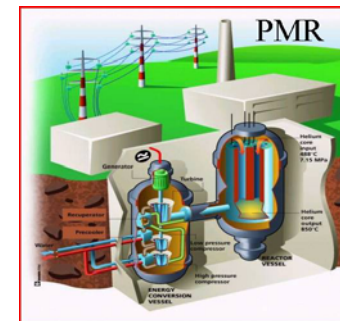
UNGG
CHOOZ



REP 900
REP 1300
N4



EPR



?

Systèmes du futur

Objectifs Generation IV

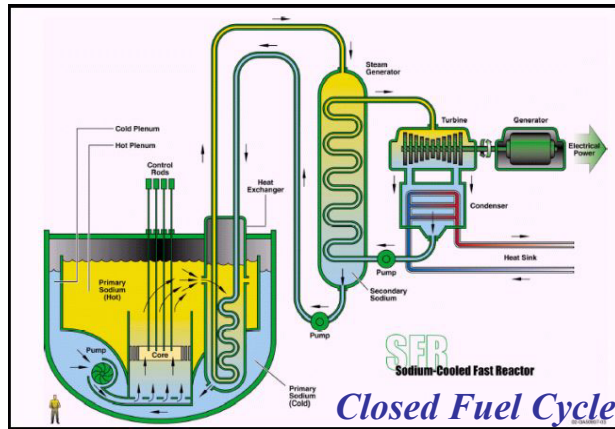


Des systèmes nucléaires pour un développement énergétique durable

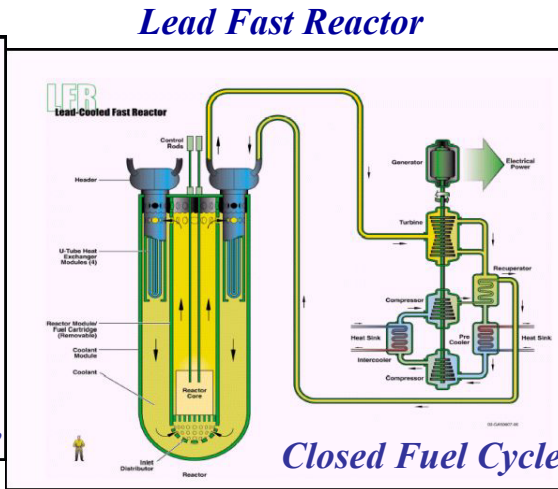
- Une maturité technique vers 2030
- Des progrès en continuité
 - Compétitivité économique
 - Sûreté et fiabilité
- Des avancées significatives:
 - Minimisation des déchets
 - Economie des ressources
 - Non prolifération et protection physique
- Une ouverture à d'autres applications :
 - Electricité, hydrogène, eau potable, chaleur



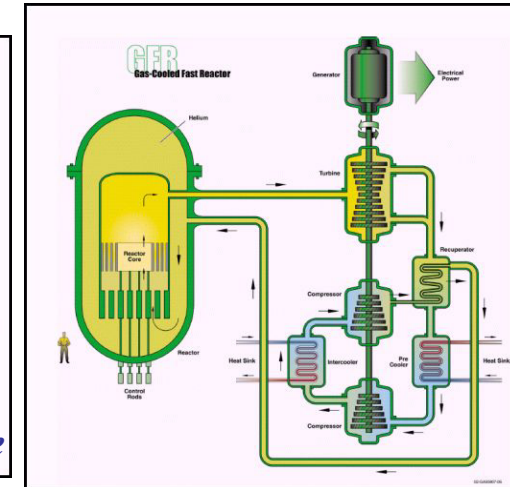
Sélection de 6 systèmes Generation IV



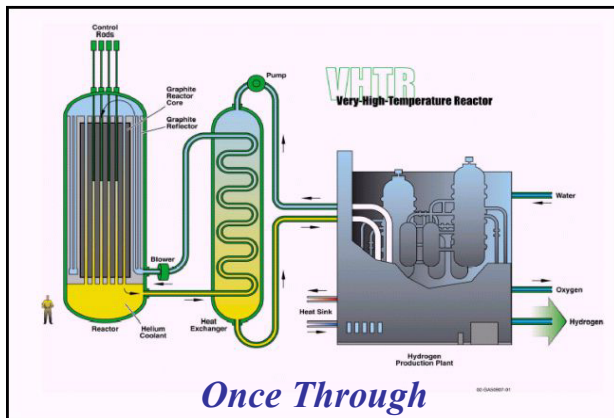
Sodium Fast reactor



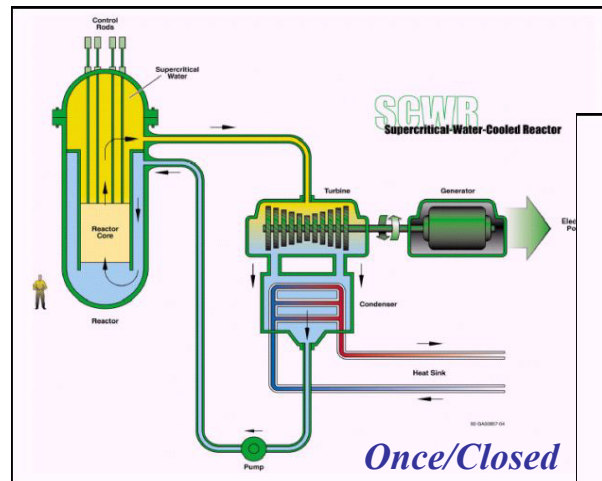
Lead Fast Reactor



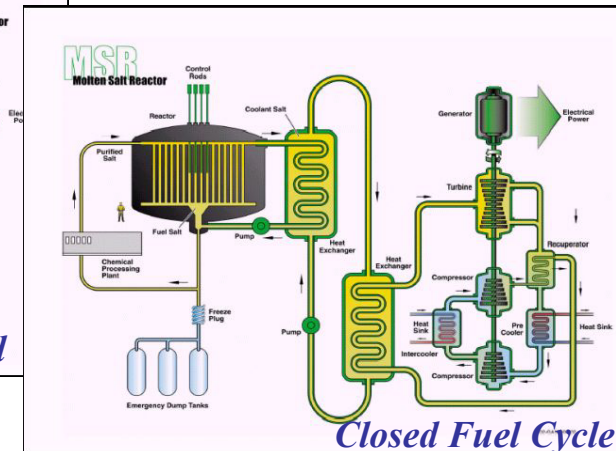
Gas Fast Reactor



Very High Temperature Reactor



Supercritical Water Reactor



Molten Salt Reactor

Les systèmes Generation IV sélectionnés



Concepts GEN IV

Acronyme

Spectre

Cycle comb.

Sodium Cooled Fast RS

SFR

Rapide

Fermé

Lead Alloy-Cooled RS

LFR

Rapide

Fermé

Gas-Cooled Fast RS

GFR

Rapide

Fermé

Very High Temperature RS

VHTR

Thermique

Ouvert

Supercritical Water Cooled RS

SCWR

Th.&Rap.

Ouvert/Fermé

Molten Salt RS

MSR

Thermique

Fermé

2000

2005

2010

2015

2020

2025

2030

SFR

Retraitement
avancé

VHTR

Combustible, maté-
riaux, production H₂

SCWR

Matériaux,
sûreté

LFR

Combustible, matériaux,
retraitement, production H₂,

GFR

Combustibles, matériaux,
retraitement, sûreté

MSR

Combustible, traitement comb.,
matériaux, sûreté, fiabilité

5,8 G€
dont 2G€
pour la
phase de
faisabilité

Faisabilité

Performance

Démonstration

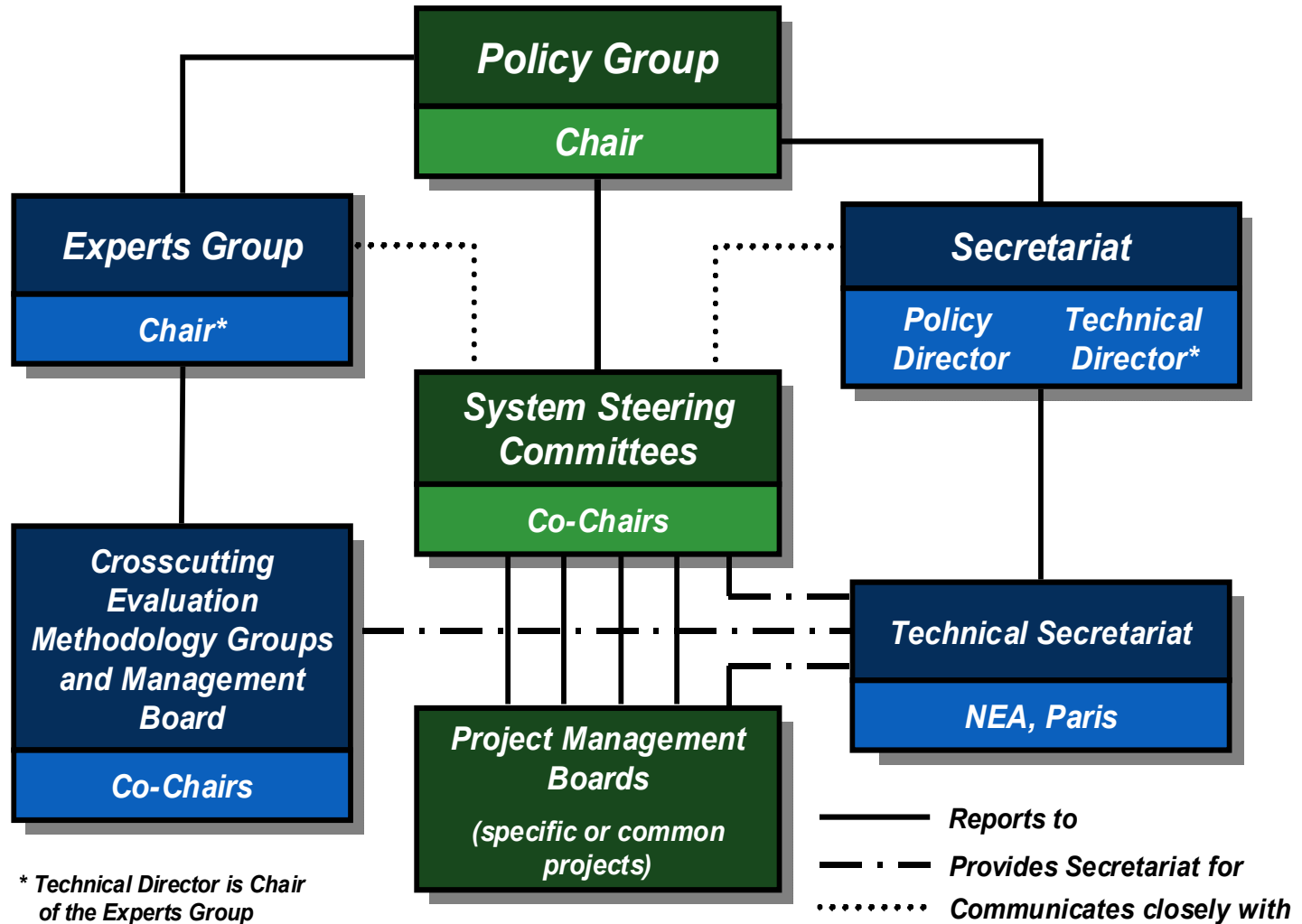
Intentions de participation (Septembre 2003)



GIF SELECTION											
SFR	N	N	X	H	H	H	X	X	M	M	X
LFR	N	N	X	F	F	F	X	M	X	M	X
VHTR	N	N	X	H	H	H	M	M	H	H	H
GFR	N	N	X	H	M	M	M	H	H	H	M
SCWR	N	N	H	M	M	M	X	H	F	M	M
MSR	N	N	X	F	X	F	X	X	F	F	F

N	X	F	M	H
Neutre	Non	Faible	Moyen	Fort

Organisation du Forum Generation IV



Un développement par étapes de systèmes nucléaires à caloporteur gaz



R & D

- Combustible à particules
- Matériaux
- Technologie des circuits He
- Système de calcul
- Cycle du combustible

VHTR

GFR

- Neutrons rapides
- Recyclage intégral des actinides

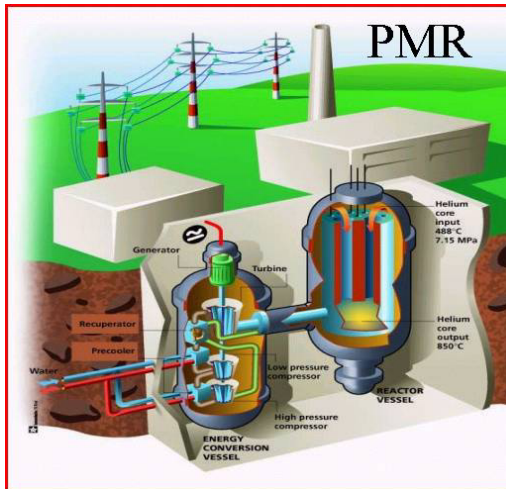
> 950°C pour
la production
d'hydrogène

R & D

- Combustible pour
cœurs rapides
- Procédés du cycle
- Systèmes de sûreté

R & D

- Matériaux résistants THT
- Echangeur intermédiaire
- Combustible enrobé de ZrC
- Cycle I-S pour la production
de H₂



NGNP

Les principaux objectifs du CEA



- Développement d'une gamme technologique cohérente
HTR / VHTR et GFR

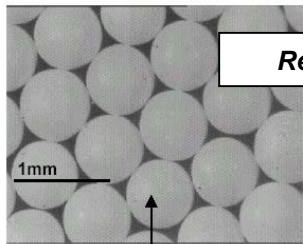
Les points clés

Générique HTR	VHTR	GFR
•Matériaux & composants •Production d'énergie	•Conception & sûreté •Particules combustible •Hydrogène	•Conception & sûreté •Combustible et cycle

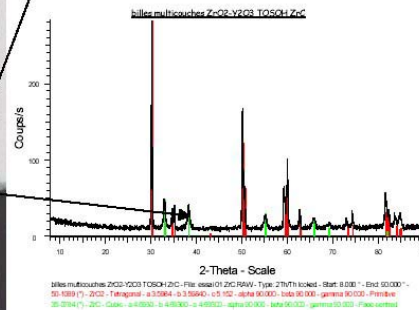
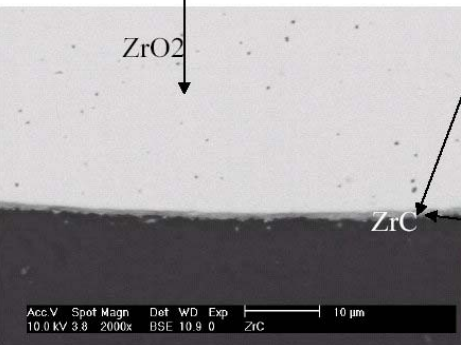
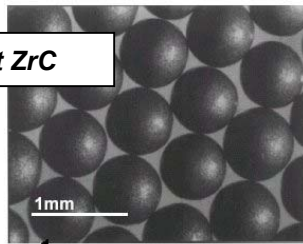
- Support au SFR
 - ✓ Cycle du combustible
 - ✓ Optimisation de la conception
 - **ISIR, économie**, concept intégré/à boucle, combustible AM, système de conversion
- Cycle du combustible

Combustible et cycle pour le VHTR

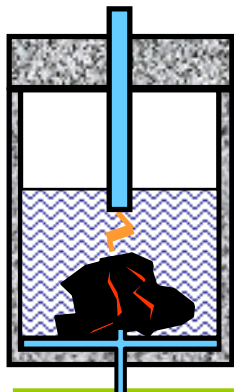
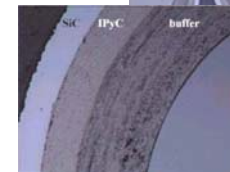
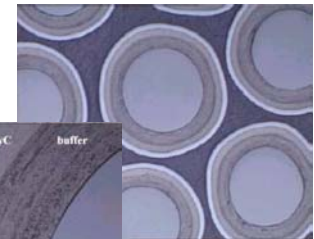
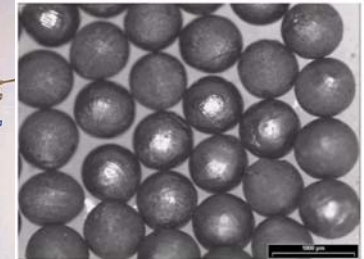
- Développement du combustible TRISO et gestion des déchets



Revêtement ZrC

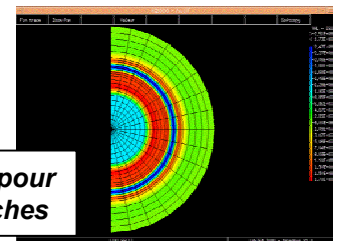


Fabrication TRISO et revêtement SiC



Courants pulsés pour le traitement des déchets graphite

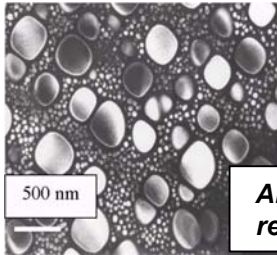
Contraintes calculées pour le noyau et les couches



Matériaux et composants pour VHTR & GFR



- Développer et qualifier des matériaux pour $T_{\text{He}} > 850\text{ °C}/1000\text{ °C}$
 - Cuve primaire et structures internes
 - Circuit primaire, échangeurs
 - Graphite, composites C-C

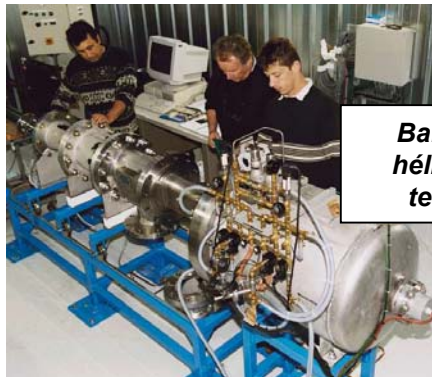


*Alliage Udimet 720
résistant au fluage*

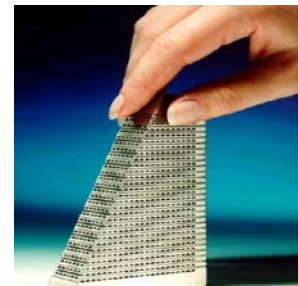


*Echangeur de
chaleur en SiC
brasé avec
Brasic®*

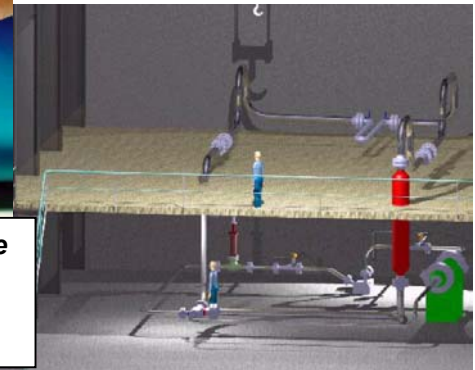
- Fabriquer et tester des maquettes de composants :
 - Récupérateur, échangeur intermédiaire (IHx)
 - Vannes, robinetterie, Isolation thermique, instrumentation, purification du gaz



*Banc d'essais
hélium à haute
température*



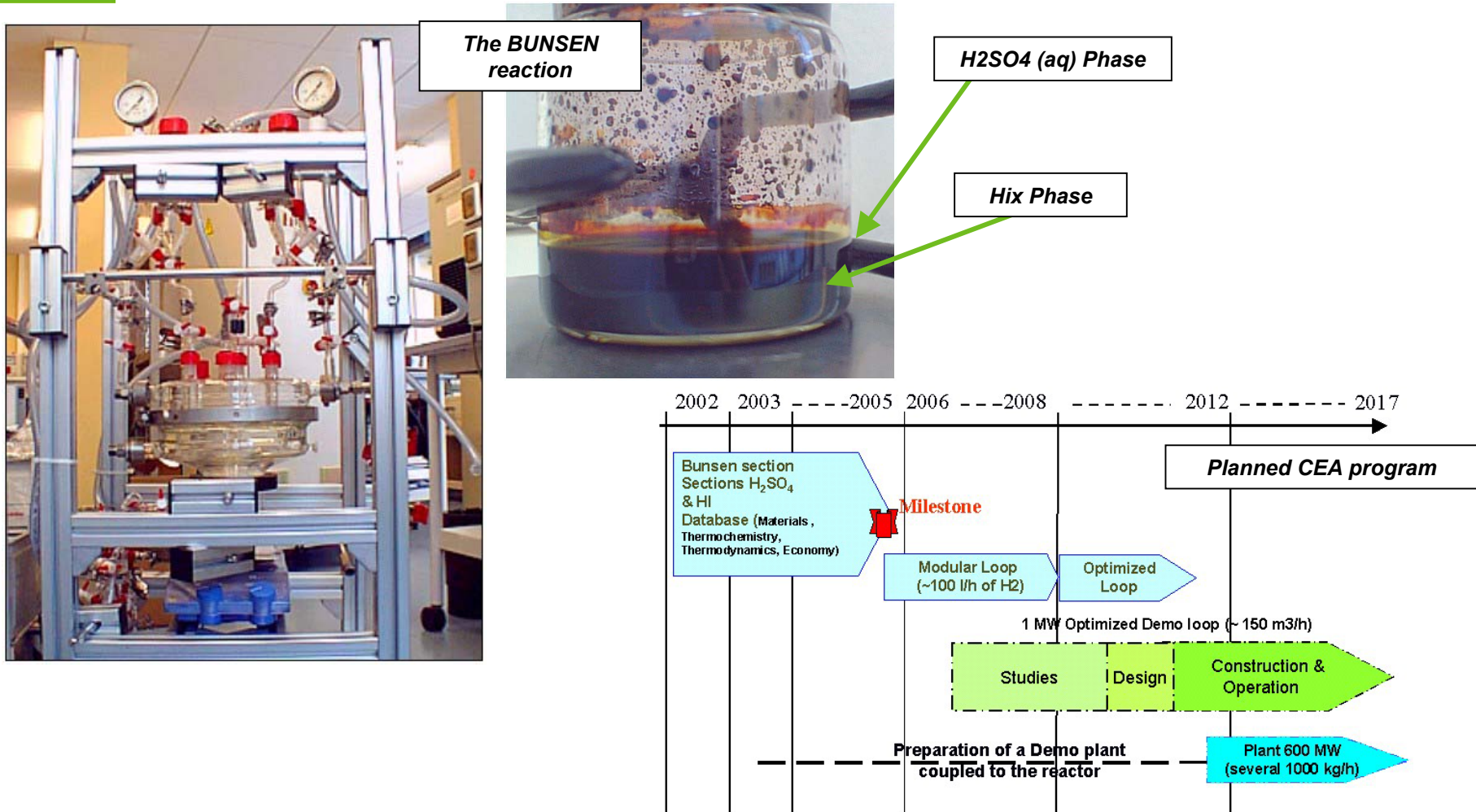
*Boucle technologique
en hélium pour tests
d'échangeurs et de
soufflantes*



Procédés de production d'hydrogène



- Développer, optimiser le cycle thermochimique iode-soufre (>850 °C)
- Réaliser et tester une batterie d'électrolyseurs haute température

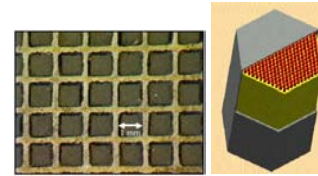


Concepts de combustibles GFR

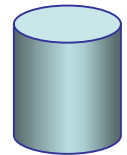
cea



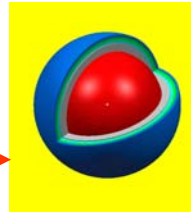
Combustible composite (céramique)



Combustible aiguille



Particules avancées



0

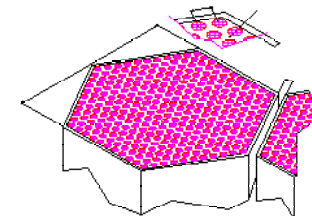
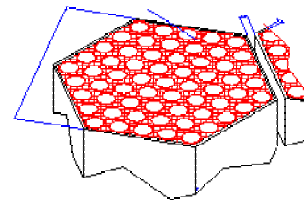
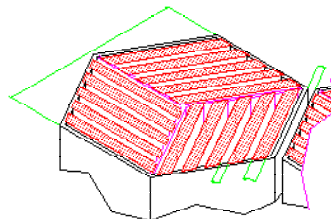
25

50

Gaz : 40 %

Structures : 10 %

% vol de composé d'actinides dans le coeur

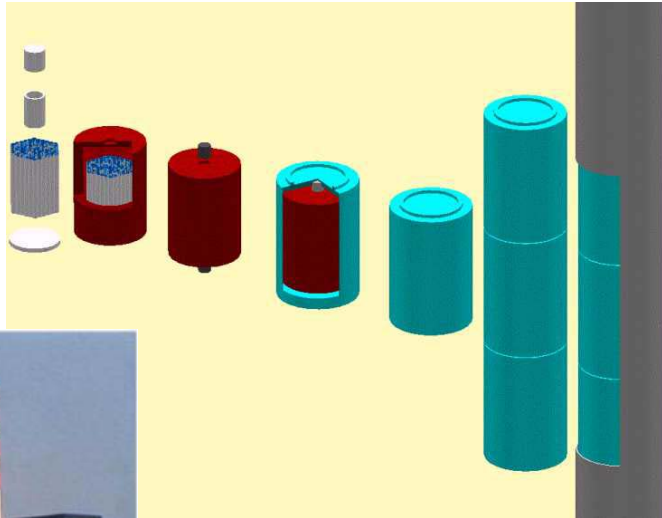


R&D sur le combustible GFR

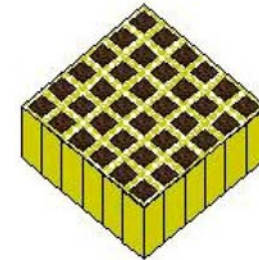
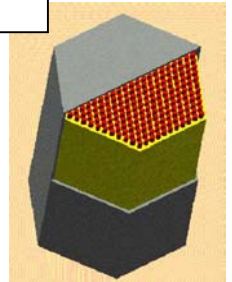
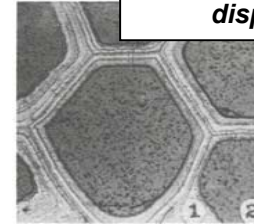


- Développement de combustibles d'actinides denses, résistant aux neutrons rapides et à la haute température,
- Irradiations dans PHENIX et dans le REDT

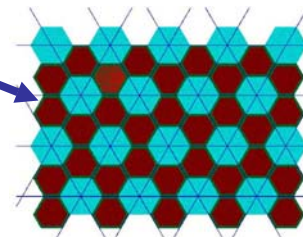
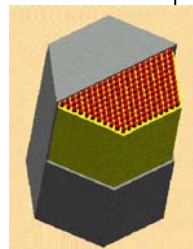
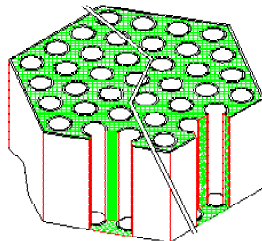
*Aiguille test
FUTURIX
d'irradiation dans
PHENIX*



*Combustibles
dispersés*

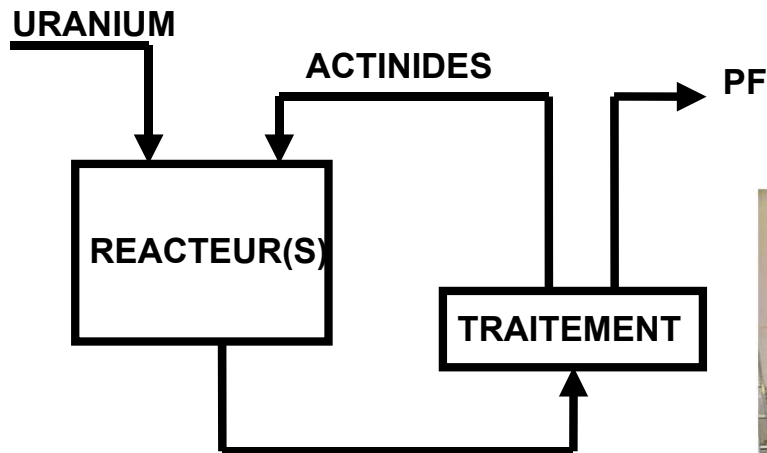
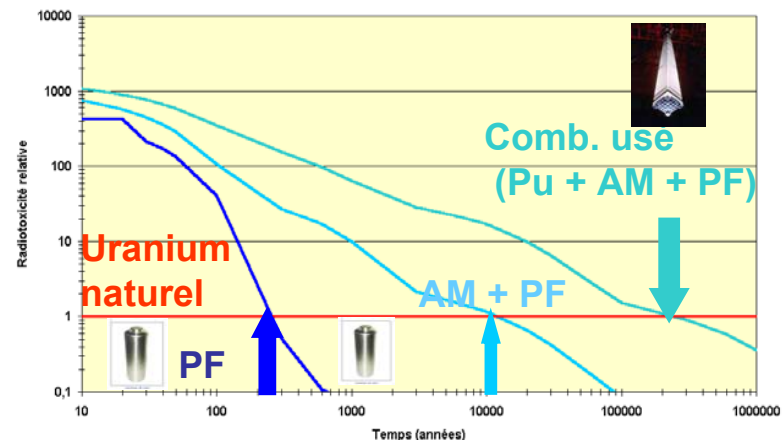


*Conception
d'assemblages*



Le cycle du combustible Generation IV

- Recycler tous les actinides
- Séparation groupée
- Intégration des procédés T/R, des technologies et des étapes
- Minimiser les déchets

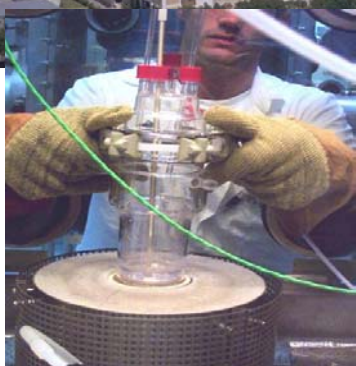


Réduction radicale de la radiotoxicité des déchets ultimes dans le temps

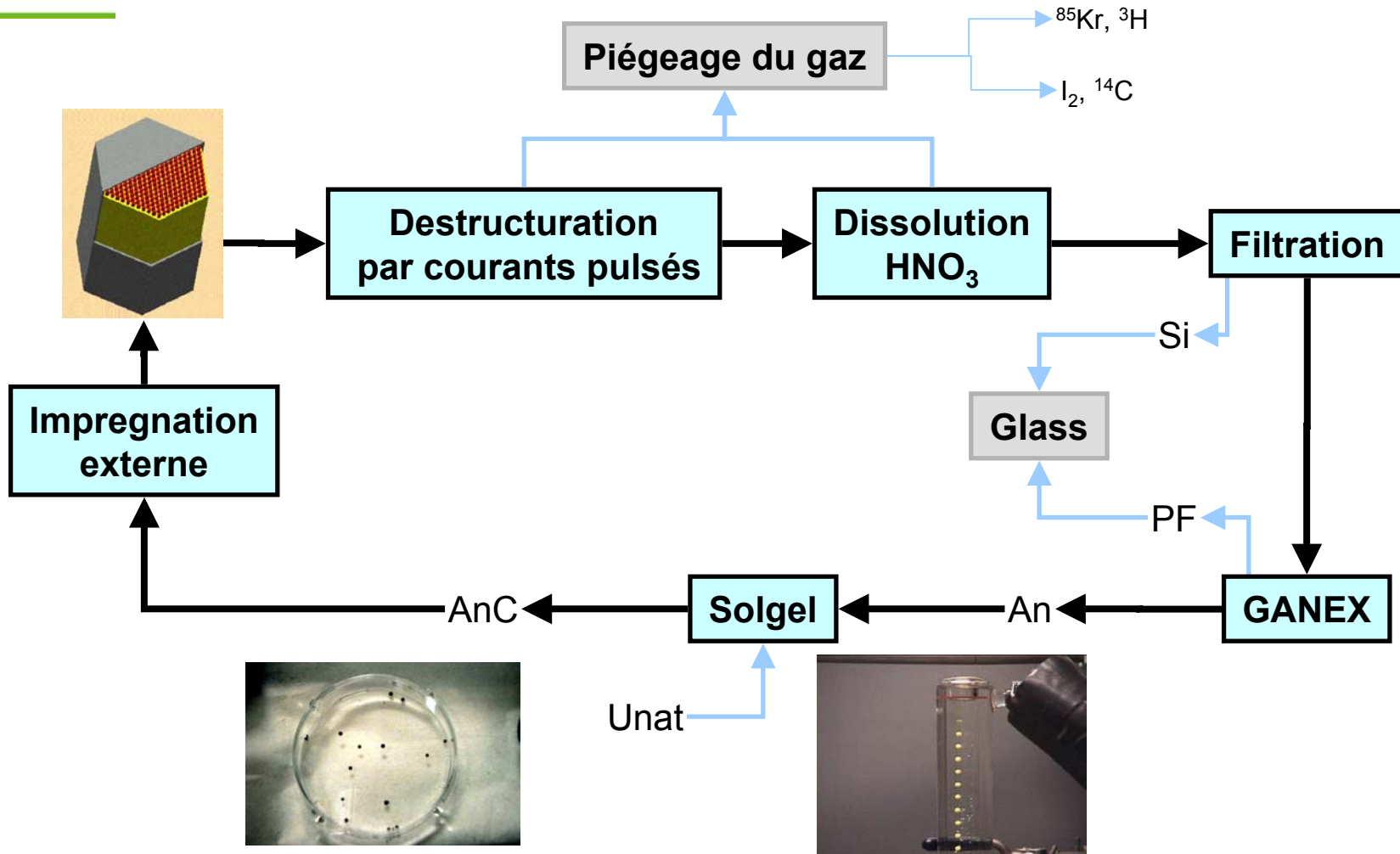
Le procédé de "Gélification externe"



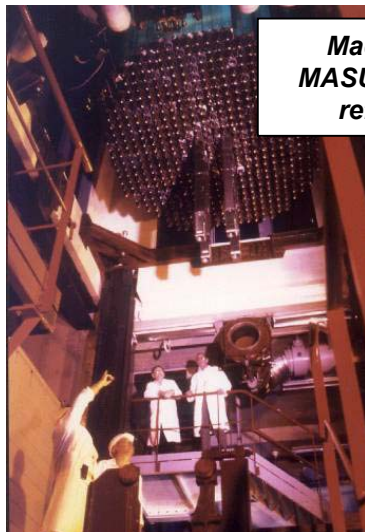
Le laboratoire chaud ATALANTE



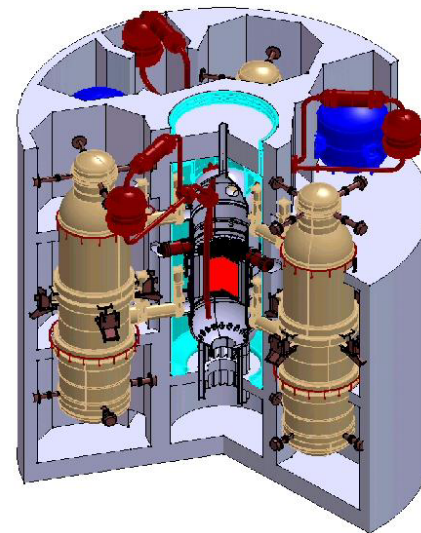
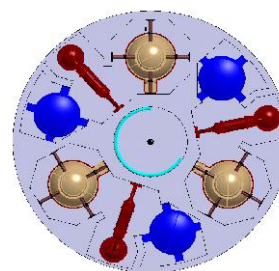
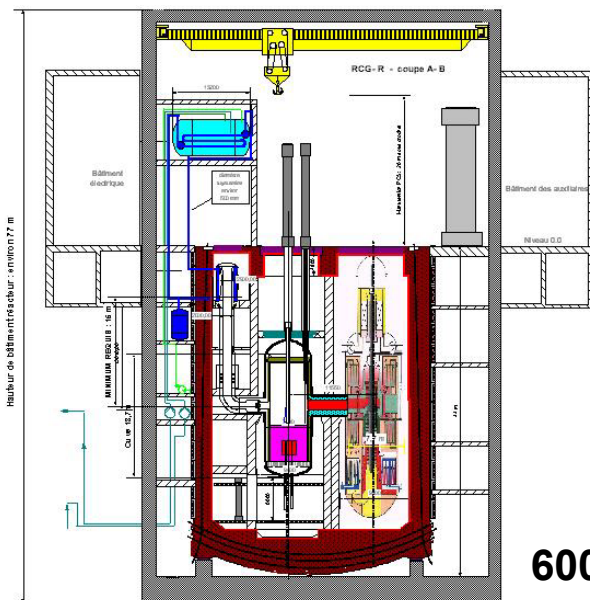
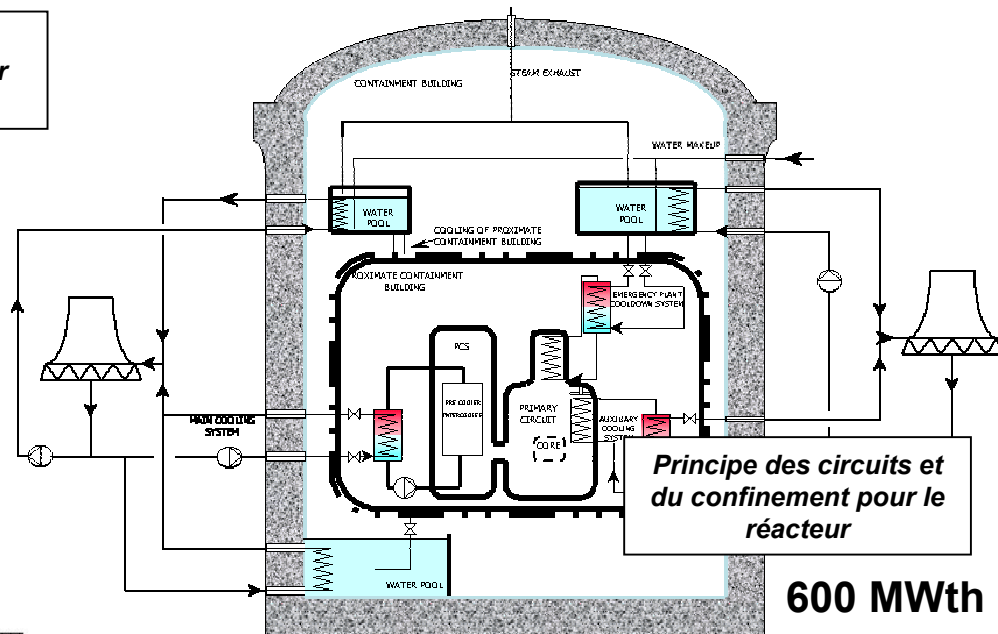
Recyclage intégral : exemple de procédés



Conception du cœur et de la chaudière du GFR



*Maquette critique
MASURCA pour cœur
refroidis au gaz*



2000 MWth

Le Réacteur d'Etude et de Développement Technologique (REDT)



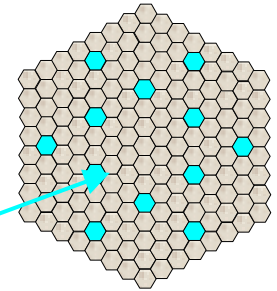
➤ Démonstrateur des principes et technologies spécifiques GFR

- Puissance < 50 MWth, $T_{\text{He}} \sim 850 \text{ }^{\circ}\text{C}$
- Pas de système de conversion

Premier coeur

➤ Premier coeur

- 200 MW/m³, Cercer UPuC/SiC à 47 % Pu gainage acier AIM1 → $T_{\text{He}} \sim 560 \text{ }^{\circ}\text{C}$

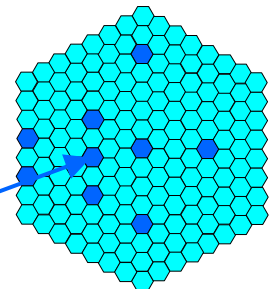


Combustible GFR expérimental

➤ Cœur de démonstration

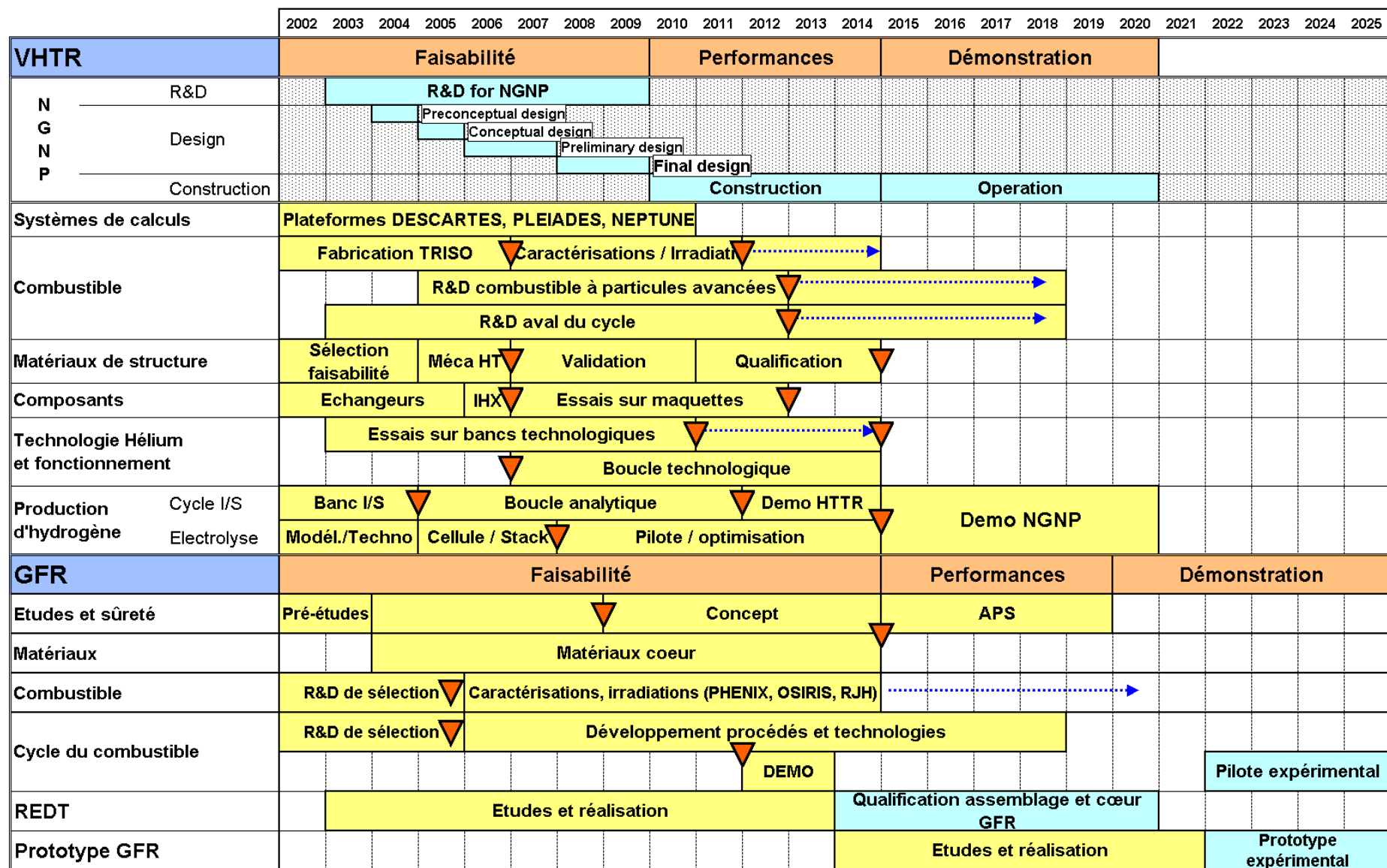
- 210MW/m³, Cercer UPuC/SiC à 30 % Pu assemblage avancé avec matrice ZrC
- $T_{\text{He}} \sim 850 \text{ }^{\circ}\text{C}$

Cœur GFR de démonstration

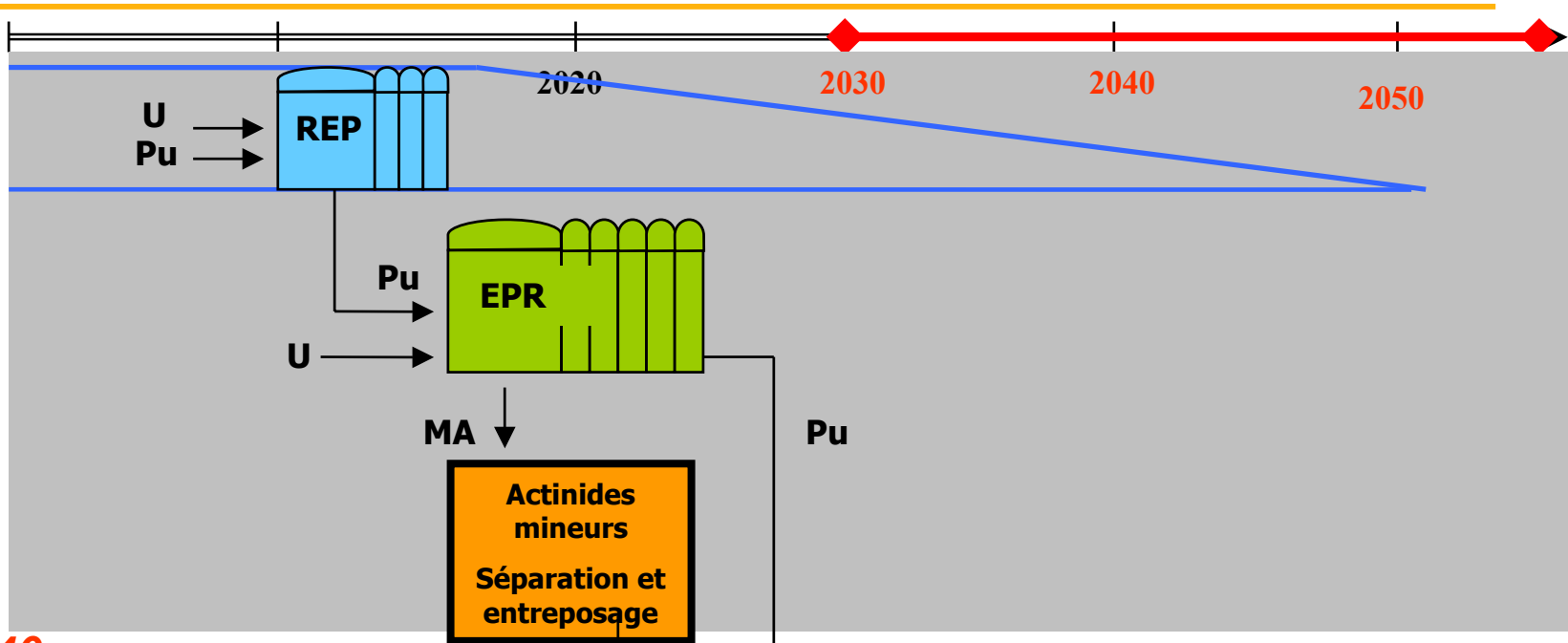


Combustible expérimental chargé en actinides mineurs

Plan de développement des systèmes VHTR et GFR



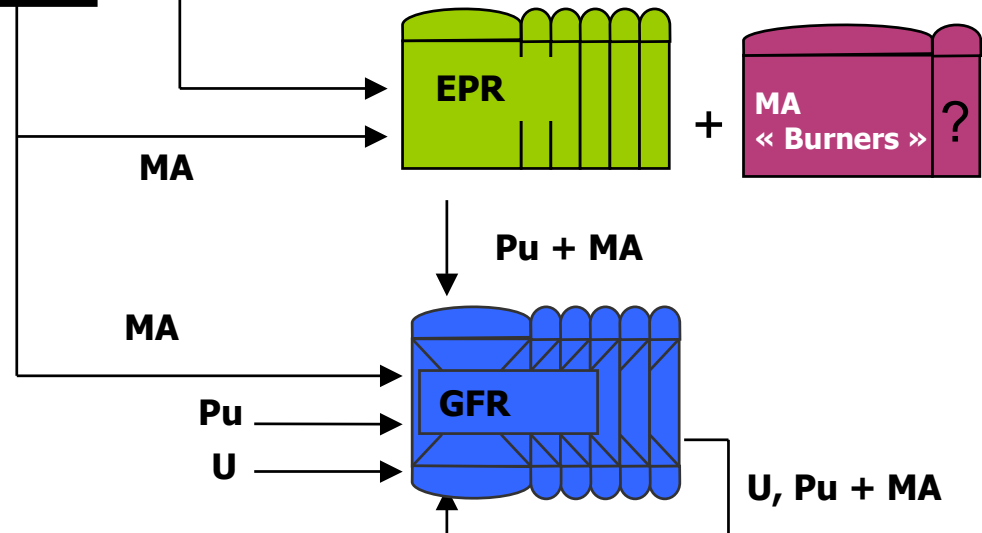
Gestion des actinides des REP à la 4e génération



2030/2040

➤ Réacteurs **GEN III** & **GEN IV**

- Recyclage Pu en EPR (3e Génération)
- Recyclage intégral du Pu et des AM entreposés (Generation IV)
- Transmutateurs dédiés pour les AM si nécessaire



Moyens affectés aux systèmes du futur dans le PMLT CEA

SYSTEMES DU FUTUR <i>(avec rech. de base)</i>	2003 Budget initial	2003 Révisé fin août	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012
Dépenses (M€)	33	30	41	45	47	49	62	62	62	62	62
Recettes externes (M€)	9	6	13	15	18	20	31	31	31	31	31
Subvention (M€)	24	24	28	30	29	29	31	31	31	31	31
Effectifs (emb)	295	295	346	373	381	413	421	429	441	455	455

Répartition 2003 <i>(hors rech. de base)</i>	VHTR	GFR Dont REDT	SFR	SCWR	MSR	Autres	REP	Total
Dépenses (M€)	9,5	8,7	0,6	0,2	0,2	0,2	5,6	25
Effectifs DEN (emb)	77	90	6	2	2	2	53	232

Les systèmes nucléaires du futur



Objectifs stratégiques pour le CEA

- Co-développer avec FANP et EDF une gamme de systèmes à caloporteur gaz dans le cadre du Forum International Generation IV

HTR / VHTR – GFR

- VHTR : Etre avec FANP et EDF des partenaires privilégiés du projet NGNP
+ Participer activement au développement du VHTR dans le Forum Gen IV
- GFR : Confirmer la viabilité et les performances du concept
+ Réussir en coopération internationale les innovations combustible et cycle
+ Consolider le REDT comme démonstrateur international des technologies GFR
- SFR : Soutenir le développement du Sodium Fast Reactor Generation IV
- Cycle du combustible : Développer des procédés pour le recyclage intégral
+ Coopérer à l'étude de scénarios de jonction entre générations pour optimiser la gestion des actinides depuis les REP actuels jusqu'aux systèmes Generation IV