



# LES RNR à caloporteur Gaz

## La conception coeur et combustible

JC. Bosq (DER/SPRC), N. Chauvin (DEC/SESC)

*Direction de l'Énergie Nucléaire*

*CEA Cadarache*

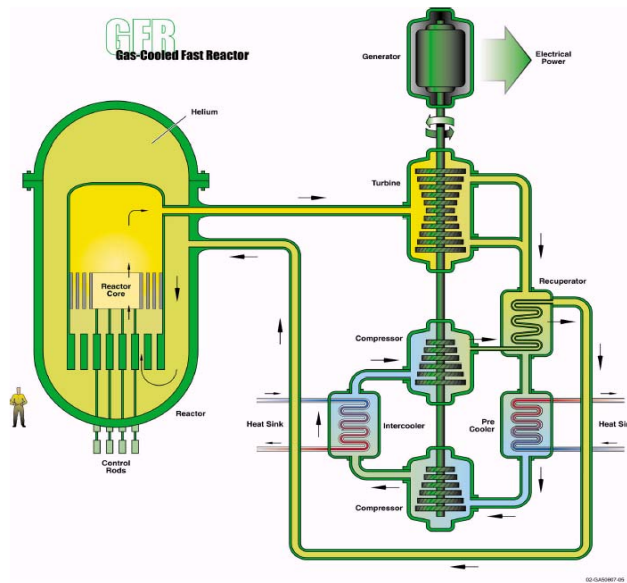
# Contenu de la présentation

---



- **Contexte du RNR-G**
- **Conception combustible**
  - démarche
  - résultats
  - perspectives
- **Conception coeur**
  - résultats acquis
  - démarche pour une révision du design
  - design et performances du coeur “12/06”
- **Conception de l'assemblage combustible**
- **Conclusions**

# Les objectifs et critères de conception du RNR-G



## L'initiative GEN IV

### missions RNR

Utilisation des ressources  
Minimisation de déchets  
Compétitivité économique  
Sûreté améliorée



### Caractéristiques RNR-G

**Spectre neutronique rapide, cycle du combustible fermé**

*Coeur iso-générateur (GRG~0), recyclage des actinides*

**Caloporteur Gaz, haute température de sortie coeur**

*He, 850°C ou plus, cycle direct attractif pour le rendement de l'installation*

**Combustible robuste et réfractaire**

*Rétention des produits de fission (analogie avec la particule combustible)*



**Une approche complémentaire au RNR sodium pour une version durable du HTR**

# Grandes étapes du projet RNR-G

---



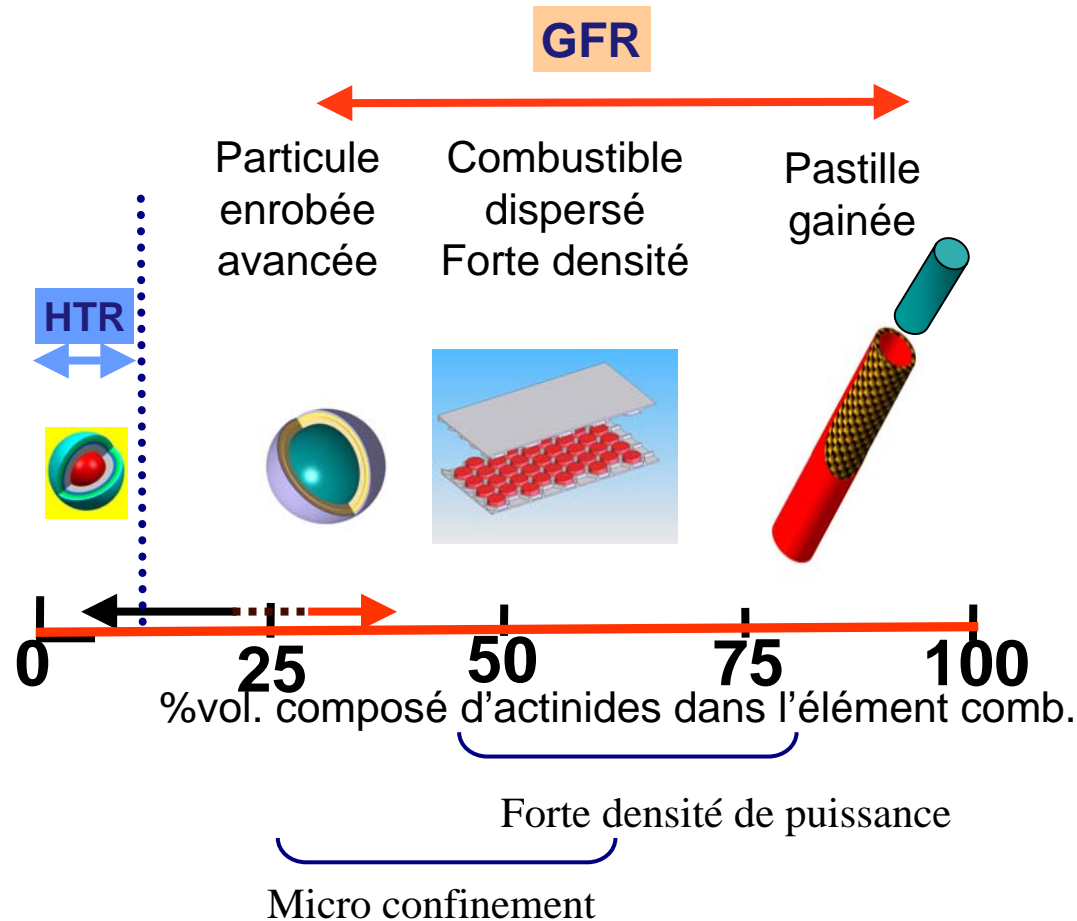
2004 sélection du concept de combustible et du design de coeur

**2005 sélection d'un ensemble cohérent d'options pour le système** (combustible, coeur, conversion d'énergie, système primaire, systèmes de sûreté...) pour un RNR-G de 2400 MWt

## 2007 Faisabilité préliminaire

2009 consolidation du concept de combustible (optimisation des concepts, choix C/N, R&D gaine, FuturixS)

**2012** démonstration de la faisabilité (Irrdemo)

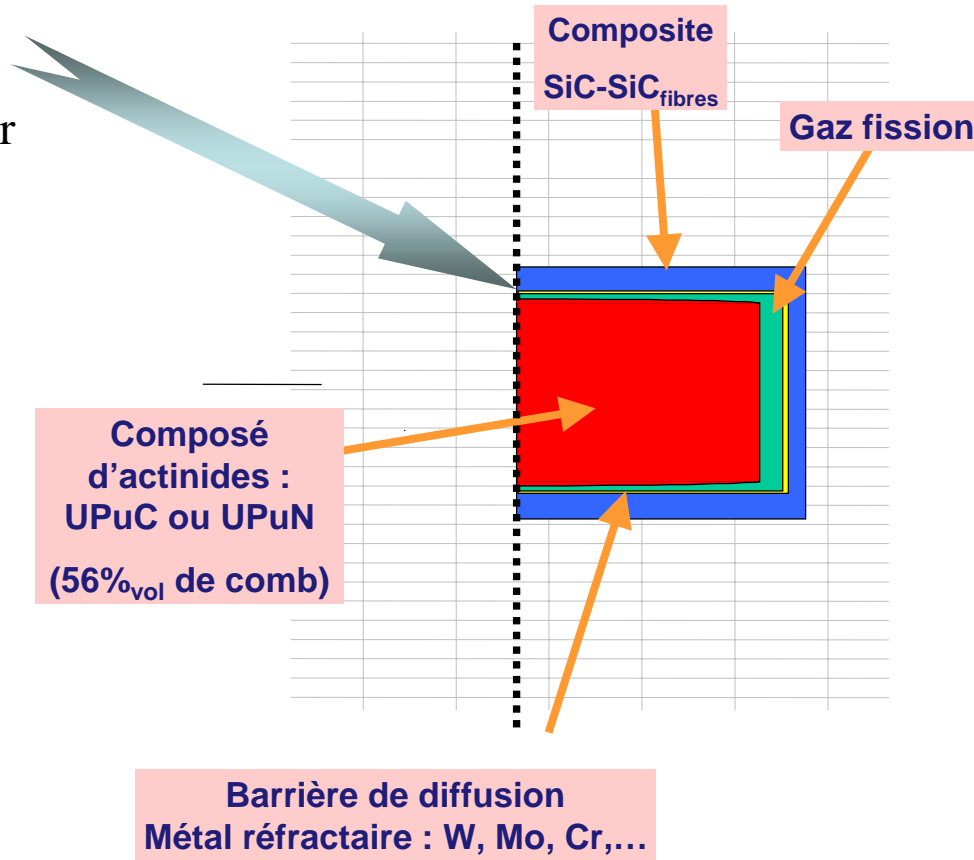
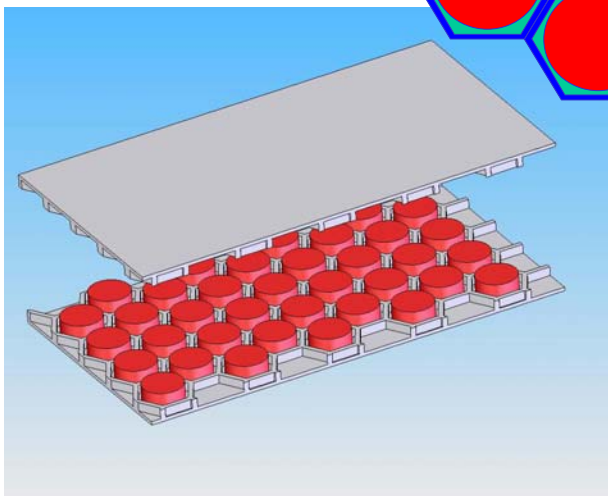
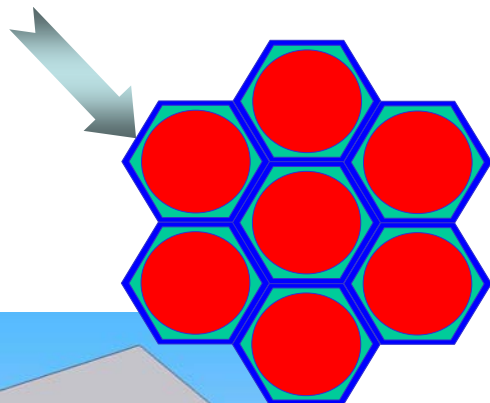


# Plaques avec pastilles : premier design



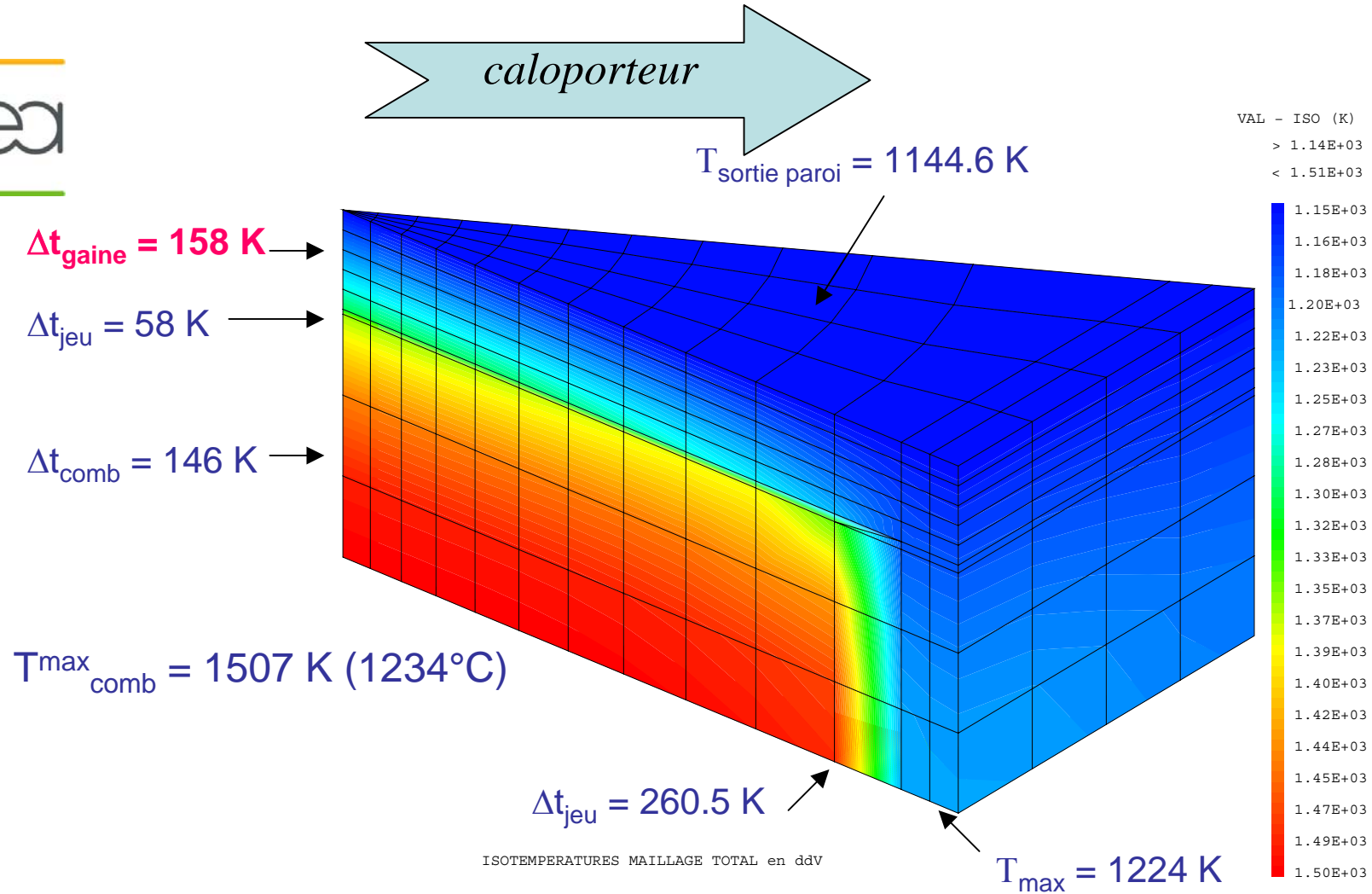
Jeu axial : fermé en DDV pour un comportement thermique homogène

Jeu radial : fermé en FDV pour piéger les gaz de fission et l'hélium



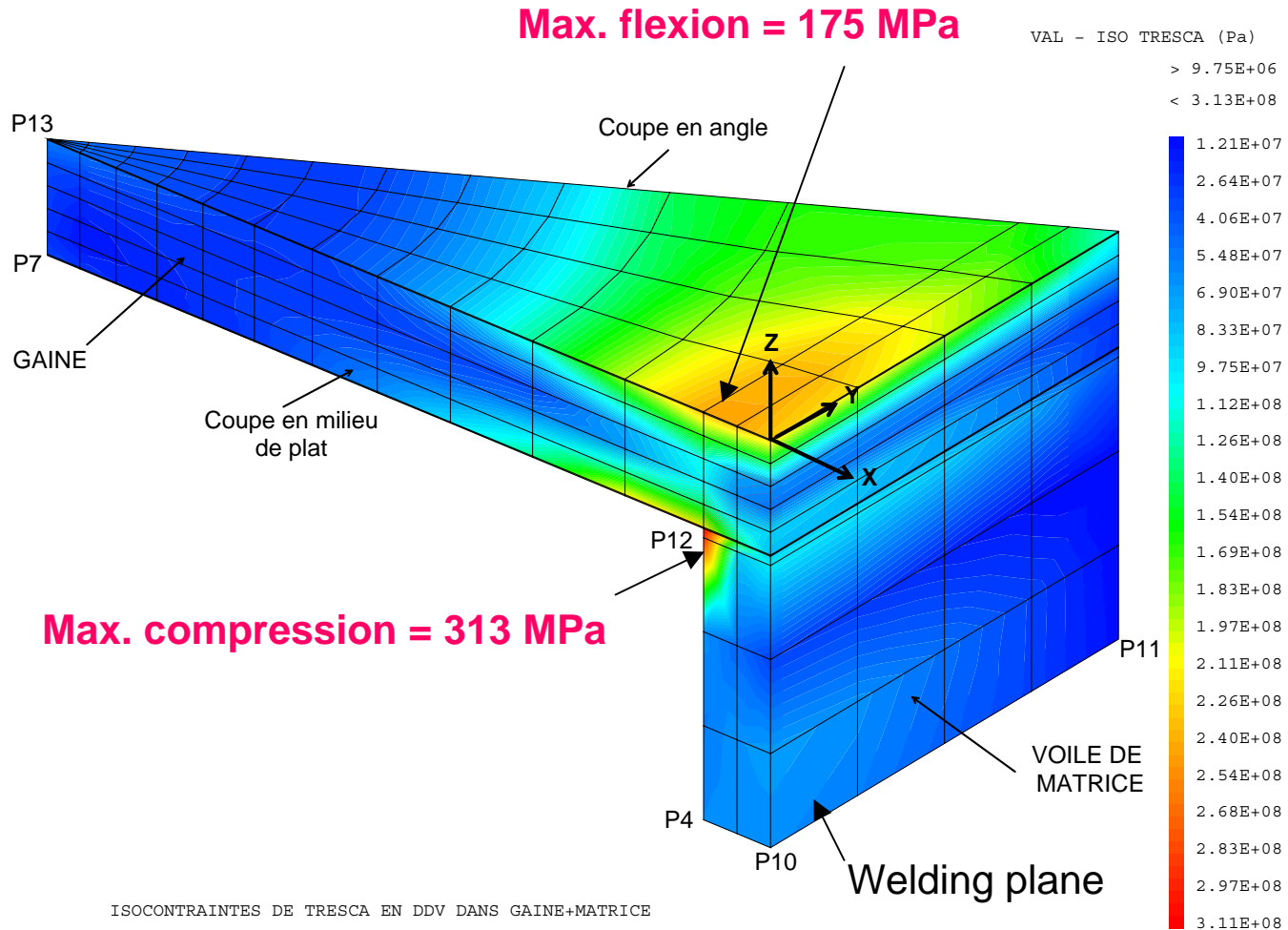
Brevet CEA

# Plaque : comportement thermique en DDV : important gradient thermique dans l'épaisseur du gainage



**R/D point clé : amélioration de la conductivité thermique du gainage**

# Comportement mécanique en DDV induit par les conditions thermiques



**R/D point clé : compréhension des propriétés mécaniques du gainage**

# Concept plaque : comportement prévu sous irradiation

---



## – Thermomécanique : « *conçu pour* »

- Température basse avec fermeture du jeu axial en DDV (transfert de chaleur) et fermeture du jeu radial en FDV (gonflement, rétention des gaz de fission)
  - Nominal : Temp. Max 1350°C, Dépressurisation : T~1650°C
- Faibles contraintes primaires, jeu dimensionné pour 70 bar de pression interne en FDV.
- Un niveau raisonnable de contraintes secondaires: contrainte de compression (~30 MPa), 1 point en traction (175 MPa)

## – Thermochimie : eutectique suspecté (1600-2000°C) entre la matrice inerte et le composé fissile:

- barrière nécessaire

## – Etanchéité aux PFs et He:

- Perméation des gaz dans le SiC-SiCf, nécessité d'une barrière.

## – Effet des actinides mineurs :

- Volume libre pour l'Hélium (volume de matrice réduit)

# Cahier des charges pour le gainage (→ SiC-SiCf)

## Critères pour le gainage

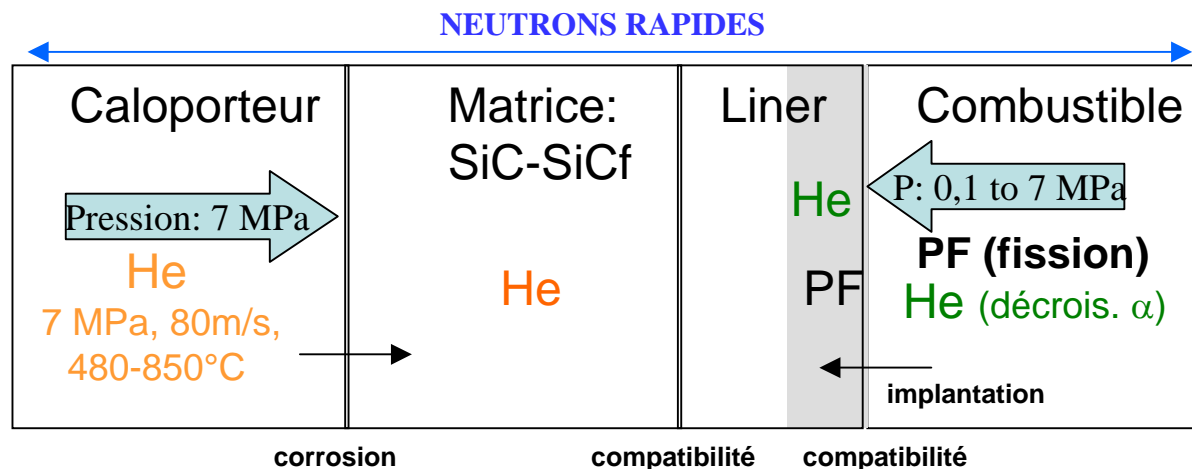
- Haut point de fusion et conductivité thermique élevée
- Forte résistance (traction, capacité de déformation) et ductilité
- Faible absorption neutronique et activation
- Gonflement réduit
- Étanchéité
- État de surface adapté aux procédés d'assemblage
- Effets environnementaux : haute temp. et compatibilité autres matériaux.

## Dommmages (→ effet sur les propriétés thermiques et mécaniques)

Comportement des produits de fission et hélium dans le matériau inerte:

- Recul des PF et décroissance alpha
- Diffusion

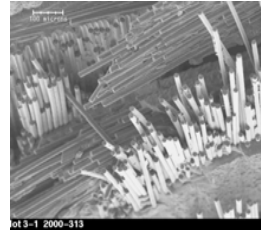
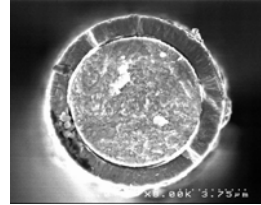
Fluence neutrons rapides ~ 40 dpa SiC





## SiC-SiC<sub>fibres</sub>

- **Optimisation des fibres, interphase, optimisation matrice**
  - Propriétés thermiques, Résistance
  - Etanchéité, Gonflement
  - Comportement en déformation
- **Comportement à haute temp. (1600-2000°C)**
  - Corrosion, érosion...
- **Domage sous irradiation**
  - Osiris et Phenix testent de nombreux matériaux (500-1000°C, 1 à >40 dpa)
  - Expérience avec protons ou ions
- **Diffusion He: à 7 MPa en matériaux implantés**
- **Modélisation**



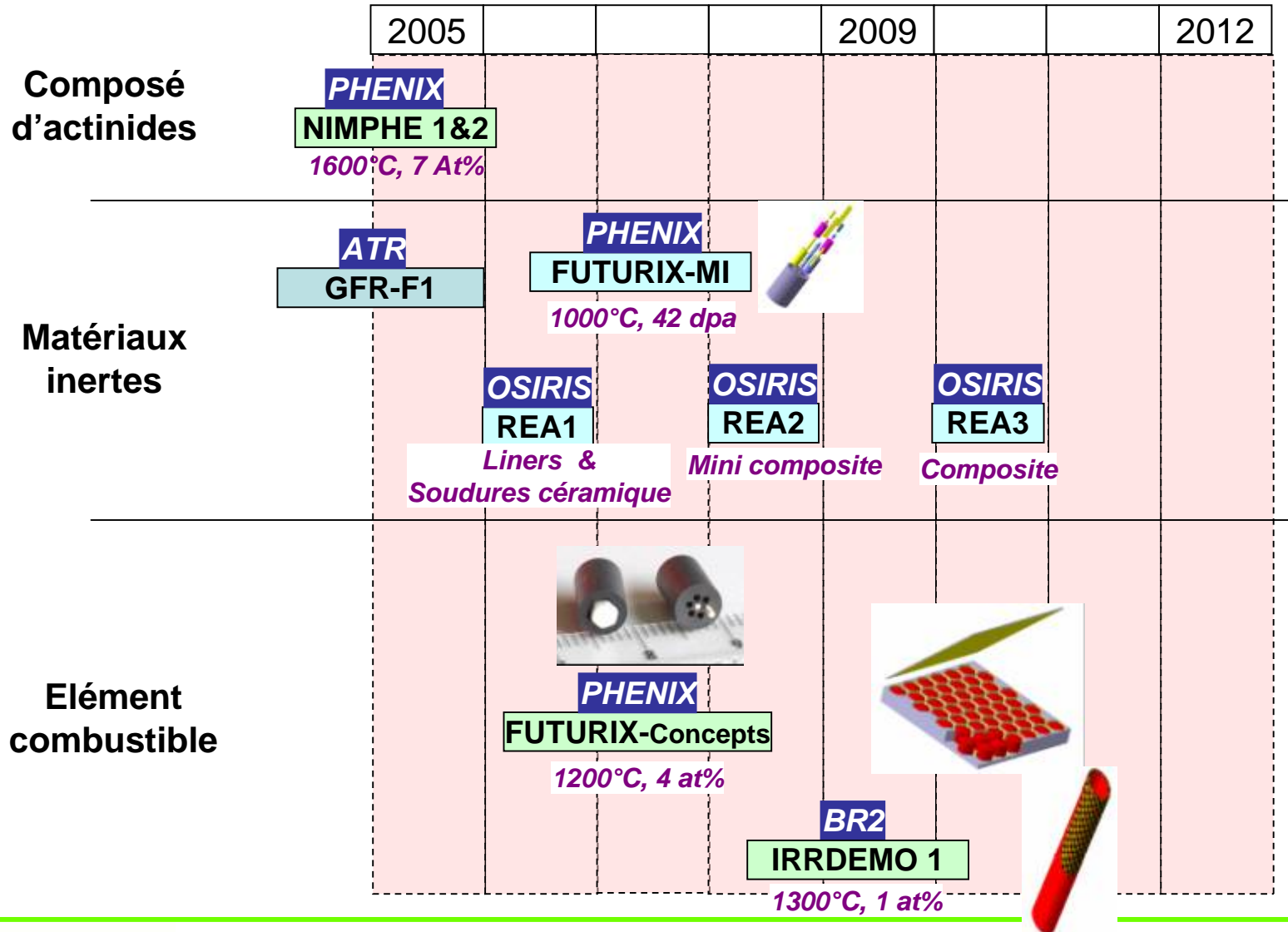
### • Liner, revêtements (W-Re, Mo-Re) pour étanchéité:

- Fabrication
- Effet de la fluence neutron
- Diffusion PF
- Comportement mécanique sous pression et au contact du fissile

### • Interaction entre matériaux : à 1000-1200°C et 1600°C

- Liner / phase fissile
- SiC-SiCf / liner

# Programme d'irradiation GFR



# Perspectives pour la conception combustible RNR-G

---



- **Conception élément combustible**

- **Composés fissiles:**

- Introduction d'actinides mineurs dans UPuC / UPuN
    - Optimisation du procédé de fabrication (perte Pu et porosité fermée)
    - Haute temp.(1600-2000°C): limite pour la stabilité
    - Effet des A.M. sur le comportement

- **Matrice inerte-gainage + barrière de diffusion ou liner**

- R&D pour l'évolution des composites Haute temp.(1600-2000°C): comportement mécanique et étanchéité
    - Liner: efficacité d'étanchéité, fabrication, effets des dommages
    - Compatibilité thermochimique: limite temp., cinétiques, effets.

- **Développement élément combustible – programme d'irradiation**

- Comportement de l'E.C. sous irradiation (prototype de plaque et aiguille)

- **Cœur RNR-G**

- Marge de sûreté en cas de dépressurisation ou accident grave

- **Cycle du combustible**

- Un test de Retraitement/Refabrication de combustible est nécessaire
    - Par procédé: robustesse, simplicité (cellules chaudes) et industrialisation
-

# Conception coeur – résultats acquis (1/2)



<b>Densité de puissance Coeur</b>	<b>~ 100 MW/m<sup>3</sup></b>	Détermine l'inventaire Pu du coeur
<b>Concept combustible</b>	<b>1/ plaque 2/ aiguille</b>	Rétention des produits de fission au plus près Application à 100 MW/m <sup>3</sup>
<b>Taille réacteur/ Puissance unitaire</b>	<b>&gt; 2400 MWt</b>	Améliore le GRG et l'économie Approche de sûreté non liée à la taille du réacteur
<b>Sélection du composé fissile</b>	<b>UPuC (or UPu<sup>15</sup>N) &gt;&gt; UPuN ou UPuO<sub>2</sub></b>	Matériau dense Grande conductivité thermique, haut point de fusion, bon comportement sous irradiation Nitrure pénalisé par l'absorption <sup>14</sup> N
<b>Sélection des matériaux de matrice/gaine</b>	<b>Composite SiC pour améliorer le comportement mécanique</b>	Métaux réfractaires (W, Mo, Nb) très pénalisants pour les performances neutroniques et la sûreté

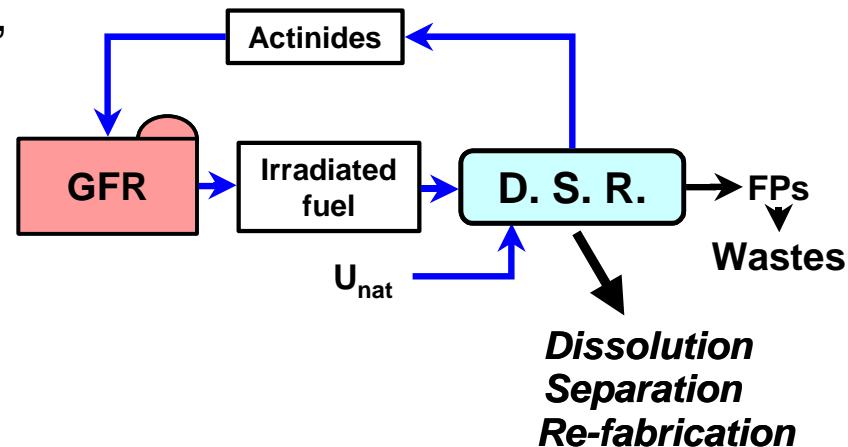
## Conception coeur – résultats acquis (2/2)

Paramètres importants de performances pour le cycle fermé



- **inventaire Pu** (géométrie du coeur, forme et frac.vol. du combustible, longueur de cycle d'irradiation et stratégie de rechargement)

- **Gain de régénération** ou **Bilan en masse Pu9eq.** sur la durée de vie du combustible



*Les valeurs de ces paramètres dépendent de la composition isotopique Pu+A.M. – Gain de régénération plus élevé en présence d'actinides mineurs*

→ pour la caractérisation, on simule un multirecyclage jusqu'au l'obtention de la composition d'équilibre (~10 recyclages)

**Les contraintes de conception sont :**

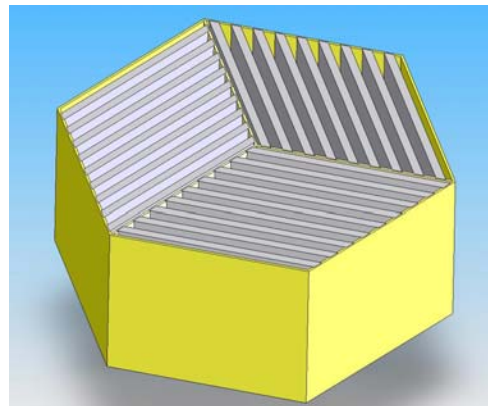
- **inventaire Pu minimum** (déploiement d'un parc de RNR),
- **GRG=0 (or →Pu9eq.) au moins à l'équilibre** (durabilité)

# Sélection d'une forme de combustible de référence (1/2)

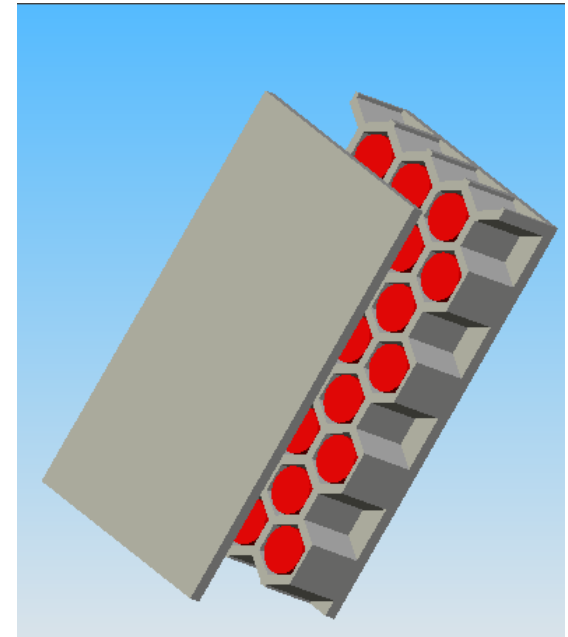


## 2004, sélection d'un design de référence (élément combustible, assemblage)

Elément combustible: plaque "Macro-structurée"  
Pastilles de carbure arrangées dans une structure SiC en nid d'abeille  
Fermeture obtenue par 2 plaques en SiCf-SiC



Assemblage combustible



Plaque: Élément combustible

... point initial d'un grand nombre d'études d'optimisation

# Sélection d'une forme de combustible de référence (2/2)

## Spécificités du choix plaque / carbure / SiC/SiC :



### Plaque

Interaction mécanique Pastille / Gainage gérée par conception

### Carbure

**Composé dense** favorisant le gain de régénération

**Grande conductivité thermique** permettant une température du combustible particulièrement basse en fonctionnement en comparaison avec la température du caloporteur en coeur. Conséquences :

- les produits de fission peuvent être retenus dans la macrostructure combustible/matrice optimisée
- en cas de perte soudaine du caloporteur (combinée avec l'arrêt du réacteur), la température d'équilibre (combustible+gainage) est largement inférieure à la température limite assurant l'intégrité du combustible

### Composite SiC/SiC

Peu de réactions nucléaires parasites (très faible absorption)

Comportement pseudo-plastique (accommodation de déformations imposées, résistance à la rupture x5 par rapport au SiC)

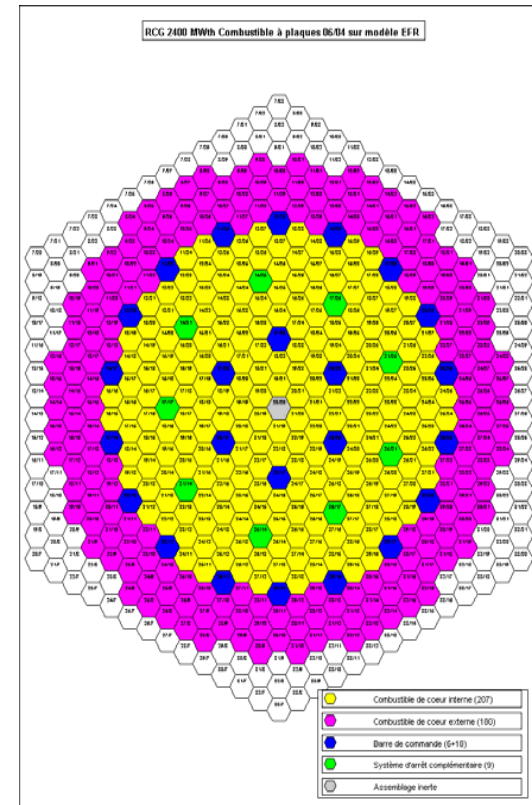
Capacité de confinement jusqu'à très haute température (1600°C)

# Sélection d'une configurations de coeur de référence (1/2)

## ☛ Référence coeur "06/04"



	<b>GFR 2400 MWth 06/04 core config.</b>
<b>Power (MW)</b>	2400
<b>Vol. Power (MW/m<sup>3</sup>)</b>	100
<b>T<sub>He</sub> inlet / outlet (°C)</b>	480 / 850
<b>Fuel form</b>	CERCER honeycomb (U,Pu) <sub>C<sub>56</sub>vol.</sub> + (SiC+jeux) <sub>44%vol.</sub>
<b>Fuel S/A</b>	Plates within Hex tube SiCf/SiC structures
<b>Fissile, coolant (vol.% of core)</b>	22.4 / 40.0
<b>Gap+matrix, structure (vol.% of core)</b>	17.6 / 20.0
<b>Plate thickness (mm)</b>	7.00
<b>Max. wall/fuel T (°C)</b>	1075 / 1210
<b>Core pressure drop (bar)</b>	0.6
<b>Pu/U+Pu (%)</b>	15.2
<b>Fuel management (EFPD)</b>	3 × 831 = 2493
<b>BU<sub>mean</sub> / max (at%)</b>	10.1 / 14.7
<b>Fast flux<sub>max</sub> E &gt; 0.1 Mev (n/cm<sup>2</sup>/s)</b>	1.17 × 10 <sup>15</sup>
<b>Fluence<sub>max</sub> E &gt; 0.1 Mev (n/m<sup>2</sup>)</b>	2.51 × 10 <sup>27</sup>
<b>Dose<sub>max</sub> (dpa SiC)</b>	163
<b>Doppler EOL (pcm)</b>	- 1175
<b>He depressurization EOL (pcm)</b>	+ 253
<b>Delayed neutron fraction (pcm)</b>	344



Plan de chargement :  
387 ass. combustibles  
24+9 barres absorbantes

## Sélection d'une configuration de coeur de référence (2/2)

---



Après la phase de sélection d'options (2004):

=> réalisation des études de caractérisation complète (neutronique, thermo-hydraulique, comportement du combustible, etc...) afin de préciser les performances et la sûreté du coeur.

Pour beaucoup de paramètres, les études fines ont consolidé les résultats obtenus précédemment, avec une exception: le Gain de Régénération finalement plus faible que prévu

### Deux causes d'explications :

1/ certaines hypothèses de modélisation ont été précisées :

Barres absorbantes et "effet de bord" dans les plaques ont été pris en compte (ils ne l'étaient pas dans la modélisation RZ initiale)

2/ le design a évolué

Ajout d'un liner métallique (métal réfractaire) entre les pastilles combustibles et le matériau SiC/SiC (étanchéité)

### Conséquences :

- La criticité du coeur nécessite un enrichissement Pu/(U+Pu) plus élevé
- avec cet enrichissement plus fort, le Gain de Régénération devient négatif

**Le coeur "06/04" n'est pas iso-générateur**

---

# Démarche pour une révision du concept (1/2)

---

L'objectif d'iso-génération est un challenge.

A la base, partant du coeur "06/04", il est possible de:

- augmenter la fraction volumique de (U,Pu)C (modification du design assemblage)
- augmenter le rapport Hauteur/Diamètre du coeur (modification de la forme du coeur)

Les deux approches conduisent à une **perte de charge coeur plus importante et des températures combustible plus élevées** – une évolution a priori acceptable (études système/sûreté réalisées sur la base du coeur "06/04")

Les contraintes révisées pour une nouvelle étude d'optimisation sont alors:

- **2 bars** – perte de charge coeur max  
préserve le potentiel de refroidissement de l'installation par convection naturelle dans certaines conditions accidentelles;
- **1450 °C** – température max locale dans la pastille combustible  
limite le relachement des gaz de fission et évite le fluage de la pastille sous le chargement thermique et de pression.

## Démarche pour une révision du concept (2/2)

---

Codes de calcul et méthodes développés au CEA, **prenant en compte les leçons des études “06/04” de caractérisation**



**COPERNIC** pour la thermo-hydraulique coeur

Feuilles de calcul Excel associées à une bibliothèque de fonctions VBA. Permet de calculer la température combustible max et la thermo-hydraulique du coeur dans des conditions nominales stationnaires dans une approche simplifiée (1 canal simple, corrélations)

**ERANOS** pour la neutronique du coeur

Code de référence CEA pour la physique/neutronique des Réacteurs Rapides ; les sections efficaces sont générées par le module ECCO en utilisant les évaluations de données nucléaires les plus récentes (JEFF3)  
Performances du multirecyclage déterminées en géométrie RZ, mais en tenant compte de la pénalité en réactivité due aux barres absorbantes.

Optimisation = processus d'itérations sur les *géométries plaque/canal, assemblage et plan de chargement*

- première étape: le design assemblage reste “académique” =>définition d'un design préliminaire (épaisseur plaque, canal He...)
- seconde étape: définition d'un design de référence (contraintes technologiques)

# Design préliminaire – le coeur “12/06 E” (1/2)



Parameter	Value
<b>CORE</b>	
Core Height / Diameter (m)	2.3 / 3.65
Number of fuel S/A	267
Volumic Fractions (%) :	Gas/Fuel : 30.8/25.7 SiC structure. : 28.6 He gap/Liner 13.4/ 1.5
<b>SUB-ASSEMBLY &amp; PLATE</b>	
S/A External width over flats (mm)	210
Number of plates in the S/A section	24
Plate Thickness (mm)	8,7
Inter-plate helium channel (mm)	4.01
<b>OPERATING AND PERFORMANCES</b>	
Core power density (MW.m <sup>-3</sup> )	100
Core inlet / outlet temp. (°C)	400 / 900
Core pressure drop (bar)	1,61
Maximum fuel temp. BOL (°C)	1360
TRU content (%)	17,3
Pu inventory (t/GWe <sup>1</sup> )	10.2
Core managt (efpd)	3 x 621
Breeding Gain*	- 0,2 / - 0,1
Doppler Constant* (pcm)	- 1060 / -923
He depressurization* (pcm)	178 / 199
$\beta_{eff}$ * (pcm)	356 / 316

Par rapport au coeur 06/04

**Augmentation du H/D**

**Fract. Vol. combustible aussi grande que possible**

**Une nouvelle géométrie “cellule”**

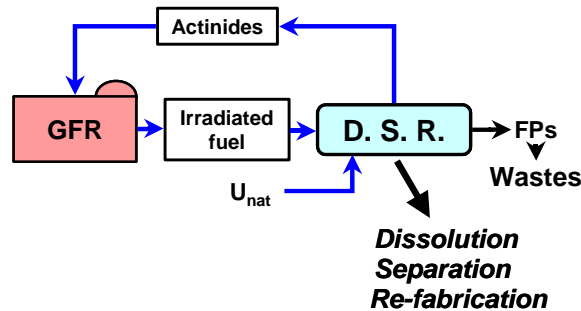
- Epaisseur plaque 8,7 mm
- Canal He 4,0 mm

**Perte de charge coeur et température combustible “raisonnablement” élevées.**

# Design préliminaire – le coeur “12/06 E” (2/2)



## Performances du cycle du combustible fermé



	BOL	BOC	EOC	EOL	EOL+3y
Reactivity (pcm)	6593	4673	3065	1537	-
Breeding gain	-0.22			-0.11	-
Pu9eq (kg)	8991			8450	8308

Détails du 1er cycle

	BOL	BOC	EOC	EOL	EOL+3y
Reactivity (pcm)	3356	3325	2993	2275	
Breeding gain	0.02			-0.03	
Pu9eq (kg)	8357			8472	8344

Détails du cycle à l'équilibre

Observation : Pu9eq. (FDV+3ans) = Pu9eq. (DDV)

**L'iso-génération est démontrée à l'équilibre**

# Définition d'un design de référence (mécanique)



*Une analyse fonctionnelle a été réalisée dans le but de sélectionner les options de conception appropriées pour l'assemblage combustible (conception des internes)*

Les structures de l'assemblage ont **deux fonctions mécaniques** :

- Assurer la continuité mécanique de l'assemblage et contribuer à l'architecture du coeur: c'est la fonction du tube hexagonal
- Supporter les plaques combustibles

De plus, les structures assurant l'architecture du coeur ne doivent pas appliquer de chargement sur les plaques. Aussi, il est nécessaire de:

- **Séparer mécaniquement les plaques et le tube hexagonal**, pour éviter qu'une déformation du tube ne vienne impacter les plaques
- Permettre la déformation naturelle des plaques dans leurs structures de support

Ces deux critères nécessitent:

- une structure additionnelle pour supporter les plaques dans le tube hexagonal
- la segmentation de la structure de support → sous-unités
- des liens isostatiques avec des jeux fonctionnels entre les sous -unités

# Conclusion sur le design de coeur



## Concept combustible/assemblage, sélection des matériaux

- détermine la faisabilité du RNR-G et les performances du coeur
- l'élément combustible innovant (plaque macro-structurée de (U,Pu)C et SiCfSiC) présente un bon potentiel en terme de performances combustible
- Le concept d'assemblage avec tube hexagonal est précisé; plaques disposées verticalement, canaux hydrauliques connectés; un design réaliste (contraintes technologiques) a été défini; la caractérisation détaillée est en cours

## Performances coeur - Révision du design

- une ré-optimisation du design combustible/coeur a été réalisée (design "12/06"); l'iso-génération est démontrée à l'équilibre
- ce coeur est compatible avec l'approche de sûreté malgré une perte de charge du coeur plus élevée

*La caractérisation du coeur 12/06 est en cours et se base sur un design réaliste d'assemblage, prenant en compte des aspects mécaniques et thermo-hydrauliques. Elle contribue à un document de pré-faisabilité en préparation pour fin 2007.*