



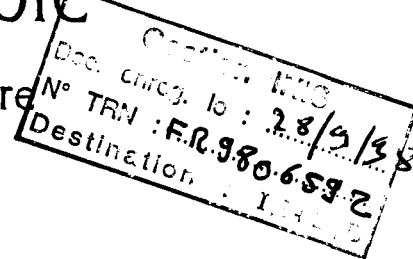
FR9806592

98006480

# Le combustible et le cycle du combustible

## 1ère partie : Le combustible nucléaire

par Claude PRUNIER - CEA/DRN



### 1. Généralités

Le combustible se distingue nettement des autres composants d'un réacteur nucléaire :

Il constitue sa partie active. C'est en son sein que se produisent les fissions de certains noyaux d'éléments de masse atomique élevée, comme l'uranium 235 ou le plutonium 239, et donc, le dégagement d'énergie. Chaque fission dégage une énergie voisine de 200 MeV ( $1 \text{ eV} = 1,6 \cdot 10^{-19}$  joules) : la fission complète d'un kilogramme d'uranium 235 fournit autant d'énergie que la combustion de 2 400 tonnes de charbon.

Le combustible est la partie consommable d'un réacteur, ce qui entraîne plusieurs conséquences. Sur le plan économique, il y a intérêt à réduire sa consommation, donc à le changer le moins souvent possible en augmentant son temps de séjour dans le réacteur. Au cours de la vie d'un réacteur, on peut faire évoluer les caractéristiques du combustible pour le rendre plus performant, sous réserve qu'elles restent compatibles avec les conditions de fonctionnement imposées par ce type de réacteur.

Les réactions de fission engendrent dans le combustible des éléments radioactifs tels que produits de fission et actinides. Le concept de "réacteur propre", retenu en général, impose d'éviter la dispersion de ces éléments en les confinant à l'intérieur d'une barrière étanche entourant le combustible, qui est sa gaine. La gaine constitue la première barrière de confinement des matières radioactives. En fonctionnement normal du réacteur et en cas d'incident, le taux de défauts d'étanchéité de cette première barrière, appelés quelquefois ruptures de gaine, doit rester extrêmement bas.

Si des conditions accidentelles de fonctionnement du réacteur surviennent, le combustible joue un rôle essentiel, étant la source de la majeure partie des éléments radioactifs susceptibles d'être dispersés et conditionnant leur dispersion par son comportement.

Les réactions de fission se produisant dans le combustible, ce sont les matériaux de l'assemblage combustible, combustible proprement dit, matériau de gainage et matériaux des structures, qui subissent les dommages les plus importants, causés en particulier par les neutrons. La tenue sous irradiation des matériaux constituant l'assemblage combustible est donc l'un des facteurs essentiels de son comportement en réacteur avec la tenue à la température et à la corrosion.

### 2. Critères de choix des matériaux

Le choix des matériaux et du dessin d'un combustible dépend étroitement du type de réacteur dans lequel il va être utilisé, bien que pour un réacteur donné, on puisse envisager des combustibles relativement différents. Le système de réacteur donné va imposer le niveau des sollicitations auxquelles sera soumis le combustible : température, pression du caloporteur, flux de neutrons... On conçoit que la nécessité d'avoir une gaine ayant de bonnes propriétés mécaniques conduise à des choix de matériaux différents selon que la température du caloporteur atteint environ 300°C dans les réacteurs à eau (REP), environ 600°C dans les réacteurs à neutrons rapides (RNR) et environ 800°C dans les réacteurs à haute température (RHT).

Nous allons énumérer les principaux critères de choix des divers composants de l'assemblage combustible.

### Matériau combustible :

- Stabilité géométrique suffisante en fonctionnement, compte tenu des conditions de température et d'irradiation (gonflement induit par les produits de fission).
- Propriétés thermiques satisfaisantes en fonctionnement pour éviter la fusion à cœur.
- Compatibilité chimique acceptable avec la gaine, pour éviter d'altérer ses propriétés.
- Densité en atomes lourds fissiles : cette propriété, si elle n'entraîne en général pas le rejet d'un matériau combustible, conditionne le bilan neutronique, donc la réactivité, l'épuisement du combustible.
- Compatibilité chimique suffisante avec le caloporteur, permettant soit de laisser en réacteur un élément combustible présentant un défaut d'étanchéité, soit de disposer d'un temps suffisant pour arrêter le réacteur et décharger le combustible défectueux avant qu'il n'induisse des conséquences graves pour le réacteur (dispersion de particules de combustible consécutive à une rupture de gaine).
- Compatibilité avec les étapes du cycle de combustible : coût de fabrication économiquement acceptable, aptitude au retraitement (dissolution aussi complète que possible par l'acide nitrique dans le cas du procédé PUREX).

### Gaine :

- Propriétés mécaniques adaptées aux conditions de fonctionnement imposées (ex : résistance à la pression interne des gaz de fission se dégageant hors du combustible).

- Compatibilité chimique satisfaisante avec le caloporteur.
- Compatibilité avec le combustible.
- Faible capture des neutrons. Cette propriété est impérative si l'on veut utiliser un combustible à l'uranium naturel (UNGG) et elle a moins d'importance dans le cas des RNR à cause des faibles sections de capture dans la plage d'énergie des neutrons.
- Résistance suffisante aux effets de l'irradiation (fragilisation, gonflement...), surtout si le flux de neutrons rapides est important.

#### Structures de l'assemblage :

- Bonne tenue mécanique des structures de l'assemblage dans les conditions de fonctionnement normales et accidentelles (ex : séisme), afin de garantir la circulation du caloporteur, l'absence de difficultés de manutention des assemblages...
- Compatibilité avec le caloporteur.
- Résistance aux effets de l'irradiation.

### 3. Matériaux des éléments combustibles

#### Combustible :

- L'incompatibilité avec l'eau élimine pour tous les réacteurs refroidis à l'eau les matériaux suivants : uranium ou UPu allié, carbure, nitrure. De ce fait, le combustible oxyde,  $UO_2$ , essentiellement, est celui qui est le plus utilisé dans le monde et pour lequel on possède la plus grande expérience.

L'oxyde, très compatible avec l'eau, réagit avec le sodium mais la cinétique de la réaction laisse le temps d'intervenir pour extraire du cœur du réacteur un assemblage défectueux, ce qui permet d'utiliser l'oxyde dans les RNR. Les alliages métalliques, le carbure et le nitrure ne réagissent pas avec le sodium.

- Les combustibles au plutonium sont peu utilisés à ce jour, pour diverses raisons.

Les seuls réacteurs où ils s'imposent, pour des raisons neutroniques, sont les

réacteurs à neutrons rapides (encore que ces réacteurs puissent fonctionner avec de l'uranium enrichi), peu développés à ce jour.

Le recyclage du plutonium, qui consiste à remplacer dans le combustible l'uranium 235 par du plutonium, n'en est qu'à ses débuts, dans un petit nombre de pays dont la France, car d'une part, une faible proportion des combustibles irradiés est retraitée dans le monde, d'autre part, la mise en œuvre du plutonium pour la fabrication du combustible est plus difficile que dans le cas de l'uranium.

#### Gaine :

Les considérations de neutronique sont impératives pour les réacteurs à uranium naturel : choix du MgZr pour les UNGG, du Zircaloy pour les HWR. Elles sont moins impératives pour les réacteurs à eau ordinaire, mais interviennent sur le plan économique.

#### Description de l'assemblage des réacteurs à eau sous pression :

La figure 1 montre l'assemblage REP développé par FRAMATOME. Il est composé de 264 crayons disposés en un réseau carré  $17 \times 17$  (289 positions), avec un tube d'instrumentation central et 24 tubes-guides, qui peuvent recevoir des crayons de grappes associées (crayons absorbants ou autres).

Avec les 25 tubes précités, la structure de l'assemblage (ou squelette), est constituée des embouts inférieur et supérieur, en acier inoxydable, de deux grilles d'extrémité et de 8 ou 10 (selon la puissance du réacteur) grilles intermédiaires, l'ensemble étant solidaire.

Les tubes-guides sont en Zircaloy-4. Les grilles, autrefois en Inconel, sont maintenant essentiellement en Zircaloy-4 et comportent cependant des ressorts en Inconel.

Le crayon a une gaine en Zircaloy-4, fermée à chaque extrémité par un bouchon en Zircaloy-4, soudé à la gaine. Il comprend la colonne de pastilles de combustible, maintenues jointives par un ressort en Inconel entre le haut de la colonne et le bouchon supérieur. L'espace situé au niveau du ressort constitue un volume libre permettant l'expansion des gaz de fission dégagés hors du combustible.

#### Terminologie relative au combustible :

Le combustible est en général constitué de plusieurs sous-ensembles réunis pour former l'assemblage combustible. On utilise parfois simplement le terme d'assemblage, mais l'adjectif combustible est nécessaire, car certains types de réacteurs peuvent contenir d'autres assemblages. Exemple : dans le cas des réacteurs à neutrons rapides, les assemblages fertiles ou les assemblages de commande.

Vis-à-vis du réacteur, l'assemblage combustible constitue l'unité élémentaire de combustible.

Le sous-ensemble (expression qui n'est pas utilisée), qui constitue la plus petite unité contenant du combustible et ayant une structure propre, est désigné par un nom évoquant sa forme géométrique : crayon ou aiguille si sa section est circulaire (avec un rapport longueur/diamètre élevé), plaque si sa section est rectangulaire (toujours de faible épaisseur). La distinction entre crayon, utilisé pour les réacteurs à neutrons thermiques, et aiguille, pour les réacteurs à neutrons rapides, est d'origine historique et n'a plus de justification, bien qu'elle subsiste : à l'origine, le diamètre était nettement plus petit dans le deuxième cas, d'où le choix du terme aiguille, mais depuis, la différence de diamètre s'est réduite.

L'expression d'élément combustible est employée en principe pour désigner crayon, aiguille, ou plaque, mais elle l'est parfois pour désigner l'assemblage combustible.

On emploie l'expression de faisceau pour désigner l'ensemble des crayons ou aiguilles d'un assemblage combustible.

Le terme de grappe est parfois utilisé à la place de celui d'assemblage, comme dans le cas des réacteurs à eau lourde. Le terme d'assemblage ne s'applique pas dans certains cas.

Le combustible est constitué soit d'oxyde d'uranium enrichi,  $UO_2$ , soit d'oxyde mixte d'uranium et de plutonium,  $(U,Pu)O_2$ . Un assemblage ne comprend qu'un seul type de combustible. Le combustible à base de plutonium est en général appelé combustible MOX (Mixed OXide).

## ASSEMBLAGE COMBUSTIBLE et GRAPPE de CONTRÔLE

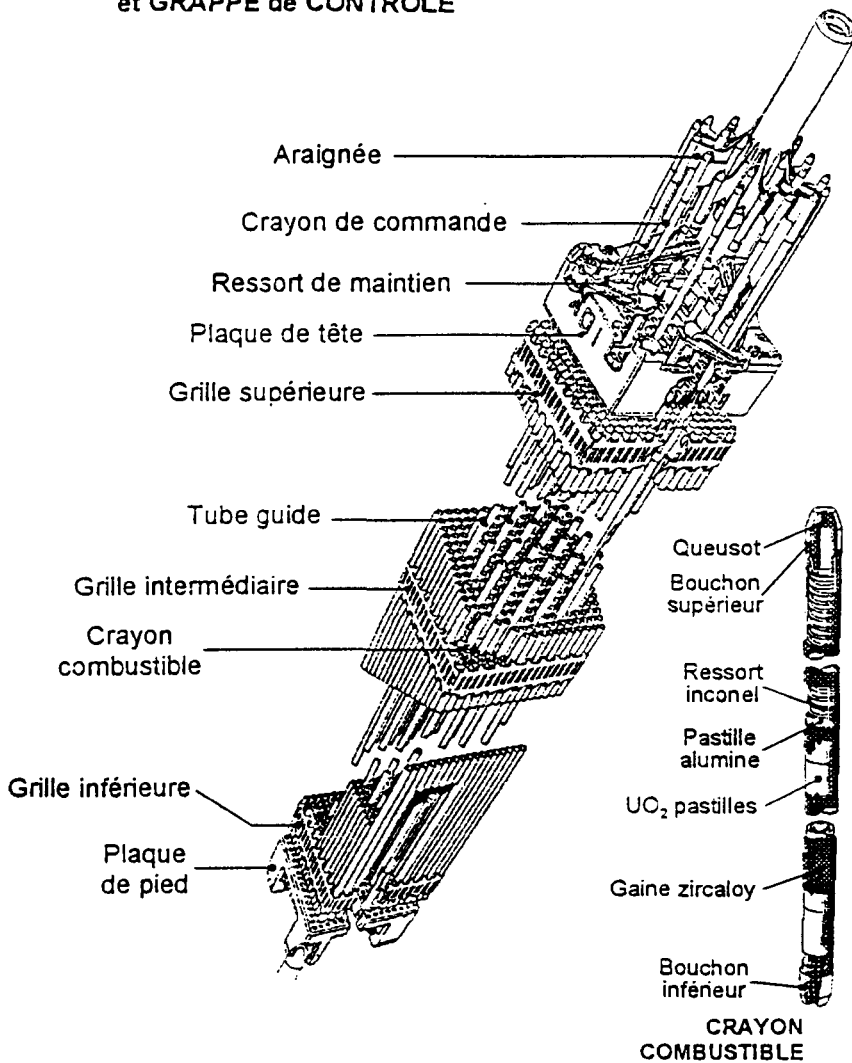


Figure 1 : Assemblage de conception FRAMATOME pour réacteur à eau sous pression

Type de réacteur	900 MWe	1 300 MWe
Nombre d'assemblages	157	193
Réseau	17 x 17	17 x 17
Nombre de crayons combustibles par assemblage	264	264
Gaine		
- Diamètre extérieur (mm)	9,5	9,5
- Epaisseur (mm)	0,57	0,57
Diamètre		
- Pastille (mm)	8,2	8,2
Longueur (mm)		
- Colonne combustible	3 658	4 267
- Crayon	3 852	4 488
- Assemblage	4 058	4 796
Nombre de grilles	8	10
Pas des crayons (mm)	12,6	12,6
Section de l'assemblage (mm)	214 x 214	214 x 214
Poids de l'assemblage (Kg)	649	760
Nb crayons/grappe de commande	24	24
Enrichissement		
- UO <sub>2</sub> (en <sup>235</sup> U)*	3,7	3,6
- MOX (en Pu)**	5,3	-

\* Rechargement par quart de cœur  
\*\* Rechargement hybride : quart de cœur (UO<sub>2</sub>) et tiers de cœur (MOX)

Tableau 1 : Caractéristiques principales des assemblages des réacteurs à eau sous pression FRAMATOME

La teneur en matière fissile est inférieure à 5 % en <sup>235</sup>U pour le combustible uranium et peut être supérieure à 5 % en plutonium pour le combustible MOX.

Le crayon est fermé sous hélium à une pression égale ou supérieure à 25 bars à froid, ce qui permet de contrebalancer en partie l'effet de la pression externe du caloporteur sur la gaine.

La puissance des réacteurs FRAMATOME ayant varié (900 MWe nets, 1 300 MWe, 1 450 pour le type N4), les crayons combustibles, donc les assemblages, ont deux longueurs différentes, l'une, plus courte, pour les 900 MWe, l'autre pour les 1 300 MWe et N4.

A chaque assemblage est associée une grappe de crayons qui sont fixés par leur partie supérieure à une pièce appelée araignée et qui s'engagent dans les tubes-guides.

Le tableau 1 donne les principales caractéristiques des assemblages combustibles des réacteurs de 900 et 1 300 MWe.

### Mesure des performances d'un combustible :

La durée de vie d'un combustible, limitée par des considérations neutroniques ou technologiques, s'exprime par sa **combustion massique** (le terme **épuiement** est quelquefois utilisé) ou son **taux de combustion**.

La **combustion massique** est l'énergie totale libérée au cours de la vie du combustible par unité de masse du combustible, en prenant soit la masse totale [UO<sub>2</sub>, (U,Pu)O<sub>2</sub>], soit la masse de métal lourd (U ou U + Pu).

Elle s'exprime en MWj/tonne (d'oxyde ou de métal lourd), en GWj/tonne ou en MWj/kg. On doit donc préciser s'il s'agit de tonne d'oxyde ou de métal lourd, mais on ne le fait pas toujours.

En France, on utilise les MWj/t de métal pour les REP, et les MWj/t d'oxyde pour les RNR. Compte tenu des rapports de masse entre oxyde et métal :

$$1 \text{ MWj/t métal} = 0,8815 \text{ MWj/t oxyde}$$

Le **taux de combustion de fission** (TCF), appelé souvent simplement **taux de combustion**, est le nombre d'atomes lourds fissionnés en % du nombre initial d'atomes lourds (U + Pu). Il est exprimé en abrégé en at %.

La combustion massique est utilisée dans les REP et dans les RNR. Le taux de combustion est surtout utilisé dans les RNR.

La combustion massique est parfois appelée improprement taux de combustion. La relation entre taux de combustion et combustion massique est à peu près la suivante :

$$1 \text{ at } \% = 8\,500 \text{ MWj/t oxyde}$$

On doit toujours préciser si l'on parle de combustion massique (ou taux de combustion) moyenne (moyenne de la recharge, moyenne dans l'assemblage combustible le plus épuisé) ou maximale (pastille, zone centrale d'aiguille ou crayon), mais on oublie parfois de le faire. En général, on parle de moyenne recharge ou assemblage pour les REP, et de maximum pour les RNR. Le flux de neutrons intégré (ou fluence) au cours de l'irradiation d'un matériau s'exprime en  $n/cm^2$ .

Pour les matériaux de structure métalliques des RNR, on préfère utiliser une unité de **dommage**, le **dpa** (déplacement par atome). Dans un réacteur RNR, au cours de la vie d'un assemblage combustible, un matériau subit plus de 100 dpa, ce qui signifie que tous les atomes du matériau ont été déplacés plus de 100 fois en moyenne. On utilise souvent le terme de dose intégrée, ou simplement dose, pour exprimer soit la fluence, soit le dommage.

#### 4. Recherche et développement

##### *Les limites actuelles de fonctionnement et les axes de R et D :*

La R et D menée en France sur le combustible REP, en collaboration entre le CEA, EDF, FRAMATOME et COGEMA, est consacrée en priorité au soutien des objectifs industriels à court et moyen terme ; toutefois, dans une perspective à plus long terme, elle alimente également l'acquisition de connaissances de base et la recherche de solutions innovantes. Cette R et D s'articule autour du développement des produits (combustibles  $UO_2$ , combustibles MOX, assemblages, grappes absorbantes, poisons consommables ...) et de thèmes techniques qui, pour certains d'entre eux, sont interdépendants et se recouvrent.

##### *Combustible $UO_2$ - Augmentation de l'épuisement de décharge :*

Un objectif économique important est d'accroître l'épuisement de décharge des combustibles  $UO_2$ , actuellement limité à 47 GWj/tU (épuisement de décharge moyen de l'assemblage le plus irradié du cœur), jusqu'à au moins 60 GWj/tU, à l'horizon 2000-2005.

En soutien de cet objectif, la R et D porte sur :

- le matériau de gainage.
- le comportement du combustible  $UO_2$  actuel à des taux de combustion supérieurs à 50 GWj/tU, vis-à-vis de la thermique, du gonflement et du relâchement des gaz de fission et de son rôle sur le comportement du combustible à partir d'environ 45 GWj/tU, notamment en situation accidentelle.
- le comportement global du crayon  $UO_2$  à très fort taux de combustion (au-delà de 60 GWj/tU).
- le comportement de combustibles  $UO_2$  innovants, envisagés pour le moyen et le long terme en particulier  $UO_2$  à microstructures avancées, visant à améliorer la tenue au fluage et la rétention des gaz de fission.

Ces programmes de R et D comprennent :

- des irradiations expérimentales "de cuisson" et analytiques soit en réacteurs de puissance (prolongation de crayons au-delà des taux de combustion usuels), soit en réacteurs de recherche OSIRIS en boucles en eau plus ou moins instrumentées.
- des examens post-irradiatoires, dans les laboratoires chauds du CEA,
- des travaux d'interprétation, synthèse et modélisation, destinés à alimenter les codes décrivant le comportement thermo-mécanique des crayons.

##### *Manoeuvrabilité - Tenue du combustible $UO_2$ aux transitoires de puissance :*

Le combustible, en exploitation, doit pouvoir supporter, sans dommage, des transitoires de puissance normaux

(suivi de charge ...) et incidentels (retrait incontrôlé de grappe de puissance, ...). Ces transitoires se traduisent par des contraintes d'exploitation parfois sévères, en particulier au niveau de la limitation des durées de fonctionnement prolongé à puissance intermédiaire pour éviter le risque de rupture de gaine par interaction pastille-gaine (IPG) lors de transitoires après retour à la puissance nominale.

Détendre cette limitation permettrait à EDF une meilleure souplesse d'exploitation du parc nucléaire.

La R et D en soutien de cet objectif comporte deux volets complémentaires :

- la recherche des limites technologiques du combustible, au moyen d'essais de simulation de rampes de puissance en boucles à eau dans des réacteurs de recherche, dans le but d'établir et valider les critères de tenue des crayons à ce type de transitoire.
- la compréhension, quantification et modélisation des phénomènes élémentaires mis en jeu (plasticité des matériaux, corrosion sous contrainte...) au moyen d'études et essais hors pile ainsi que d'irradiations analytiques, en boucles en eau instrumentées, dans des réacteurs de recherche.

##### *Combustible MOX - Fabrication :*

Le fabricant français, COGEMA, est incité à améliorer les procédés, en particulier dans le sens d'une simplification et d'une réduction des coûts sans remettre en cause la qualité.

En coopération avec COGEMA, le CEA conduit un important programme de R et D, centré sur l'assistance aux usines de fabrication existantes (MELOX, CFCA), l'amélioration des procédés et l'étude des mécanismes physiques et chimiques qui les sous-tendent.

La R et D consiste en des études et essais en boîtes à gants dans les laboratoires de Cadarache (LEFCA, Labo  $UO_2$ ), portant sur des différentes étapes du procédé de fabrication (origine et mélange des poudres, broyage, pastillage, frittage, rectification, contrôles associés ...).

### Combustible MOX - Augmentation de l'épuisement de décharge :

L'objectif général pour l'exploitant EDF étant d'utiliser les combustibles MOX dans les mêmes conditions que les combustibles  $UO_2$ , il est impératif d'accroître l'épuisement de décharge des MOX, qui est actuellement de 43 GWj/t. Dans une première étape, le passage, à l'horizon 2000, d'une stratégie de gestion hybride (renouvellement par 1/4 de cœur pour l' $UO_2$  et par 1/3 de cœur pour le MOX - cycles annuels) à une stratégie de gestion par 1/4 de cœur-cycles annuels pour les 2 types de combustibles dans les REP 900 MWe du parc EDF, nécessite de porter à environ 50 GWj/tU l'épuisement de décharge du combustible MOX. 55 GWj/t devrait constituer l'étape suivante.

En soutien de cet objectif, outre les améliorations de conception, les axes de R et D sont analogues à ceux développés plus avant pour la recherche de forts taux de combustion sur l' $UO_2$ , avec l'accent mis particulièrement sur la minimisation du relâchement des gaz de fission qui apparaît aujourd'hui comme la principale limitation potentielle pour des taux de combustion supérieur à 50 voire 55 GWj/t.

Cette R et D porte en priorité sur le produit actuel (MOX/MIMAS) mais, dans une perspective à plus long terme, vise également à développer des combustibles améliorés du point de vue de leur microstructure.

### Combustible MOX - Tenue aux transitoires de puissance :

Le combustible MOX est soumis aux mêmes règles et aux mêmes contraintes que le combustible  $UO_2$  vis-à-vis des transitoires de puissance. Ses meilleures propriétés de fluage-plasticité le prédisposent à un comportement plus favorable vis-à-vis de l'interaction pastille-gaine, ce qui a été vérifié expérimentalement, mais sur une base de données limitée.

Un effort reste à faire pour étendre cette base de données pour le produit actuel et, le moment venu, pour les combustibles améliorés, en mettant l'accent sur la compréhension et la modélisation des phénomènes concernés.

Le programme de R et D correspondant comporte ainsi des études et essais hors pile, des irradiations expérimentales en réacteurs de recherche, analytiques ou technologiques, et les examens associés, des travaux de synthèse et modélisation.

### Développement de matériaux pour les gaines et les structures des assemblages combustibles :

Dans le but d'accroître les performances des assemblages, notamment en épuisement de décharge, FRAMATOME a initié un important programme de développement, visant à sélectionner et qualifier des alliages de zirconium pour les gaines, les tubes-guide et les grilles, des matériaux nouveaux pour les grilles d'extrémité et des matériaux à base Nickel pour les ressorts de maintien de l'assemblage.

La majeure partie de ce programme est consacrée au développement des alliages de zirconium, structuré au sein d'un Projet Alliages Zirconium (PAZ) associant étroitement le CEA et ses partenaires EDF, FRAMATOME, CEZUS, ZIRCOTUBE. Les objectifs industriels sont de sélectionner le matériau de référence, et de le qualifier, à une échelle statistique suffisante pour en généraliser l'utilisation à l'horizon 2000.

Le programme de R et D, mené par les partenaires, est articulé autour de deux volets principaux : l'étude de la corrosion externe du gainage et les propriétés mécaniques des matériaux en liaison avec leur caractérisation métallurgique.

Il comporte :

- des essais de corrosion hors pile (en autoclaves, en boucles en eau à chimie contrôlée) et en pile (en boucles en eau dans des réacteurs expérimentaux),
- des examens de crayons irradiés dans les réacteurs REP,
- des expériences analytiques en boucles instrumentées dans des réacteurs de recherche,
- des travaux de métallurgie analytique sur alliages irradiés et non irradiés,
- des travaux de synthèse et modélisation des lois de comportement des matériaux sous irradiation.

### Phénoménologie du combustible - Codes de calcul thermo-mécanique du crayon - Bases de données :

Les résultats de la R et D sur le comportement du crayon combustible, constituent la base de développement des logiciels de calcul, outils de simulation indispensables pour le concepteur (FRAMATOME), l'exploitant (EDF), et l'organisme de R et D (CEA).

Au fur et à mesure des progrès acquis sur la modélisation physique des phénomènes, de nouvelles versions des codes sont développées, en intégrant les progrès de l'informatique, et validées sur les acquis les plus récents.

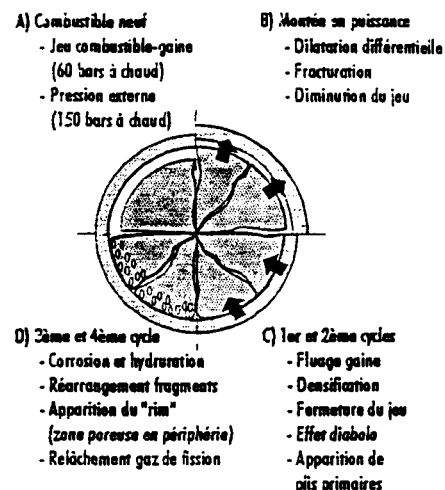


Figure 2 : Comportement d'un crayon combustible en REP

Le domaine d'application visé par les logiciels de simulation comprend à la fois le comportement du crayon combustible en situation normale (irradiation de base, suivi de réseau) mais aussi en transitoire de puissance (rampes). Une description qualitative de l'ensemble des phénomènes qui gouvernent le comportement du crayon, au cours de sa vie sous irradiation en réacteur, est donnée ici afin de préciser les enjeux de la modélisation et d'illustrer les mécanismes à reproduire.

La figure 2 met en évidence de manière schématique l'évolution de la structure du combustible et de sa gaine au cours des 4 cycles en réacteur d'un combustible standard  $UO_2$ .

Ces phénomènes constituent des facteurs limitatifs de la durée de vie des crayons en REP.

En régimes transitoires incidentels (rampes de puissance), les températures atteignent des valeurs élevées dans le combustible (1500°C) et le mécanisme de poussée des pastilles sur la gaine, déjà observé en fonctionnement de base à jeu rattrapé, est fortement exacerbé. La mise en diabolo des pastilles, combinée à l'arcure des fragments, contribue à l'accentuation de la poussée des pastilles sur la gaine au niveau des plans inter-pastilles et plus précisément en face des fissures de l'oxyde. Ce mécanisme d'Interaction Pastille-Gaine (IPG) associé à la présence d'agents corrosifs (produits de fission tel que l'iode) est susceptible de provoquer des ruptures de gaine par Corrosion Sous Contrainte (CSC).

Le comportement du combustible MOX est similaire à celui de l'UO<sub>2</sub> avec cependant certaines spécificités liées à sa microstructure hétérogène (dispersion d'amas de mélange-mère riche en Pu dans une matrice d'UO<sub>2</sub>) qui peut affecter notamment les processus de relâchement des gaz de fission.

La figure 3 indique une représentation schématique traduisant l'organisation du logiciel METEOR/TU, les mécanismes principaux modélisés.

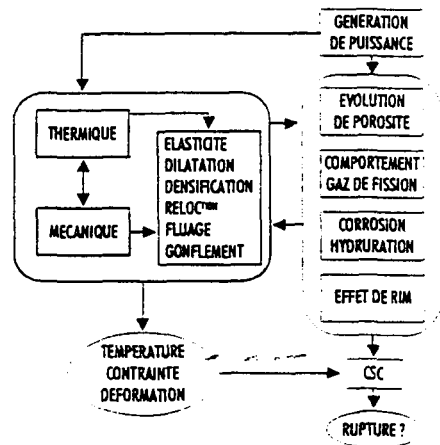


Figure 3 : Mécanismes modélisés dans METEOR/TU

La modélisation 3D (maillage d'un quart de pastille comprenant 2 fragments ou plus, figure ci-après) prend en compte la fragmentation radiale de l'oxyde (figure 4). Elle permet ainsi une représentation réaliste de l'expansion des pastilles responsable, d'une part, de la formation des plis sur la gaine, au niveau des plans inter-pastilles, et, d'autre part, de la concentration de contraintes en face des fissures de l'oxyde.

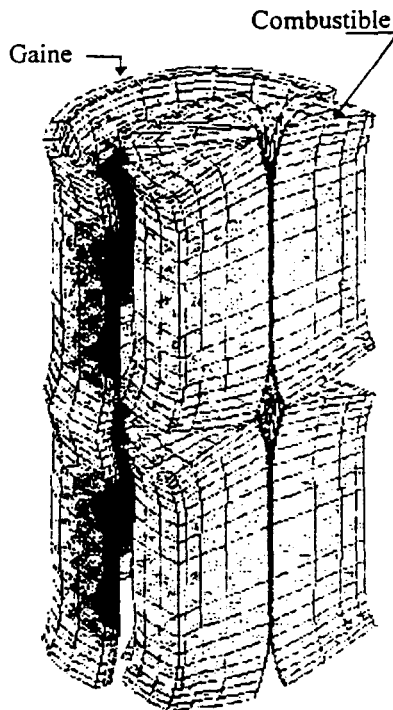


Figure 4 : Modélisation 3D fragmentée avec TOUTATIS

#### Assemblages - Comportement mécanique et hydraulique :

Les évolutions dans la conception des assemblages par FRAMATOME et le retour d'expérience par EDF de l'exploitation du parc de réacteurs induisent des programmes de R et D contribuant à qualifier les performances des produits actuels et futurs, vis-à-vis des situations d'exploitation normales et accidentelles.

Il s'agit en particulier d'étudier :

- les interactions fluide-structure,
- le comportement vibratoire des crayons vis-à-vis des grilles et l'usure des gaines qui peut en découler,
- le comportement mécanique global de l'assemblage, notamment l'influence des déformations de la structure sur la chute des grappes de commande.

Les programmes de R et D en soutien de cet objectif comportent :

- des essais en maquettes d'assemblages, pouvant aller jusqu'à échelle 1, en air et en eau.
- des travaux de compréhension et modélisation servant de base au développement et à la qualification de logiciels.

#### Conclusion :

La R et D et la validation des logiciels associée reposent principalement sur :

- les expériences analytiques réalisées dans les réacteurs expérimentaux SILOE et OSIRIS.
- les examens post-irradiatoires sur des crayons irradiés en réacteurs de puissance (programmes de surveillance).
- les rampes de puissance sur crayons "refabriqués" (procédé Fabrice) dans OSIRIS.

Un effort important est également consenti pour étendre cette base de validation de façon à prendre en compte les résultats intéressants obtenus dans le cadre de programmes internationaux auxquels CEA, EDF et FRAMATOME participent.

Le niveau de validation des logiciels est évalué sur la base de comparaisons calcul-mesure sur les grandeurs accessibles à la mesure dans les laboratoires chauds, notamment :

- l'évolution géométrique du crayon (profilométrie le long d'une génératrice),
- le relâchement des gaz de fission (prélèvement des gaz après perçage),
- la corrosion externe de la gaine (mesures d'épaisseur de zirconium par courant de Foucault en fonction de la cote axiale).

#### Bibliographie

- [1] Le combustible nucléaire des réacteurs à eau sous pression et des réacteurs à neutrons rapides : conception et comportement  
H. BAILLY, D. MENESEIER et C. PRUNIER  
Série Synthèse, Eyrolles, 1996
- [2] Les thèmes de R et D sur le combustible REP en France  
JP. PAGES, C. GOLINELLI, A. BERTHET, P. MELIN  
RGN, n° 3, Mai-Juin 1997
- [3] Modélisation du comportement des combustibles UO<sub>2</sub> et MOX dans les logiciels de simulation en France  
C. RENAULT, P. OBRY, J. BROCHARD, JP. PIRON  
RGN, n° 3, Mai-Juin 1997