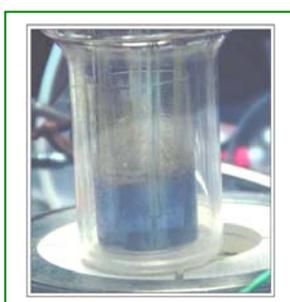
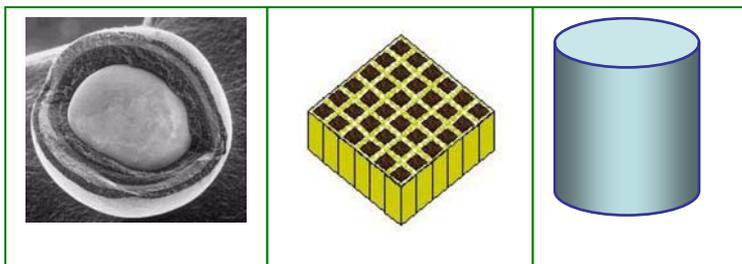


Voyage de presse

Systemes nucléaires du futur

Minimisation des déchets, économie des ressources :

les enjeux du cycle du combustible





SOMMAIRE

- Introduction
- Les enjeux du cycle du combustible du futur
- Atalante
- Phénix

Les réacteurs utilisés dans le monde pour produire de l'électricité ont connu des améliorations constantes et des ruptures technologiques depuis l'origine du nucléaire civil, dans les années 1950. On désigne ces ruptures en termes de « générations » de réacteurs : les installations aujourd'hui en exploitation sont des réacteurs de « deuxième génération ». Ce sont principalement des réacteurs à eau légère pressurisée (REP) ou bouillante (REB) aux Etats-Unis, en Europe et au Japon, des VVER (analogues aux REP) et des RBMK dans les pays de l'Est, et des Candu (réacteurs à eau lourde) au Canada et en Inde.

Une troisième génération de réacteurs est prête à prendre le relais, pour couvrir les deux à trois prochaines décennies. La quatrième génération est celle des « systèmes¹ du futur », qui restent à concevoir et visent un déploiement à partir de 2035. C'est en effet le temps nécessaire pour qu'une recherche ambitieuse, non contrainte par des objectifs de court terme, puisse proposer des ruptures technologiques et mettre au point des concepts innovants, au-delà des développements en continuité des systèmes actuels.

La communauté internationale est consciente des enjeux de l'énergie nucléaire à cet horizon. Pour relever ce défi, une dizaine de pays² ont décidé de mettre en commun leurs efforts pour développer cette quatrième génération de systèmes nucléaires capables de participer à une fourniture d'énergie en forte croissance pour répondre aux besoins énergétiques prévus d'ici une vingtaine d'années et au-delà. Le Forum international Generation IV est l'initiative la plus marquante dans ce sens. Il a été créé en 2001, dans le prolongement d'une initiative lancée en 2000 par le département américain de l'Energie (DOE). Les pays membres reconnaissent les atouts de l'énergie nucléaire pour satisfaire les besoins croissants en énergie dans le monde, dans une perspective de développement durable et de prévention des risques de changement climatique.

Afin de tenir compte de l'évolution à long terme des besoins, les systèmes nucléaires du futur ne devront d'ailleurs pas se limiter à la seule production d'électricité ; ils devront pouvoir répondre à d'autres demandes, telles que la production d'hydrogène ou des utilisations combinées de la production de chaleur comme le dessalement de l'eau de mer.

Aux réacteurs proprement dits sera associé un cycle du combustible novateur. Outre des performances améliorées en terme d'économie et de sûreté, le Forum international Generation IV s'est défini trois grands critères de choix pour le développement du cycle du futur : la sauvegarde des ressources, la minimisation des déchets et la résistance aux risques de prolifération.

Les chercheurs devront ainsi mettre au point des combustibles innovants permettant l'incorporation de l'ensemble des éléments actinides³, valorisables, issus du

¹ Par système, il faut entendre l'ensemble formé par un type de réacteur et le cycle de combustible associé.

² L'Argentine, le Brésil, le Canada, la France, le Japon, la République de Corée, l'Afrique du Sud, la Suisse, le Royaume-Uni, les Etats-Unis et la Commission européenne.

³ Actinides : éléments chimiques lourds de la famille de l'actinium, notamment l'uranium, le plutonium, le neptunium, l'américium et le curium, présents dans les combustibles nucléaires irradiés dans les cœurs des centrales nucléaires. (les 3 derniers nommés constituent les actinides mineurs).

traitement du combustible usé. De cette façon, en combinant recyclage et transmutation, les systèmes du futur permettront de limiter de façon très importante la radiotoxicité des déchets ultimes nécessitant un stockage approprié et d'économiser au mieux les ressources en réutilisant comme combustible tout ce qui est possible. Ce sont les nouvelles technologies de ce cycle du combustible qui sont à développer, grâce aux recherches menées, notamment en France, dans les installations **Atalante** et **Phénix** du CEA.

La question du combustible nucléaire est un enjeu fondamental pour les réacteurs du futur. Le combustible du futur devra permettre de résoudre le problème de la gestion des ressources naturelles en uranium, en amont, et de limiter la production de déchets radioactifs, en aval du cycle. Pour être compatible avec les technologies des réacteurs de 4^{ème} génération, « hautes températures » et/ou « à neutrons rapides », les combustibles du futur devront être totalement « reformatés », que ce soit du point de vue de leur composition, de leur conditionnement et des techniques de recyclage.

Le cycle du combustible associé aux réacteurs de 4^{ème} génération sera donc en évolution par rapport à ce qui existe aujourd'hui dans les réacteurs à eau pressurisée (REP). Ce que l'on appelle cycle du futur ou « cycle génération IV » est un mode de gestion des matières nucléaires qui a pour objectif :

- ❖ la minimisation des déchets : les actinides mineurs (neptunium, américium, curium) seront eux aussi recyclés pour être transmutés, puisque les neutrons rapides offrent également cette possibilité. Les produits de fission resteront alors les seuls déchets ultimes, ce qui aura notamment pour conséquence une diminution drastique de la radiotoxicité et de la puissance thermique des déchets ultimes et d'augmenter de plusieurs décennies la capacité d'accueil d'un éventuel site de stockage profond.
- ❖ la sauvegarde des ressources : mieux utiliser les ressources naturelles sur le long terme. L'objectif du cycle du futur est d'étendre les ressources jusqu'à un millier d'années. Pour l'atteindre, des recherches sont menées sur les configurations du réacteur (mode isogénérateur ou surgénérateur) afin de recycler les matières encore valorisables (uranium, plutonium et autres actinides). L'alimentation ne sera plus alors assurée que par de l'uranium naturel ou même appauvri sans qu'il soit besoin d'enrichissement.
- ❖ la non-prolifération : le cycle « Generation IV » constitue un progrès supplémentaire dans ce sens car les actinides seront recyclés ensemble, sans être séparés. C'est ce que l'on appelle la « gestion groupée des actinides », qui nécessite la mise au point de procédés et de technologies innovantes, puisque dans une telle stratégie, toutes les opérations se feront en chaîne blindée, y compris la fabrication.

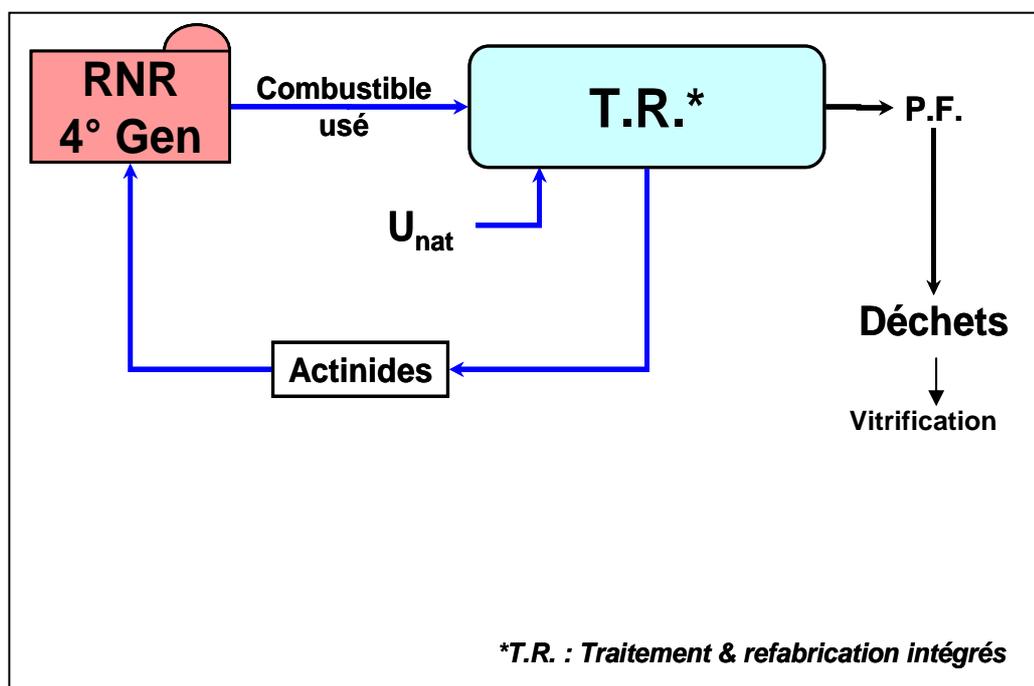
La gestion groupée des actinides (GAM – « global actinides management »)

Aujourd'hui, en France, les combustibles usés⁴ sortant des réacteurs à eau sous pression (REP) sont traités, dans le but de récupérer la matière encore valorisable, l'uranium et le plutonium, et de vitrifier ce qui n'est plus réutilisable dans ces réacteurs : les produits de fission et les autres actinides (américium, curium,

⁴ Les principaux éléments présents dans les combustibles usés sont, par ordre de radiotoxicité décroissante, le plutonium, l'uranium, les actinides mineurs et certains produits de fission (iode 129, technétium 99, césium 135).

neptunium). A l'uranium et au plutonium ainsi récupérés, on ajoute de l'uranium enrichi, le tout étant réinséré dans les réacteurs.

Dans les systèmes de quatrième génération et le cycle du futur qu'étudient les chercheurs, et notamment ceux du CEA dans l'installation Atalante de Marcoule, l'ensemble des actinides peut être valorisé pour produire de l'énergie. Les actinides seront considérés comme un tout et seront retransformés en restant groupés. Ce concept est appelé gestion groupée des actinides ou « global actinides management » (GAM). Ainsi, après dissolution du combustible, les actinides sont "extraits" ensemble par une suite de réactions chimiques (procédé GANEX pour "Group Actinides Extraction") et retransformés immédiatement en combustible neuf ("Refabrication"). Les produits de fission qui restent dans la solution, sont conditionnés dans du verre pour constituer les déchets ultimes.



Principales opérations unitaires de la séparation groupée des actinides :

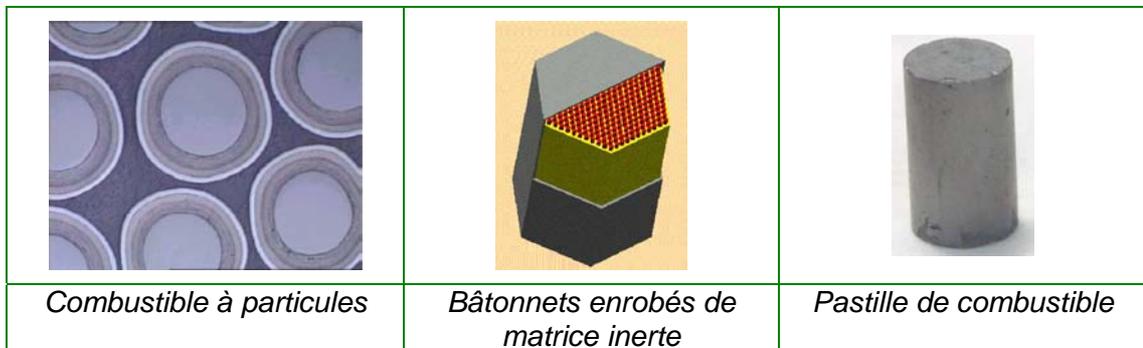
- décohésion : traitement mécanique, dissolution, piégeage des gaz
- récupération des actinides : séparation groupée et reconversion en solide
- refabrication du combustible : noyaux, enrobages, gainage, assemblage
- gestion des déchets : confinement des produits de fission et traitement/conditionnement des déchets secondaires.

Pour parvenir à réaliser ces différentes opérations, il faut développer les nouvelles technologies du cycle du combustible.

Les technologies à mettre au point dépendent bien sûr de la forme du combustible. Plusieurs voies sont à l'étude, l'objectif étant de proposer un objet qui, pendant toute la durée du séjour en réacteur, confine totalement les éléments radioactifs (actinides, produits de fission) dans toutes les situations possibles y compris en cas de dysfonctionnement du réacteur. Plusieurs types de combustible sont étudiés :

- Le "combustible à particules" où la matière nucléaire, sous forme de billes de 1 mm, est entourée de plusieurs couches de matériaux très résistants comme du carbure de silicium.

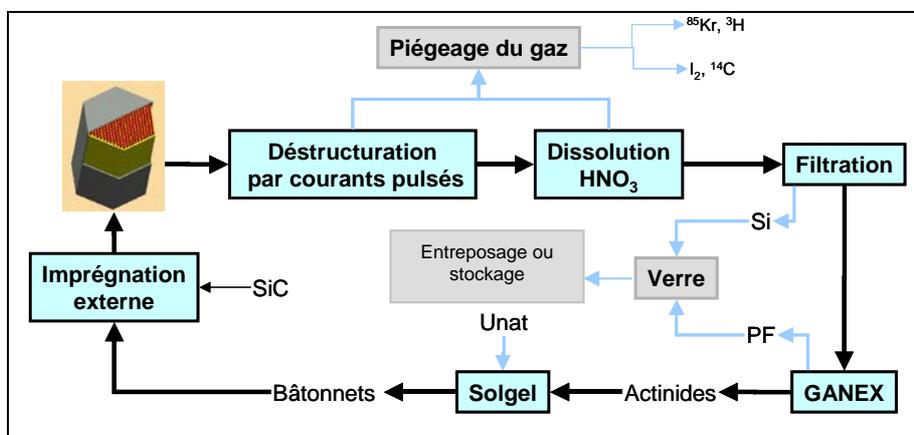
- Le combustible à matrice inerte : des grains ou des bâtonnets d'actinides sont dispersés dans un matériau réfractaire (céramique ou alliage) de quelques cm de hauteur.
- Le combustible à aiguilles où des pastilles d'actinides d'un centimètre de hauteur sont empilées puis entourées d'une gaine assurant le confinement. C'est la solution qui est utilisée dans les réacteurs d'aujourd'hui.



Dans tous les cas, le traitement de ces combustibles pour récupérer les actinides comprend trois étapes élémentaires :

- La dissolution dans un solvant afin de "dispenser" les constituants pour pouvoir les trier. Plusieurs solutions sont en cours de test en particulier dans les acides ou même dans des sels fondus à haute température (800 °C).
- La séparation des actinides proprement dite : la solution précédente est mise en contact avec des molécules chimiques qui agissent comme des "pinces" qui vont extraire les actinides. Une part importante des recherches est consacrée à la mise au point de ces molécules.
- La refabrication : une fois extraits, les actinides sont retransformés en composés solides puis l'élément combustible (particules, briquettes, pastilles) est reconstitué. Les techniques étudiées pour faire cette opération sont très pointues et nécessitent un haut niveau de qualification pour garantir une parfaite qualité du produit final afin de répondre aux exigences de sûreté puisqu'il doit retourner en réacteur.

L'enchaînement de ces opérations constitue ce qu'on appelle un schéma de procédé donnant une vision du cycle fermé. Un exemple d'un tel schéma est donné sur la figure suivante.



Les recherches s'intéressent également à toutes les opérations annexes comme le piégeage des gaz libérés lors de la dissolution du combustible, l'incorporation des

produits de fission dans une matrice vitreuse pour assurer leur confinement sur de très longues périodes, le recyclage poussé des réactifs chimiques utilisés, etc. L'objectif est de proposer des usines de traitement au moins aussi propres que celles d'aujourd'hui.

On le voit, le champ des recherches est très grand et le CEA ne travaille pas de façon isolée pour parvenir à ces objectifs. Ainsi le programme se développe dans un cadre largement coopératif tant avec les universités françaises (Montpellier, Toulouse, Paris,..) qu'avec les laboratoires spécialisés du CNRS (IN2P3, Subatech,...) que sur le plan international, où les collaborations se mettent en place.

Le Forum International Generation IV est le cadre privilégié qui permet de partager l'effort de recherche en particulier pour la mise en œuvre des grandes démonstrations technologiques qui jalonnent le programme (ex.: une démonstration des technologies de retraitement à l'horizon 2012-2015 sur une quantité significative de combustible en partenariat avec le Japon et les Etats-Unis est en cours de discussions).

L'Europe est également au cœur de ces développements. Cette implication se traduit en particulier par la constitution du "Réseau d'excellence" ACTINET centré sur la chimie des actinides et dont Atalante constituera le pôle majeur.

Atalante :

atelier alpha et laboratoires pour les analyses de transuraniens et études de retraitement

Atalante est un ensemble de bâtiments constitués de laboratoires et de chaînes blindées. L'installation comporte cinq bâtiments en zone active (zone avec de la matière nucléaire), un bâtiment de services généraux inactifs (sans matière nucléaire) et un bâtiment de bureaux.

Dans ces différents bâtiments se trouvent :

- **des laboratoires comprenant des boîtes à gants** (pour les études de radiochimie mettant en jeu des éléments transuraniens, essentiellement émetteurs de rayonnement alpha peu pénétrants)
- **des halls de chaînes blindées équipées de télémanipulateurs** (permettant la mise en œuvre d'échantillons de combustibles irradiés, émetteurs de rayonnements bêta, gamma et neutrons en plus des rayonnements alpha).



Atalante est une installation dotée des moyens les plus modernes de recherche et développement et prenant en compte, d'une part, les critères concernant la protection de l'environnement et du personnel et, d'autre part, la gestion des effluents liquides et des déchets solides.

220 personnes au total travaillent à Atalante : 160 ingénieurs, chercheurs et techniciens y mènent leurs travaux de recherche. L'exploitation est confiée à une équipe d'environ 60 personnes.

Le projet Atalante a été engagé dès le début des années 1980 dans le but de regrouper sur un même site l'ensemble des moyens nécessaires aux recherches en chimie de haute activité conduites par le CEA.

Les recherches menées dans l'installation Atalante concernent deux volets :

- Le traitement des combustibles usés des réacteurs nucléaires, en vue de réduire toujours plus les coûts du retraitement ainsi que le volume des déchets induits.
 - L'installation apporte ainsi tout le support de recherche et développement nécessaire à l'exploitation des usines de Cogema à La Hague, notamment pour proposer les adaptations rendues nécessaires par l'évolution des

combustibles (haut taux de combustion et combustible Mox), améliorer les procédés mis en œuvre, préparer les procédés de retraitement du futur. A Atalante peuvent être mises en œuvre, à échelle réduite, sur des combustibles réels, toutes les étapes du retraitement depuis la dissolution jusqu'à la vitrification.

- Les recherches avec l'industriel Cogema (Areva) sont menées contractuellement dans le cadre de projets d'intérêt commun (PIC). Chaque année, les partenaires se mettent d'accord, préalablement à leur exécution annuelle, sur les programmes à mener ; leur déroulement fait ensuite l'objet d'un suivi et d'un bilan technique et financier.
- La gestion des déchets radioactifs de haute activité et à vie longue. Les recherches portent sur :
 - la conception et l'expérimentation de molécules dites "extractantes" qui peuvent séparer sélectivement les éléments à vie longue contenus dans les déchets (actinides mineurs et produits de fission), puis à établir la faisabilité technique des procédés de séparation correspondants,
 - la mise au point et la fabrication (pour la transmutation) de pastilles à base d'américium, un des actinides mineurs constitutif des déchets à vie longue, ainsi que l'étude de leur retraitement après irradiation en réacteur,
 - des expérimentations sur les nouvelles matrices en vue de confiner certains éléments à vie longue,
 - les recherches sur l'étude du comportement à long terme des déchets vitrifiés et des colis de combustibles usés, en situation de stockage ou d'entreposage.
- Le développement des procédés de recyclage des combustibles des systèmes du futur. Ces recherches dérivent des précédentes et portent principalement sur :
 - l'étude de procédés de dissolution de matériaux de matrices inertes et des matériaux combustibles,
 - le développement de concepts de séparation groupée des actinides, basés sur la technique d'extraction par solvant
 - l'étude et le développement des voies de conversion groupée des actinides (co-précipitation, sol-gel, absorption sur support,...),
 - l'exploration des potentialités des procédés pyrochimiques pour le traitement-recyclage des combustibles usés,
 - la mise au point des technologies de traitement et de conditionnement des déchets secondaires et ultimes associés aux procédés de recyclage.



Phénix : Réacteur de recherche à neutrons rapides

Parmi les 6 concepts les plus prometteurs de systèmes du futur sélectionnés en 2002 par le forum Generation IV, quatre sont à neutrons rapides et 5 font appel au cycle fermé, avec recyclage intégral de tous les actinides présents dans les combustibles usés. L'enjeu de la préservation des ressources naturelles en combustible et de leur utilisation optimale ainsi que celui de la minimisation des déchets radioactifs expliquent largement ce choix.

Phénix est un réacteur de recherche à neutrons rapides. Les irradiations expérimentales qui y ont été réalisées depuis sa mise en service en 1974 ont servi à acquérir des connaissances dans plusieurs domaines intéressants la filière nucléaire. Aujourd'hui, c'est aussi un outil de recherche et développement majeur pour la gestion des déchets nucléaires ainsi que pour les systèmes du futur, notamment le cycle du combustible du futur

Qu'est ce qu'un réacteur à neutrons rapides ?

Les réacteurs à neutrons rapides sont appelés ainsi par opposition aux réacteurs classiques dans lesquels les neutrons sont ralentis. Leur intérêt est double puisqu'ils peuvent à la fois réduire considérablement la radiotoxicité des déchets ultimes, en brûlant tous les actinides (qui sont les éléments énergétiques mais aussi radiotoxiques à long terme) et régénérer le combustible :

- ils peuvent « brûler » du plutonium et les autres actinides radioactifs à vie longue ;
- ils peuvent produire plus qu'ils ne consomment. En 1981, en utilisant comme combustible du plutonium qu'il avait lui-même généré lors de cycles précédents de fonctionnement, Phénix démontrait que la surgénération était effectivement réalisable.

Au besoin, les neutrons rapides peuvent être « modérés », alors qu'inversement, on ne sait pas augmenter l'énergie d'un neutron « ralenti ».

Les recherches effectuées dans Phénix

Depuis sa mise en service, les 200 irradiations expérimentales effectuées dans Phénix ont permis d'acquérir des connaissances dans plusieurs domaines :

- des études sur la filière même des réacteurs à neutrons rapides ;
- des études intéressant les réacteurs de seconde génération, notamment les REP (réacteur à eau pressurisée), comme par exemple la tenue des matériaux sous fortes irradiations ;
- des études sur la transmutation. L'intérêt de Phénix pour la transmutation tient aux caractéristiques des neutrons « rapides ». Les réacteurs à neutrons rapides sont capables de fissionner (« casser ») la plupart des noyaux lourds avec une meilleure efficacité que les REP. L'objectif du programme d'irradiations prévu dans Phénix est de préciser ce potentiel et de définir, à l'aide d'irradiations expérimentales, la nature et le concept de fabrication des éléments combustibles qui seront le siège des réactions de transmutation, isotope par isotope.

Phénix pour les systèmes du futur

Aujourd'hui, Phénix est un outil de recherche et développement précieux pour le cycle du combustible du futur. L'avènement des systèmes du futur suppose en effet la mise au point d'un cycle du combustible et de matériaux de structure adéquats. Or, Phénix est aujourd'hui le seul réacteur expérimental européen capable de fournir un flux de neutrons équivalent à ceux envisagés pour les réacteurs de quatrième génération. Cette caractéristique lui confère un rôle essentiel pour tester les matériaux et les combustibles qui équiperont ces réacteurs du futur.

A cette fin, le CEA conçoit des expériences qui seront soumises au flux de neutrons rapides de Phénix.

3 expériences d'irradiation pour les systèmes du futur seront menées dans Phénix :

FUTURIX FTA

Ce programme concerne les combustibles dédiés à l'incinération possédant de fortes teneurs en actinides mineurs. Il permettra de comparer plusieurs types de combustibles : métalliques, nitrures et oxydes, avec ou sans uranium.

FUTURIX MI

L'objet de ce programme est d'acquérir des données sur le comportement d'une large gamme de matériaux inertes, envisagés pour réaliser le combustible et les matériaux de structure des futurs réacteurs rapides à caloporteur gaz (RCG ou GFR en anglais). Il s'agira de déterminer leurs propriétés physiques et chimiques, sous irradiation : densité, activation, microstructure, résistivité électrique, performances thermiques et mécaniques...

FUTURIX Concept

Ces irradiations permettront d'étudier plusieurs concepts de combustibles (carbures ou nitrures - destinés aux réacteurs à caloporteur gaz), tels que :

- des bâtonnets cylindriques ou hexagonaux dans une matrice nid d'abeille,
- des sphères enrobées,
- des sphères dispersées dans une matrice,
- des pastilles nitrures ou carbures.

Phénix en quelques chiffres.

Phénix est constitué d'une centaine d'assemblages combustibles dans un cœur de réacteur d'un mètre cube, le tout situé dans une cuve de sécurité de 14 m de circonférence et d'environ 12 m de profondeur.

Depuis sa mise en service industriel en juillet 1974, il a fonctionné 97000 heures pour 200 irradiations expérimentales.

270 personnes travaillent à Phénix dont 80 % de personnels CEA, et 20 % d'EDF.