

Le panorama mondial des réacteurs expérimentaux

Les réacteurs expérimentaux dans le monde

L'état du parc des réacteurs expérimentaux

Depuis le début des années 50, plus de 670 réacteurs expérimentaux de tous types ont été construits dans le monde et recensés. Aujourd'hui, 234 d'entre eux sont en activité dans 58 pays, les autres étant à l'arrêt définitif, démantelés ou en attente de démantèlement.

Les tableaux 13 et 14, ci-dessous, indiquent la répartition des réacteurs expérimentaux en activité, par continent, ainsi que les pays qui disposent des parcs de réacteurs expérimentaux en service les plus importants.

Tableau 13

Répartition des réacteurs expérimentaux en service, par continent	
Continent	Nombre de réacteurs expérimentaux en service
Europe (Fédération de Russie incluse)	100
Amérique	66
Asie/Océanie	59
Afrique	9

Tableau 14

Pays disposant des plus importants parcs de réacteurs expérimentaux en service	
Pays	Nombre de réacteurs expérimentaux en service
Fédération de Russie	48
États-Unis	41
Chine	15
Japon	13
France	11
Allemagne	10

Ces constructions ont été réalisées par vagues successives, la première vague, qui va des années 50 aux années 70, étant le fait des pays industrialisés du monde occidental et des pays du bloc communiste qui plaçaient de grandes espérances dans les perspectives des applications civiles de l'énergie nucléaire et, pour une très large part, sous l'impulsion des États-Unis et de l'Union soviétique, qui bénéficiaient de leur expérience acquise avec les développements de l'énergie nucléaire destinés aux applications militaires.

Cette première période de très forte expansion a vu la construction de réacteurs expérimentaux de tous types ; en effet, tout était alors à développer et à qualifier : la physique nucléaire, la neutronique, les filières de réacteurs électrogènes, les combustibles... À partir des années 70, le rythme de réalisation des réacteurs expérimentaux s'est fortement ralenti, les grands choix des filières de réacteurs électrogènes étant faits, et les capacités des réacteurs expérimentaux en irradiations technologiques, formation, etc., étant arrivées à un niveau suffisant, par rapport à la demande.

La seconde vague, moins forte et qui va des années 70 aux années 90, a concerné plus particulièrement les grands pays en voie de développement de l'époque, en Asie et dans le Pacifique, notamment le Japon, la Chine, la Corée du Sud, l'Inde, qui se lançaient, à leur tour, dans le développement de l'énergie nucléaire.

La figure 131 (page suivante) montre l'évolution du nombre de réacteurs expérimentaux dans le temps, avec la montée rapide, dans les années 50-70, qui culmine à 367 réacteurs en activité, vers 1975, la descente relativement rapide dans les décennies suivantes, en partie compensée par la mise en service de réacteurs expérimentaux dans les pays en voie de développement et par celle de réacteurs spécialisés (pour l'étude de la matière, les essais en situations accidentelles...), puis la stabilisation actuelle. Il est à noter que seulement quelque 30 % des réacteurs expérimentaux ont une puissance supérieure à 1 MW.th et que seulement environ 10 % d'entre eux ont une puissance supérieure à 25 MW.th.

Comme nous l'avons déjà indiqué, les réacteurs expérimentaux sont des outils souvent consacrés à plusieurs types d'activités. Sur les 234 réacteurs en service :

- Plus de 50 % d'entre eux correspondent à des réacteurs d'irradiation technologique et polyvalents (produisant, en outre, des radio-isotopes, disposant de faisceaux de neutrons sortis pour la recherche...);
- environ 20 % d'entre eux sont du type maquette critique de très faible puissance ;
- environ 13 % d'entre eux sont des petits réacteurs essentiellement dévolus à la formation et à l'entraînement.

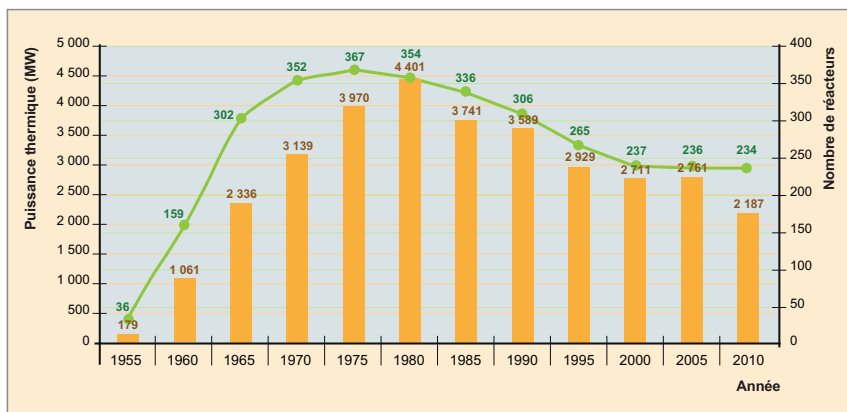


Fig. 131. Évolution du nombre de réacteurs expérimentaux en service, recensés dans le monde.

Les figures suivantes, 132 et 133, montrent la situation actuelle des principaux réacteurs d'irradiation technologique qui contribuent fortement au développement et à l'utilisation des réacteurs électrogènes [1].

La figure 134 (p. 138) donne l'état des principaux réacteurs utilisés comme sources de neutrons pour la recherche fondamentale.

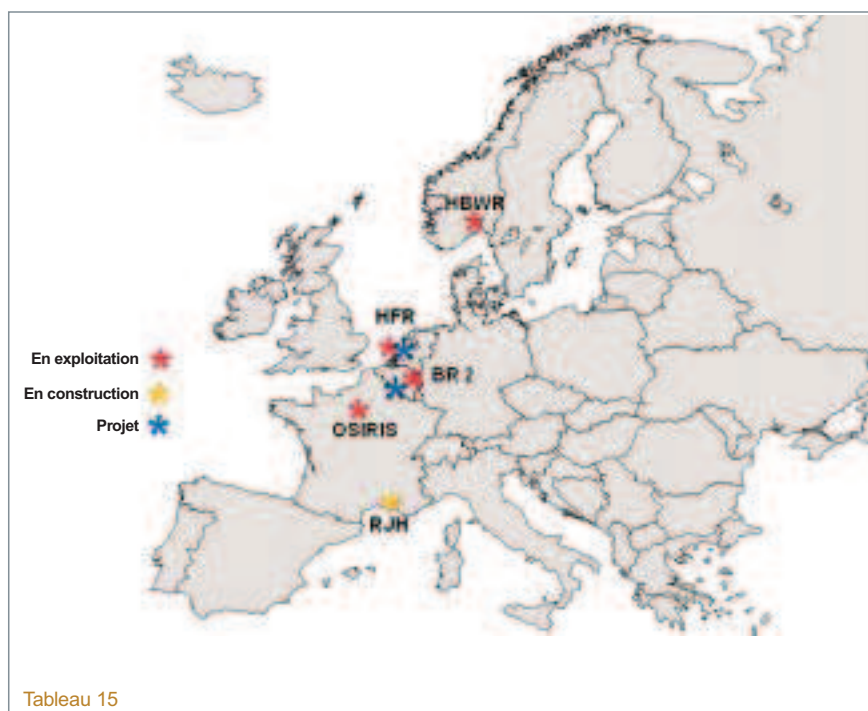


Tableau 15

Principaux réacteurs d'irradiations technologiques en Europe de l'Ouest

Pays	Situation	Réacteur	Divergence	Puissance
France (Saclay)	En exploitation	OSIRIS	1966	70 MW
France (Cadarache)	En construction	RJH ¹	2016	100 MW
Belgique (Mol)	En exploitation	BR2	1961	100 MW
Belgique (Mol)	Projet	MYRRHA ²	2022/2023	50/80 MW
Pays-Bas (Petten)	En exploitation	HFR	1961	45 MW
Pays-Bas (Petten)	Projet	PALLAS ³	2017/2018	30-80 MW
Norvège (Halden)	En exploitation	HBWR	1959	25 MW

1. Destiné à prendre la suite d'OSIRIS
2. Destiné à prendre la suite de BR2
3. Destiné à prendre la suite du HFR

Fig. 132. Principaux réacteurs d'irradiation technologique en Europe. (En gras : réacteurs en exploitation.)



Tableau 16

Principaux réacteurs d'irradiations technologiques dans le monde, hors Europe de l'Ouest				
Pays	Situation	Réacteur	Divergence	Puissance
EUROPE DE L'EST				
Russie (Dimitrovgrad)	En exploitation	SM-3	1961	100 MW
Russie (Dimitrovgrad)	En exploitation	MIR	1966	100 MW
Russie (Dimitrovgrad)	En exploitation	BOR-60	1969	60 MW
Russie (Dimitrovgrad)	Projet	MBIR ¹	2019	150 MW
Tchéquie (Rez)	En exploitation	LVR-15	1957	10 MW
AMERIQUE				
États-Unis (Idaho)	En exploitation	ATR	1967	250 MW
Canada (Chalk-River)	En exploitation	NRU	1957	135 MW
Brésil (Ipero)	Projet	RMB	Non précisée	30 MW
ASIE				
Chine (Omei)	En exploitation	HFETR	1979	125 MW
Japon (Oarai)	En exploitation	JMTR	1968	50 MW
Corée du Sud (Daejong)	En exploitation	HANARO	1995	30 MW
Inde (Bombay)	En exploitation	DHRUVA	1985	100 MW

1. Destiné à prendre la suite du BOR-60.

Fig. 133. Principaux réacteurs d'irradiation technologique, hors Europe de l'Ouest. (En gras : réacteurs en exploitation.)

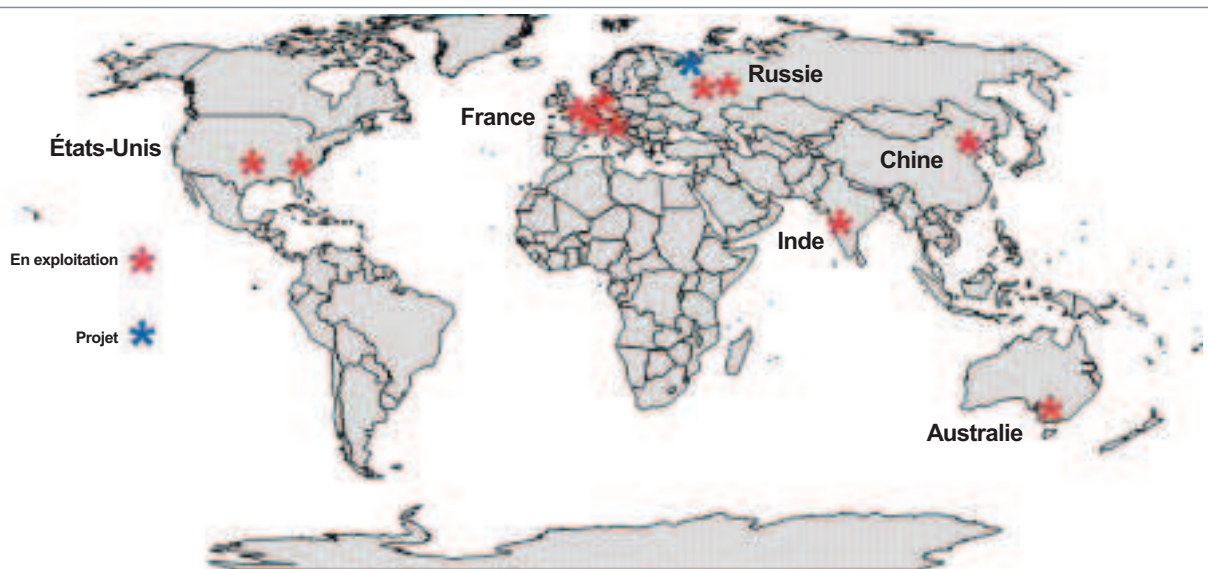


Tableau 17

Principaux réacteurs expérimentaux utilisés comme sources de neutrons intenses pour la recherche				
Pays	Situation	Réacteur	Divergence	Puissance
EUROPE				
France (Saclay)	En exploitation	ORPHÉE	1980	14MW
France (Grenoble)	En exploitation	RHF	1971	57 MW
Allemagne (Garching)	En exploitation	FRM-II	2001	20 MW
Allemagne (Berlin)	En exploitation	BER-II	1973	10 MW
Russie (Moscou)	En exploitation	IRT	1967	2,5 MW
Russie (Sverdlovsk)	En exploitation	IVV-2M	1966	15 MW
Russie (Saint-Petersbourg)	En mise en service	PIK	2011	100 MW
AMERIQUE				
États-Unis (Gaithersburg)	En exploitation	NBSR	1967	20 MW
États-Unis (Oak-Ridge)	En exploitation	HFIR	1965	85 MW
ASIE-OCÉANIE				
Chine (Beijing)	En exploitation	CARR	2010	60 MW
Inde (Bombay)	En exploitation	DHRUVA	1985	100 MW
Australie (Lucas-Heights)	En exploitation	OPAL	2006	20 MW

Fig. 134. Principaux réacteurs expérimentaux utilisés comme sources de neutrons intenses pour la recherche fondamentale (en gras : réacteurs en exploitation).

Les caractéristiques et problèmes du parc des réacteurs expérimentaux

Le vieillissement du parc et sa sous-utilisation

Beaucoup de réacteurs expérimentaux sont aujourd'hui vieillissants : 70 % des réacteurs expérimentaux en service dans le monde ont plus de 30 ans, et 50 % plus de 40 ans [2].

Ce vieillissement touche tout particulièrement les réacteurs expérimentaux de la « première vague » construits en Amérique et en Europe, et notamment les réacteurs d'irradiation technologique présentés en figures 132 et 133, qui ont tous entre quarante et cinquante ans d'exploitation, aujourd'hui.

Pour ces réacteurs, la question de la poursuite de leur exploitation ou de leur arrêt, avec ou sans la construction d'un réacteur de remplacement, se pose, en fonction :

- De l'utilisation de l'énergie nucléaire et de ses perspectives dans le pays considéré, des besoins en résultant ;
- de l'incidence de leur mise à niveau, compte tenu des exigences de sûreté et des exigences réglementaires à mettre en œuvre ;
- de leur environnement, qui souvent évolue au fil des décennies ;
- des financements mobilisables ;
- de l'existence ou non de réacteurs de même capacités dans la région, sur le continent considéré, et plus généralement dans le monde.

À cet état de fait, s'ajoute, notamment pour les réacteurs expérimentaux de petite puissance, une sous-utilisation croissante mise en évidence par les enquêtes menées par l'AIEA qui évalue, pour 50 % des réacteurs expérimentaux en service, leur activité annuelle inférieure à quatre semaines conventionnelles d'exploitation (7 jours de 24 heures) à puissance nominale.

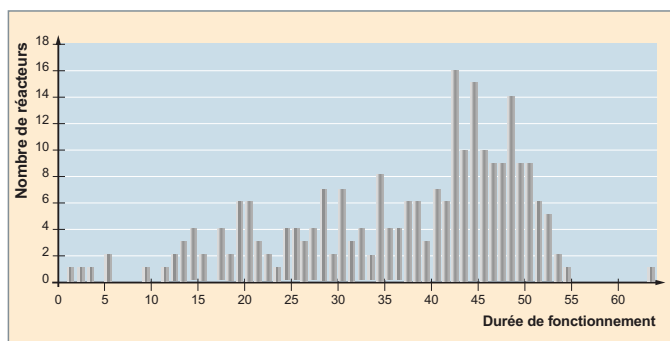


Fig. 135. Âge des réacteurs expérimentaux en service dans le monde.

De ce fait, les projections faites par l'AIEA conduiraient du nombre de 234 réacteurs expérimentaux actuellement en service à celui de 100 à 150 réacteurs expérimentaux, à l'horizon 2020.

La politique de non-prolifération et ses conséquences sur le combustible des réacteurs expérimentaux

Comme nous l'avons vu, les décennies cinquante et soixante ont constitué une époque d'expansion exceptionnelle pour les réacteurs expérimentaux. En Occident, ce mouvement s'est inscrit dans le cadre de la politique « *Atoms for Peace* » lancée par les États-Unis. Une démarche parallèle s'est développée dans l'ensemble des pays du « bloc communiste », sous l'impulsion de l'URSS. De part et d'autre, les États-Unis et l'URSS ont fourni, pour faire fonctionner ces réacteurs, des quantités notables d'uranium enrichi, et notamment de l'uranium hautement enrichi (UHE) pouvant aller jusqu'à un enrichissement de 93 % en U 235, ce dernier permettant d'obtenir, dans les meilleures conditions, les flux neutroniques importants, caractéristique essentielle des réacteurs expérimentaux. Avec l'accroissement rapide du nombre de réacteurs expérimentaux, il est vite apparu que l'utilisation de cet UHE, même s'il s'agissait de développements scientifiques et technologiques, entraînait des risques inévitables de **prolifération***, consécutifs à des détournements d'emploi ou de vol de cet UHE.

Aussi, en 1978, les États-Unis lancent-ils le programme RERTR (*Reduced Enrichment for Research and Test Reactors*) pour réduire l'utilisation de l'UHE dans les réacteurs expérimentaux, en développant des combustibles permettant de « convertir » ces réacteurs à l'utilisation d'uranium dit « faiblement enrichi » (UFE), estimé « non proliférant ». Le pourcentage d'enrichissement en U 235 de l'UFE « non proliférant » a été fixé, au maximum, à 20 %, à l'époque, par les États-Unis, en tenant compte à la fois du risque de détournement ou de vol de l'UHE non irradié proprement dit et du risque provenant de la production de plutonium, lors de l'irradiation des combustibles [3].

Cette initiative, qui concernait initialement les réacteurs approvisionnés en uranium enrichi par les États-Unis, a été étendue, au début des années 90, en collaboration avec la Russie, aux pays approvisionnés en uranium enrichi par cette dernière.

Enfin, en 2004, cette initiative a été renforcée et intégrée dans une initiative plus large, le GTRI (*Global Threat Reduction Initiative*), sous la houlette des USA, de la Fédération de Russie et de l'AIEA [4]. Le GTRI regroupe 130 pays et concerne :

- La conversion à l'UFE des combustibles des réacteurs expérimentaux utilisant de l'UHE, ainsi que celle des cibles d'uranium utilisées dans ces réacteurs pour produire le radio-iso-

tope Mo 99 à des fins médicales (voir, *supra*, p. 9-31, le chapitre intitulé « À quoi servent les réacteurs expérimentaux ?... », ainsi que l'encadré sur « la production de radio-nucléides artificiels », p. 24-26) ;

- la suppression ou l'évacuation vers des sites sûrs des matières nucléaires et radiologiques susceptibles d'être utilisées pour réaliser des armes nucléaires ;
- la protection des sites contenant des matières nucléaires et radiologiques susceptibles d'être utilisées pour la réalisation d'armes nucléaires.

Aujourd'hui, après trente ans d'efforts, le bilan du GTRI, en ce qui concerne la « conversion » des réacteurs expérimentaux utilisant de l'UHE, est le suivant :

- 67 d'entre eux ont été convertis ou arrêtés ;
- 35 d'entre eux sont en cours, ou en attente de conversion, celle-ci étant possible avec les combustibles standards actuels, couramment mis en œuvre dans les réacteurs expérimentaux ;
- 27 réacteurs à haut niveau de performances attendent le développement et la qualification (en cours) d'un combustible utilisant de l'UFE mais à forte densité en uranium pour pouvoir être convertis dans des conditions de performances et de coûts satisfaisants (voir au chapitre intitulé « le réacteur Jules Horowitz », p.95-96, l'encadré sur les développements de combustibles pour les réacteurs expérimentaux).

L'objectif annoncé par le GTRI est d'aboutir à la finalisation de ces activités de conversion, à l'horizon 2020.

- Enfin, 78 réacteurs sont jugés « non convertibles », en raison de leurs activités liées à la Défense nationale ou de leurs conceptions particulières.

Ce mouvement de « conversion à l'UFE » touche fortement les réacteurs expérimentaux, et notamment beaucoup de réacteurs de petite puissance pour lesquels les instituts et organismes propriétaires n'ont pas toujours les moyens techniques et financiers d'assurer la conversion, malgré l'appui des grandes puissances, essentiellement les États-Unis et la Fédération de Russie, ainsi que celui de l'AIEA.

Il concerne également les réacteurs très performants en attente de la qualification et de l'industrialisation du combustible UFE à forte densité, lancée en 1995, qui demande des efforts de développement et des investissements non négligeables et dont la réussite dépendra, à la fois, de sa capacité à satisfaire les performances attendues et de son coût de mise en œuvre, qui devra être comparable à celui des combustibles actuels.

Le devenir des combustibles usés des réacteurs expérimentaux

Les combustibles des réacteurs expérimentaux sont, pour une grande partie d'entre eux, constitués de poudre d'uranium de type UAl ou U_3Si_2 , et pour ce dernier type, non retraitables, après irradiation, dans les conditions industrielles d'aujourd'hui.

Les exploitants de réacteurs expérimentaux ont, cependant, la possibilité de retourner leurs combustibles usés aux États-Unis et en Fédération de Russie, lorsque ces pays leur ont fourni l'uranium enrichi correspondant. Cette possibilité est très importante pour les exploitants des réacteurs expérimentaux situés dans des pays ne disposant pas d'installations nucléaires industrielles ; elle leur évite, notamment, la prise en charge des déchets ultimes à longue durée de vie contenus dans les combustibles usés ; aussi l'utilisent-ils largement, les coûts de prise en charge des combustibles usés tenant compte de leurs capacités financières.

Pour les réacteurs implantés dans les pays disposant d'installations nucléaires industrielles, leurs exploitants font également appel à cette possibilité ou adaptent des dispositions spécifiques telles que le traitement des combustibles usés, lorsque celui-ci est possible, comme cela est fait en France, ou l'entreposage de longue durée.

À terme, le devenir des combustibles usés des réacteurs expérimentaux va beaucoup dépendre :

- Pour les réacteurs expérimentaux situés dans les pays ne possédant pas d'infrastructures nucléaires industrielles, du maintien ou non par les États-Unis et la Fédération de Russie de leur politique de retour des combustibles usés, ou des dispositions de substitution envisagées dans un cadre international, notamment un entreposage / stockage commun dans un pays l'acceptant ;
- de l'aboutissement du développement et de la mise en œuvre du nouveau combustible de type UMo, en cours de qualification, et qui est retraitable. Toutefois, pour les petits réacteurs et les réacteurs situés dans des pays à faibles capacités financières, la prise en charge du coût de retraitement des combustibles usés peut constituer une condition rédhibitoire.

Quel futur pour les réacteurs expérimentaux ?...

Le besoin en énergie et les perspectives du parc électronucléaire mondial

Après un coup d'arrêt dû à l'accident de Tchernobyl, le nucléaire a redémarré dans le monde, du fait des besoins croissants en énergie de la planète et de l'épuisement des

hydrocarbures. D'autres facteurs interviennent aussi en faveur du nucléaire : le nucléaire produit un KWh économiquement compétitif, sans production de gaz à effet de serre. L'accident de Fukushima ralentira peut-être le développement de l'énergie nucléaire en Occident et au Japon, mais ne devrait pas avoir d'impact déterminant sur le développement de l'énergie nucléaire dans le reste du monde, en particulier dans les pays émergents, Chine, Inde, Brésil. Nous pouvons citer également, sans que cette liste soit exhaustive, les nombreux autres pays qui ont déclaré leur intention de recourir à l'énergie nucléaire : au Moyen-Orient, les Émirats arabes unis (deux réacteurs commandés), l'Arabie saoudite, la Jordanie, l'Égypte, la Turquie ; en Asie, le Vietnam, la Thaïlande, l'Indonésie ; en Afrique, le Maroc, la Tunisie ; en Europe, la Pologne, les pays baltes (Estonie, Lettonie et Lituanie).

Pour répondre à ces besoins, l'évolution des réacteurs électrogènes se déroule dans la perspective de deux démarches successives :

- Une démarche s'inscrivant dans la continuité et consistant à poursuivre la valorisation des technologies connues et éprouvées des derniers réacteurs mis en service, en améliorant de façon significative leur niveau de sûreté, leur compétitivité économique, et en les inscrivant dans une démarche de développement durable (notamment avec la minimisation des déchets produits). Ces réacteurs évolutionnaires, dits « de troisième génération » (voir, en figure 136, les quatre générations définies pour les réacteurs électrogènes) sont destinés à couvrir la demande des trente à quarante prochaines années. En France, le représentant de cette nouvelle génération est l'EPR (*European Pressurized water Reactor*) ;
- à plus long terme, une rupture technologique est en préparation avec les réacteurs à neutrons rapides, qui devraient permettre :
 - de renforcer le caractère durable de l'énergie nucléaire, en utilisant toute l'énergie potentielle contenue dans l'uranium, c'est-à-dire l'énergie de fission, non seulement de l'isotope U 235, comme c'est le cas dans la plupart des réacteurs actuels, mais également de l'isotope U 238, bien plus abondant, ce qui multiplie par un facteur 50 à 100 les capacités de production d'énergie pour une masse d'uranium donnée !...
 - de réduire fortement les déchets ultimes produits en volume, durée de vie et toxicité ;
 - d'étendre les domaines d'application de l'énergie nucléaire pour l'adapter au mieux aux besoins (production de chaleur, d'hydrogène...);

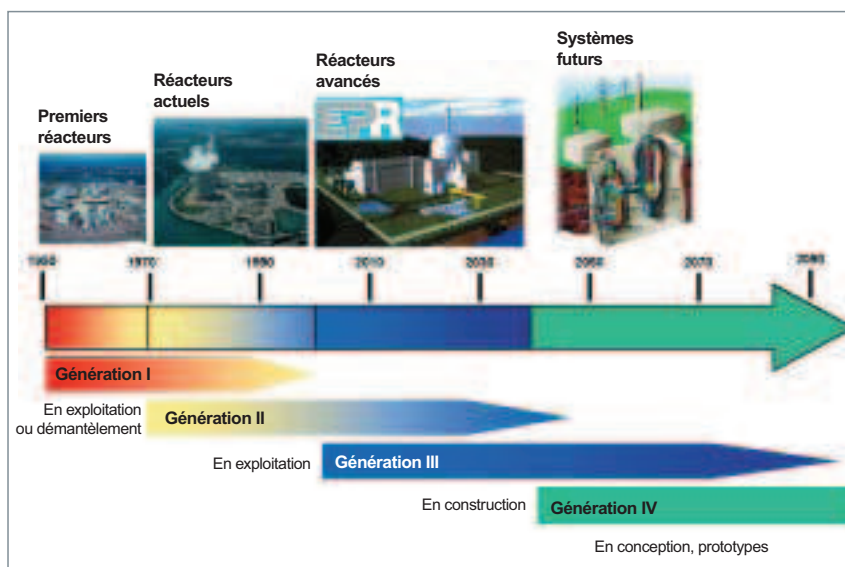


Fig. 136. Les quatre générations de réacteurs électrogènes.

- par ailleurs, un mouvement se dessine pour la mise en œuvre de réacteurs de petite puissance (de 300 MW électriques à quelques dizaines de MWe) et de moyenne puissance (de 600 à 300 MWe) pour répondre à des besoins énergétiques locaux et diversifiés. Les projets sont très nombreux ; ils font souvent appel à des concepts novateurs pour pouvoir être à la fois extrêmement sûrs, relativement simples d'exploitation et compétitifs dans leur contexte d'utilisation.

Les perspectives d'évolution des réacteurs expérimentaux

Le tableau des perspectives pour l'électronucléaire, dressé au paragraphe précédent, montre que le besoin en réacteurs expérimentaux de tous types existe :

- Pour continuer à améliorer l'exploitation, la sûreté et les performances des réacteurs électrogènes en service, dont le nombre est en croissance ;
- pour participer aux développements conséquents associés aux systèmes nucléaires du futur envisagés, notamment avec les réacteurs d'irradiation technologique et d'essais de sûreté ;
- pour accompagner l'accession à l'électronucléaire des nombreux pays « primo-accédants », notamment avec des réacteurs de formation et de production de radioéléments.

Face à ces besoins, la situation des réacteurs expérimentaux se présente de la façon suivante :

- Les réacteurs expérimentaux, compte tenu de leur simplicité et de leur faible puissance pour beaucoup d'entre eux, peuvent avoir une longue durée de vie allant jusqu'à cinquante

ans et au-delà. Toutefois, le parc mondial de ces réacteurs est, pour une large part, fortement vieillissant, et les constructions de nouvelles unités, au rythme actuel (huit réacteurs en construction, à ce jour) ne compenseront pas longtemps les mises en arrêt d'exploitation ;

- beaucoup de petits réacteurs expérimentaux sont sous-utilisés, alors que, *a contrario*, plusieurs pays « primo-accédants » associent à leur perspectives d'utilisation de réacteurs électronucléaires celle de l'acquisition de réacteurs expérimentaux. C'est le cas, notamment, de la Jordanie, qui a commandé récemment un réacteur expérimental, de la Tunisie, de Singapour, de l'Azerbaïdjan..., d'où l'idée de regrouper les efforts autour de quelques réacteurs expérimentaux partagés à l'échelle régionale. L'AIEA réunit, à cet effet, les pays possesseurs de réacteurs expérimentaux, ainsi que ceux intéressés par les activités de ces derniers. Quatre groupes sont en activité ; plusieurs autres sont en préparation, notamment pour les zones « pays méditerranéens » et « Asie-Pacifique » ;
- en ce qui concerne les réacteurs expérimentaux de forte puissance destinés aux irradiations technologiques et aux essais de sûreté :
 - il existe de nombreuses instances de concertation : l'AIEA, l'agence de l'énergie nucléaire de l'OCDE, les initiatives comme le GIF, qui se soucient de la disponibilité, dans le cadre d'une utilisation partagée, des réacteurs expérimentaux nécessaires aux développements de ses projets ;
 - l'Europe a intégré les installations expérimentales dans son plan stratégique concernant les technologies pour l'énergie (*Strategic Energy Technology Plan of the European Union* [SET Plan]). Plusieurs initiatives, décrites ci après, ont été prises pour aboutir à une politique cohérente, en la matière.

L'émergence d'une politique européenne, en matière de réacteurs de recherche

En 2001, la Commission à l'énergie atomique européenne s'est inquiétée des capacités européennes en matière de réacteurs d'irradiations technologiques, ces derniers constituant un support absolument déterminant dans le développement des combustibles et matériaux des réacteurs électrogènes, et a lancé le programme FEUNMARR (*Futur European Union Needs in Material Research Reactors*), rassemblant les instituts de recherche européens les plus représentatifs et destiné à examiner les besoins correspondants aux échéances 2020 (réacteurs de Génération III) et 2040 (réacteurs de Génération IV). Ce programme a conclu, en 2003, à la nécessité de disposer au minimum d'un nouveau réacteur d'irradiations technologiques en Europe, dans la décennie 2010-2020, qui puisse succéder aux réacteurs actuellement en service, en tant que plateforme européenne à rayonnement international (c'est le réacteur Jules Horowitz, dont la construction a été lancée par le CEA à Cadarache, qui devrait, à l'horizon 2016, répondre pour une large part à ce besoin (voir les cha-

pitres « Le réacteur Jules Horowitz », *supra*, p. 95-100, et « Perspectives de recherches relatives aux situations accidentelles, avec le réacteur Jules Horowitz », *supra*, p. 131-132, pour la description du RJH et de ses programmes expérimentaux).

Pour répondre à un besoin d'organisation plus général, et ce, dans le contexte d'une vision globale partagée, la Commission européenne a mis en place, dans le cadre de l'espace européen de recherche (ERA), un plan de développement stratégique concernant l'énergie, approuvé par les états membres et incluant l'énergie nucléaire : l'*European Strategic Energy Technology Plan* (SET-Plan) et, en 2007, un organisme de prévision et de coordination pour les études et développements du nucléaire, le SNETP (*Sustainable Nuclear Energy Technology Platform*) destiné à examiner, au niveau européen, les besoins en développement des réacteurs à fission, à définir les axes de recherche correspondants, à organiser leur déploiement, à déterminer et à promouvoir la réalisation des infrastructures et installations d'essais nécessaires pour mener les différents programmes de recherche. La réalisation proprement dite de développements et réalisations issus des travaux de cet organisme se fait au travers d'initiatives lancées de concert avec les industriels concernés.

Ainsi, le SNETP comprend aujourd'hui près de 80 organismes issus de 20 pays regroupant pratiquement tous les industriels européens, producteurs importants d'électricité, toutes les ingénieries nucléaires, tous les organismes de recherche nucléaire européens, de nombreuses universités et sociétés savantes européennes.

La figure 137 (page suivante) montre les objectifs visés par le SNETP pour les grandes installations à mettre en œuvre en Europe, dans le domaine des réacteurs expérimentaux, et plus particulièrement en ce qui concerne les réacteurs d'irradiations technologiques et les réacteurs « démonstrateurs » de concepts de filières nucléaires, à savoir :

- Le réacteur d'irradiations technologiques Jules Horowitz du CEA, en France, présenté en détail au chapitre « Le réacteur Jules Horowitz » (*supra*, p. 95-100), réacteur de type « piscine » de 100 MW/h, en cours de construction à Cadarache, dans le cadre d'un consortium international, et dont la mise en exploitation est prévue à l'horizon 2016 (fig. 138, page suivante). Le réacteur et les installations associées constitueront, à ce terme, une plateforme d'irradiations technologiques de référence pour les besoins d'exploitation et de développement des réacteurs électrogènes de générations II, III et IV ;
- le projet de réacteur MYRRHA du SCK/SEN en Belgique ; il s'agit d'un réacteur de 100 MW/h de type **ADS*** (*Accelerator Driven System*), c'est-à-dire constitué d'un accélérateur de particule et d'une « cible », en l'occurrence en plomb-bismuth, produisant un intense faisceau de neutrons rapides

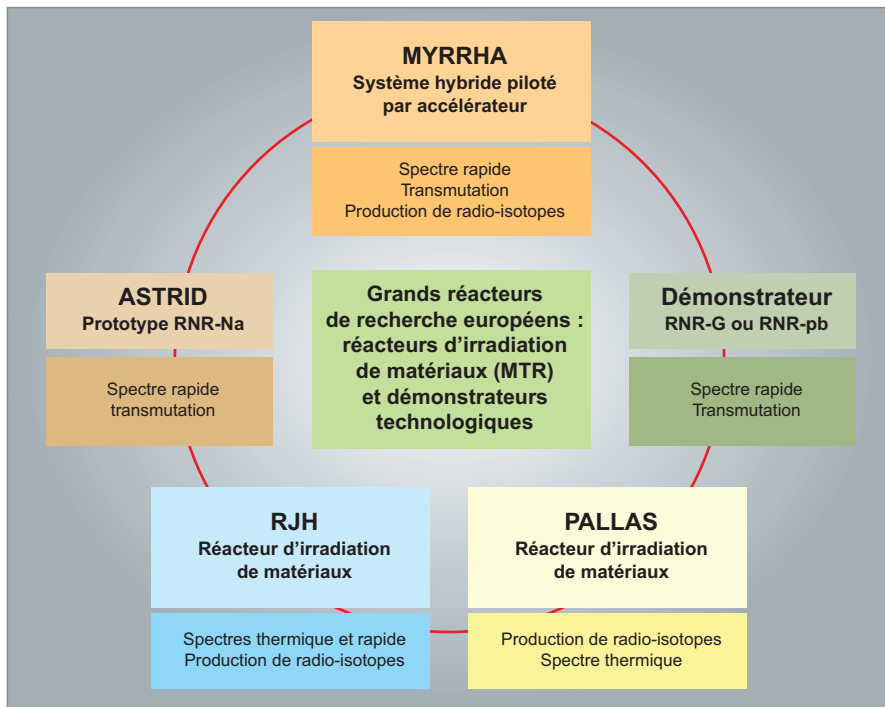


Fig. 137. Perspectives européennes envisagées par le SNETP pour les réacteurs expérimentaux de type réacteurs d'irradiation technologiques, démonstrateurs et prototypes.

par spallation (fig. 139, page suivante). L'objectif de ce réacteur est double : être, d'une part, le démonstrateur du fonctionnement d'un système ADS à une puissance représentative, ainsi que du concept de réacteur de quatrième génération de type réacteur à spectre de neutrons rapides

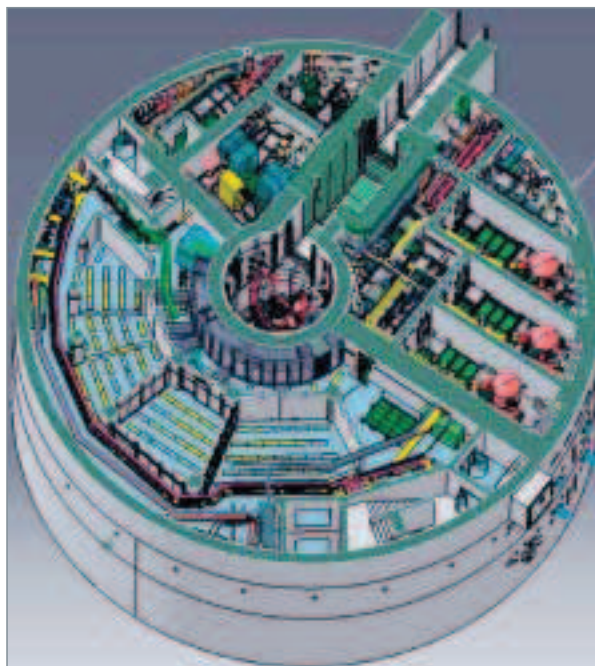


Fig. 138. Vue en éclaté du réacteur Jules Horowitz et des dispositifs expérimentaux associés.

au plomb-bismuth, technologie alternative aux réacteurs à spectre de neutrons rapides refroidis au sodium ; être, d'autre part, un réacteur d'irradiations technologiques performant, notamment pour les irradiations de matériaux, grâce à son fort flux en neutrons rapides ; le réacteur MYRRHA est en phase de conception ; sa réalisation, comme pour le RJH, devrait intervenir dans le cadre d'une large coopération internationale. La planification actuelle prévoit le démarrage de la phase de construction en 2016/2018, sur le site du SCK/SEN de Mol, pour une mise en service à l'horizon 2023/2024 ;

- le projet de réacteur PALLAS de NRG, aux Pays-Bas, réacteur expérimental de type piscine d'une puissance allant de 30 à 80 MW_{th}, destiné à la production intense de radioéléments pour les applications médicales, et notamment du Mo 99 indispensable, aujourd'hui, pour la réalisation d'un très grand nombre d'examens médicaux. PALLAS réalisera également des irradiations technologiques, en complément du RJH et du MYRRHA. Le réacteur PALLAS est actuellement en phase de définition et faisabilité ; il devrait donner lieu à un appel d'offres, pour une réalisation sur le site de Petten, au Pays-Bas, et une mise en service à l'horizon 2016/2018 ;

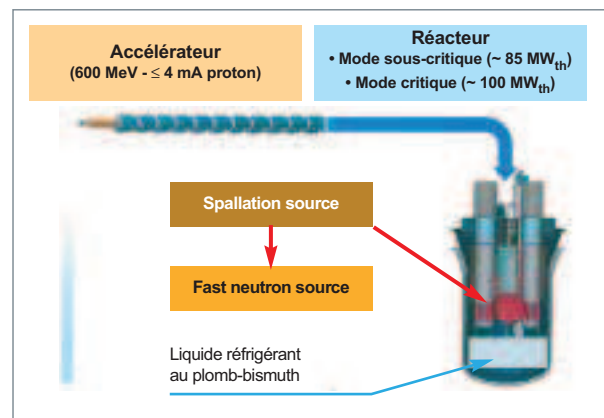


Fig. 139. Réacteur MYRRHA : réacteur d'irradiations technologiques et démonstrateur de concept de réacteurs de Génération IV à spectre rapide et au plomb-bismuth. Le réacteur est conçu pour fonctionner en ADS (il est alors en mode **sous-critique***), ou en mode de réacteur critique, sans l'accélérateur, lorsque l'on veut disposer des plus hauts flux de neutrons pour la réalisation de programmes d'irradiation.

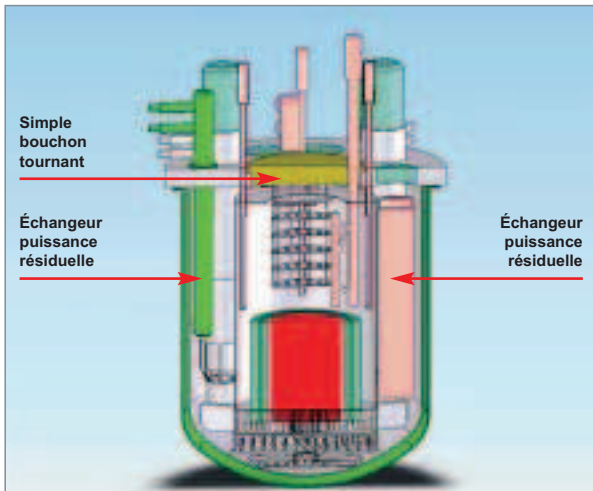


Fig. 140. Coupe du réacteur à neutrons rapides refroidi au sodium ASTRID.

- le projet de réacteur ASTRID du CEA, en France, prototype du concept de réacteur de la filière de réacteurs rapides refroidis au sodium de Génération IV (fig. 140). Ce réacteur, d'une puissance envisagée comprise entre 250 à 600 MWe est en phase de conception préliminaire, pour une décision de poursuite du projet à prendre en 2012. Sa construction est envisagée sur le site CEA de Marcoule, en France, dans le cadre d'un partenariat avec divers industriels, avec une



Fig. 141. Le prototype de réacteur rapide refroidi au gaz ALLEGRO.

mise en service à l'horizon 2020/2025. Le projet de réacteur ASTRID comporterait également la réalisation de l'installation de fabrication du combustible et de son traitement, de façon à constituer une démonstration complète du concept ;

- le projet de « réacteur-démonstrateur » du concept de réacteur rapide refroidi au gaz ou au plomb-bismuth de Génération IV, selon l'avancement de ces deux techniques, en alternative au réacteur de Génération IV refroidi au sodium. La version « gaz » de ce réacteur baptisé « ALLEGRO » a fait l'objet d'un début de conception au CEA (fig. 141). Si ce réacteur est retenu, il sera construit dans un cadre européen.

André CHABRE

Direction de l'énergie nucléaire

► Références

- [1] A. ALBERMAN, « Panorama des réacteurs expérimentaux dans le monde » CEA, RGN, mai-juin 2002.
- [2] « *The IAEA Activities towards Enhanced Utilization, Sustainability and Applications of Research Reactors* », RRFM 2010, March 22-25.
- [3] A. GLASER, « *About the Enrichment Limit for Research Reactors: why 20%* », 24th RERTR Meeting, 2005.
- [4] N. BUTLER, « *Conversion of Research and Test Reactors* », last performance, future plans, DOE/NNSA, 2007.

► Bibliographie

- IAEA Research Reactors database, March 2010.
- IAEA Research Reactors Purpose and Future, November 2010.
- DOE/NNSA-GTRI Office of global Threat Reduction, Strategic plan, January 2007.
- CEA Future European Union Needs in Material Research Reactors (FEUNMARR). Final Report (2003), May 2009.
- SNETP Strategic Research Agenda.