

LE DEVELOPPEMENT DES REACTEURS A NEUTRONS RAPIDES EN FRANCE
DE MARS 1980 A MARS 1981

L. VAUTREY
Commissariat à l'Energie Atomique
CEN de Saclay
Gif-sur-Yvette, France

Le texte qui suit donne un aperçu général sur le développement des réacteurs à neutrons rapides en France de mars 1980 à mars 1981.

L'exposé porte successivement sur :

- Rapsodie
- la centrale de démonstration Phénix
- la centrale prototype de Creys Malville (Super Phénix 1)
- les centrales futures (chaudières dites Super Phénix 2) et le programme d'avenir
- la recherche et le développement en cours.

La situation se présente globalement comme suit :

- Rapsodie a été remise en marche régulière, mais à puissance réduite en juillet 1980, compte tenu du défaut d'étanchéité du circuit primaire, qui n'a pas encore trouvé sa solution.
- Phénix a fonctionné de manière très satisfaisante, et conformément aux prévisions.
- la construction de Super Phénix 1 (centrale de Creys Malville) se poursuit normalement.
- les études de Super Phénix 2 (projet 1500) pour les centrales qui suivront Creys Malville se développent pour préciser les réalisations qui doivent être engagées en 1984.

- la Recherche et Développement se déroule à la fois pour les besoins de Super Phénix 1, pour Super Phénix 2 et pour l'avenir de la filière.
- enfin, la collaboration internationale reste intense et se poursuit normalement.

Les moyens affectés au développement des réacteurs à neutrons rapides restent sensiblement constants. Au CEA, un budget de l'ordre de 800 millions de francs, hors cycle du combustible et grosses installations de sûreté, est affecté aux réacteurs à neutrons rapides, et les effectifs du personnel restent de l'ordre de 1500 personnes. Ceci n'inclut pas les moyens affectés par Electricité de France et par les industriels.

RAPSODIE

Je rappelle tout d'abord rapidement la situation de Rapsodie il y a un an : le fonctionnement du réacteur en 1979 avait été très limité et intermittent ; l'année avait été en grande partie occupée par la recherche d'une fuite extrêmement minime de sodium, qui s'était traduite dès octobre 1978 par la détection d'une légère bouffée de sodium actif dans la double enveloppe du circuit primaire (circuit d'azote).

Malgré des interventions in situ pendant plus de 6 mois, l'emplacement exact du défaut n'avait pas pu être identifié, et on avait décidé de remettre le réacteur en fonctionnement à puissance réduite, tout en poursuivant les investigations.

Depuis un an, nous avons peu progressé sur la connaissance de ce léger défaut d'étanchéité. Nous sommes donc dans une situation où le réacteur fonctionne, mais où nous sommes conduits à le faire marcher avec une certaine prudence.

Voici un résumé chronologique :

- mars 1980 : lors de courtes périodes de fonctionnement en puissance (6 jours équivalents au total) la détection d'aérosols réapparaît sans pouvoir être localisée
- fin mars-début avril 1980 : après vidange partielle de la cuve, les signaux subsistent
- juin 1980 : après chargement de traceurs radioactifs (200 g d'or et 200 g d'indium) dans le sodium du réacteur, ces traceurs n'apparaissent pas dans les détections, malgré une émission d'aérosols pendant un fonctionnement à pleine puissance.
- jusqu'à fin 1980 : pas d'émission évidente d'aérosols, malgré des résultats de mesure très variables, allant de 1 microgramme de sodium à 1 centigramme de sodium par m³ d'azote.
- en décembre 1980, à la suite d'une modification du chargement du coeur du réacteur, une élévation générale des températures de paroi de la cuve a été constatée. L'arrêt du réacteur le 3 janvier 1981 a donné lieu à une nouvelle émission d'aérosols, qui a disparu après le redémarrage du 13 janvier, les distributions de température sur la cuve étant elles-mêmes différentes.

En résumé, le défaut existe toujours. Il est très faible, et localisé, et il se manifeste de manière sporadique.

Il paraît très lié à la distribution des températures sur la cuve, et de ce fait, au chargement du coeur et au régime de fonctionnement. La manifestation du défaut paraît être en corrélation avec une recirculation du sodium chaud derrière les écrans thermiques situés à l'intérieur de la cuve.

En pratique, Rapsodie a pu être remise en fonctionnement pratiquement régulier depuis juillet 1980, mais à puissance et débits réduits (d'un facteur 0,6 environ) : 22,4 MW et 717 m³/h, tout en conservant à l'entrée et à la

sortie du coeur les températures nominales. A l'exception du début janvier 1981, on n'a pas relevé à ce régime de nouveaux indices d'émission d'aérosols de sodium actif.

La surveillance de la double enveloppe est basée essentiellement sur les moyens de détection suivants :

- détection des aérosols par mesure en continu avec une chambre d'ionisation sur un prélèvement d'azote.
- comptage bêta sur papier filtre à déroulement continu dans les lignes de prélèvement d'azote.
- détection de présence éventuelle de sodium liquide au point bas de la double enveloppe par mesure de pression différentielle d'injection d'azote par un tuyau souple intérieur.

BILAN DU FONCTIONNEMENT

Durant le second semestre 1980, 107 jours de fonctionnement à 23 MW ont été cumulés.

Le 50ème cycle d'irradiation, commencé en mai 1979 a été achevé en novembre 1980, et le 51ème cycle a été entrepris début décembre. Il vient de s'achever.

Au total :

- près de 29.000 aiguilles ont été irradiées depuis l'origine dont 5000 ont dépassé 10% de taux de combustion, et 2000 ont dépassé 80 déplacements par atome (dpaf)
- une seule rupture de gaine s'est manifestée au cours de cette période, dont l'évolution a nécessité un déchargement, qui a conduit à 13 jours d'indisponibilité.

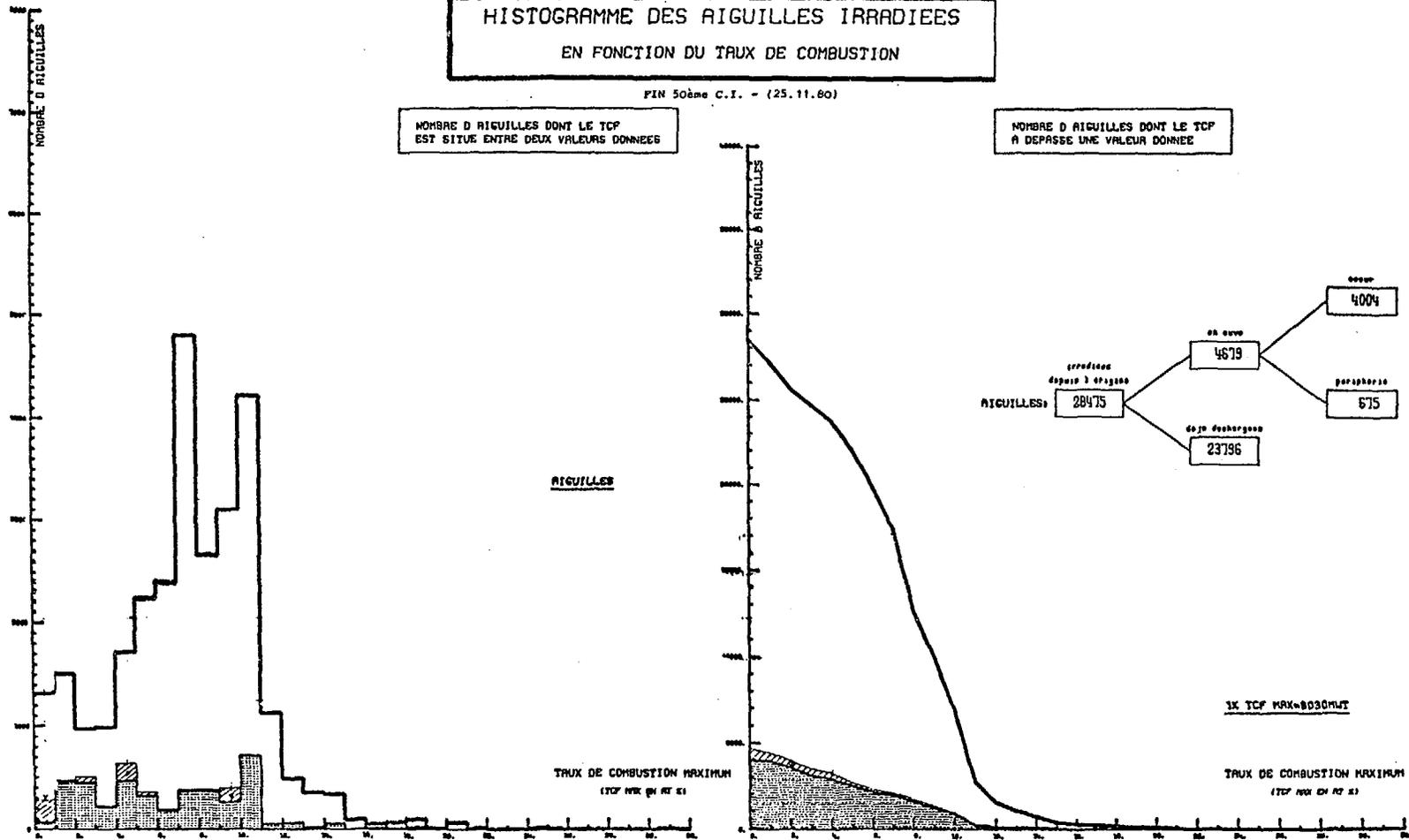
La situation dosimétrique du personnel pour l'année 1980 a été la suivante :

<u>Dose cumulée en 12 mois</u> (mrem)	<u>Nombre d'agents</u> (total 173)
5 à 100	69
105 à 200	25
205 à 500	43
505 à 1500	30
1505 à 5000 (limite autorisée)	6

RAPSODIE

HISTOGRAMME DES AIGUILLES IRRADIEES
EN FONCTION DU TAUX DE COMBUSTION

FIN 50ème C.I. - (25.11.80)



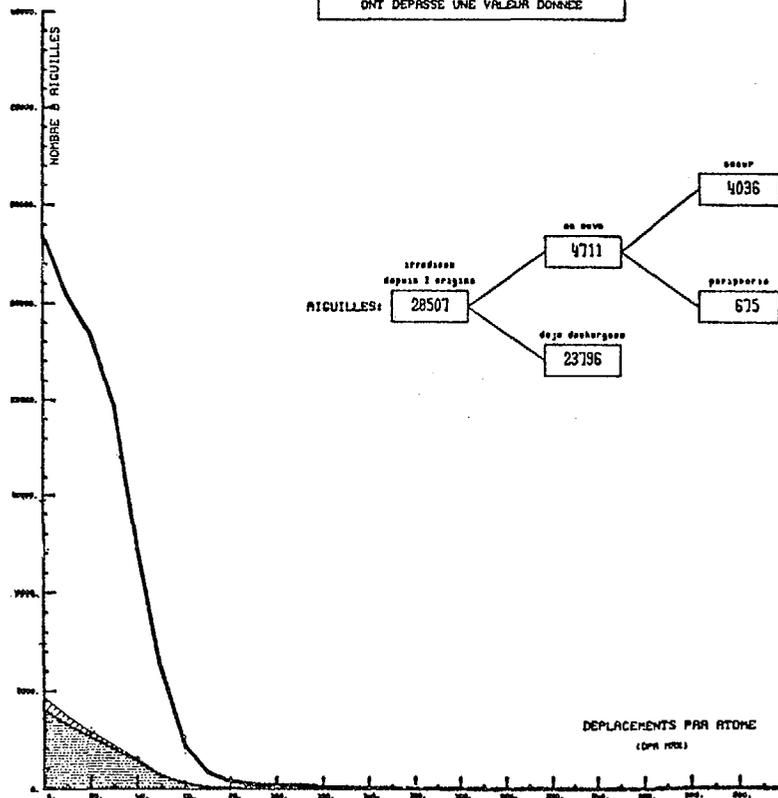
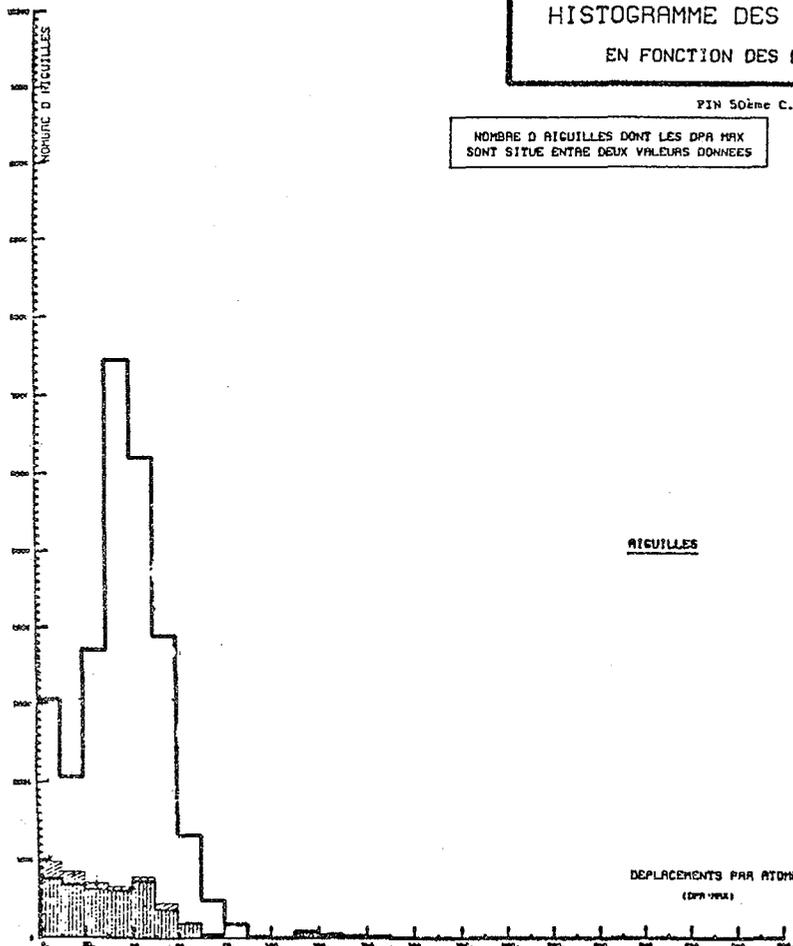
RAPSODIE

HISTOGRAMME DES AIGUILLES IRRADIEES EN FONCTION DES DEPLACEMENTS PAR ATOME

FIN 50ème C.I. - (25.11.80)

OMBRE D AIGUILLES DONT LES DPA MAX
SONT SITUE ENTRE DEUX VALEURS DONNEES

OMBRE D AIGUILLES DONT LES DPA MAX
ONT DEPASSE UNE VALEUR DONNEE



P H E N I X

Le fonctionnement de la centrale Phénix durant l'année 1980, peut se résumer ainsi : 3 cycles de fonctionnement répartis sur neuf mois calendaires un arrêt programmé pour travaux de trois mois.

Les travaux exécutés pendant les 3 mois d'arrêt sont présentés dans les pages suivantes ; ils ont mis en évidence le bon comportement du matériel, excepté quelques déformations dans les modules des étages resurchauffeurs des générateurs de vapeur.

Le déroulement des cycles de fonctionnement, depuis février 1980, est présenté dans le tableau qui suit :

	Date	JEPP	Taux de disponibilité pendant le cycle
19ème cycle	11/1 au 28/3/80	74,91	97,9%
20ème cycle	25/6 au 25/9/80	78,29	88,81%
21ème cycle	5/10 au 4/1/81	92,11	101,7%

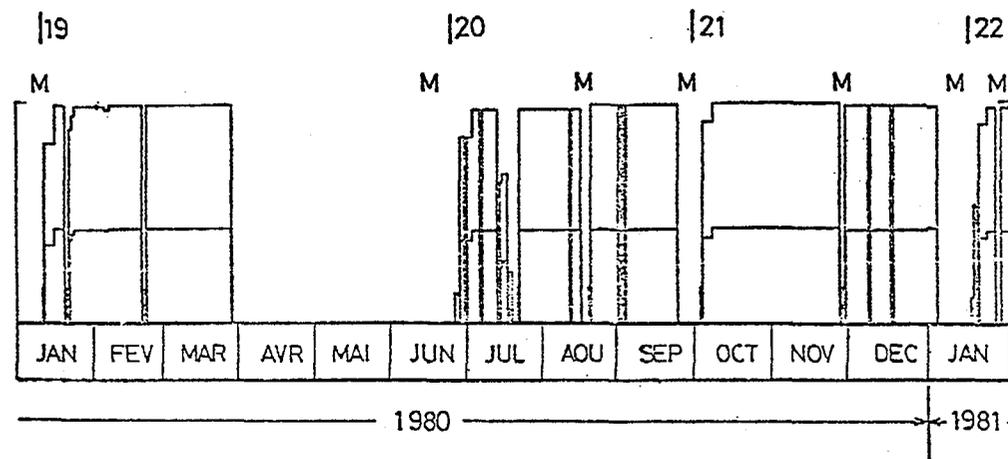
Le diagramme et le tableau suivants donnent un ensemble des résultats statistiques du fonctionnement de Phénix.

On pourra retenir en outre quelques chiffres significatifs actualisés au 1er février 1981 :

- la production d'énergie brute, y compris la vapeur vendue à Marcoule, a atteint 8,50 milliards kWh.
- le taux de disponibilité depuis le 21 avril 1978 (reprise du fonctionnement à pleine puissance avec les 6 échangeurs réparés) est de 79,96% et le taux de disponibilité global depuis le 14 juillet 1974 atteint 62,9%.

PHENIX 1980-1981

Diagramme de fonctionnement



M : Campagnes de manutention du combustible

Les numéros 19, 20, 21, 22, indiquent le début des cycles d'irradiation.

PHENIX 1980

STATISTIQUES

au 1.2.1981

Depuis l'origine

- Energie thermique réacteur	820 458	MWj
- J.E.P.P.	1 457,30	JEPP
- Energie électrique brute	8 488.900	MWh
- Energie brute (y compris vapeur)	8 506 880	MWh
- Energie électrique nette	7 905 302	MWh
- Combustion massique max. assemblages	100 084	MWj/t
- D.p.a. max. assemblages Pu	146	Dpa

Depuis le 14 juillet 1974

- Energie thermique réacteur	794 147	MWj
- J.E.P.P.	1 410,56	JEPP
- Energie électrique brute	8 248 290	MWh
- Energie brute (y compris vapeur)	8 266 270	MWh
- Energie électrique nette	7 682 718	MWh
- Taux de charge	57,55 %	
- Taux de disponibilité	62,93 %	

Depuis le début de l'année 1980

- Energie thermique réacteur	136 594	MWj
- J.E.P.P.	242,62	JEPP
- Energie électrique brute	1 419 550	MWh
- Energie brute (y compris vapeur)	1 426 028	MWh
- Energie électrique nette	1 325 154	MWh
- Taux de charge	64,94 %	
- Taux de disponibilité	70,67 %	

RESULTATS SUR LE COMBUSTIBLE

A la fin du 21^{ème} cycle (4/1/1981), l'expérience statistique des irradiations d'aiguilles au plutonium était la suivante :

Sur 80.260 aiguilles irradiées :

- 63.702	aiguilles	ont dépassé	40.000	MWj/t
- 43.054	"	"	50.000	MWj/t
- 9.951	"	"	60.000	MWj/t
- 2.537	"	"	70.000	MWj/t
- 274	"	"	80.000	MWj/t
-	un assemblage	a atteint	100.000	MWj/t

Le taux de combustion maximal atteint est de 11,7% correspondant à une combustion massique de 100.100 MWj/t.

Les taux de dommage des gaines en déplacement par atome (dpaF) sont les suivants :

- 63.818	aiguilles	ont dépassé	50	dpaF
- 53.774	"	"	60	dpaF
- 35.350	"	"	70	dpaF
- 15.266	"	"	80	dpaF
- 2.363	"	"	90	dpaF
- 862	"	"	100	dpaF

Le maximum atteint est 146,2 dpaF

Au cours de l'année 1980, le retraitement s'est poursuivi dans les usines du groupe CEA, aussi bien à La Hague qu'à Marcoule. A ce jour, un peu moins d'un coeur a été retraité sans difficulté majeure. Le plutonium récupéré a été livré à l'usine de fabrication de Cadarache.

Le cycle du combustible continue donc à être bouclé.

Le seul fait marquant à signaler est la deuxième rupture de gaine de Phénix : elle s'est produite le 26 janvier 1981. La détection a été rapide et la localisation aisée par mesures sur les prélèvements de sodium effectuée

à la sortie de chaque assemblage. L'évolution relativement rapide a conduit à un arrêt d'urgence automatique par dépassement des seuils. L'assemblage a été déchargé sans aucune perturbation. Cet incident a été la cause de 50 heures d'indisponibilité.

Par ailleurs, les principales causes de pertes de production pendant le déroulement des 3 cycles réalisés en 1980, se répartissent en :

- combustible, environ 5 JEPP
- pompes sodium primaires et secondaires, environ 4 JEPP
- groupe turbo-alternateur, environ 8 JEPP

Rappelons enfin que le bon fonctionnement et l'entretien aisé de Phénix trouvent leur concrétisation dans l'innocuité de l'installation sur les hommes qui y travaillent et son environnement. Les rejets gazeux continuent à être pratiquement nuls ($< 0,37$ curie/jour) et la dose totale intégrée par le personnel, sur 12 mois glissants dont 3 mois d'arrêt pour travaux, est de 6,2 hommes.rem pour 477 agents, soit 15 mrem par personne et par an (à comparer à 5000 mrem autorisés). Ces chiffres se passent de commentaire.

ARRET PROGRAMME POUR TRAVAUX

Il s'est déroulé du 29 mars 1980 au 27 juin 1980.

Principaux travaux effectués :

- démontage complet de la turbine et de l'alternateur pour réfection des massifs de scellements des différents corps et des paliers. C'est cette intervention qui a imposé un arrêt de 12 semaines
- épreuves en pression décennales des générateurs de vapeur. Les examens gammagraphiques effectués préalablement aux épreuves ont montré, sur le tiers des modules surchauffeurs, des déformations sur une grille de maintien des tubes de vapeur. Pour expertise plus complète, un module a été déposé en janvier 1981. Les modules des étages évaporateurs et surchauffeurs ne présentent pas d'anomalies.
- remplacement d'un échangeur intermédiaire "réparé" par un échangeur neuf. Les 6 échangeurs sont maintenant tous identiques et conformes au nouveau dessin.
- démontage de toutes les parties mécaniques du bouchon tournant, examen et nettoyage du joint métal liquide, remplacement du joint gonflable.

- sas de manutention : visite du chariot basculeur et des vannes d'isolement entre le sas et le réacteur.

SUPER PHENIX 1

La réalisation de la chaudière de la centrale de Creys Malville, confiée à l'association NOVATOME-NIRA, s'est poursuivie régulièrement pendant l'année 1980 qui a été particulièrement marquée par la mise en place de gros composants chaudronnés du circuit primaire dans le bâtiment réacteur.

Parallèlement, on a poursuivi les études de vérification du dimensionnement des structures ainsi que les premiers essais en sodium de certains gros composants destinés à la centrale.

LES ETUDES

Faisant suite aux travaux de l'année précédente, les études ont été en grande partie consacrées à la vérification du dimensionnement des structures et composants de la chaudière, principalement à la vérification de la tenue des matériels aux régimes transitoires et incidentels, ainsi qu'à la combinaison de ces conditions : l'étude de la résistance aux sollicitations dues aux séismes a été très développée. Toutes ces études avaient été commencées l'année précédente pour le bloc-réacteur, cette année, elles ont été étendues aux circuits.

LA REALISATION

Sur le site :

Le génie civil du bâtiment du réacteur est pratiquement achevé ce qui permet le montage des principaux composants chaudronnés : le génie civil des bâtiments des générateurs de vapeur est à plus de 70% de son achèvement. Au cours de l'année, les principaux composants chaudronnés qui avaient été réalisés dans l'atelier du site au cours de l'année précédente ont été mis en place dans le bâtiment réacteur.

Il y a eu successivement :

- les 7 et 8 mai 1980, la mise en place de la cuve de sécurité d'un diamètre de 21 m et d'un poids de 260 tonnes ;
- le 25 août 1980, la mise en place "du colis n°1" constitué par la cuve principale, le récupérateur, le platelage et le baffle de protection thermique de la cuve et de guidage du sodium de refroidissement de la cuve principale, soit un total de 710 tonnes ;
- les 4 et 6 novembre 1980, mise en place du "colis n°2", formé par l'ensemble des cuves internes avec les cheminées des pompes primaires, poids total 610 tonnes.
- enfin le 29 novembre 1980, l'élément le plus lourd : la dalle de 870 tonnes d'un diamètre de 25,7 m et d'une hauteur de 2,90 m a été mise en place.
- parallèlement à l'installation de ces éléments du bloc réacteur, on a également mis en place les cuves du barillet de stockage des assemblages irradiés ainsi que de sa dalle de couverture.
- enfin, on a terminé les installations de remplissage en sodium : ces installations permettront bientôt ^(mai 81) le déchargement des camions-citernes de sodium, dans 3 réservoirs de stockage de 580 m³ chacun, comportant les tuyauteries de transfert et une chaudière électrique auxiliaire qui permet le pré-chauffage des tuyauteries.

Au début de 1981, les travaux préliminaires du montage des circuits secondaires ont également été entrepris : le montage se poursuivra durant toute l'année.

Dans les usines :

- Les fabrications se sont poursuivies au long de l'année : on peut noter les éléments suivants :
- le sommier support du coeur de 9 m de diamètre pour un poids de 150 tonnes est arrivé sur le site le 18 février 1981, il venait des usines de BREDA à Milan.
 - dans les ateliers de Creusot-Loire à Chalon, les 4 générateurs de vapeur entrent dans la phase finale de leur réalisation. (1er appareil à sortir d'usin. en septembre 1981)
 - le tubage des 8 échangeurs intermédiaires est pratiquement achevé dans les usines de Franco Tosi et de Breda.

- la fabrication des pompes primaires se poursuit dans les ateliers de Jeumont-Schneider (2 sont déjà terminées). Les pompes secondaires sont en cours de fabrication dans les ateliers de FIAT.
- en ce qui concerne la manutention du combustible, les bouchons tournants et le sas à tourniquet (Neyrpic) ainsi que les machines de transfert sont achevés et sont maintenant en phase d'essais.

Dans les stations d'essais :

- à la Station d'essais d'EDF à Gennevilliers, les essais de la première pompe primaire sont terminés et la seconde pompe a pris sa place ; les essais des 8 pompes primaires et secondaires s'y dérouleront successivement.
- dans les installations du CEA à Cadarache, les essais en sodium de la première machine de transfert sont en cours, ceux du sas de manutention et des mécanismes de barres de commande ont été réalisés dans de bonnes conditions et dans des délais très courts, ils ont démontré un fonctionnement satisfaisant des matériels.
- dans l'atelier site, les bouchons tournants sont en phase d'essais.

BILAN ACTUEL

Le chantier :

Durant l'année écoulée, les travaux de réalisation de la centrale ont progressé de manière très spectaculaire. Le fait marquant de 1980 a été la fin de l'assemblage du bloc réacteur et des dispositifs relatifs au stockage du combustible irradié, et leur mise en place avec succès dans le bâtiment réacteur.

Tous ces montages délicats (certains composants comme la fermeture supérieure dépasse 800 t) se sont déroulés de manière très satisfaisante, démontrant une totale maîtrise technique de ces opérations. Un seul incident significatif mais sans gravité a eu lieu à l'automne : pendant les essais dynamiques du pont tournant du bâtiment réacteur, une rupture de pignon ayant provoqué l'éclatement du réducteur a entraîné la chute d'une charge de 400 t de béton dans le bâtiment sans entraîner de conséquence grave humaine ni matérielle.

PROBLEMES TECHNIQUES

Deux problèmes ont été mis en évidence :

- la tenue des structures internes aux séismes. Des solutions satisfaisantes ont pu être apportées après études
- l'intérêt de procéder éventuellement à un détentionnement des générateurs de vapeur sur le site. Les modalités de l'opération sont dès à présent établies.

LE CALENDRIER GENERAL

On peut raisonnablement prévoir actuellement une divergence et les essais à basse puissance à la fin de l'année 1983.

Le couplage au réseau aurait lieu au début de l'année 1984, puis la mise en service industrielle.

L'AVENIR DE LA FILIERE

LE PROJET SUPER PHENIX II (SUPER PHENIX 1500)

Il faut compter environ 25 ans entre la date d'engagement du prototype industriel de grande taille et l'époque où les surgénérateurs pourront représenter une part significative du parc des centrales électro-nucléaires en service. La construction du prototype Super Phénix ayant commencé en 1977, on voit qu'il ne faut pas perdre de temps dans le lancement industriel de la filière si l'on veut obtenir dès la fin de ce siècle une pénétration significative des surgénérateurs dans le parc nucléaire français permettant d'infléchir la courbe de notre demande en uranium naturel.

Ceci a conduit EDF et le CEA à rassembler les éléments permettant les réalisations dès 1984 - soit peu après le démarrage de Super Phénix - sous la forme d'une présérie de plusieurs tranches de 1500 MWe environ, espacées de 18 mois. Une décision sur la construction des usines du cycle de combustible associé devrait être prise également à cette date afin d'arrêter un échéancier cohérent avec celui de la présérie de réacteurs. Un tel calendrier permettra d'exploiter le plus tôt possible les enseignements tirés du fonctionnement de Super Phénix et du pilote de retraitement TOR.

Rappelons les deux points essentiels de ce programme :

- diminuer les coûts d'investissements et les coûts de production d'énergie à partir des centrales à neutrons rapides ;
- mettre en place les installations nécessaires pour fermer le cycle du combustible (fabrication et retraitement), ce qui est un impératif pour un développement substantiel des centrales à neutrons rapides.

o

En ce qui concerne les coûts, l'électricité produite à Creys Malville sera sensiblement au même prix que celle produite à partir des centrales à charbon désulfurisé. Pour l'avenir, on vise à un prix du kWh issu d'une centrale rapide qui ne soit pas supérieur de plus de 15 à 25% au prix du kWh produit par un PWR. Les études en cours montrent que cette perspective n'est pas hors de portée.

La diminution des coûts d'investissements proviendra essentiellement

- de la réalisation d'une centrale de 1500 MWe, avec un réacteur de dimensions sensiblement égales à celles de Super Phénix 1 (1200 MWe).
- de l'effet de série qui abaissera les coûts par rapport à Super Phénix 1, qui était une réalisation unique.
- de certaines modifications , actuellement à l'étude, et pour lesquelles les décisions seront prises prochainement.

On donne ci-dessous à titre indicatif, certaines évolutions possibles actuellement prises en considération :

- espacement des arrêts pour déchargement, et diminution corrélative du flux de combustible
- stockage interne en réacteur
- allègement du système de manutention-stockage-évacuation du combustible irradié
- abandon du dôme type Super Phénix surmontant la dalle du réacteur
- allègement sensible de la dalle
- utilisation d'un système d'arrêt complémentaire intrinsèque
- conception d'un système d'évacuation de la puissance résiduelle en secours redondant (4 files) et pouvant fonctionner passivement (circulation naturelle)

- mise en place d'un récupérateur de combustible fondu, interne à la cuve, du type Super Phénix
- modification du puits de cuve pour le rendre étanche en cas de percement des 2 cuves (adjonction d'une peau métallique d'étanchéité ancrée dans le béton pouvant être refroidie).

C'est dans un très bref délai que ces options devront être prises.

Il reste en effet entendu qu'EDF décidera en 1984 le lancement d'une première série de centrales à neutrons rapides de 1500 MWe, dont le premier site sera probablement voisin de Marcoule. Les usines de fabrication de combustible (FOR) et de retraitement (PURR) sont prévues sur le même site.

On sait par ailleurs que les capacités nécessaires de retraitement seront parallèlement mises en place.

A Marcoule, l'atelier pilote TOR (actuellement SAP) permettra de retraiter le combustible de Phénix, et d'autres réacteurs (mise en service 1983-84 - capacité 5 tonnes/an).

Par ailleurs, l'usine PURR, adaptée aux besoins de Super Phénix et des centrales suivantes sera lancée parallèlement au programme de centrales à venir. L'étude se poursuit.

RECHERCHE ET DEVELOPPEMENT

La Recherche et le Développement se poursuivent dans tous les domaines concernés par les réacteurs à neutrons rapides.

On en donne un bref aperçu dans ce qui suit :

TECHNOLOGIE

On rappelle ci-dessous quelques uns des principaux sujets qui font l'objet d'études continues pour améliorer le fond et l'étendue des connaissances fondamentales.

- Etude des espaces annulaires de traversées de composants
- Etude des matériaux en frottement, étude du mouillage
- Fatigue-fluage des matériaux en sodium, corrosion et transfert de masse décarburation des aciers ferritiques
- Calcul mécanique des structures : établissement de règles de dimensionnement, développement de codes de calcul
- Cavitation en sodium, poursuite des travaux de caractérisation acoustique du phénomène d'érosion de cavitation
- Systèmes de purification du sodium et cristallisation des impuretés
- Mesures des impuretés dans le sodium (oxygène, hydrogène, carbone...) par des essais sur Phénix et sur les circuits expérimentaux
- Instrumentation, visualisation dans le sodium à l'aide de transducteurs immergés, détection des défauts de refroidissement du coeur, essais acoustiques dans Phénix, détection des fuites de sodium
- Etude de la contamination des circuits (Rapsodie, Phénix) étude de la décontamination
- Etude de thermohydraulique dans les cavités en convection mixte, étude des mélangeurs, étude de la stratification dans les tuyauteries horizontales
- Pompes électromagnétiques immergées.

Les activités actuellement les plus importantes dans le domaine de la technologie concernent évidemment les principaux composants de Super Phénix 1 et les études effectuées pour l'avant-projet de Super Phénix 2.

Pour Super Phénix 1, il s'agit en particulier soit d'essais sur des prototypes, soit d'essais de qualification sur des appareils de série :

Pour les générateurs de vapeur, on a poursuivi le dépouillement des résultats expérimentaux et des observations effectuées sur la maquette de 45 MWth expérimentée au Centre EDF des Renardières. Les résultats sont dans l'ensemble satisfaisants pour le dimensionnement des appareils.

Les études métallurgiques de l'alliage 800 se sont poursuivies et un programme expérimental a été mis en oeuvre pour l'étude des phénomènes de fatigue sur les soudures de raccordement des tubes d'échange. D'autres essais de confirmation de la tenue des tubes réels des générateurs de vapeur seront entrepris parallèlement par EDF et par le CEA au cours des années à venir.

Pompes mécaniques

Les essais de la liaison pompe secondaire-réservoir d'expansion ont été effectués. L'installation d'essais en sodium de l'ensemble de l'arbre et des parties tournantes d'une pompe primaire a été mise en service au CNEN à Brasimone. Des essais complets en eau des pompes de Super Phénix sont en cours à Gennevilliers au Centre d'EDF.

Echangeurs intermédiaires

La qualification des codes thermohydrauliques utilisés pour calculer, en régime permanent et transitoire, les échangeurs de Super Phénix s'est poursuivie à partir des mesures effectuées sur maquettes hydrauliques et sur Phénix. Ces maquettes ont également servi à vérifier l'efficacité des dispositifs hydrauliques prévus au primaire et au secondaire et à vérifier les caractéristiques hydrauliques et vibratoires du faisceau.

Isolation thermique des fermetures supérieures et traversées des composants

Les essais de calorifuge en argon, effectués sur les maquettes Gulliver et Cythère se sont poursuivis. Après 24.000 h d'essais sur Gulliver et 13.000 h d'essais sur Cythère et de nombreux cyclages thermiques entre le régime nominal et le régime de manutention, on a pu vérifier le bon comportement du calorifuge et étudier la thermique des espaces annulaires de grandes dimensions.

Les essais de mise au point et de conformité des composants suivants du bloc réacteur de Super Phénix ont été effectués dans l'installation d'essai Tripot :

- le système de chargement-déchargement comprenant le sas à basculeur, le pot de transfert de Super Phénix associés à une rampe réalisée spécialement pour les essais, a été essayé avant sa mise en place sur le site de Creys Malville.

Le nombre de manoeuvres effectuées correspond à une campagne complète de manutention.

- Les mécanismes des deux systèmes de commande principaux ont été essayés en sodium, les essais de mise au point sont terminés.
- La machine de transfert des assemblages dans le bloc réacteur est en cours d'essais de mise au point.

Le VISUS (appareil de visualisation par ultrasons) est également en cours d'essais de mise au point.

Enfin les essais de qualification des vannes et robinets de Super Phénix se sont poursuivis à Cadarache et au Centre EDF des Renardières. Les autres essais effectués concernent des prototypes de composants de Creys Malville :

- un prototype à l'échelle 1 du système de purification intégré dont les essais sont en cours.
- un élément du déversoir qui permet le retour du sodium de refroidissement de la cuve principale dont les essais sont terminés.
- un prototype du filtre destiné à arrêter les aérosols dans le circuit d'argon relié au ciel de pile.
- le prototype du mécanisme de commande du Système d'Arrêt Complémentaire (SAC) de Super Phénix réalisé aux dimensions de Phénix qui a été expérimenté sur ce réacteur, associé à un faux élément absorbant.

Pour Super Phénix 2, on a poursuivi des études préliminaires pour le projet dont l'étude détaillée doit commencer à la mi-1981 :

Générateur de vapeur :

La solution de référence à faisceau hélicoïdal en alliage 800 n'a pas donné lieu à des développements spécifiques pour Super Phénix 2. On a terminé l'étude d'avant projet d'une solution alternative, modulaire, à tubes droits en aciers ferritiques chromesco 3 et EM12.

Pompes mécaniques :

On a étudié en liaison avec Novatome et le constructeur, les moyens de réduire l'encombrement du composant. Le programme de qualification correspondant a été élaboré. On a poursuivi le développement des programmes de calcul des

Formulaire protection (PROPANE)

Le programme expérimental JASON (étude de protection avec E_4C sur le réacteur Harmonie) a été défini à partir de calculs et d'expériences préliminaires dans Harmonie. L'interprétation de ces dernières est en cours à partir de calculs à 1 et 2 dimensions.

Le programme JASON a démarré en janvier 1981.

L'analyse des expériences acier-sodium est en cours d'achèvement à Casaccia (CNEN). Les premiers résultats obtenus ont permis un essai d'ajustement des sections efficaces du formulaire PROPANE Do (Ni, Cr, Fe, Na) qui devrait réduire de façon significative les écarts calcul-expérience.

Formulaire cycle

Dans le domaine de l'évaluation, les travaux ont porté sur :

- les sections efficaces de capture du 59 Co
- les sections efficaces du 237 Np
- les paramètres de résonance du Pu 238 et 58 Ni.

Formulaire gamma

La validation expérimentale du formulaire gamma a débuté sur les mesures faites dans Racine 1A.

TECHNOLOGIE ASSEMBLAGES ET COEUR

R et D en soutien à Super Phénix 1 :

- Essai dans Phénix du prototype SAC de Super Phénix 1 (système d'arrêt complémentaire)
 - . irradiation 1ère phase (absorbant seul): satisfaisant
 - . irradiation 2ème phase (assemblage postiche + mécanisme) : prolongation pour mieux étudier le comportement de l'ensemble barre + mécanisme
 - . irradiation 3ème phase (absorbant réel + mécanisme) : à démarrer à partir de fin 81
- Essai dans Phénix de prototype SCP de Super Phénix 1 (Système de contrôle principal)

Essai retardé pour des problèmes de délais de fabrication. L'irradiation pourra démarrer fin 81-début 82

- Irradiation PRECURSAB (éléments absorbants)
 - 3 aiguilles de ce programme d'irradiation d'éléments absorbants ont été retirées de Phénix pour examens. Par ailleurs, on prévoit une extension du programme d'irradiation.

R et D en soutien à Super Phénix 2 :

- Poursuite du développement des déprimogènes compacts pour les pieds d'assemblage combustibles :
 - confirmation des performances hydrauliques, choix des technologies de fabrication, préparation d'un essai dans Phénix
- Préparation des essais mécaniques sur assemblages raccourcis
- Avancement satisfaisant des études d'environnement du coeur :
 - . étude paramétrique de l'écoulement dans le sommier
 - . étude du mélange de jets en sortie d'assemblages

R et D Filière

- Etude de la thermohydraulique des faisceaux déformés
 - . poursuite des essais hors pile en eau et en sodium et préparation d'essais de contact entre aiguilles
- Etude de la détection précoce d'anomalies thermohydrauliques :
 - Achèvement de la 1ère phase des essais de mélange dans la protection neutronique supérieure et de l'étude des fluctuations de température mesurables par les thermocouples de surveillance.

COMBUSTIBLE

L'essentiel de l'activité de Recherche et de Développement dans le domaine de l'assemblage combustible a consisté à extrapoler et à améliorer encore celui qui donne toutes satisfactions dans le réacteur Phénix. La maîtrise désormais bien acquise de toutes les propriétés physiques et métallurgiques intervenant dans le comportement de l'aiguille et l'acquisition statistique des données technologiques sur le comportement du faisceau permettent petit à petit

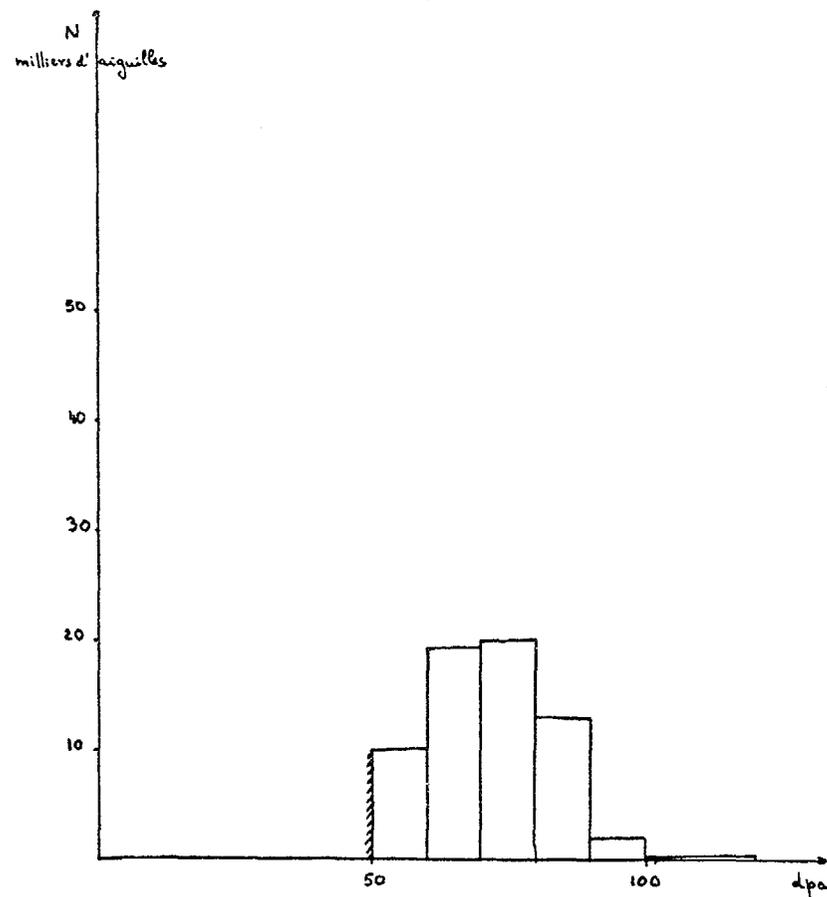
d'accroître très sensiblement le taux de combustion limite admissible sur les assemblages de type Phénix et d'en prévoir la transposition au réacteur Super Phénix. A titre d'exemple, précisons que le taux de combustion maximal autorisé dans Phénix sur les assemblages standard est de 85.000 MWj/t et que, progressivement, tous les assemblages concernés sont prévus pour atteindre ce taux qui ne nous paraît pas être une limite technologique. Par ailleurs, certains assemblages expérimentaux ont été irradiés, sans précaution particulière jusqu'à plus de 120 dpaF.

Dans ce contexte, on ne peut manquer de signaler que, sur plus de 80.000 aiguilles standard fabriquées à l'Atelier de Technologie du plutonium de Cadarache, aucune ne s'est rompue en réacteur. Au 31/12/1980, une seule rupture était intervenue (en 1979) sur une aiguille d'un assemblage expérimental. Rapportée au nombre de soudures, la fiabilité ressort à mieux que 10^{-6} .

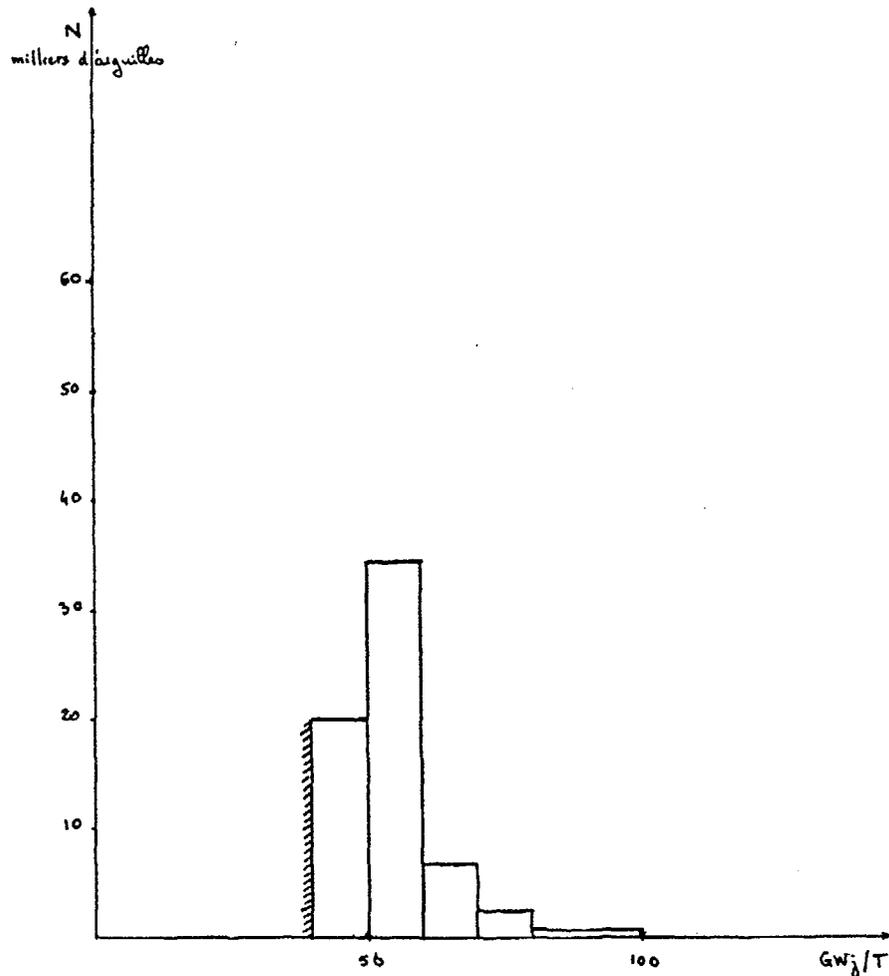
Ces résultats particulièrement satisfaisants permettent de poursuivre le développement logique de nouveaux choix technologiques pour l'assemblage combustible dans les voies suivantes :

- Caractérisation du plus grand nombre de matériaux métalliques possible vis-à-vis des phénomènes cruciaux que sont le gonflement et le fluage d'irradiation. (aciers inoxydables austénitiques à composition resserrée, tel le 316 Ti, alliages réfractaires à base de nickel type inconel 625 et 306 aciers ferrito-martensitiques du genre F17 et EM12). De ce point de vue, il apparaît que, du moins provisoirement la limitation pourra provenir du tube hexagonal
- Poursuite de la démonstration des possibilités du combustible carbure en dégageant les données technico-économiques associées. A cet égard, la référence reste le combustible carbure à joint sodium dont plusieurs capsules sont actuellement en cours d'irradiation dans Phénix.
- Modélisation de tous les phénomènes physiques rencontrés en n'omettant pas l'aspect statistique permis par le bon fonctionnement industriel du réacteur Phénix. A cet égard, on soulignera l'importance du programme d'irradiation d'échantillons de matériaux métalliques candidats au rôle de matériaux de gainage ou de structure d'une part, l'attention toute particulière accordée à l'examen des assemblages standard fortement irradiés qui seraient susceptibles de fournir des indications sur d'éventuels critères de fin de vie.

En outre, bien entendu, les efforts de compréhension de la métallurgie sous flux rapide sont poursuivis, notamment le rôle des dislocations et de leur évolution sous irradiation et la cinétique de précipitation des éléments mineurs des alliages. L'utilisation à Saclay, du microscope à 1 MeV spécialisé pour ces études se révèle particulièrement précieuse.



Histogramme du nombre d'aiguilles au Pu dont les gaines ont un taux de dommages dépassant 50 dpaF dans PHENIX



Histogramme du nombre d'aiguilles au Pu ayant dépassé 40000 MWj/T dans PHENIX

LE PROGRAMME EXPERIMENTAL CABRI

Malgré l'indisponibilité encore importante en 1980 de l'installation due à l'incendie d'armoires électriques en août 1979, l'année 1980 a permis :

- de réaliser le premier essai global de type A sur une aiguille irradiée
- de résoudre sur le plan expérimental, grâce à un effort technique international tout particulier, les problèmes de l'étalonnage du dépôt d'énergie et de sa variation le long de l'aiguille testée, au cours d'un tir, de la stabilité du profil axial de puissance au cours de ces mêmes tirs. Les valeurs obtenues et les précisions associées ont permis de lever un certain nombre d'incertitudes sur les modèles établis à partir des tirs déjà réalisés.
- de réaliser de façon particulièrement soignée deux essais l'un de type A, l'autre de type B, dont les caractéristiques ont permis de confirmer certains modèles de calcul.

Le tableau ci-après résume les caractéristiques essentielles des essais réalisés à ce jour.

COMBUSTIBLE D'ESSAI	ESSAIS A (transitoire de puissance simple)				ESSAIS B (défaut de refroidissement plus transitoire de puissance)			
	ESSAI	DATE	IRRA- DIATION	DEPOT D'ENER- GIE ATTEINT (kJ/g)	ESSAI	DATE	IRRA- DIATION	DEPOT D'ENER- GIE ATTEINT (kJ/g)
AIGUILLE VIERGE	A1	7-78	-	0,49	B1	6-79	-	-
	A1 R	10-78	-	0,65	B2	7-79	-	1,20
	A2	4-79	-	1,14	B3	12-80	-	1,40
	A3	12-80	-	1,44				
AIGUILLE IRRADIEE	A1 I	4-80	8 200 MWj/t	0,62				

Quelques détails sur les essais réalisés en 1980 :

Essai AI 1

Il s'agissait de soumettre une aiguille irradiée au préalable dans Phénix (8200 MWj/t), à un transitoire de puissance permettant d'atteindre la fusion du combustible, sans toutefois que la gaine ne se rompe.

Les conditions du tir étaient telles que la distribution de température dans l'aiguille et les caractéristiques thermiques du sodium réfrigérant simulaient l'état d'une aiguille d'un réacteur en fonctionnement à puissance nominale. Cette expérience est donc une première mondiale.

Conformément aux calculs prévisionnels, il n'y a pas eu rupture de gaine ; une analyse détaillée de la zone fondue de l'aiguille, de l'expansion axiale du combustible, ainsi que de la quantité et de la nature des gaz relâchés au cours du transitoire doit permettre de tirer des enseignements importants sur l'effet des gaz de fission et donc sur les mouvements de combustible qui interviennent lors d'une excursion accidentelle de puissance.

Essai B 3

Les conditions réalisées ont été très proches des conditions requises et le comportement de l'instrumentation a été bon.

Un examen encore sommaire des premiers résultats et notamment des indications des capteurs de pression, des microphones et des radiographies de l'aiguille, montre que les objectifs de l'expérience ont été atteints :

- une rupture de gaine a été détectée ;
- la mise en contact UO_2 liquide-sodium liquide a donné lieu à un dégagement d'énergie mécanique et des mouvements de combustible dans le canal sodium. L'énergie mécanique libérée semble avoir été suffisante pour expulser vers le haut de plusieurs centimètres toute la partie supérieure de l'aiguille.

Le déroulement des phénomènes comporte ainsi de nombreuses séquences typiques (rupture de gaine, interaction, ébullition et expulsions, mouvements de combustible, éjection et dispersion du combustible) dont l'analyse sera intéressante.

Essai A 3

Il s'est déroulé de façon tout à fait conforme aux conditions prévues et le comportement de l'instrumentation a été bon.

L'examen sommaire des indications des capteurs tels que capteurs de pression et microphones, montre qu'un premier événement a été enregistré quelques millisecondes seulement après le sommet du pic de puissance, ce qui laisse supposer une rupture de l'aiguille. Les résultats préliminaires de cette expérience sont les suivants :

- la gaine s'est rompue exactement à l'instant et à l'endroit prévus par les précalculs.
- la mise en contact d' UO_2 liquide avec du sodium froid conduit à une interaction dont les pics de pression sont peu énergétiques (le canal sodium n'a pas été complètement vidangé). Là encore, il semble que cet essai doive être riche d'enseignements.

Essais ultérieurs

Au cours du premier trimestre 1981, des modifications ont été effectuées pour augmenter le dépôt d'énergie dans l'aiguille d'essai, afin d'atteindre le seuil de vaporisation de l'oxyde d'uranium, en dessous de 2 kJ/g. Ceci est possible en remplaçant l'acier inoxydable de la cellule d'essais par du zircalloy qui absorbe moins les neutrons du cœur nourricier. Les essais reprendront ainsi au cours du 2ème trimestre 1981.

LE PROGRAMME EXPERIMENTAL SCARABEE

Bien que cette installation ne soit pas encore opérationnelle, un travail important a été réalisé pour la définition du programme expérimental et sa faisabilité dans les domaines :

- des modèles thermohydrauliques simples et double phase décrivant le comportement du sodium à l'intérieur d'une grappe d'aiguilles combustibles supportant un fil d'espacement en présence ou non d'un bouchage poreux partiel ou total. Le développement de l'interprétation des essais hors pile effectués à Grenoble est une des meilleures approches de la phase initiale de l'accident d'assemblage. Les travaux dans ce domaine ont trouvé une application dans l'interprétation d'une série d'expériences en pile réalisées sur une grappe 37 aiguilles placées dans la cavité centrale du réacteur BR2 de Mol.

- du mouvement des matériaux fondus. Ces mouvements essentiels dans l'analyse de l'accident d'assemblage par les effets en réactivité qu'ils peuvent induire ont été étudiés à l'aide d'essais en simulation hors pile. Une première modélisation en géométrie monoaiguille a permis de retrouver avec une bonne précision le sens du mouvement et la vitesse de déplacement de la gaine fondue, les longueurs de pénétration dans les zones froides et d'ajuster la valeur limite du coefficient de frottement film liquide-gaz. L'extrapolation de ces essais monocanaux à des géométries de grappe est en cours et devrait permettre de précalculer de façon satisfaisante les essais Scarabée dont une partie est destinée à étudier la formation de bouchages, la coulée gravitaire, etc...
- du comportement des bains fondus de combustible contenant ou non de l'acier et des produits de fission solides. Les études portent sur la stabilité de la croûte et la propagation éventuelle de ce magma aux assemblages voisins. Des études hors pile de faisabilité ont été engagées cette année et leur développement devrait permettre dans les deux années à venir de définir les essais qu'il sera indispensable de réaliser dans Scarabée, essais pour lesquels le chauffage neutronique contrôlé est indispensable pour éviter les mouvements induits par chauffage haute fréquence utilisés dans les expériences hors pile. Là encore, au développement expérimental hors pile est associé un effort important de modélisation des phénomènes de convection naturelle qu'il est essentiel d'appréhender pour l'étude de la croûte solide qui confine le matériau fondu à l'intérieur d'un assemblage.

Il est prévu de réaliser les premiers essais du programme expérimental Scarabée vers la fin de l'année 1981.

Au delà, compte tenu des éléments communs aux installations Cabri et Scarabée, il est prévu de réaliser les deux programmes Cabri et Scarabée en alternance, à raison de 4 à 6 essais par an et par installation pour les 3 à 4 années à venir.

Sur le plan interprétation et transposition des modèles au code d'analyse des accidents de réacteur rapide, l'expérience acquise en 1980 sur le transfert de quelques modèles d'interprétation des phénomènes thermohydraulique

double phase validés sur les essais Cabri devrait permettre dans les années à venir une utilisation rapide dans les codes d'accidents des modèles mis au point par le vaste programme de recherche et de développement en matière de sûreté.

COMPORTEMENT DES PRODUITS DE FISSION GAZEUX ET VOLATILS LORS D'UN TRANSITOIRE DE PUISSANCE

Le programme réalisé dans le réacteur pulsé Silène, a permis d'obtenir des résultats importants cette année :

- d'entrée de jeu, un résultat fondamental a été acquis, à savoir qu'un relâchement des gaz de fission était possible au cours d'un transitoire rapide n'entraînant pas la fusion du combustible ;
- on a pu mettre en évidence des taux de relâchement de gaz de fission croissant avec l'énergie déposée et atteignant 100%, soit un dégagement total pour la fusion du combustible ;
- la question du gaz intrinsèque ou parasite recevra une réponse complète dans le cadre du programme miniaiguille qui sera mis en oeuvre dans le réacteur pulsé Silène après irradiation dans le réacteur de puissance Phénix.

ETUDES DE L'ACCIDENT DE DIMENSIONNEMENT DU CONFINEMENT DANS SUPER PHENIX

Des essais ont été réalisés en 1980 ayant pour but de déterminer l'importance des fuites de sodium primaire et de gaz de couverture qui pourraient produire à travers des diffuses créées dans la dalle de couverture une interaction sodium-combustible fondu à l'intérieur de la cuve primaire.

Les essais de simulation eau-air ont montré que l'écoulement du fluide par les orifices de la dalle est un écoulement diphasique confirmant ainsi l'hypothèse de l'émulsion eau-air utilisée pour l'interprétation des essais précédents.

ETUDES HORS PILE

Au cours de l'année 1980, tous les programmes d'étude hors pile relatifs aux accidents conduisant à la fusion du combustible ont été poursuivis. Les phénomènes étudiés sont : l'ébullition du sodium, la fusion et la coulée des gaines d'aiguille, la fusion et la coulée du combustible, l'interaction sodium combustible, les effets de condensation pendant l'expansion de la bulle, la formation de couches de débris et le refroidissement du récupérateur.

Citons, en particulier les résultats suivants :

Dans le domaine de l'ébullition consécutive à un défaut de refroidissement, une campagne d'essais, sur une grappe à 19 aiguilles équipées de gaines en acier, a pu être menée à bien et d'intéressants résultats sur les distributions de température, distribution de vapeur et conditions d'assèchement en cas d'ébullition localisée et généralisée, ont été obtenus.

Les essais d'interaction sodium-combustible, réalisés sur le dispositif Corect II, confirment les résultats précédents à savoir que dans des conditions hors pile mettant en jeu des quantités de plusieurs kilos de combustible fondu, on peut obtenir des interactions qui, sans donner lieu à des phénomènes violents du genre détonation, n'en produisent pas moins des effets thermiques et mécaniques importants. Par ailleurs, le projet de dispositif Corect III Cocorena mettant en jeu 70 kg de combustible a été achevé et la construction est en cours.

Dans le cadre du programme Excobulle, on a développé un modèle d'entraînement de liquide à l'interface de la bulle de vapeur en expansion. Lorsqu'il sera validé, il permettra une estimation de la réduction de l'énergie mécanique pendant la détente de la bulle.

Dans le domaine du refroidissement post accidentel (RPA), une étude a été menée sur la formation du tas de débris sur le récupérateur et l'influence de l'ébullition interne du fluide sur les conditions de son étalement. De plus, le dispositif Bocal, pour l'étude de la convection naturelle en sodium (sous le récupérateur) a été construit et les premiers essais sont prévus début 1981.

Le développement des codes de calcul destinés à la description de ces phénomènes dans les conditions réacteur a été poursuivi.

Ainsi, le code Mandrin (code d'ébullition en géométrie monocanal), dérivé du code Natrex, décrit maintenant les régimes avec inversion de débit et plusieurs zones en double phase le long du canal.

Le code Bacchus, code de thermohydraulique en géométrie de grappe, existe maintenant en plusieurs versions :

- 1 - Bacchus P - pour les régimes permanents en simple phase et en ébullition
- 2 - Bacchus T - code pour décrire les transitoires en simple phase ; il peut être utilisé pour les régimes de convection naturelle ou mixte.
- 3 - Bacchus TL - pour les régimes avec ébullition évoluant lentement (transitoires lents)

Remarque :

L'ensemble de ces programmes d'étude hors pile a été conduit jusqu'à maintenant en soutien direct de l'analyse de sûreté de Super Phénix et concernait, en particulier, l'accident d'arrêt des pompes sans chute des barres qui conduit avec des hypothèses pessimistes à la fusion d'une partie du coeur.

La révision des options de sûreté à l'occasion du projet Super Phénix 2 conduit à donner plus d'importance aux défauts localisés au niveau de l'assemblage non plus au niveau du coeur. Il en résulte une réorientation des programmes de sûreté vers l'analyse des bouchages internes et externes qui peuvent affecter un assemblage : leur formation, leur détection, les conditions de leur éventuelle propagation...

FEUX DE SODIUM

Dans le domaine des feux de sodium pulvérisés, l'interprétation des résultats expérimentaux fait ressortir que les mouvements de convection ont une importance prépondérante dans ce phénomène de combustion sous forme pulvérisée. La taille des gouttelettes n'est pas un paramètre important et il faut prendre en compte les effets d'échelle.

Les travaux de réalisation de l'installation Esmeralda d'essais de feux de sodium de grande ampleur (plusieurs dizaines de tonnes) se déroulent conformément au planning : la date de mise en service est toujours envisagée pour mi-1982.

COLLABORATION INTERNATIONALE

Elle est particulièrement étroite depuis plusieurs années entre les cinq pays européens : France, Italie, République Fédérale d'Allemagne, Belgique, Pays Bas (DeBeNe). La réalisation de la centrale de Creys Malville en est actuellement la matérialisation concrète.

La collaboration se poursuit également, selon les accord conclus, avec tous les pays actuellement engagés dans le développement des réacteurs à neutrons rapides.

L'année écoulée n'a pas apporté de faits marquants dans la situation existante.

STATUS OF THE FAST BREEDER REACTOR DEVELOPMENT IN
THE FEDERAL REPUBLIC OF GERMANY, BELGIUM AND
THE NETHERLANDS, FEBRUARY 1981

R. HÜPER, R. FRIESE
Kernforschungszentrum Karlsruhe
Federal Republic of Germany

Preface

In 1967 and 1968 the Federal Republic of Germany, the Kingdom of Belgium and the Kingdom of the Netherlands ("DeBeNe") agreed to develop, in a joint program, breeder reactors to the point of commercial maturity. The following research organizations take part in this effort:

- Kernforschungszentrum Karlsruhe (KfK)
- INTERATOM, Bergisch Gladbach
- ALKEM, Wolfgang near Hanau
- SCK/CEN, Mol
- Belgonucléaire, Brussels
- ECN, Petten
- TNO, Apeldoorn
- NERATOOM, The Hague.

The three German institutions mentioned above have been interrelated since 1977 by the Entwicklungsgemeinschaft (EG) Schneller Brüter. Between KfK, INTERATOM, and the French Commissariat à l'Energie Atomique contracts were concluded in 1977 about close cooperation in the Fast Breeder field, with association of the Belgian and Dutch partners.

