



COMMISSARIAT A L'ENERGIE ATOMIQUE

INSTITUT DE RECHERCHE TECHNOLOGIQUE ET DE DEVELOPPEMENT INDUSTRIEL
DIVISION D'ETUDE ET DE DEVELOPPEMENT DES REACTEURS

IRDI

FR8601313



5. Symposium on reactor dosimetry
Geeshacht (Germany, FR) 24-28 Sep 1984
CEA-CONF--8271

DRNR / P / N° 306

SUPER PHENIX

SURVEILLANCE DES STRUCTURES SOUMISES A IRRADIATION
PROGRAMME DE MESURES ET CALCULS NEUTRONIQUES

J.C. CABRILLAT - G. ARNAUD - D. CALAMAND
D. MAIRE(*) - G. MANENT(**) - A.A. TAVASSOLI(***)

RESUME :

Pour le réacteur à neutrons rapides SUPER PHENIX, l'évolution en fonction de l'irradiation des propriétés mécaniques de l'acier constituant le sommier -structure fixe assurant l'alimentation et le supportage du coeur- fait l'objet d'études et d'un suivi particulier.

La mise en oeuvre s'appuie sur des irradiations d'éprouvettes en acier, effectuées actuellement dans le réacteur PHENIX, et projetées dans le réacteur SUPER PHENIX dès les premiers cycles de fonctionnement. Pour des raisons liées à l'interprétation des résultats, elles sont accompagnées d'un important programme de dosimétrie couplant calcul et mesure.

Les motivations, la définition de la structure, de la conduite et des matériels mis en oeuvre dans ce programme de dosimétrie ainsi que les premiers résultats d'une comparaison calcul-mesure font l'objet de cette présentation.

- * Novatome - La Boursidière 92 - Le Plessis Robinson
- ** CEA/IRDI/DRE - CEN Cadarache
- *** CEA/IRDI/D.Tech - CEN Saclay 91 - Gif sur Yvette (France)

INTRODUCTION

Pour les conditions de fonctionnement (température, contraintes mécaniques, flux neutronique) rencontrées dans les réacteurs à neutrons rapides, l'évolution des propriétés mécaniques des matériaux constituant certaines structures fixes internes à la cuve est entachée d'incertitudes importantes ; elles résultent du concours d'incertitudes sur l'évaluation des doses reçues et d'incertitudes sur le comportement des matériaux soumis à irradiation.

Cette remarque prend toute son importance, vis-à-vis de la durée de fonctionnement et de la sûreté de la centrale SUPER PHENIX, pour le sommier (Fig. 1) assurant le supportage et l'alimentation du coeur. Elle est à la base d'un important programme d'étude et de suivi visant :

- 1/ la levée par anticipation sur la réalité, des incertitudes sur l'évolution des propriétés mécaniques de l'acier du sommier.
- 2/ la levée des incertitudes sur les valeurs des flux et des dommages vus par le sommier.

La réalisation pratique s'appuie :

- a/ d'une part sur des irradiations d'éprouvettes d'acier, prélevées dans le matériau du sommier, pour des conditions proches de celles du fonctionnement de la structure sous surveillance soit :
 - une campagne préliminaire dans le réacteur PHENIX se terminant en 1984
 - une campagne "in situ" dans le réacteur SUPER PHENIX, prévue dès les premiers cycles de fonctionnement (1986)
- b/ d'autre part des mesures du niveau et spectre de flux vus par les éprouvettes et par le sommier, plus particulièrement par sa plaque supérieure (Fig. 1).

En se situant du point de vue neutronique, cette présentation définit et justifie les options de ce programme concernant :

- le paramètre quantifiant les dommages dûs au bombardement neutronique et assurant la corrélation des diverses observations et leurs transcriptions au sommier
- les emplacements, durées et déroulement des irradiations
- la dosimétrie.

Une comparaison préliminaire calcul-expérience est ensuite discutée pour les premiers résultats de mesures obtenus dans PHENIX.

PARAMETRE DE CORRELATION

Le nombre d'atomes déplacés par atome cible (D.P.A.) a été préféré à des grandeurs intégrales, telle, en particulier, la fluence supérieure à 0,1 Mev.

Le modèle en usage au C.E.A. détaillé en (1) est inspiré des travaux de Lindhard (2). Pour le sommier de SUPER-PHENIX ce choix trouve ses motivations dans les faits suivants :

- la population neutronique est estimée en majorité (94 %) en dessous de 0,1 Mev (tableau 1)
- la contribution des neutrons en dessous de 0,1 Mev aux déplacements d'atomes est importante (50 %) (tableau 1)
- ce modèle donne une réponse cohérente, dans son principe avec les phénomènes supposés responsables (3) de la fragilisation de l'acier à la température de fonctionnement du sommier (400° C) : les créations de paires lacunes-interstitiels.

PLAGE D'ENERGIE	CENTRE DU COEUR		SOMMIER	
	Flux %	D.P.A. (%)	Flux %	D.P.A. (%)
E > 1 Mev	7,1	43,5	0,1	2,1
1 Mev > E > 0,1 MeV	40,6	46	6,1	48,1
0,1 Mev > E > 0,01 MeV	25,4	8,6	19,7	43,0
0,01 Mev > E > 1 Kev	18,8	1,9	18,0	6,3
1 Kev > E > 100 eV	2,9	-	22,4	0,3
100 eV > E	5,2	-	33,7	0,2
TOTAL	100,0	100,0	100,0	100,0

TABLEAU 1 : REPARTITION DE LA POPULATION NEUTRONIQUE ET DES DOMMAGES EN FONCTION DE L'ENERGIE

Toutefois ce choix appelle quelques remarques conditionnant la conduite des irradiations :

- le D.P.A. se réfère à un modèle calculé : sa détermination "expérimentale" implique une bonne connaissance du spectre neutronique.
- les incertitudes liées à la transcription des résultats au sommier (incertitudes dues au modèle) seront minimales si les spectres neutroniques vus par les éprouvettes sont proches de celui vu par la structure étudiée.

Dans ces conditions la dose maximale attendue (toutes incertitudes comprises) est de 1.4 D.P.A. pour la plaque supérieure du sommier en fin de vie de la centrale.

DESCRIPTION DES IRRADIATIONS

Emplacements d'irradiation

Leur détermination s'appuie sur des valeurs de flux et D.P.A. issues de calculs de propagation neutronique à une et deux dimensions cylindriques [formulaire PROPANE D0 (4)] dans la cuve des réacteurs PHENIX et SUPER PHENIX ; ils sont complétés par des calculs en géométrie "hexagonale-plane" du coeur afin de préciser les effets locaux de géométrie dans les zones de couvertures radiales (formulaire CARNAVAL IV (5)).

Trois zones vérifient les conditions requises : bonne accessibilité, niveau de flux permettant une anticipation des phénomènes vus par le sommier, spectre dégradé. Leurs caractéristiques d'irradiation, comparées à celles du sommier sont données tableau (2). Il s'agit de :

1. PHENIX zone de stockage interne (Fig. 2)
(irradiation DINOSAURE)
2. SUPER-PHENIX 1ère rangée d'assemblages de
protection (Fig. 3) (irradiations
DIPLODOCUS)
3. SUPER-PHENIX Dernière rangée d'assemblages de
couverture (Fig. 3) (irradiations
IGUANODON) avec toutefois un spectre
plus dur, mais des temps de séjour
courts.

REACTEUR	SUPER PHENIX	PHENIX	SUPER PHENIX	SUPER PHENIX
Emplacement	Sommier	Stockage interne	Protect. latérale	Couvert. radiales
Irradiation		DINOSAURE	DIPLODOCUS	IGUANODON
Section DPA 1 groupe (barns) (indicateur de spectre)	44	100	170	200
T° (JEPP)	≈ 8800	700-800	640-1500	4300

TABLEAU 2 : CARACTERISTIQUES DES EMPLACEMENTS D'IRRADIATION

- * T : temps moyen permettant d'atteindre la dose maximale de 1,4 DPA attendue sur la plaque supérieure du sommier en 30 ans (≈ 8800 JEPP)
 JEPP : journée équivalente à pleine puissance du réacteur.

Durées des irradiations

Les temps longs d'irradiation interdisent pratiquement la répétition d'une mesure en cas d'objectifs non atteints ou dépassés (dose) ce qui conduit, entre autres causes, à structurer les mesures en fonction des incertitudes importantes :

- a) l'incertitude qui touche les évaluations prévisionnelles de dose (± 40 à 50 %) implique
- une mesure directe de flux et donc de débit de dose à hauteur du sommier de SUPER PHENIX (tableau 3 - Dosimétrie du sommier)
 - la mise en place d'irradiations parallèles, exploitées en un temps compatible avec une modification du déroulement de l'irradiation principale. Cette stratégie est adoptée pour DINOSAURE (PHENIX) et DIPLODOCUS (SUPER PHENIX). Ces irradiations secondaires sont mises à profit pour compléter la prise d'information (tableau 3).

- b) l'incertitude sur le paramètre de corrélation motive en partie l'irradiation IGUANODON afin de cerner l'influence des spectres neutroniques, par rapport aux résultats attendus de l'irradiation principale DIPLODOCUS (tableau 3).

DOSIMETRIE

Phénix : Dinosaur

La dosimétrie de l'irradiation principale (détecteurs, fer, nickel, cobalt, Niobium) dont la maîtrise incombe à DEBENE (PETTEN) est donc complétée sur l'initiative du CEA par une irradiation d'isotopes lourds (DINOSAURE 2) dans une position similaire à l'irradiation principale (Fig. 2). Compte tenu des informations attendues (débit de dose, puissance en zone de stockage), les isotopes choisis couvrent la totalité du spectre énergétique: U235, Pu239, U238, Pu242, Np237.

La détermination des taux de fission (spectrométrie sur les produits de fission) est complétée par une gammamétrie sur les conteneurs en acier des isotopes lourds.

Super-Phénix

Les principales contraintes du choix, de la nature et du conditionnement des dosimètres sont, des temps d'irradiation et de récupération des détecteurs longs (plusieurs années, 1 an minimum respectivement), une mise en oeuvre en sodium à température élevée (400 à 550° C), une dynamique sur les flux importante, la volonté d'une information fiable.

La nature et la présentation des dosimètres sont donnés dans le tableau 4.

Ces détecteurs sont conditionnés sous atmosphère neutre dans des boîtiers en acier inoxydable avec une double enceinte pour le Niobium et le Neptunium.

Pour les irradiations DIPLODOCUS et IGUANODON, ils sont regroupés par lot de cinq détecteurs de natures différentes ; ces lots sont répartis tous les 25 cm environ dans les 7 capsules concernées sur une hauteur de 2 mètres environ. L'interprétation de ces mesures est ainsi susceptible d'attribuer à chaque éprouvette un nombre d'atomes déplacés.

TABLEAU 3
PANORAMA DES IRRADIATIONS

IRRADIATIONS (type) · Dénomination · Réacteur · Emplacement	NOMBRE D'IRRADIATIONS ELEMENTAIRES ET DENOMINATIONS	TEMPS DE SEJOUR	INSTRUMENTATION
<u>DINOSAURE</u> - PHENIX - STOCKAGE INTERNE	2. DINOSAURE 1 DINOSAURE 2	800 JEPP (1 à 1,4 DPA)	Eprouvettes Dosimètres DéTECTEURS de température
<u>IGUANODON</u> - SUPER PHENIX - COUVERTURES RADIALES	3. IGUANODON 1 IGUANODON 2 IGUANODON 3	640 JEPP (1 DPA) 640 JEPP (2 DPA) 1440 JEPP (2 DPA)	Eprouvettes Dosimètres DéTECTEURS de température
<u>DOSIMETRIE DU SOMMIER</u> - SUPER PHENIX - COEUR INTERNE	3. 1 2 3	~ 480 JEPP 480 JEPP 640 JEPP	Dosimètres
<u>DIPLODOCUS</u> - SUPER PHENIX - PROTECTION LATERALE	4. DIPLODOCUS 1 DIPLODOCUS 2 DIPLODOCUS 3 DIPLODOCUS 4	1400 JEPP (0,5 DPA) 3000 JEPP (0,9 DPA) 4320 JEPP (1,4 DPA) (réserve)	Eprouvettes Dosimètres DéTECTEURS de température

NATURE	REACTION	PRESENTATION
Fer	$^{54}\text{Fe} (n,p)$	Feuille
Ni	$^{58}\text{Ni} (n,p)$	Feuille
Co	$^{59}\text{Co} (n,\gamma)$	Feuille
Nb	$^{93}\text{Nb} (n,n')$	Fil
Np	$^{237}\text{Np} (n,f)$	Fil (alliage neptunium vanadium)

TABLEAU 4

La détermination de la dose au niveau de la plaque supérieure du sommier s'effectue à partir d'une interpolation des valeurs mesurées par des détecteurs, placés dans les évidements pratiqués dans les pièces massives de la partie basse de l'assemblage (tableau 3). La connaissance de la pente de variation du flux et donc des dommages, très importante dans cette zone (30 %/cm), est appréhendée par un empilement de détecteurs dans le pied et une répartition des dosimètres en plusieurs étages au niveau de la portée sphérique (Fig. 4).

De plus un recouplement avec les valeurs mieux connues de flux au niveau de la colonne combustible est obtenu par une répartition, dans des capsules instrumentant les assemblages affectés à cette mesure, du lot des cinq dosimètres précédemment défini.

PHENIX : PREMIERS RESULTATS

L'interprétation première des résultats de l'essai DINOSAURE (isotopes lourds) a été de conforter le temps de séjour de l'irradiation principale, obtenu en son temps à partir de calculs simples (une dimension cylindrique). Elle constitue de plus la première étape de travaux poursuivis actuellement dans le sens :

- * d'une détermination précise des débits de dose et de puissance en zone de stockage, pouvant s'appuyer sur des techniques de type "unfolding" et incluant les résultats de gammamétrie.
- * d'une qualification des méthodes de calcul susceptibles de rendre compte des niveaux de flux et de puissance des assemblages en zone de stockage.

Cette interprétation préliminaire s'appuie sur une comparaison calcul-mesure des taux de fission des isotopes lourds.

Les calculs de base, images des chargements du coeur et de la zone de stockage interne pendant l'irradiation, possèdent les caractéristiques suivantes :

- 25 groupes d'énergie
- géométrie hexagonale plane
- théorie de la diffusion
- formulaire CARNAVAL IV
- sections efficaces de fission :
 U235, Pu239 : origine : formulaire CARNAVAL IV (5)
 Pu242 : origine : ENDFB V
 Np237 : origine (6).

La comparaison donnée tableau 5 montre une sous-estimation des valeurs calculées, plus accentuée en moyenne aux hautes énergies.

ISOTOPES	TAUX DE FISSION MESURÉS ÉVÉNEMENTS/SEC. (INCERT. en %)	TAUX DE FISSION CALCULÉS ÉVÉNEMENTS/SEC. (INCERT. $\pm 50\%$ ^a)	$\frac{E - C}{C}$ (%)
U 235	$1,1 \cdot 10^{-09}$ (4,3 %)	$1,0 \cdot 10^{-09}$	9 %
Pu 239	$1,42 \cdot 10^{-09}$ (3,6 %)	$1,1 \cdot 10^{-09}$	29 %
Pu 242	$1,11 \cdot 10^{-11}$ (19 %)	$9,4 \cdot 10^{-12}$	18 %
Np 237	$1,5 \cdot 10^{-11}$ (18 %)	$1,1 \cdot 10^{-11}$	36 %

TABLEAU 5 : COMPARAISON DES TAUX DE FISSION MESURES ET CALCULES

- a) L'incertitude tient compte des approximations de calcul (théorie de la diffusion, ...).

Finalem^{ent}, la valeur "expérimentale" du taux de déplacement par atome est estimée à l'aide d'un ajustement du flux calculé, condensé à 6 groupes d'énergie, par une méthode de moindre χ^2 . La comparaison de la valeur centrée ainsi obtenue ($1,37 \cdot 10^{-7}$ D.P.A./JEPP) à la valeur estimée de façon préliminaire ($1,7 \cdot 10^{-3}$ DPA/JEPP) ne suscite pas de modification fondamentale de la durée de l'irradiation principale.

CONCLUSION

Un important programme expérimental, en cours d'exécution dans le réacteur PHENIX, et projeté dans le réacteur SUPER PHENIX, est mis en oeuvre afin de préciser le comportement de l'acier du sommier de SUPER PHENIX sous irradiation, jusqu'à la dose limite vue par cette structure.

· Du point de vue neutronique, les incertitudes touchent :

- la corrélation des diverses expériences, malgré le choix d'un paramètre incluant un maximum d'informations sur la nature du spectre neutronique et sur les dommages créés au matériau (déplacement par atomes : DPA)
- les calculs et estimations des dommages vus par le sommier et les diverses éprouvettes irradiées.

La réponse proposée est un programme volumineux de mesure de flux permettant une prise d'informations la plus complète possible :

- a) par l'utilisation de détecteurs couvrant le mieux possible le spectre neutronique :
 - isotopes lourds pour les irradiations dans PHENIX
 - ^{54}Fe , ^{58}Ni , ^{59}Co , ^{93}Nb , ^{297}Np pour les irradiations dans SUPER PHENIX.
- b) par une répartition géographique permettant de déterminer la dose effectivement vue par chaque éprouvette.
- c) par une mesure directe du flux à hauteur du sommier.

De plus, la structure et le déroulement des irradiations permet des prises d'informations intermédiaires autorisant d'éventuels réajustements des temps de séjour des irradiations principales.

REFERENCES

- /1/ M. LOTT et al.
"Sections efficaces de création de dommage"
Nuclear data in Science and Technology - Vienne 1973
IAEA SM 170.65.
- /2/ J. LINDHARD and al
"Integral equation governing radiation effects"
MAT. PHYS. MEDD DAN VID SELSK 33 N° 10 - 1903.
- /3/ E. E. BLOOM
"An Investigation of Fast Neutron Radiation
Damage in an Austenetic Stainless Steel"
DRNL-4580.
- /4/ J.C. ESTIOT, M. SALVATORES, J.P. TRAPP
"Basic Nuclear Data and the fast reactor shielding
design - Formulaire PROPANE D0"
Conf. Nucl. Cross Sections and Technology
Knoxville 22-26 October 1979.
- /5/ J.P. CHAUDAT and al
"Data adjustment for Fast Reactor Design"
N. Trans. Am. Nucl. Soc 27.877 (1977).
- /6/ H. DERRIEN, J.P. DOAT, E. FORT, D. LAFOND
"Evaluation of ^{237}Np Neutron Cross sections in the
energy range from 10^{-5} eV to 14 MeV"
Rapport INDCI (FR) 42/L.

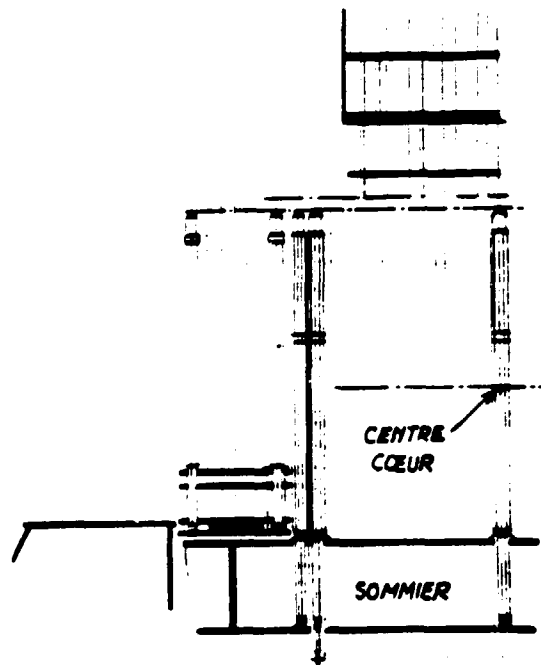


FIG.1 SUPER-PHENIX
LOCALISATION DU SOMMIER

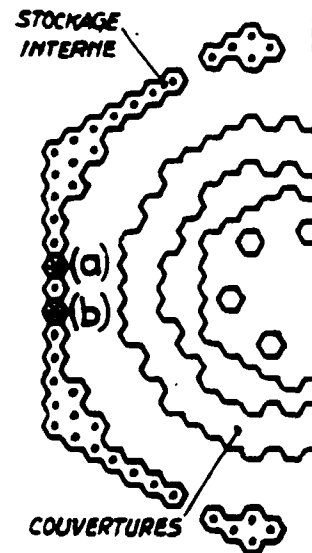


FIG.2. PHENIX EMBLEMES
DES IRRADIATIONS
DINOSAURE (a, b)

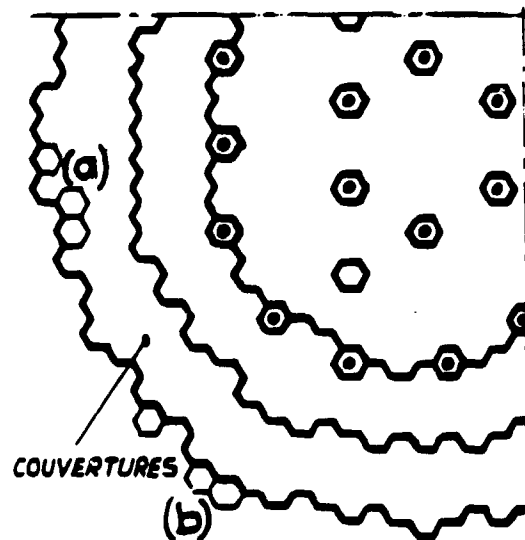


FIG.3. SUPER-PHENIX - EMBLEMES
CARACTERISTIQUES DES IRRADIATIONS
DIPLODOCUS (a) ET IGUANODON (b)

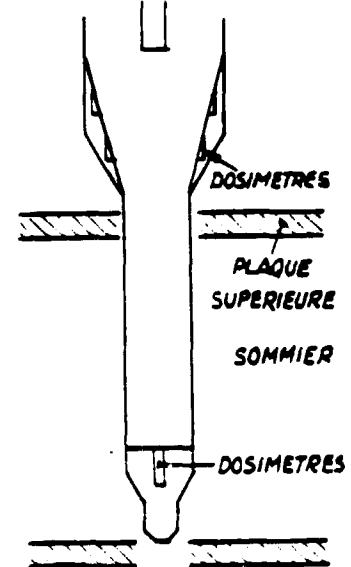


FIG.4. DOSIMETRIE DU SOMMIER
PIED SPECIAL D'ASSEMBLAGE
CONTENANT DES DOSIMETRES