

FRC EA TH - 544

Pub n° 98007079



FR9900299

PROJET DE FIN D'ETUDES

présenté

A L'INSTITUT NATIONAL DES SCIENCES ET TECHNIQUES NUCLEAIRES

Pour obtenir

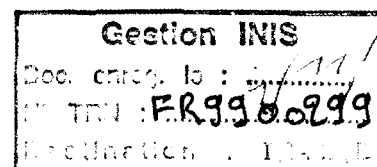
LE TITRE D'INGENIEUR EN GENIE ATOMIQUE

Option : MODELISATION DES REACTEURS

par

Mohamed Fadhel MALOUCH

Ingénieur en Génie Industriel



Sujet

**ETUDE PRELIMINAIRE
D'UN CONVERTISSEUR DE FLUX
POUR REACTEUR EXPERIMENTAL**

Soutenu à Saclay le 2 juillet 1998

Encadré par : M. Charles MORIN

Effectué à : DRN/DRE/SIREN
CEA - SACLAY

Rapporteur : M. Paul REUSS

PROJET DE FIN D'ETUDES

présenté

A L'INSTITUT NATIONAL DES SCIENCES ET TECHNIQUES NUCLEAIRES

Pour obtenir

LE TITRE D'INGENIEUR EN GENIE ATOMIQUE

Option : MODELISATION DES REACTEURS

par

Mohamed Fadhel MALOUCH

Ingénieur en Génie Industriel

Sujet

**ETUDE PRELIMINAIRE
D'UN CONVERTISSEUR DE FLUX
POUR REACTEUR EXPERIMENTAL**

Soutenu à Saclay le 2 juillet 1998

Encadré par : **M. Charles MORIN**

Effectué à : **DRN/DRE/SIREN
CEA - SACLAY**

Rapporteur : **M. Paul REUSS**

REMERCIEMENTS

Je tiens à exprimer tout d'abord ma profonde reconnaissance à **Messieurs Albert MEJANE** et **Alain ALBERMAN**, *Assistants de Chef du Département des Réacteurs Expérimentaux* (DRE) pour m'avoir offert la possibilité d'effectuer ce projet en Génie Atomique au sein du Département. Je les remercie pour leurs encouragements et leur suivi minutieux du travail réalisé.

J'adresse également mes vifs remerciements à **Monsieur Charles JOLY**, *Chef du Service d'Irradiations en Réacteur et d'Etudes Nucléaires* (SIREN), pour m'avoir accueilli dans son service avec une grande amabilité.

Je tiens à exprimer ma profonde gratitude à **Monsieur Charles MORIN**, *Chef du Laboratoire d'Examens, d'Analyse et de Calculs* (LEAC), pour avoir dirigé ce projet. C'est grâce à son encadrement scientifique, sa compétence, ainsi que ses bons conseils que ce travail a pu être mené à bien. Qu'il trouve ici mes sincères remerciements.

Je suis très reconnaissant à **Monsieur Jean-Christophe DAVID**, *Ingénieur au LEAC*, pour son suivi continu et son aide précieuse tout au long de ce projet. Ses remarques pertinentes et ses conseils judicieux m'ont été de grand intérêt.

Je tiens à remercier tous les ingénieurs du SIREN ou du DRE qui m'ont amicalement aidé dans l'élaboration de certains volets de ce travail, notamment **Messieurs Olivier DUCAUROY**, **Franck ROZENBLUM**, **Fabien MOREL** et **Gilles WALGENWITZ**. J'ai bien bénéficié de leurs remarques et leurs commentaires.

Je ne manquerai pas de rappeler la constante sympathie que j'ai trouvée auprès de toutes les personnes du DRE durant toute la période de ce projet.

RESUME

Le but de ce projet est de faire ressortir les principaux paramètres de dimensionnement d'un *convertisseur de flux* dans le coeur d'OSIRIS (*réacteur expérimental* de type piscine à eau légère et à coeur ouvert implanté au CEA-Saclay).

Ce convertisseur est destiné à *accroître localement le flux rapide* dans un *dispositif d'irradiation d'éprouvettes* en vue d'accroître les performances, notamment les dommages dans les éprouvettes irradiées.

Le travail réalisé a consisté à mener une étude préliminaire et globale qui s'intéresse aux principaux aspects du problème : neutroniques et thermohydrauliques.

Les résultats obtenus à l'issue des calculs neutroniques et thermohydrauliques (menés par les codes Apollo2, DAIXY, MERCURE5.3 et FLICA-3M), montrent qu'avec un convertisseur, en géométrie cylindrique, à cinq *couronnes fissiles*, on arrive à augmenter le flux rapide de l'ordre de 35% dans un dispositif d'irradiation placé au centre. L'échauffement gamma dans le dispositif irradié reste comparable à l'échauffement mesuré dans le coeur d'OSIRIS . En plus, on a une marge minimale à l'ébullition sous-saturée de 30°C pour la température de gaine des *couronnes fissiles* et 60% pour la limite maximale de puissance admissible.

MOTS CLEFS :

Convertisseur de flux, Flux rapide, Gain , OSIRIS, Réacteur expérimental, Dispositif d'irradiation d'éprouvettes, Couronnes fissiles.

TABLE DES MATIERES

INTRODUCTION GENERALE	1
1.PRESENTATION DU REACTEUR OSIRIS	2
1.1. PRÉSENTATION GÉNÉRALE	2
1.2. UTILISATION	2
1.3. PRINCIPALES CARACTÉRISTIQUES	2
1.4. SERVICES ASSOCIÉS	3
2. PROBLEMATIQUE ET PRESENTATION DU PROJET	4
2.1. PROBLÉMATIQUE	4
2.2. CONTRAINTES	4
2.3. OBJECTIFS DU PROJET	5
2.4. MÉTHODOLOGIE DE TRAVAIL	5
3.DISPOSITIF CONVERTISSEUR	6
3.1. INTRODUCTION	6
3.2. DISPOSITIFS D'IRRADIATION D'ÉPROUVETTES DANS LE COEUR	6
3.2.1. LA CAPSULE CHOUCA	6
3.2.3. LE PORTE-ÉCHANTILLON	6
3.3. DISPOSITIF CONVERTISSEUR	8
3.3.1. IDÉE DE BASE	8
3.3.2. CHOIX PRÉLIMINAIRES	8
3.3.3. SCHÉMA DU PRINCIPE	8
3.4. PARAMÈTRES D'INFLUENCE	9
3.4.1. EMBLEMMENT DU DISPOSITIF DANS LE COEUR	9
3.4.2. ÉPAISSEUR DES COURONNES COMBUSTIBLES	9
3.4.3. ÉPAISSEUR DES LAMES D'EAU	10
3.4.4. NOMBRE DE COURONNES FISSILES	10
3.4.5. TYPE DE COMBUSTIBLE DES COURONNES FISSILES	10
3.4.6. ÉVALUATION DE PERFORMANCE	10
3.5. CONCLUSION	10

4. ETUDE NEUTRONIQUE	11
4.1. INTRODUCTION	11
4.2. PRÉSENTATION DES CODES DE CALCUL	11
4.2.1. APOLLO2	11
4.2.2. DAIXY	12
4.3. MODÉLISATION NEUTRONIQUE	12
4.3.1. MODÉLISATION APOLLO2	12
4.3.2 . MODÉLISATION DAIXY	14
4.4. RÉSULTATS	15
4.4.1. COMBUSTIBLES UTILISÉS	15
4.4.2. APOLLO2	15
4.4.3. DAIXY	18
4.5. CONCLUSION	19
5. ETUDE DE L'ECHAUFFEMENT GAMMA	21
5.1. INTRODUCTION	21
5.2. PRÉSENTATION DES ÉCHAUFFEMENTS GAMMA	21
5.3. MERCURE5	21
5.4. MODÉLISATION ET MÉTHODE DE CALCUL	22
5.4.1. GÉOMÉTRIE UTILISÉE DANS MERCURE5	22
5.4.2. CALCUL DES SPECTRES	22
5.4.3. DISTRIBUTION SPATIALE DES SOURCES	23
5.5. RÉSULTATS	24
5.6. CONCLUSION	24
6. ETUDE THERMOHYDRAULIQUE	25
6.1. INTRODUCTION	25
6.2. PRÉSENTATION DU CODE FLICA-3M	25
6.3. MODÉLISATION	25
6.3.1. MODÉLISATION EN CANAUX	25
6.3.2. DISTRIBUTION DE PUISSANCE	26
6.3.3. HYPOTHÈSES ET DONNÉES DE CALCUL	27
6.4. RÉSULTATS	27
6.4.1. CRITÈRE DE BON REFROIDISSEMENT	27
6.4.2. ÉVOLUTION DE LA TEMPÉRATURE	28
6.4.3. LIMITE DE DENSITÉ DE PUISSANCE MAXIMALE	29
6.5 . CONCLUSION	29
CONCLUSION GENERALE	30

BIBLIOGRAPHIE

INTRODUCTION GENERALE

Il est nécessaire, dans la préparation des réacteurs du futur ou dans l'amélioration des performances du parc actuel, d'effectuer des essais aussi bien sur la physique des coeurs que sur la tenue sous rayonnements des éléments constitutifs.

Les réacteurs expérimentaux offrent la possibilité d'accueillir des expériences d'irradiations de matériaux ou de combustibles en reproduisant les conditions de fonctionnement des réacteurs de puissance.

Les réacteurs expérimentaux thermiques, en particulier de type piscine, présentent une souplesse supplémentaire de structure et des possibilités de modification de la configuration même du coeur qui permettent de les adapter facilement à des besoins technologiques très divers.

Certains dispositifs supplémentaires particuliers sont parfois utilisés pour obtenir un spectre donné, ou pour augmenter les performances des réacteurs, [5], [7].

C'est ainsi que l'on a eu l'idée d'installer, dans une pile de type piscine à *eau légère* et à coeur ouvert, un dispositif destiné à accroître les performances des expériences d'irradiations, *sous haut flux rapide*, des matériaux de structure.

En effet, on se propose à OSIRIS, réacteur expérimental implanté au CEA-Saclay, de mettre un dispositif, pour augmenter les performances des expériences d'irradiations en augmentant les dommages dans les éprouvettes de structure irradiées.

Ce dispositif « *convertisseur de flux* » servira donc à accroître localement le flux rapide dans le dispositif à irradier *dans le coeur*.

Dans la littérature, on retrouve des exemples de convertisseurs de flux qui sont installés dans des réacteurs expérimentaux, mais sont généralement hors coeur, [4]. Vu qu'il y a peu de travaux sur le sujet, on se propose, dans cette première phase du projet, de faire une étude préliminaire qui s'efforcera de valider l'idée de départ et de faire ressortir les principaux paramètres de dimensionnement d'un tel dispositif.

Notre travail consistera donc à mener une étude globale qui traitera les différents aspects d'un convertisseur de flux rapide dans le coeur d'OSIRIS. Notre rapport sera, par conséquent, organisé comme suit :

- deux premiers chapitres pour la présentation du réacteur OSIRIS et les dispositifs d'irradiations d'éprouvettes de structure utilisés actuellement dans le coeur,
- un troisième chapitre qui développera le schéma de principe d'un dispositif convertisseur, les principaux paramètres d'influence et la méthodologie de travail adoptée,
- un quatrième chapitre où on étudiera l'aspect neutronique du problème,
- un cinquième chapitre qui sera dédié aux calculs d'échauffement gamma dans le dispositif irradié,
- et un dernier chapitre qui sera consacré à l'étude de l'aspect thermohydraulique et au refroidissement du dispositif dans le coeur.

Chapitre 1

***PRESENTATION
DU REACTEUR OSIRIS***

1. PRESENTATION DU REACTEUR OSIRIS

1.1. PRESENTATION GENERALE

OSIRIS est un réacteur expérimental d'une puissance thermique de 70 MW implanté au CEA de SACLAY . C'est un réacteur de type piscine à eau légère et à coeur ouvert.

La première divergence d'OSIRIS a eu lieu le 8 Septembre 1966, [19].

1.2. UTILISATION

OSIRIS est un réacteur polyvalent, utilisé pour :

- les irradiations technologiques pour les besoins de l'industrie nucléaire ou ceux de la recherche fondamentale,
- la production de radio-éléments et de silicium dopé,
- l'analyse par activation.

1.3. PRINCIPALES CARACTERISTIQUES

Le coeur, compact ($57 \times 57 \times 63 \text{ cm}^3$) est composé de 38 éléments combustibles standards et de 6 éléments de commande avec absorbant en hafnium.

Il permet d'obtenir des flux de neutrons très élevés, supérieurs à $3.10^{14} \text{ n.cm}^{-2}.\text{s}^{-1}$.

- Puissance thermique : 70 MW
- Combustible : U_3SiAl Enrichi à 19,75%
- Modérateur : H_2O
- Réflecteur : H_2O , Béryllium
- Flux de neutrons thermiques : $3.10^{14} \text{ n.cm}^{-2}.\text{s}^{-1}$
- Flux de neutrons rapides ($> 0,1 \text{ MeV}$) : $4,5.10^{14} \text{ n.cm}^{-2}.\text{s}^{-1}$
- Température entrée coeur : 38° C
- Température sortie coeur : 47° C
- Température piscine : 35° C
- Débit primaire coeur : $5600 \text{ m}^3.\text{h}^{-1}$
- Flux calorifique moyen : 125 W.cm^{-2}
- Flux calorifique maximal : 310 W.cm^{-2}
- Température entrée secondaire : 23° C
- Température sortie secondaire : 36° C
- Débit secondaire du circuit coeur : $4200 \text{ m}^3.\text{h}^{-1}$

1.4. SERVICES ASSOCIES

OSIRIS est attaché au Département des Réacteurs Expérimentaux (DRE).

Le DRE, qui s'étend sur plusieurs centres, est l'un des six pôles de compétence sous la tutelle de la Direction des Réacteurs Nucléaires (DRN). Il a pour principale mission l'exploitation des réacteurs de recherche du CEA. Son activité se traduit par un support technologique aux réacteurs en service (Réacteurs EDF), l'amélioration des performances du combustible ainsi que la préparation des réacteurs du futur.

Deux services du DRE sont directement associés à OSIRIS, à savoir :

- le SEROS (Service d'Exploitation du Réacteur OSiris) qui est chargé de l'exploitation du réacteur et qui veille à son bon fonctionnement,
- et le SIREN (Service d'Irradiations en Réacteur et d'Etudes Nucléaires) qui a pour mission de réaliser dans OSIRIS, des irradiations de matériaux et de combustibles des réacteurs actuels ou futurs. Il conçoit, réalise, exploite les dispositifs expérimentaux.

C'est au sein de ce service que le présent projet est réalisé.

En outre, les deux services s'occupent aussi de l'exploitation du réacteur ISIS qui est la maquette neutronique d'OSIRIS.

ISIS sert à effectuer les essais de nouvelles configurations de coeur, de nouveaux combustibles ou d'expériences d'irradiations. Il fonctionne à la demande à une puissance maximale de 700 kW.

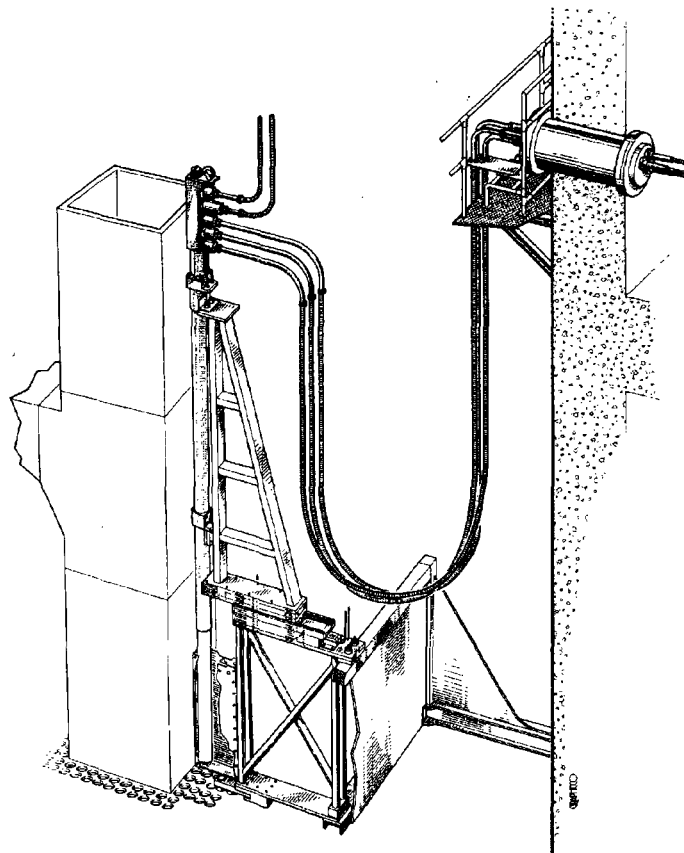


Fig 1.1 : Cœur OSIRIS (vu de la piscine)

Chapitre 2

***PROBLEMATIQUE
ET PRESENTATION
DU PROJET***

2. PROBLEMATIQUE ET PRESENTATION DU PROJET

2.1. PROBLEMATIQUE

Un des buts principaux d'OSIRIS est d'effectuer des essais et d'irradier sous haut flux de neutrons (rapides ou thermiques) des éléments combustibles et des matériaux de structure des centrales électronucléaires de puissance. Ces irradiations sont effectuées notamment pour le compte des partenaires de l'industrie nucléaire tels que EDF et FRAMATOME.

Le réacteur permet de fournir aux expérimentateurs des emplacements d'irradiation adaptés à chaque programme.

En effet, les expériences sont réalisées :

- soit à l'extérieur du caisson, où il y a 27 emplacements expérimentaux,
- soit dans le coeur à l'intérieur du caisson.

Le coeur dispose d'un certain nombre d'emplacements libres (3 ou 4) qui peuvent recevoir des dispositifs expérimentaux et qui sont particulièrement utilisés pour l'irradiation de matériaux de structure ou d'absorbants à fort flux rapide.

Les performances de ces dispositifs sont directement liées au niveau de flux rapide disponible pour l'irradiation. Etant donné qu'on travaille avec une puissance fixée à 70 MW, il est impossible d'augmenter un tel flux par augmentation de la puissance totale du réacteur.

On se propose donc, dans le cadre de ce projet, d'accroître localement de 40 à 50% le niveau du flux rapide (> 1 MeV) dans un dispositif à irradier dans le coeur ; et ceci en vue d'en accroître les performances, notamment l'augmentation des dommages (dpa) dans les éprouvettes de structures.

2.2. CONTRAINTES

L'augmentation du flux rapide et le durcissement du spectre neutronique dans le dispositif d'irradiation est sujet à un certain nombre de contraintes, à savoir:

- travailler avec une puissance fixée à 70 MW,
- utiliser les emplacements déjà disponibles dans le coeur,
- estimer l'échauffement Gamma dans le dispositif à irradier, de manière à pouvoir rester dans la gamme de températures acceptables pour l'irradiation ($280 \leq T \leq 350^\circ\text{C}$).
- s'assurer du bon refroidissement de l'ensemble.

2.3. OBJECTIFS DU PROJET

Il s'agira donc de définir les principaux paramètres de dimensionnement d'un dispositif *CONVERTISSEUR DE FLUX* permettant la conversion des neutrons thermiques en neutrons rapides afin d'accroître le niveau de flux rapide dans le dispositif d'irradiation.

En outre, il sera nécessaire de mener à bien une étude globale qui s'intéressera aux principaux aspects du problème, neutroniques et thermohydrauliques.

2.4. METHODOLOGIE DE TRAVAIL

Pour atteindre les objectifs fixés pour cette étude, on se propose de suivre la démarche de travail suivante :

- étudier le dispositif d'irradiation existant afin d'appréhender les paramètres de choix sur la géométrie du convertisseur et les matériaux à utiliser,
- réaliser une étude neutronique pour calculer les flux, les spectres et les puissances dans les zones à étudier à l'aide du code de transport APOLLO2 et du code de diffusion DAIXY,
- étudier l'échauffement Gamma dans le convertisseur et le dispositif d'irradiation afin de rester dans une gamme d'échauffement acceptable. Les calculs seront menés avec le code MERCURE5.3,
- réaliser une étude thermohydraulique pour vérifier les conditions de refroidissement du convertisseur et de la structure irradiée à l'aide du code FLICA3M.

Chapitre 3

***DISPOSITIF
CONVERTISSEUR***

3. DISPOSITIF CONVERTISSEUR

3.1. INTRODUCTION

Le but de ce chapitre est d'appréhender et définir les paramètres de choix concernant le dispositif convertisseur (géométrie, matériaux, etc...). Pour cela, on se propose d'abord d'étudier les dispositifs d'irradiation d'éprouvettes dans le coeur, notamment la *partie en pile* pour avoir une idée générale sur les méthodes et les moyens utilisés pour effectuer ce genre d'expériences. Ensuite, on développera de manière plus détaillée le concept du dispositif convertisseur en l'adaptant à son contexte dans le coeur. Finalement, on essaiera de déduire les différents paramètres d'influence qui s'avéreront pertinents pour la suite de l'étude. Toutes ces étapes sont essentielles pour pouvoir modéliser le problème et mener à bien une étude paramétrique.

3.2. DISPOSITIFS D'IRRADIATION D'ÉPROUVETTES DANS LE COEUR

L'équipement utilisé comprend généralement une capsule d'irradiation type CHOUCA, l'éprouvette à irradier ou éventuellement le porte-échantillon qui tient et positionne plusieurs étages d'éprouvettes à la fois, ainsi que les installations hors pile habituelles des chouca, [8]. Le dispositif occupe un canal d'une boîte à eau expérimentale au coeur OSIRIS.

Dans ce qui suit, on donne une description pour la partie en pile (dans le coeur).

3.2.1. La capsule CHOUCA

Sous flux, la capsule CHOUCA (fig 3.1) est constituée de deux enveloppes séparées par une barrière thermique (d'épaisseur de l'ordre de 0,2 mm) rempli en Hélium ou en Azote :

- un tube interne (tube de force) en acier inoxydable, sur lequel peuvent être bobinés verticalement des éléments chauffants et complété par un shoopage de zircone.
- un tube externe (tube calandre) en acier inoxydable.

Sur la hauteur (≈ 600 mm) où elle est présente, l'épaisseur de la couche de zircone est variable en fonction de l'épaisseur de la lame de gaz. Ceci permet, en l'absence des fours, d'obtenir une distribution verticale homogène des températures, en compensant la forme du flux du réacteur OSIRIS.

3.2.3. Le porte-échantillon

En partie basse, les échantillons (fig 3.1) sont regroupés en plusieurs étages sur une hauteur de l'ordre de 450 mm. Dans chaque étage, les éprouvettes sont disposées autour du tube central, emboîtées entre des plateaux supports. La température peut atteindre des valeurs de l'ordre de 350° C sur les éprouvettes. L'ensemble est plongé dans du NaK (56% Potassium, 44% Sodium) afin d'avoir une bonne diffusion de la chaleur vers l'extérieur.

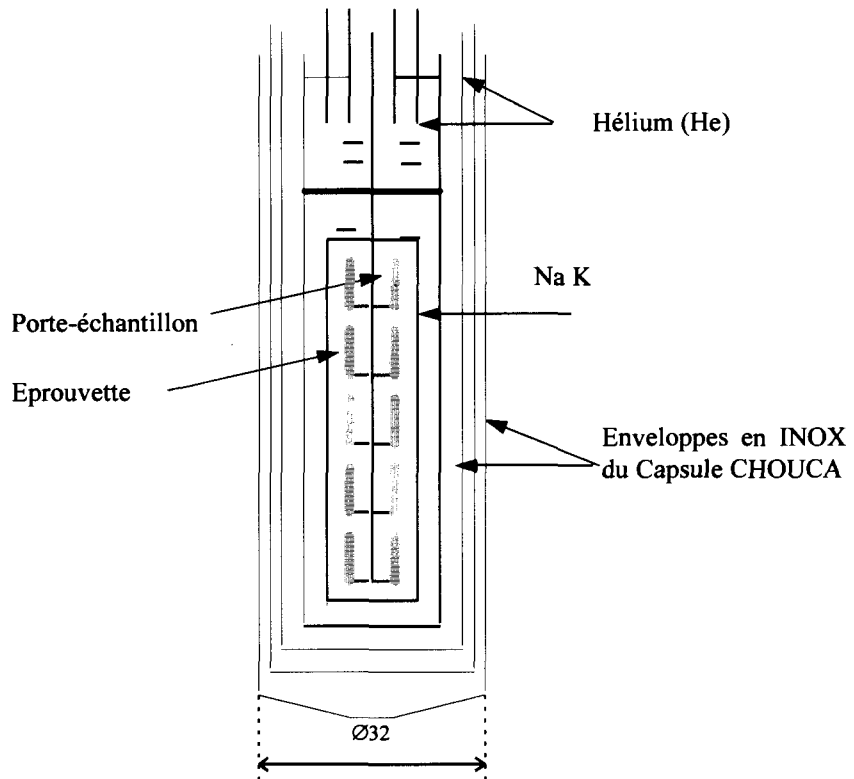


Fig 3.1 : Capsule d'irradiation de type CHOUCA

3.2.3. La boîte à eau

C'est une boîte de section carrée de 82,4 mm placée dans un emplacement du casier alvéolé de section carrée de 84,4 mm (fig 3.2). Elle est composée d'AG3 (97% Aluminium, 3% Magnésium). Elle contient jusqu'à quatre trous d'eau (généralement de diamètre Ø37 mm) qui vont accueillir les dispositifs d'irradiation type CHOUCA (un dispositif par trou).

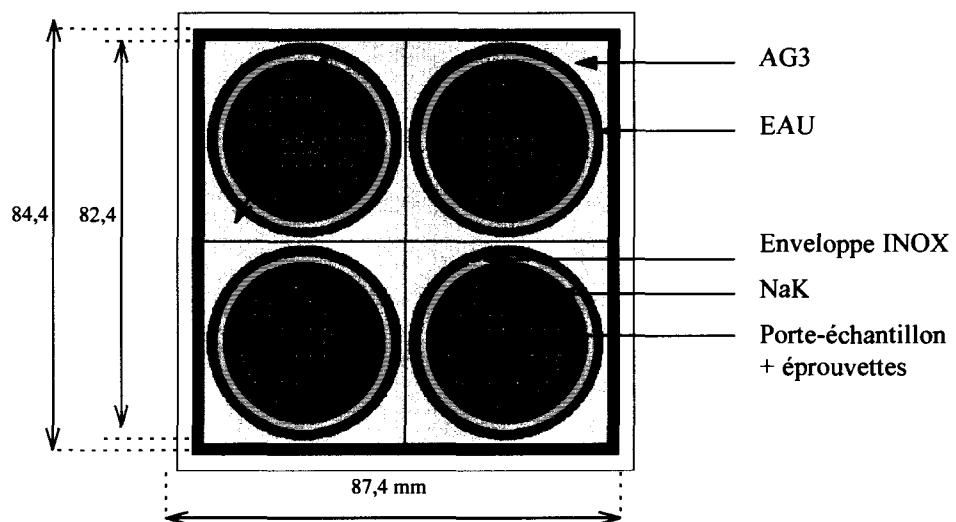


Fig 3.2 : Boîte à eau

3.3. DISPOSITIF CONVERTISSEUR

3.3.1. Idée de base

Pour accroître localement le flux rapide dans les éprouvettes à irradier, une idée fortement envisageable est de mettre de l'Uranium plus ou moins enrichi autour du dispositif d'irradiation. De cette manière, on bénéficiera des neutrons rapides issus directement des réactions de fissions dans cette zone.

3.3.2. Choix préliminaires

En partant de l'idée de base pour le convertisseur et vu la configuration existante de l'équipement d'irradiation, des choix préliminaires sont à considérer pour la présente phase d'étude.

En effet, on se propose d'adopter une géométrie cylindrique pour le convertisseur entourant le dispositif à irradier, et ceci dans le but de profiter au maximum du flux rapide ainsi produit.

En outre, on se restreindra à un seul dispositif d'irradiation au milieu de la boîte à eau pour des problèmes d'encombrement dus à l'espace occupé par le combustible.

3.3.3. Schéma du principe

Le schéma que l'on propose pour le convertisseur est de mettre le dispositif d'irradiation au milieu de la boîte à eau et de l'entourer avec une ou plusieurs couronnes fissiles, comme le présente la figure suivante:

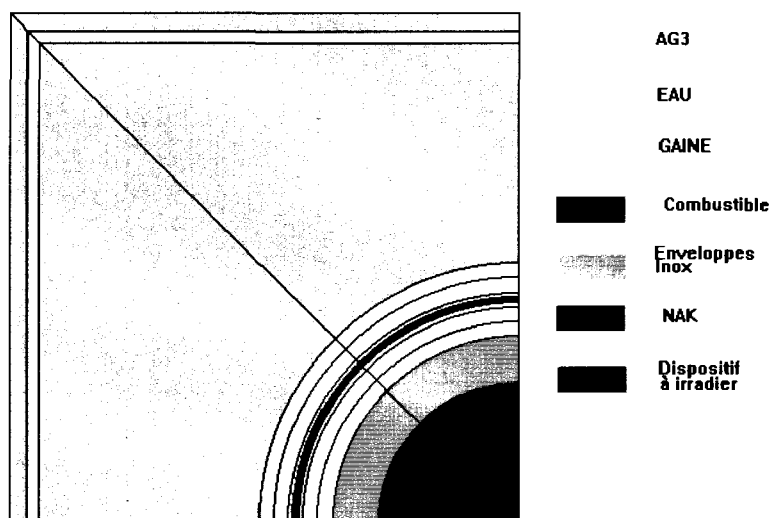


Fig 3.3 : Schéma d'un convertisseur à une couronne fissile
(Représentation d'un quart d'emplacement)

3.4. PARAMETRES D'INFLUENCE

Une fois que le schéma de principe du convertisseur a été défini, on a cherché à déterminer les principaux paramètres d'influence dont dépend la performance du convertisseur.

Finalement, on a relevé un certain nombre de paramètres qui sont développés dans les paragraphes suivants.

3.4.1. Emplacement du dispositif dans le coeur

Comme la figure (fig 3.4) le montre, le coeur dispose actuellement de quatre emplacements possibles pour recevoir des dispositifs expérimentaux (64, 52, 44 et 24). Néanmoins, les blocs de béryllium peuvent être remplacés par des expériences en cas de nécessité.

Dans le but de bénéficier du fort flux rapide qui règne sur le zone centrale du coeur, on se propose de mettre le dispositif convertisseur en position « 64 ». Il bénéficiera aussi d'un niveau suffisant de flux thermique nécessaire pour les réactions de fission.

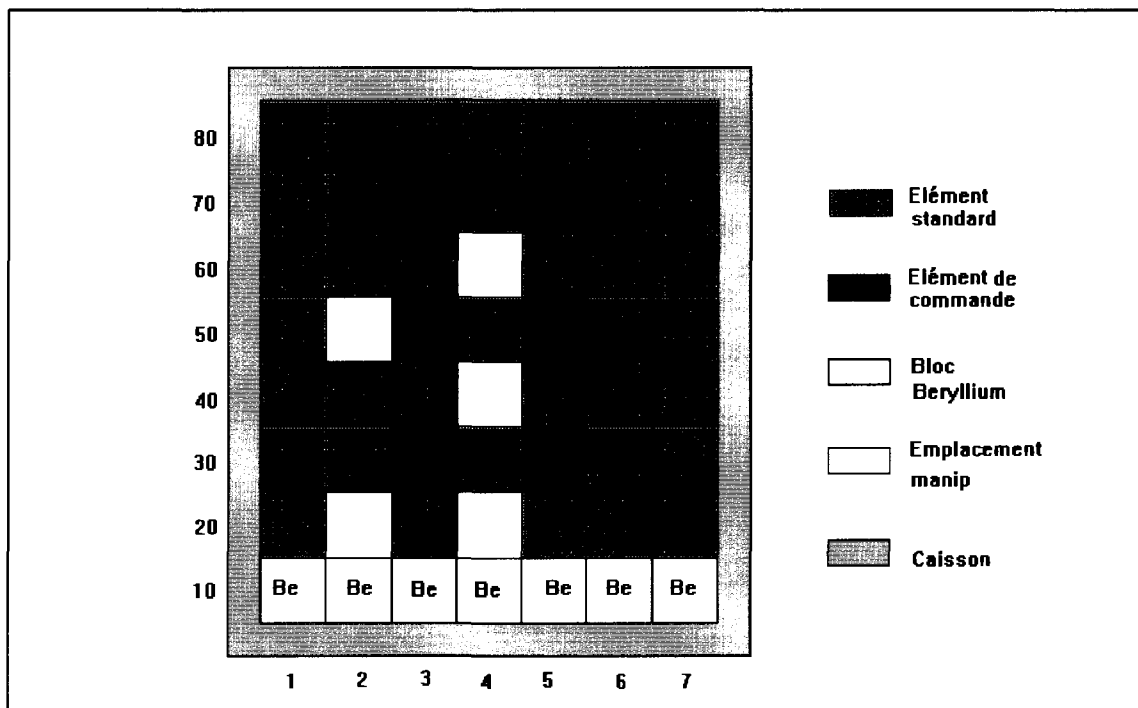


Fig 3.4 : Coupe horizontale du cœur OSIRIS

3.4.2. Epaisseur des couronnes combustibles

Pour cette étude, on adoptera les mêmes dimensions que les plaques standards d'OSIRIS, c'est à dire:

- 0,51 mm comme épaisseur de la partie fissile,
- et 0,38 mm comme épaisseur de la gaine (en Aluminium).

Ce qui fera une épaisseur totale de 1,27mm.

3.4.3. Epaisseur des lames d'eau

L'eau joue un double rôle: modérateur et caloporteur. On a intérêt, d'une part à diminuer l'épaisseur des lames d'eau entre couronnes fissiles pour réduire l'effet modérateur qui tend à diminuer le niveau de flux rapide, d'autre part, il faut avoir suffisamment d'eau pour bien refroidir l'ensemble du dispositif.

On adoptera une épaisseur des lames d'eau de 2,5 mm qui est quasiment la même épaisseur qu'entre les plaques standards d'OSIRIS (2,46 mm).

3.4.4. Nombre de couronnes fissiles

Vu les dimensions adoptées pour les couronnes fissiles et les lames d'eau, la boîte à eau peut contenir jusqu'à cinq couronnes autour de dispositif d'irradiation. Donc, dans la suite de l'étude, on jouera sur le nombre de couronnes en le faisant varier de 1 à 5.

3.4.5. Type de combustible des couronnes fissiles

Le combustible utilisé actuellement à OSIRIS est le Siliciure (U_3SiAl) enrichi à 19,75%. Une première idée qui vient à l'esprit est d'essayer ce type de combustible dans le convertisseur. Une autre alternative possible et qui paraît intéressante est d'utiliser un combustible fortement enrichi tel que l'UAl à 93% utilisé dans certains réacteurs expérimentaux. Ceci a pour effet de réduire la capture due à l' U^{238} .

3.4.6. Evaluation de performance

Tout l'intérêt du convertisseur de flux est d'accroître localement le flux rapide dans le dispositif à irradier. Pour évaluer la performance d'un tel convertisseur, on définit un paramètre d'évaluation baptisé *GAIN* :

$$GAIN = \frac{\text{Flux rapide au centre du dispositif à irradier avec convertisseur}}{\text{Flux rapide au centre du dispositif à irradier sans convertisseur}}$$

Le convertisseur sera d'autant plus performant que le gain sera élevé (> 1).

3.5. CONCLUSION

Après avoir défini le schéma de principe du convertisseur, adopté les différents choix et fixé les principaux paramètres d'influence, on peut passer à la modélisation du dispositif et entamer l'étude neutronique et puis à l'étude thermohydraulique.

Chapitre 4

***ETUDE
NEUTRONIQUE***

4. ETUDE NEUTRONIQUE

4.1. INTRODUCTION

Le but de l'étude neutronique est d'une part d'effectuer les calculs de flux et de puissances pour évaluer et comparer les performances des différentes configurations envisageables pour le convertisseur, d'autre part, de fournir les données nécessaires pour les étapes suivantes de l'étude.

Pour ce faire, on se propose d'utiliser successivement deux codes de calcul, à savoir un code de transport : Apollo2 ; et un code de diffusion : Daixy.

Apollo2 servira à calculer, dans le cadre de la théorie du transport, le flux neutronique dans les géométries à étudier. Cela permettra d'avoir une première comparaison entre les cas correspondants. Ce code sera employé aussi pour obtenir les constantes neutroniques et les coefficients de diffusion nécessaires pour Daixy.

Daixy sera utilisé par la suite pour traiter les cas qui s'avéreront les plus intéressants. En effet, ce code servira à calculer, dans le cadre de la théorie de la diffusion, le flux et les puissances neutroniques dans une configuration réelle du coeur. En outre, il permettra d'avoir à la fois la répartition spatiale de flux et des sources pour le calcul de l'échauffement Gamma et la distribution de la puissance totale dans le coeur pour l'étude thermohydraulique.

Dans ce qui suit, on exposera, après une présentation succincte des deux codes, la méthode que l'on a utilisée pour la modélisation du problème, ainsi que les principaux résultats obtenus.

4.2. PRESENTATION DES CODES DE CALCUL

4.2.1. APOLLO2

Le code Apollo2 est un code modulaire de transport multigroupe, [13]. Ce code résout, par un formalisme multigroupe et dans une géométrie donnée, l'équation de Boltzmann soit sous sa forme intégrale :

$$\Phi(\vec{r}, v, \vec{\Omega}, t) = \int_0^\infty e^{-\tilde{\Sigma}s} q(\vec{r} - s\vec{\Omega}, v, \vec{\Omega}, t - \frac{s}{v}) ds$$

$$\text{avec } q(\vec{r}, v, \vec{\Omega}, t) = \int_0^\infty dv' \int_{4\pi} d^2\Omega' \Sigma_s(\vec{r}, v' \rightarrow v, \vec{\Omega}' \rightarrow \vec{\Omega}) \Phi(\vec{r}, v', \vec{\Omega}', t) + S(\vec{r}, v, \vec{\Omega}, t)$$

$$\text{et } \tilde{\Sigma}s = \int_M^A \Sigma_t(\vec{r}, v, \vec{\Omega}) ds \quad : \text{Parcours optique entre } M(\vec{r} - s\vec{\Omega}) \text{ et } A(\vec{r})$$

en utilisant le formalisme des probabilités de collision, soit sous sa forme intégral-différentielle :

$$-\vec{\Omega} \cdot \text{grad} \Phi(\vec{r}, v, \vec{\Omega}, t) - \Sigma_t(\vec{r}, v, \vec{\Omega}, t) \Phi(\vec{r}, v, \vec{\Omega}, t) + \int_0^\infty dv' \int_{4\pi} d^2\Omega' \Sigma_s(\vec{r}, v' \rightarrow v, \vec{\Omega}' \rightarrow \vec{\Omega}, t) \Phi(\vec{r}, v', \vec{\Omega}', t) + S(\vec{r}, v, \vec{\Omega}, t) = \frac{1}{v} \frac{\partial}{\partial t} \Phi(\vec{r}, v, \vec{\Omega}, t)$$

en utilisant des méthodes Sn à différences finies ou nodales.

Le code dispose actuellement d'une bibliothèque de données et constantes neutroniques relatives à 99 ou 172 groupes.

Le code permet d'effectuer des calculs d'homogénéisation par équivalence transport-transport et transport-diffusion. Il dispose aussi de méthodes de condensation et homogénéisation par pondération par les flux, [13].

4.2.2. DAIXY

Daixy est un code de diffusion multigroupe, [15]. Ce code résout, par un formalisme multigroupe et dans une géométrie décrite en coordonnées XY, l'équation de diffusion :

$$D \Delta \Phi - \Sigma_a \Phi + S = \frac{1}{v} \frac{\partial \Phi}{\partial t}$$

en utilisant la méthode de différences finies, [1].

Le nombre maximum de groupes est quatre. En fait, ce sont les quatre macrogroupes classiques qui sont utilisés dans Daixy (10 MeV - 0,907 MeV - 5 KeV - 0,625 eV - $1,1 \cdot 10^{-4}$ eV).

Le code permet d'effectuer des calculs de puissance et de répartition spatiale des sources et de flux.

4.3. MODELISATION NEUTRONIQUE

4.3.1. Modélisation Apollo2

- Choix d'une expérience de référence d'irradiation :

Pour pouvoir déterminer le gain du convertisseur dans chaque cas, il faut calculer le flux au centre du dispositif à irradier à la fois avec et sans convertisseur. Par conséquent, il sera nécessaire de fixer une expérience dans le coeur (sans convertisseur) qui servira comme référence pour le calcul de gain.

Pour cela, on adoptera la configuration de la figure (fig 4.1-a-) en prenant comme dispositif à irradier un barreau homogénéisé (de diamètre 20 mm) constitué d'un mélange de Zircaloy et d'Inox dans les mêmes proportions volumiques. Ce barreau sera alors entouré d'une couche de NaK (d'épaisseur 2 mm) et d'une seule enveloppe en Inox (d'épaisseur de 4 mm) obtenue par l'homogénéisation des deux enveloppes en Inox et de la lame de gaz.

L'ensemble du dispositif d'irradiation fera un diamètre extérieur de 32 mm.

L'expérience de référence sera alors composée d'une boîte à eau à 4 trous CHOUCA (de diamètre 37 mm), dont chacun contiendra un dispositif d'irradiation décrit ci-dessus, (fig 4.1-a-).

Le flux de référence sera pris comme le flux moyen sur tout le milieu à irradier.

Le même dispositif d'irradiation sera adopté pour les cas avec convertisseur (fig 4.1-b-).

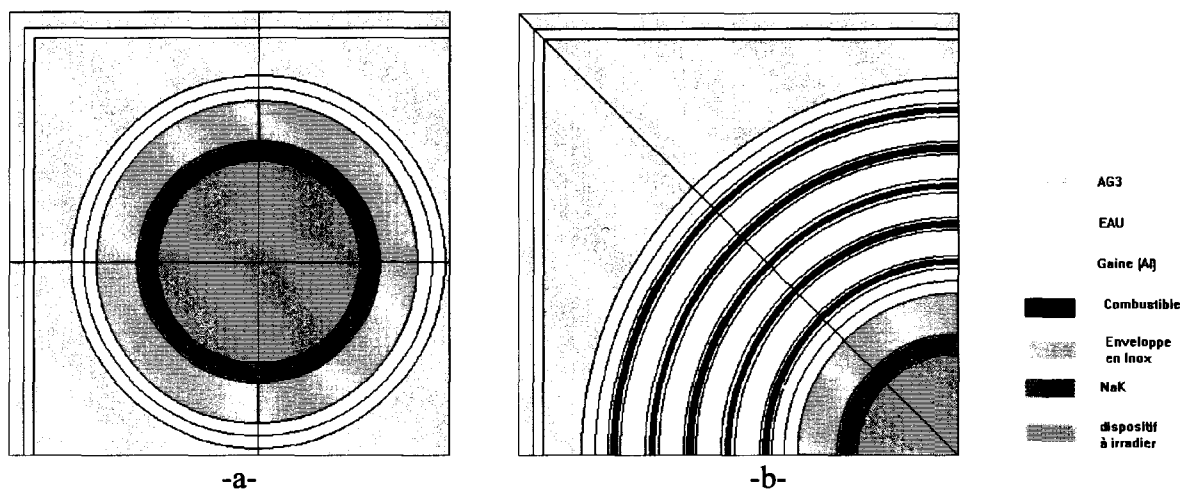


Fig 4.1 -a- : Schéma d'expérience de référence
 -b- : Schéma d'un convertisseur à 5 couronnes
 (Représentation d'un quart d'emplacement)

• Représentation de l'environnement coeur-piscine :

Pour obtenir des flux et des constantes neutroniques qui soient les plus réalistes que possibles, on se propose d'effectuer les calculs en mettant le dispositif convertisseur dans son environnement : coeur et piscine.

Pour ce faire, on entoure successivement, comme le montre la figure (fig 4.2), l'emplacement expérimental par :

- des éléments combustibles standards, dont chacun est composé d'une zone fissile, de deux zones « plaques de rives », de deux zones « extrémité », et de quatre zones « coins »,
- une zone fissile homogène qui représente le reste du coeur,
- une zone représentant le caisson,
- et de l'eau pour représenter la piscine.

Finalement, les conditions aux limites (vide et réflexion) sont indiquées sur la figure (fig 4.2).

Les données neutroniques correspondant aux zones homogénéisées mentionnées ci-dessus sont extraites de la procédure de calcul de coeurs OSIRIS et ISIS, [9].

Le maillage de la géométrie ainsi définie est d'autant plus fin que l'on se rapproche de l'emplacement du dispositif convertisseur au centre(fig 4.2).

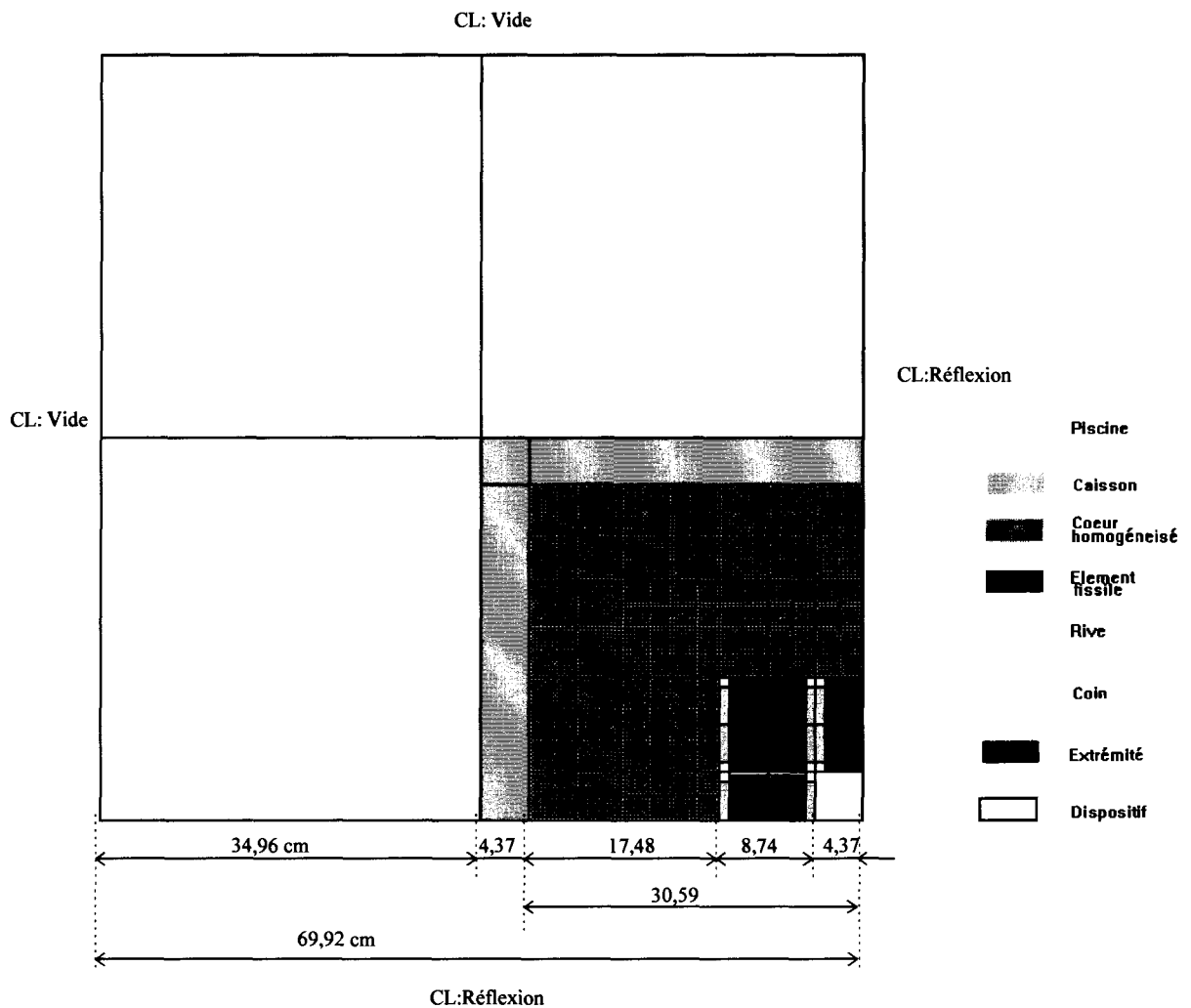


Fig 4.2 : Environnement cœur-piscine pour apollo2
(Représentation d'un quart de cœur)

- Bibliothèque utilisée :

Pour les données neutroniques concernant les différents isotopes dont on aura besoin dans les calculs, on a eu recours à la bibliothèque CEA_93 à 99 Groupes, [13].

- Définition des milieux dans Apollo :

Les milieux sont constitués dans Apollo à partir des mélanges massiques ou atomiques dans les proportions correspondantes. En plus, dans chaque milieu, on a mis, en proportion très faible voire négligeable, des noyaux du corps « idéal » de section d'absorption en $1/v$. Ceci va nous permettre d'observer le décalage du spectre vers les énergies hautes ou basses. En outre, on aura besoin des caractéristiques neutroniques de ce noyau en $1/v$ qui déterminent les flux thermiques nécessaires pour les calculs d'échauffement Gamma dû à la capture de neutrons.

- Autoprotection :

Le dispositif convertisseur contient des noyaux lourds résonnants tels que l' U_{235} , l' U_{238} , le Zr, etc.. Pour cette raison, on a fait appel à l'autoprotection de ces noyaux dans nos calculs Apollo.

- Calcul de flux dans Apollo :

Pour le calcul de flux neutronique dans les différents milieux, on a employé la méthode des probabilités de collision, [14].

- Normalisation de flux :

Apollo sert à effectuer une étude comparative entre les différents cas et à fournir les sections efficaces macroscopiques nécessaires pour le code Daixy. La normalisation de flux n'intervient pas à ce stade de calcul.

- Sorties des résultats :

Pour des besoins de calculs postérieurs, on a établi des sorties à 1, 4 et 99 groupes pour les milieux ou les regroupements de milieux.

4.3.2 . Modélisation DAIXY

- Représentation du coeur OSIRIS :

Dans la procédure de calcul d'OSIRIS, [9], le coeur est composé de plusieurs régions pour tenir compte des différences entre les spectres des plaques de rives et de la zone combustible pour les éléments standards et les éléments de commande (en positions hautes et basses).

On a repris la même représentation (utilisée pour le calcul d'un cycle récent sur OSIRIS), tout en insérant le dispositif convertisseur dans l'emplacement 64.

- Représentation du dispositif :

Dans Daixy, on représente le dispositif convertisseur par quatre régions obtenues par regroupement et homogénéisation des différents milieux employés dans Apollo.

En effet, de l'intérieur vers l'extérieur, on trouve :

- la région 1 qui contient le dispositif à irradier,
- la région 2 qui regroupe le Nak, l'enveloppe en inox et une demi-lame d'eau,
- la région 3 qui regroupe les couronnes fissiles avec de l'eau autour,
- et la région 4 qui contient le reste de la boîte à eau.

- Données neutroniques des régions Daixy :

Les propriétés neutroniques des régions sont déduites de calculs Apollo. En effet, les sections efficaces macroscopiques (d'absorption, de transfert et de fission) sont directement tirées des sorties Apollo en quatre groupes pour les régions en question. Les coefficients de diffusion sont obtenus à partir d'un nouveau calcul Apollo2 en 1D.

4.4. RESULTATS

4.4.1. combustibles utilisés

Deux types de combustibles ont été utilisés pour le calcul, à savoir l'UAl 93% et le siliciure 20% dont les compositions sont données dans le tableau suivant :

Combustible	Concentration (10^{24} noyaux/cm ³)			
	U ₂₃₅	U ₂₃₈	Al	Si
UAl 93 %	$1,9905 \cdot 10^{-3}$	$0,1479 \cdot 10^{-3}$	$5,1930 \cdot 10^{-2}$	-
U ₃ SiAl 20 %	$2,4293 \cdot 10^{-3}$	$9,7180 \cdot 10^{-3}$	$2,9501 \cdot 10^{-2}$	$8,2474 \cdot 10^{-3}$

Table 4.1 : Concentrations des combustibles utilisés

4.4.2. Apollo2

- Gain :

Rappelons que le gain est le rapport des flux rapides (> 1 MeV) dans le dispositif à irradier avec et sans convertisseur. Le flux au dessus de 1 MeV est obtenu à partir du flux rapide Apollo (sortie en 4 groupes) pris entre 10 et 0,907 MeV (Φ_1) moyennant une correction de 5%.

En faisant varier le nombre de couronnes de 1 à 5, on obtient la figure suivante qui montre la variation du gain obtenu dans le cas de l'UAl et du siliciure.

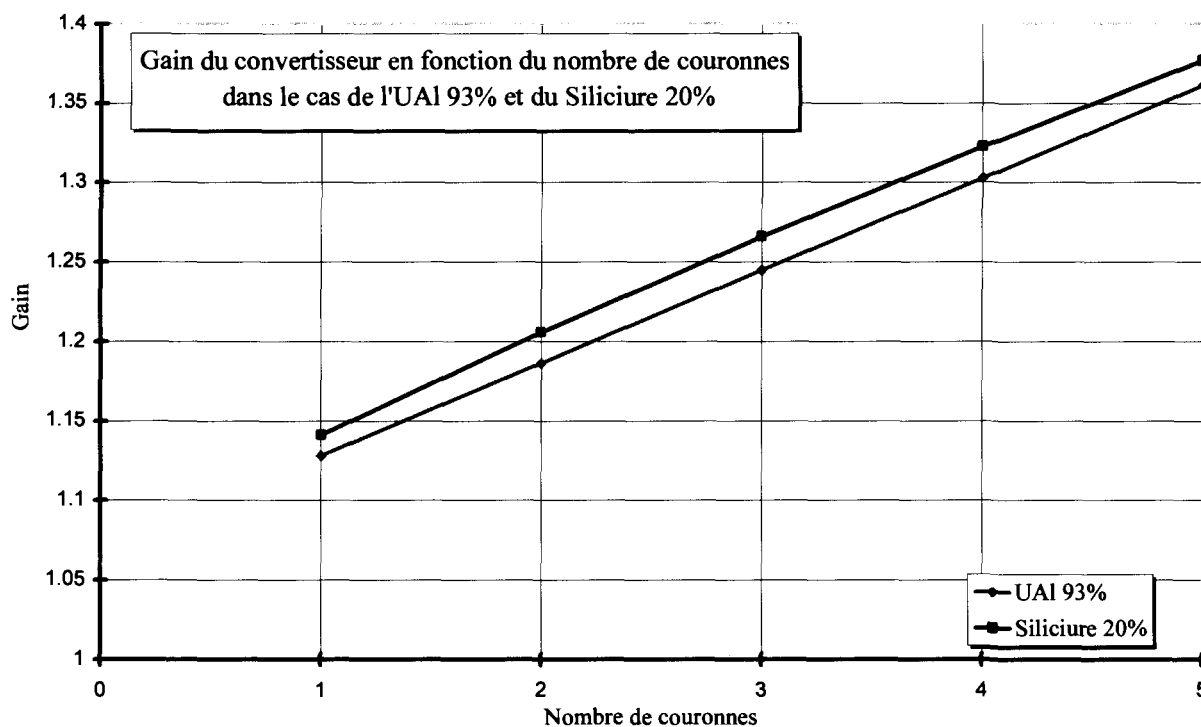


Fig 4.3 : Gain du convertisseur en fonction du nombre de couronnes

On remarque que la variation du gain est quasiment linéaire en fonction du nombre de couronnes et que l'on peut atteindre un gain de 1,36 (UAl) ou de 1,37 (siliciure) avec 5 couronnes.

En plus, le gain obtenu dans le cas du siliciure est légèrement supérieur à celui obtenu dans le cas de l'UAl pour un nombre de couronnes fixé. Le fait que la concentration de l'U₂₃₅ dans le siliciure soit légèrement supérieure à celle dans l'UAl pourrait en être à l'origine.

La linéarité des courbes peut être expliquée par une compensation mutuelle entre l'éloignement de chaque couronne du centre de dispositif irradié et l'augmentation de la quantité de la matière fissile qu'elle contient.

En d'autres termes, le même poids a été attribué pour toutes les couronnes. Mais, en toute rigueur, le paramètre « couronne » ou « nombre de couronne » est complexe, car il renferme beaucoup des notions de volume, quantité d'uranium, éloignement par rapport au milieu à irradier.

Pour essayer d'étudier le gain d'une façon moins dépendante du nombre des couronnes, on s'est proposé de représenter la variation du Gain en fonction du taux de fission global dans l'ensemble des couronnes (fig 4.4) vu que les neutrons rapides sont issus exclusivement des réactions de fission.

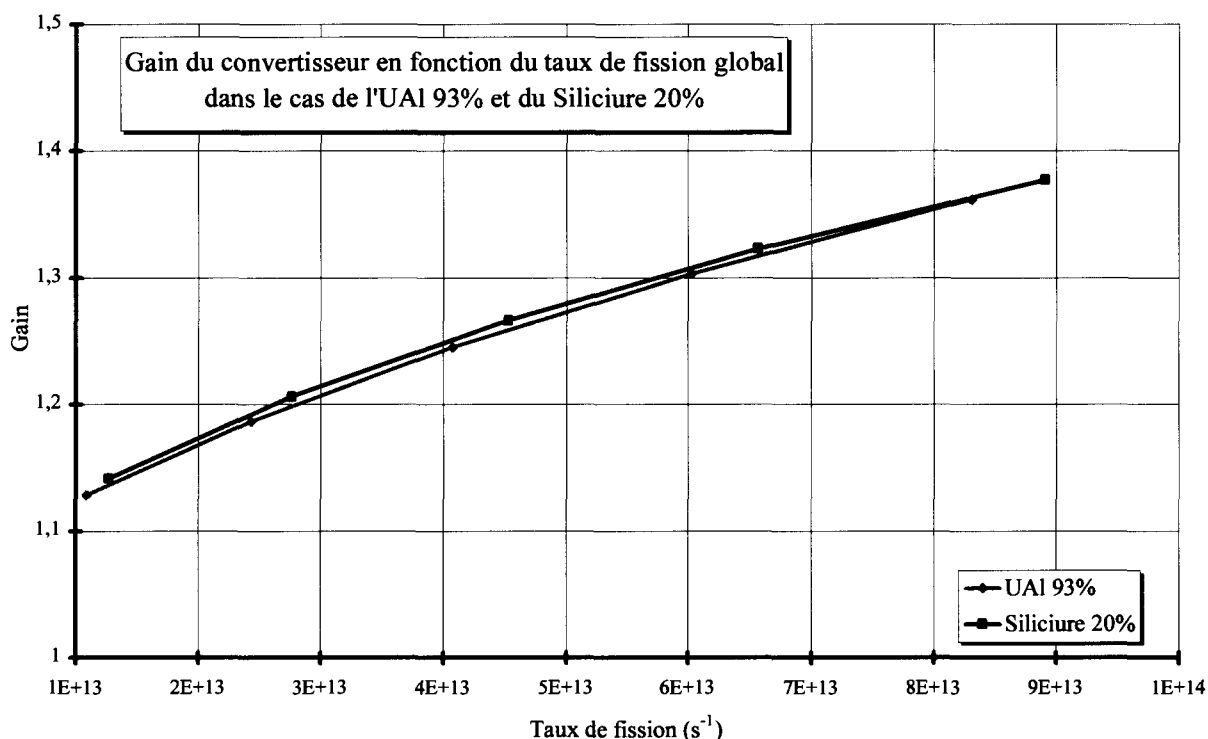


Fig 4.4 : Gain du convertisseur en fonction de taux de fission global

Avec la représentation de la figure (4.4), les deux courbes se rejoignent. On vérifie bien l'influence directe du taux de fission sur le gain.

En plus le gain perd l'aspect de linéarité et il a même tendance à atteindre une certaine limite avec l'augmentation du taux de fission. En effet, plus les couronnes sont éloignées du centre, moins elles sont rentables en terme de rapport gain/taux de fission, car les neutrons créés dans les grandes couronnes trouveront plus d'obstacles neutroniques (absorption, thermalisation, etc...) pour atteindre le dispositif irradié.

Pour analyser de près la variation des taux de fission au niveau des couronnes, on donne dans les tables (4.2) et (4.3) les taux de fission dans chaque couronne, pour une configuration et un type de combustible donné.

UAl 93 %		Taux de fission (s^{-1})				
Couronne	Isotope fissile	cas 5 couronnes	cas 4 couronnes	cas 3 couronnes	cas 2 couronnes	cas 1 couronne
c1	U_{235}	1.09E+13	1.07E+13	1.07E+13	1.07E+13	1.08E+13
	U_{238}	1.18E+09	1.12E+09	9.48E+09	1.01E+09	9.41E+08
c2	U_{235}	1.37E+13	1.35E+13	1.35E+13	1.36E+13	
	U_{238}	1.45E+09	1.38E+09	1.30E+09	1.22E+09	
c3	U_{235}	1.65E+13	1.64E+13	1.65E+13		
	U_{238}	1.70E+09	1.61E+09	1.51E+09		
c4	U_{235}	1.94E+13	1.95E+13			
	U_{238}	1.92E+09	1.80E+09			
c5	U_{235}	2.27E+13				
	U_{238}	2.12E+09				
Total		8.31E+13	6.02E+13	4.07E+13	2.43E+13	1.08E+13

Table 4.2 : Taux de fission des 5 couronnes en UAl

Siliciure 20 %		Taux de fission (s^{-1})				
Couronne	Isotope fissile	cas 5 couronnes	cas 4 couronnes	cas 3 couronnes	cas 2 couronnes	cas 1 couronne
c1	U_{235}	1.14E+13	1.15E+13	1.17E+13	1.20E+13	1.26E+13
	U_{238}	7.84E+10	7.52E+10	7.19E+10	6.81E+10	6.35E+10
c2	U_{235}	1.43E+13	1.45E+13	1.49E+13	1.55E+13	
	U_{238}	9.63E+10	9.23E+10	8.78E+10	8.22E+10	
c3	U_{235}	1.74E+13	1.78E+13	1.85E+13		
	U_{238}	1.13E+11	1.08E+11	1.01E+11		
c4	U_{235}	2.08E+13	2.16E+13			
	U_{238}	1.28E+11	1.21E+11			
c5	U_{235}	2.47E+13				
	U_{238}	1.41E+11				
Total		8.91E+13	6.57E+13	4.53E+13	2.77E+13	1.26E+13

Table 4.3 : Taux de fission des 5 couronnes en Siliciure

Déjà, on voit bien que les taux de fission dus à l' U_{238} sont négligeables devant ceux dus à l' U_{235} (un rapport de 1/1000 à 1/100). Donc, on retrouve bien un résultat connu pour les réacteur thermique.

Néanmoins les taux de fission de l' U_{238} augmentent avec le nombre de couronnes utilisées. Ceci confirme bien qu'il y a plus de neutrons rapides qui règnent dans le convertisseur.

En ce qui concerne les taux de fission de l' U_{235} dans les couronnes, ils sont quasiment constants (à 2% près dans le cas de l'UAl et à 10% près dans le cas du siliciure). Donc, le fait d'ajouter une couronne de plus n'altère pas apparemment les taux de fission dans les couronnes déjà existantes. Ceci explique la linéarité du gain en fonction des couronnes, car leurs effets sur le gain se superposent.

- Spectre dans le dispositif à irradier :

A côté du gain, on s'est intéressé à regarder la forme du spectre dans le dispositif à irradier dans trois cas différents, à savoir :

- cas de référence (sans convertisseur),
- 5 couronnes d'UAl,
- et 5 couronnes de siliciure.

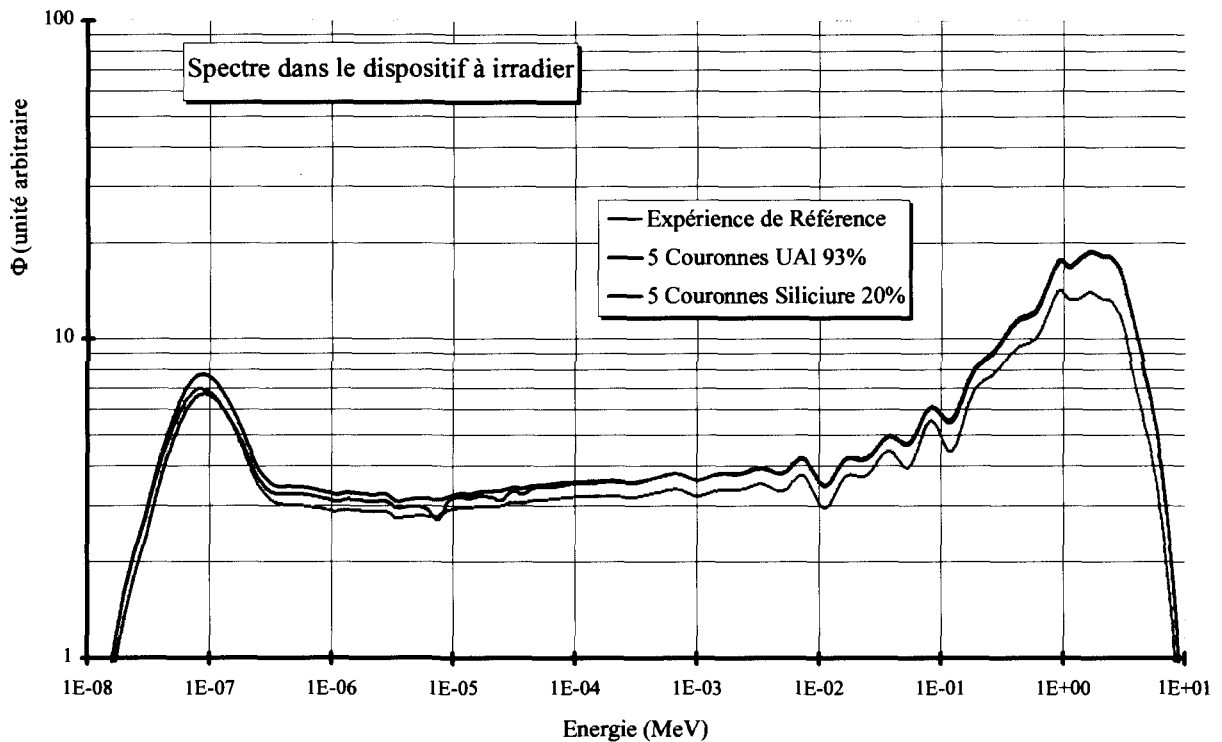


Fig 4.5 : Spectre dans le dispositif irradié

Comme la figure (fig 4.5) le montre, le spectre garde la même allure dans les trois cas.

Ceci pourrait être dû au fait que le dispositif irradié est entouré, dans tous les cas de figure, par des environnements sensiblement semblables du point de vue composition et caractéristiques neutroniques.

Cependant, le spectre montre bien qu'il y a un gain en flux rapide (> 1 MeV) avec l'emploi du convertisseur.

On peut remarquer aussi l'effet des pics de résonance de l' U_{238} aux alentours de l'intervalle 10-100 eV dans le cas du siliciure 20%.

4.4.3. Daixy

- Gain :

Pour le calcul du gain à l'aide de Daixy, on a utilisé le flux rapide Φ_1 (moyennant la même correction de 5%) ramené sur le plan médian (par un facteur multiplicatif de 1,31).

Le tableau suivant présente une comparaison entre les gains obtenus par Daixy et Apollo dans le cas d'un convertisseur à 5 couronnes (UAl et Siliciure).

Le calcul a été fait avec 6 barres hautes, car c'est dans cette configuration que l'on a remarqué que le dispositif dégage le maximum de puissance.

Type de combustible	Gain	
	Apollo	Daixy
UAI 93%	1,36	1,33
Siliciure 20%	1,37	1,34

Table 4.4 : Comparaison gain Apollo2-Daixy

On vérifie bien que les gains obtenus par Apollo et Daixy sont tout à fait comparables.

• Puissance dégagée :

Daixy calcule les puissances dégagées dans chaque emplacement dans le coeur. La figure (4.6) montre les résultats d'un calcul fait pour le cas d'un convertisseur à 5 couronnes d'UAI (on travaille avec une puissance totale du coeur fixée à 70 MW et avec 6 barres hautes).

```

-----*-----
! BAJH 50 ! BAJH 46 ! BAJI111 ! BAJI106 ! BAJL241 ! BAJI 95 ! BAJI 81 !
! 100048.16 ! 101758.98 ! 24365.90 ! 37585.33 ! 50880.96 ! 78543.13 ! 102031.45 !
! 754.25 ! 1033.11 ! 1705.50 ! 1714.04 ! 1612.01 ! 1178.05 ! 754.38 !
-----*-----
! BAJL244 ! BAJI107 ! BCJH 13 ! BAJI108 ! BCJH 14 ! BAJI109 ! BAJI 94 !
! 70721.82 ! 35873.77 ! 34369.50 ! 40001.82 ! 110067.93 ! 25024.17 ! 77811.13 !
! 1176.27 ! 1880.56 ! 1554.93 ! 2367.18 ! 1109.82 ! 1953.10 ! 1161.95 !
-----*-----
! BAJH 24 ! BAJI102 ! BAJI 98 ! C3XX 1 ! BAJI 69 ! BAJI105 ! BAJI113 !
! 6010013.32 ! 57585.36 ! 62871.54 ! 95376.09 ! 64772.96 ! 42157.25 ! 22410.23 !
! 1657.77 ! 2027.21 ! 2428.55 ! 1532.08 ! 2440.92 ! 2157.85 ! 1663.59 !
-----*-----
! BAJI103 ! BAJI101 ! BCJH 12 ! BAJI 99 ! BCJH 7 ! BAJI104 ! BAJI110 !
! 5038086.09 ! 58447.29 ! 78269.14 ! 66076.10 ! 75118.04 ! 41680.52 ! 24493.74 !
! 1565.59 ! 2062.20 ! 1541.37 ! 2498.05 ! 1578.89 ! 2213.31 ! 1689.90 !
-----*-----
! BAJI115 ! BAJI 88 ! BAJI 91 ! BAJI100 ! BAJI112 ! BAJI114 !
! 409014.91 ! 52942.52 ! 55133.77 ! .00 ! 46055.51 ! 25679.66 ! 20499.06 !
! 1483.83 ! 1795.05 ! 2112.47 ! .00 ! 2203.73 ! 2006.97 ! 1528.81 !
-----*-----
! BAJI 78 ! BAJI 86 ! BCJI 17 ! BAJI 87 ! BCJH 15 ! BAJI 97 ! BAJI 73 !
! 3097883.85 ! 94126.06 ! 18472.02 ! 72339.24 ! 18412.12 ! 75782.09 ! 81998.82 !
! 855.30 ! 1187.77 ! 1229.66 ! 1568.59 ! 1265.43 ! 1366.71 ! 1002.12 !
-----*-----
! BAJI 82 ! BHJL 1 ! BAXX121 ! BAJI 79 !
! 20102025.35 ! .00 ! 112759.05 ! .00 ! 110875.22 ! .00 ! 107107.25 !
! 659.20 ! .00 ! 1019.56 ! .00 ! 1036.36 ! .00 ! 687.63 !
-----*-----
! ! ! ! ! ! ! ! NUMERO ELEMENT
! ! ! ! ! ! ! !
! 10 ! .00 ! .00 ! .00 ! .00 ! .00 ! .00 ! .00 ! TAUX IRRAD.MWJ/T
! ! ! ! ! ! ! !
! ! ! ! ! ! ! ! PUISSANCE EN KW
! ! ! ! ! ! ! !
1 2 3 4 5 6 7

```

Fig 4.6 : Distribution de puissance dans le coeur avec convertisseur en UAI

On remarque que le dispositif dégage 1,532 MW, soit 2,18% de la puissance totale. Dans le cas du siliciure, le même type de convertisseur dégage, dans les mêmes conditions de calcul, une puissance de 1,667 MW, soit 2,38% de la puissance totale. La distribution de la puissance dans le coeur sera exploitée par la suite pour les calculs

4.5. CONCLUSION

L'étude neutronique nous a permis d'estimer un gain possible avec un dispositif convertisseur de l'ordre de 1,35 ; soit une augmentation de flux rapide dans le dispositif irradié de 35 %.

En plus, elle nous a montré que le fait de mettre plus de matières fissiles, principalement de l' U_{235} , autour du dispositif à irradier augmente le gain jusqu'à une certaine limite.

Cette augmentation dépend certainement de la répartition, de la concentration en U_{235} et de l'enrichissement du combustible. Mais, pour pouvoir quantifier l'effet de chaque paramètre, il faut l'étudier séparément des autres en essayant de dissocier l'effet de chacun.

Tout ce que l'on peut affirmer à ce stade d'étude, est que mettre du combustible fortement chargé et enrichi, le plus près possible du dispositif à irradier ne peut qu'accroître la performance du convertisseur.

Pour l'étude de l'échauffement Gamma et l'étude thermohydraulique, on travaillera seulement sur un dispositif convertisseur à 5 couronnes, car ce cas englobe les autres en matière de puissance et d'échauffement Gamma.

Chapitre 5

**ETUDE DE
L'ECHAUFFEMENT
GAMMA**

5. ETUDE DE L'ECHAUFFEMENT GAMMA

5.1. INTRODUCTION

Le but de ce chapitre est d'estimer l'échauffement gamma dans le dispositif irradié.

C'est un facteur très important dans le dimensionnement et le calcul thermique au moment de la conception d'un dispositif à irradier dans le coeur.

En fait, l'expérimentateur détermine des conditions expérimentales à respecter pendant le déroulement de l'expérience. L'estimation de l'échauffement gamma permet de prendre en compte la puissance gamma déposée dans le milieu irradié pour pouvoir rester dans la gamme de température exigée.

5.2. PRESENTATION DES ECHAUFFEMENTS GAMMA

L'objectif des mesures d'échauffement est de connaître la puissance déposée par les rayonnements gammas dans les dispositifs d'irradiations.

Le transfert d'énergie engagé par les interactions entre les rayonnements gamma et la matière est la principale cause d'échauffement d'un dispositif irradié dans un réacteur nucléaire.

En toute rigueur, les échauffements produits dans les structures ne sont pas uniquement issus de l'interaction des rayonnements gamma. Les particules chargées ainsi que les neutrons rapides apportent leurs propres contributions qui, toutefois, restent dans tous les cas faibles au regard de l'échauffement total.

Les échauffements gamma mesurés dans le coeur d'OSIRIS vont de quelques W/g à 13 W/g environ.

Cet échauffement proviennent essentiellement :

- des γ instantanés de fission,
- des γ différés dus à la désactivation des produits de fission,
- des γ de capture des neutrons dans le combustible et dans les structures.

Les échauffements gamma mesurés en périphérie du réacteur proviennent pour une grande partie des gammas de capture et ne dépassent jamais 2W/g à 70MW.

Les échauffements gamma sont mesurés avec des calorimètres différentiels à échantillons de graphite. L'unité de mesure est le W/g dans le graphite. L'extrapolation à l'échauffement dans un milieu quelconque de numéro atomique Z réclame un calcul supplémentaire.

5.3. MERCURE5

Le code Mercure5 calcule les échauffements gamma, en géométrie hétérogène à trois dimensions, à partir de répartitions spatiales de sources de fission et de flux fournies par le code Daixy.

En effet, Mercure prend en compte les phénomènes de diffusion des gamma en utilisant la méthode de l'atténuation en ligne droite fondée sur les notions de flux sans choc et de facteur d'accumulation, [11].

En fait, le programme Mercure5 intègre des noyaux ponctuels d'atténuation en ligne droite pour les gamma et pour les neutrons par une technique de Monte Carlo dans l'approximation multigroupe, [6], [16].

Une bibliothèque de spectres des éléments à 17 groupes est associée à Mercure qui permet de calculer les spectres dans les différents milieux de la géométrie en question.

5.3. MODELISATION ET METHODE DE CALCUL

5.3.1. Géométrie utilisée dans Mercure5

Pour la représentation du coeur dans Mercure, on a repris celle utilisée dans la procédure de calcul d'OSIRIS, [10], pour le calcul des échauffements gamma, dans laquelle on a inséré le dispositif convertisseur dans l'emplacement 64.

Dans cette représentation, les blocs béryllium, les structures hautes et basses des éléments combustibles ainsi que les éléments de commande en position basse sont représentés en géométrie homogène.

Les éléments combustibles sont représentés en plusieurs régions pour tenir compte des différences entre les spectres des plaques de rives et de la zone combustible.

Le dispositif convertisseur a été représenté en quatre régions.

Les régions des éléments combustibles ainsi que celles du dispositif convertisseur sont identiques à celles définies pour le calcul de diffusion DAIXY.

5.3.2. Calcul des spectres

- Régions combustibles :

Dans les régions qui contiennent du combustible où l'on a à la fois des γ de fission, des γ de capture et des γ issus des produits de fission, les spectres sont normés à une fission et le spectre s'exprime de la façon suivante :

$$\left(\sum_i \gamma_{ig/fission} \times p_i + \gamma_{ig/capture} \times \frac{\Sigma c_i}{\Sigma f_T} \right) + (\gamma_{PFg/fission}) + \left(\sum_j \gamma_{jg/capture} \times \frac{\Sigma c_j}{\Sigma f_T} \right)$$

avec

g	: numéro du groupe d'énergie Mercure,
i	: corps fissiles (U_{235} , U_{238}),
j	: corps de structure (H_2O , Al)
p_i	: pourcentage de fission du corps i fourni par le calcul Apollo,
Σc_i	: section efficace macroscopique de capture pour le corps i,
Σf_T	: section efficace macroscopique totale de fission,

(Le rapport $\Sigma c_i / \Sigma f_T$ reste donc le nombre de captures par fission pour le corps i. Il est déduit du rapport des taux de réaction correspondants calculés par Apollo),

$\gamma_{ig/fission}$: nombre de γ produits par fission instantanée et par capture pour le corps i (fissile) dans le groupe d'énergie g (données tabulées),
$\gamma_{ig/capture}$: nombre de γ produits par capture pour le corps j (non fissile) dans le groupe d'énergie g (données tabulées),
$\gamma_{jg/capture}$: nombre de γ produits par capture pour le corps j (non fissile) dans le groupe d'énergie g (données tabulées),
$\gamma_{PFg/fission}$: nombre de γ générés par les produits de fission (ce nombre a été calculé à l'aide du code Pèpin1).

- Régions non combustibles :

Dans ces régions qui ne contiennent pas de corps fissiles, où il n'y a que des captures, les spectres sont normés à 1 neutron/cm³.s et s'expriment de la façon suivante :

$$\sum_j \Sigma c_j \times \gamma_{jg/capture}$$

avec

- $\gamma_{jg}/\text{capture}$: nombre de γ produits par capture pour le corps j (non fissile) dans le groupe d'énergie g ,
- Σc_j : section macroscopique effective de capture pour le corps j (calculée à l'aide de la section efficace macroscopique d'absorption du corps en $1/v$ dans le milieu considéré).

5.3.3. Distribution spatiale des sources

Cette distribution est le produit de deux fonctions axiale et radiale :

$$G(r) = F_1(z).F_2(x,y) .$$

⇒ La fonction axiale s'exprime de la façon suivante :

$$F_1(z) = \frac{\Phi_{\max}}{\Phi} \cos\left(\pi \frac{z - z_0}{H}\right)$$

avec

- z_0 : côte du plan de flux maximum ($z_0 = -2$ cm),
- H : hauteur extrapolée du coeur OSIRIS ($H = 80$ cm),
- $\frac{\Phi_{\max}}{\Phi}$: rapport entre le flux maximum et le flux moyen ($\frac{\Phi_{\max}}{\Phi} = 1,31$).

⇒ La fonction radiale s'exprime de deux façons différentes selon qu'il s'agit de régions combustibles ou non.

- Dans les régions combustibles où les spectres sont normés à 1 fission :

$$F_2(x,y) = k . s(x,y)$$

avec

- $s(x,y)$: fourni par Daixy sous forme de valeurs discrètes s_i qui représentent les nombres de neutrons sources dans les mailles i ,
- k : facteur de normalisation qui représente le nombre de fissions à 70 MW par nombre de neutrons sources à la puissance de calcul.

- Dans les régions ne contenant pas de combustible où les spectres sont normés à un flux unité, la fonction F_2 s'écrit :

$$F_2(x,y) = k' . \phi(x,y)$$

avec

- $\phi(x,y)$: fourni par Daixy sous forme de valeurs discrètes ϕ_i qui représentent les nombres de neutrons thermiques capturés dans les mailles i ,
- k' : facteur de normalisation de flux à 70 MW.

5.4. RESULTATS

On a calculé l'échauffement gamma seulement dans la configuration à 5 couronnes (fig 4.1-b), car on estime que l'échauffement obtenu dans le dispositif irradié avec ce cas de figure majore l'échauffement qui serait obtenu dans les autres configurations (1 à 4 couronnes).

A l'aide de Mercure, on a calculé différents échauffements gamma en plusieurs points du dispositif irradié. Le tableau suivant présente les valeurs minimales et maximales obtenues dans le cas de l'UAl et du siliciure :

Type de combustible	Siliciure 20%	UAl 93%
Echauffement gamma (W/g)	12,5 à 14,0	13,0 à 15,5

Table 5.1 : Echauffement gamma dans le dispositif irradié

On retrouve des valeurs comparables ou légèrement supérieures à celles mesurées actuellement dans les emplacements expérimentaux du coeur d'OSIRIS qui sont de l'ordre de 13 W/g.

Si l'échauffement calculé dans le cas du convertisseur est légèrement supérieur à celui mesuré dans le coeur, cela dû au fait que le dispositif irradié est plus entourée par la matière fissile.

On vérifie bien que l'échauffement gamma obtenu dans le cas du siliciure est inférieur à celui obtenu dans le cas de l'UAl, car le siliciure, qui a une densité d'Uranium plus importante, absorbe plus les gamma.

5.5. CONCLUSION

Les valeurs d'échauffement gamma obtenues avec convertisseur à cinq couronnes, montrent que l'on reste dans les ordres de grandeur des échauffements mesurés habituellement dans les dispositifs irradiés à OSIRIS.

En ce qui concerne l'échauffement gamma dans la zone fissile, il est pris en compte dans la puissance dégagée par les couronnes. Il est compris de façon implicite dans le calcul thermo-hydraulique qui fait l'objet du chapitre suivant.

Chapitre 6

***ETUDE
THERMOHYDRAULIQUE***

6. ETUDE THERMOHYDRAULIQUE

6.1. INTRODUCTION

On se propose, dans l'étude thermohydraulique, de s'assurer du bon refroidissement du convertisseur dans les conditions du fonctionnement normal en régime permanent à 70 MW, et de chercher une limite maximale de densité de puissance admissible pour le dispositif.

Les calculs seront effectués au moyen du code FLICA-3M.

6.2. PRESENTATION DU CODE FLICA-3M

Le code FLICA-3M est dédié à l'analyse thermohydraulique des coeurs de réacteur en régime permanent et en régimes transitoires incidentels, [17].

Le modèle d'écoulement dans FLICA résulte de l'analyse par canaux et par sous-canaux. Il permet de calculer l'écoulement d'un fluide mono-phasique ou di-phasique dans un ensemble de canaux couplés, en supposant implicitement que l'écoulement axial est prépondérant.

Les équations du code FLICA-3M sont établies à partir des équations fondamentales de la mécanique des fluides que sont les équations de conservation de la masse, de bilan de quantité de mouvement et de bilan d'enthalpie, [17].

6.3. MODELISATION

6.3.1. Modélisation en canaux

Pour mener les calculs thermohydrauliques à l'aide du code FLICA-3M, on a modélisé le coeur OSIRIS avec le dispositif convertisseur en canaux.

- Modélisation du coeur OSIRIS :

L'élément combustible standard d'OSIRIS est constitué principalement par 22 plaques combustibles parallèles assemblées par deux plaques de rive borées.

L'élément de commande comporte une partie combustible à 17 plaques, dérivée de l'élément standard, et surmontée d'une partie absorbante en hafnium.

Pour les calculs FLICA, on a considéré le coeur OSIRIS constitué de 38 éléments standards et 6 éléments de commande en position haute (partie suiveur fissile) conformément au calcul Daixy.

Le coeur peut être décomposé en 6 canaux : 3 pour les élément standards et 3 pour les éléments de commande. Ces 3 canaux représentent les 3 zones suivantes :

- zone 1 (canal moyen) : canal d'eau entre deux plaques fissiles,
- zone 2 (canal périphérique) : canal d'eau entre le croisillon et la première plaque de l'élément,
- zone 3 (canal de rive) : partie entre le croisillon du casier alvéolé et une plaque de rive.

On a considéré à part l'élément dégageant le plus de puissance dans le coeur (d'après le calcul Daixy), qui est en outre un élément standard voisin du convertisseur, et donc on a ajouté 3 canaux supplémentaires pour la représentation du coeur.

Cette distinction entre l'élément chaud du coeur et le reste des éléments standards va nous permettre d'une part de raisonner sur une valeur maximale de flux de chaleur et non sur une

valeur moyenne, et d'autre part de savoir si la limite de densité de puissance maximale est déterminée par le convertisseur ou par le reste du coeur.

Le tableau (6.1) présente les caractéristiques thermohydrauliques des canaux.

	Nombre	Zone	Poids PC	S _{passage} Sp (cm ²)	P _{chauffant} P _{CH} (cm)	D _{hydrau} D _H (cm)
Elément standard moyen	37	1	777	1,7884	13,68	0,4759
		2	74	1,7448	6,84	0,4647
		3	74	1,0234	0	0,2155
Elément standard chaud	1	1	21	1,7884	13,68	0,4759
		2	2	1,7448	6,84	0,4647
		3	2	1,0234	0	0,2155
Elément de commande	6	1	96	1,6740	11,14	0,5332
		2	12	1,8210	5,57	0,5933
		3	12	1,3584	0	0,3301

Table 6.1 : Caractéristiques hydrauliques des canaux du coeur

• Modélisation du dispositif convertisseur :

Pour les calculs FLICA, on a retenu la configuration du convertisseur qui dégage le plus de puissance, c'est à dire celle correspondant à cinq couronnes.

Le convertisseur à 5 couronnes peut simplement être décomposé en 7 canaux. Ainsi, de l'intérieur vers l'extérieur, on trouve:

- 1 canal situé entre la première couronne combustible et le dispositif irradié,
- 4 canaux situés entre les 5 couronnes combustibles,
- 1 canal situé entre la dernière couronne et la boîte à eau,
- et 1 canal (by-pass) situé entre la boîte à eau et le croisillon du casier alvéolé.

N° du canal	Poids PC	S _{passage} Sp (cm ²)	P _{chauffant} P _{CH} (cm)	D _{hydrau} D _H (cm)
1	1	2,7096	11,62	0,5
2	1	3,3018	26,41	0,5
3	1	3,8940	31,15	0,5
4	1	4,4862	35,89	0,5
5	1	5,0784	40,63	0,5
6	1	5,6706	21,90	0,5
7	1	3,3360	0	0,5

Table 6.2 : Caractéristiques hydrauliques des canaux du convertisseur

6.3.2. Distribution de puissance

La distribution de puissance dans le coeur (y compris le convertisseur) est décrite à l'aide de 3 facteurs utilisés par le code:

- une densité de puissance moyenne (ϕ_0) utilisée comme flux de référence et égale au rapport entre la puissance totale (70 MW) et la surface chauffante totale,
- une représentation axiale de flux de chaleur (Fz) identique pour tous les canaux, qui s'étale sur une hauteur totale (H) de 67,5 cm y compris la partie fissile qui a pour hauteur 63 cm (on a repris la représentation mesurée à ISIS, [12]),
- un facteur de répartition de puissance (ϕ_c) défini pour chaque canal, [16], qui sert à calculer la puissance dégagée par le canal et qui doit vérifier :

$$\sum_{canaux} \Phi_c(i) \times PC(i) \times P_{CH}(i) = \sum_{canaux} PC(i) \times P_{CH}(i).$$

Pour un canal appartenant à un élément standard ou à un élément de commande, on a :

$$\Phi_c = \frac{P(\text{element})}{P(\text{coeur})} \times \frac{P_{CH}(\text{coeur})}{P_{CH}(\text{element})}$$

Pour un canal appartenant au dispositif convertisseur, on a :

$$\Phi_c = \frac{P(\text{canal})}{P(\text{coeur})} \times \frac{P_{CH}(\text{coeur})}{P_{CH}(\text{canal})}$$

Les puissances des éléments sont fournies par le calcul Daixy. Par contre les puissances des canaux du convertisseur sont calculées à l'aide des taux de fission des couronnes combustibles tirés du calcul Apollo.

Le tableau (6.3) présente les valeurs de ϕ_c pour chaque type de canaux.

	Elément standard moyen	Elément standard chaud	Elément de commande	Dispositif convertisseur						
Puissance(MW)	1,555	2,500	1,400	1,600						
N° du canal	Tous*	Tous*	Tous*	1	2	3	4	5	6	7
ϕ_c	0,944	1,491	1,327	1,546	1,536	1,601	1,656	1,714	1,713	0

(* sauf les canaux à P_{CH} nul : $\phi_c = 0$)

Table 6.3 : Valeur du facteur ϕ_c pour tous les canaux

6.3.3. Hypothèses et données de calcul

- Débits :

Le débit de l'eau primaire traversant les 38 éléments standards est de 4180 m³/h et celui traversant un élément de commande est d'environ 100 m³/h, [12].

Le code FLICA ne demande que le débit massique des éléments modélisés, [18]. Le débit entrant en jeu sera donc 4780 m³/h, pour une configuration de 6 barres hautes du coeur.

Les calculs sont faits avec un débit coeur constant.

- Pertes de charges :

Les singularités d'entrée et de sortie des canaux, ainsi que les pertes de charge à l'entrée et à la sortie de l'élément pour un élément standard et pour un élément de commande ont été tirées du calcul thermique fait lors de la conversion d'OSIRIS au combustible Siliciure, [12].

Pour le dispositif convertisseur, on a estimé ces valeurs en utilisant les formules indiquées dans le livre « IDELCHIK », [2], [3].

Avec ces estimations, on a fait un premier calcul, puis on a ajusté les valeurs de singularités en pied, pour retrouver la perte de charge totale à froid (puissance totale = 0 MW) du coeur OSIRIS qui est de 1250 mbars, ensuite, on a vérifié qu'à chaud (puissance totale = 70 MW), on obtient bien la perte charge totale du coeur à 70 MW qui est de 1160 mbars, [12].

- Pressions et températures :

La pression de sortie coeur est prise à 1,8 bars. Les températures d'entrée de l'eau sont prises à 40°C à chaud et 20°C à froid.

6.4. RESULTATS

6.4.1. Critère de bon refroidissement

Le critère de bon refroidissement retenu pour l'analyse thermohydraulique est :

$$T_p < (T_{\text{sat}} + \Delta T_{\text{sat}})$$

avec

- T_p : température de gaine,
- T_{sat} : température de saturation de l'eau,
- ΔT_{sat} : ΔT nécessaire pour atteindre l'ébullition sous-saturée ;

et ceci sur toute la hauteur des plaques combustibles du coeur et des couronnes fissiles du convertisseur.

Ainsi l'écoulement en paroi sera toujours sous cette condition en simple phase en supprimant tout risque d'ébullition nucléée ou même d'assèchement de la gaine.

6.4.2. Evolution de la température

A partir du calcul FLICA fait à une puissance du coeur de 70 MW, on a comparé l'écart entre T_p et $T_{sat} + \Delta T_{sat}$ pour tous les canaux et sur la hauteur H considérée pour le calcul. On a remarqué que le plus faible écart pour tous les canaux se trouve au même niveau : $z = 40,7$ cm.

En plus, pour les éléments standards et les élément de commande, les écarts les plus faibles sont obtenus dans les canaux représentant la zone située entre les plaques combustibles. Le tableau (6.4) présente les différents écarts obtenus pour ces canaux ainsi que pour les canaux représentant le convertisseur.

z = 40,7 cm	Elément standard moyen	Elément standard chaud	Elément de commande	Dispositif convertisseur						
				N° du canal	1	2	3	4	5	6
T_p (°C)	73,2	90	84,7	96,3	97,3	99,5	101,3	103,2	96,3	40
$T_{sat} + \Delta T_{sat}$ (°C)	132,2	133,6	132,8	135,3	136,1	136,2	136,3	136,4	136,4	123,2
Ecart (°C)	59	43,6	48,1	39	38,8	36,7	35	33,2	40,1	83,2

Table 6.4 : Ecart entre T_p et $(T_{sat} + \Delta T_{sat})$

On remarque déjà que tous les canaux satisfont la condition du critère de bon refroidissement. En effet, la valeur de l'écart est comprise entre 33,2 et 59 °C. La valeur minimale est atteinte par le cinquième canal du convertisseur situé entre la quatrième et la cinquième couronne qui s'avère le canal le plus chaud.

La figure (6.1) montre un profil axial de température correspondant à ce canal.

La densité de puissance dans ce canal à la côte $z = 40,7$ cm est de 181 W/cm².

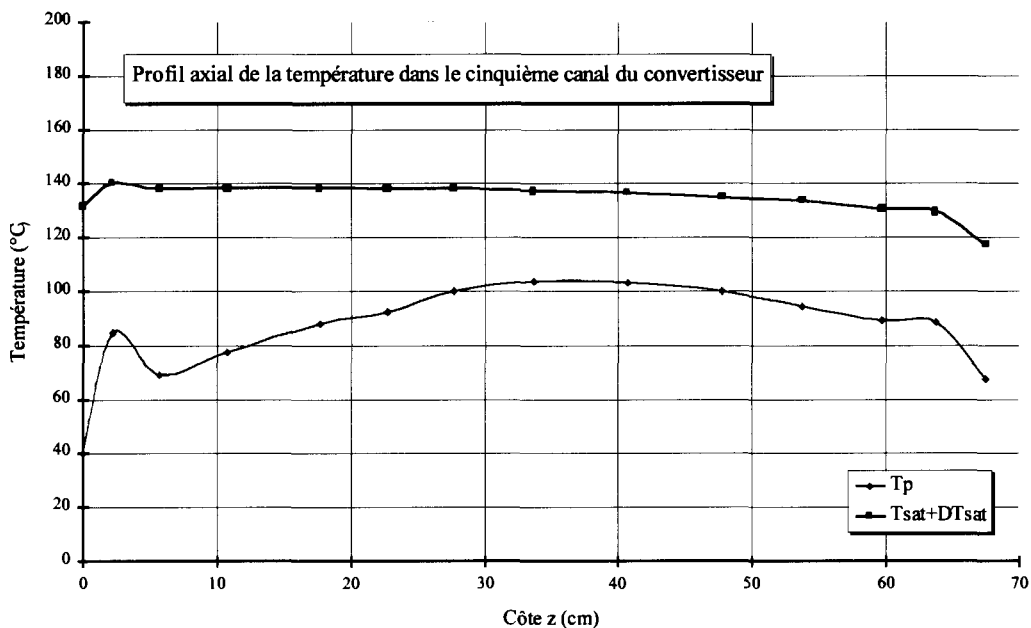


Fig 6.1 : Profil axial de la température dans le cinquième canal du convertisseur

On peut remarquer aussi que la température de paroi du canal chaud du convertisseur est supérieure à celle des canaux correspondant à l'élément standard chaud et à l'élément de commande, on peut donc prévoir que la limite de densité de puissance maximale sera imposée par le dispositif convertisseur et non par les éléments du coeur.

6.4.3. Limite de densité de puissance maximale

On se propose de déterminer la puissance maximale admissible du coeur pour laquelle la température T_p atteint la limite $(T_{sat} + \Delta T_{sat})$.

Pour ce faire, on a répété les calculs avec les mêmes hypothèses en augmentant à chaque fois le flux de référence ϕ_0 (à l'aide d'un facteur de multiplication).

On a remarqué que effectivement la limite de l'ébullition sous-saturée a été franchie en premier lieu par le canal le plus chaud du convertisseur.

La figure (6.2) montre l'évolution de T_p ainsi que $(T_{sat} + \Delta T_{sat})$ pour ce canal à la côte $z = 40,7\text{cm}$.

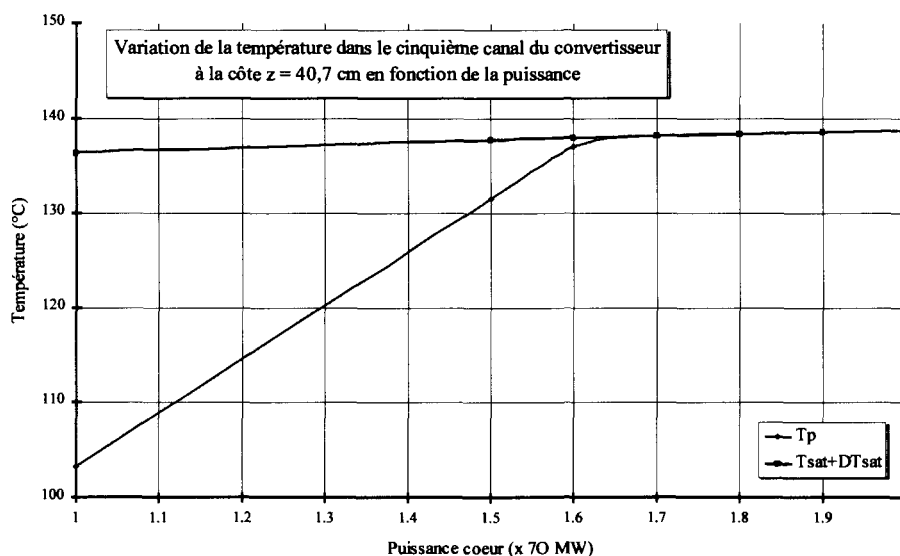


Fig 6.2 : Variation de la température dans le cinquième canal du convertisseur en fonction de la puissance du coeur

On peut donc atteindre une puissance d'une valeur égale à 1,6 fois la puissance nominale. La densité de puissance dans le canal chaud du convertisseur à la côte $z = 40,7\text{cm}$ est de 315 W/cm^2 .

6.5 . CONCLUSION

Cette étude thermohydraulique nous a permis d'avoir une première idée sur le refroidissement du dispositif convertisseur dans le coeur.

Les résultats obtenus sont encourageants. En effet, on a une marge à l'ébullition sous-saturée de 30 °C pour la température de gaine du canal le plus chaud du convertisseur et de 60% pour la limite maximale de densité de puissance admissible.

Toutefois, cette étude n'est pas suffisante pour obtenir une autorisation de mise en irradiation du convertisseur auprès des autorités de sûreté. En effet, il faut étudier entre autre :

- le fonctionnement en régime permanent en cumulant toutes les incertitudes,
- le fonctionnement aux limites de sûreté,
- le fonctionnement en régime transitoire d'arrêt des pompes coeur sur inertie,
- et le fonctionnement en convection forcée.

CONCLUSION GENERALE

Le but de ce présent projet est de faire ressortir les principaux paramètres de dimensionnement d'un convertisseur de flux destiné à accroître localement le flux rapide dans un dispositif d'irradiation dans le coeur du réacteur expérimental OSIRIS.

Le travail réalisé a consisté à mener une étude préliminaire et globale qui s'intéresse aux principaux aspects du problème : neutroniques et thermohydrauliques.

Les résultats obtenus à ce stade de projet sont encourageants.

En effet, les calculs neutroniques menés à l'aide du code de transport Apollo2 et du code de diffusion DAIXY, montrent qu'avec un convertisseur, en géométrie cylindrique, à cinq couronnes fissiles, on arrive à augmenter le flux rapide de l'ordre de 35% dans un dispositif d'irradiation placé au centre.

Les calculs d'échauffement gamma, effectués avec le code MERCURE5.3, ont démontré que l'échauffement gamma dans le dispositif irradié avec convertisseur est de l'ordre de 14 à 15W/g et donc reste comparable à l'échauffement mesuré dans le coeur d'OSIRIS dans un tel dispositif (de l'ordre de 13W/g).

En ce qui concerne le refroidissement du convertisseur dans le coeur, les calculs thermohydrauliques, menés avec le code FLICA-3M, indiquent que dans les conditions nominales du fonctionnement du coeur OSIRIS, on a une marge minimale à l'ébullition sous-saturée de 30°C pour la température de gaine des couronnes fissiles et 60% pour la limite maximale de puissance admissible.

Pour augmenter le gain, il est nécessaire d'approfondir l'étude neutronique en étudiant l'influence de tous les paramètres du problème puisque quelques uns ont été fixés au début de l'étude tels que le choix de la géométrie, l'épaisseur de la lame d'eau et l'épaisseur de la partie fissile des couronnes. Ainsi, on pourra mieux appréhender les phénomènes entrant en jeu en vue d'augmenter le gain obtenu.

Sur un autre plan, il faudra étudier tous les aspects qui touchent à la sûreté de la mise en irradiation du convertisseur dans le coeur, notamment le fonctionnement en régime transitoire ou à la limite de la sûreté.

Le travail réalisé va nous servir de base de réflexion pour développer l'étude et optimiser le convertisseur .

BIBLIOGRAPHIE

OUVRAGES

- [1] BUSSAC J., REUSS P.
Traité de neutronique.
Hermann, 1985.
- [2] IDELCHIK I.E.
Mémento des pertes de charge.
Eyrolles, 1969.
- [3] IDELCHIK I.E.
Handbook of hydraulic resistance.
Hemisphere Publishing Co, 1986.

PUBLICATIONS SCIENTIFIQUES

- [4] POULEUR Y. *et al.*
Optimization of a fuel converter for the Merlin materials testing facility.
SCK-CEN,mol (Belgique), 1997.

THESES

- [5] DESTOT M.
Etude d'une cellule d'irradiation à spectre de réacteur rapide, dans le coeur d'une pile à eau légère.
Université Scientifique et Médicale de Grenoble, décembre 1972.
- [6] SETIYANTO M.
Puissance déposée par les rayonnements gamma dans le réacteur SILOE.
Institut National Polytechnique de Grenoble, 1988.

NOTES TECHNIQUES (CEA)

- [7] MAUGARD B.
Coeur RJH-Evaluation des performances de la boucle centrale pour des irradiations sous flux rapide.
DRN/DER/SIS/RJH 96-30/1027, mars 1988

- [8] ROZENBLUM F.
Fiche technique d'irradiation CASIMIR 3.
DRN/DRE/SRO/FT 98-781, mars 1998.
- [9] BOUVARD P.
Procédure de calcul de coeurs applicable aux réacteurs OSIRIS et IRIS.
DRN/DRE/SRO/SEN/note I 92-433, mai 1993.
- [10] BOUVARD P.
OSIRIS-Passage au combustible Siliciure.
DRN/DRE/SRO/SEN/note I 95-479, décembre 1995.
- [11] ASSAD A.
Amélioration de la modélisation du transport des gamma suivant la méthode de l'atténuation en ligne droite.
CEA/note N 2804, décembre 1995.
- [12] JAUSSAUD C.
Essai avec un élément combustible Siliciure instrumenté dans OSIRIS. Comparaison calculs/mesures.
DRN/DRE/SEROS/note 97-223/CJ, septembre 1997.

MANUELS DE REFERENCE (CODES DE CALCUL)

- [13] COSTE M. *et al.*
Apollo2 - Notice théorique.
DRN/DMT/93-581/SERMA/LENR/1535, janvier 1994
- [14] COSTE M. *et al.*
Apollo2 - Notice d'utilisation.
DRN/DMT/93-582/SERMA/LENR/1536, janvier 1994.
- [15] VASSEUR C. *et al.*
Spécification d'un code de diffusion en géométrie XY : DAIXY.
CEA/R 2759, 1965
- [16] DUPONT C.
Mercur5.3 - Un programme de Monte-Carlo à trois dimensions pour l'intégration de noyaux ponctuels d'atténuation en ligne droite.
DRN/DMT/95-552/SERMA/LEPP/95-1817, novembre 1995.
- [17] RAYMOND P.
Flica 3M - Version 3.2 : Equations et modèles.
DRN/DMT/92-654/SERMA/LETR/92-1455, décembre 1993.
- [18] RAYMOND P., OSTERTAG E.
Flica 3M - Version 3.2 : Manuel d'utilisation.
DRN/DMT/92-654/SERMA/LETR/92-1455, décembre 1993.

DIVERS

- [19] *OSIRIS, présentation générale.*
CEA/DRN/DRE, 1996.