

Titre: Étude numérique de l'autoprotection spatiale dans des échantillons
Title: fortement absorbants irradiés dans le réacteur SLOWPOKE

Auteur: Haykel Raouafi
Author:

Date: 2012

Type: Mémoire ou thèse / Dissertation or Thesis

Référence: Raouafi, H. (2012). Étude numérique de l'autoprotection spatiale dans des
Citation: échantillons fortement absorbants irradiés dans le réacteur SLOWPOKE [Mémoire
de maîtrise, École Polytechnique de Montréal]. PolyPublie.
<https://publications.polymtl.ca/947/>

 **Document en libre accès dans PolyPublie**
Open Access document in PolyPublie

URL de PolyPublie: <https://publications.polymtl.ca/947/>
PolyPublie URL:

**Directeurs de
recherche:** Guy Marleau, & Cornelia Chilian
Advisors:

Programme: Génie énergétique
Program:

UNIVERSITÉ DE MONTRÉAL

ÉTUDE NUMÉRIQUE DE L'AUTOPROTECTION SPATIALE DANS DES ÉCHANTILLONS
FORTEMENT ABSORBANTS IRRADIÉS DANS LE RÉACTEUR SLOWPOKE

HAYKEL RAOUAFI
DÉPARTEMENT DE GÉNIE PHYSIQUE
ÉCOLE POLYTECHNIQUE DE MONTRÉAL

MÉMOIRE PRÉSENTÉ EN VUE DE L'OBTENTION
DU DIPLÔME DE MAÎTRISE ÈS SCIENCES APPLIQUÉES
(GÉNIE ÉNERGÉTIQUE)
SEPTEMBRE 2012

UNIVERSITÉ DE MONTRÉAL

ÉCOLE POLYTECHNIQUE DE MONTRÉAL

Ce mémoire intitulé:

ÉTUDE NUMÉRIQUE DE L'AUTOPROTECTION SPATIALE DANS DES ÉCHANTILLONS
FOTEMENT ABSORBANTS IRRADIÉS DANS LE RÉACTEUR SLOWPOKE

présenté par: RAOUAFI Haykel

en vue de l'obtention du diplôme de: Maîtrise ès sciences appliquées

a été dûment accepté par le jury d'examen constitué de:

M. HÉBERT Alain, D.Ing., président

M. MARLEAU Guy, Ph.D., membre et directeur de recherche

Mme. CHILIAN Cornelia, Ph.D., membre et codirectrice de recherche

M. JONKMANS Guy, Ph.D., membre

à mes parents

REMERCIEMENTS

Après un peu plus d'un an et demi de travail vient ce moment tant attendu (et redouté) de la rédaction des remerciements. En effet, ce travail n'aurait pas été possible sans l'aide, les conseils et les encouragements de nombreuses personnes.

J'aimerais tout d'abord remercier mes parents pour leur patience, leurs sacrifices et leur appui.

Ce travail de recherche a été rendu possible grâce au soutien financier de la mission universitaire de la Tunisie en Amérique du nord (MUTAN) et l'aide financière du CRSNG. Merci à tous... Je remercie aussi la fondation de l'École Polytechnique de Montréal de m'avoir accordé la bourse ROASTERS pour encourager mon travail de recherche.

Je tiens à remercier monsieur Guy MARLEAU de m'avoir accepté à titre de directeur de recherche et pour sa bonne humeur, ses conseils et son encouragement pour réussir mes travaux de recherche.

Je tiens également à remercier ma co-directrice de recherche madame Cornelia CHILIAN pour m'avoir aidé à faire les expériences au laboratoire SLOWPOKE et sa bonne humeur.

Je tiens à remercier les membres du jury, particulièrement monsieur Alain HÉBERT pour avoir accepté de présider le jury.

Un grand merci à mon cher ami Pierre ADOUKI qui m'a aidé à réussir mes études, pour son soutien moral et sa confiance. Comme je tiens à remercier madame Geneviève HARRISSON d'avoir toujours eu la patience de m'expliquer de nombreux aspects de cette nouvelle discipline.

Je tiens encore remercier monsieur Jean-Paul LÉVESQUE qui m'a aidé à préparer les échantillons.

Je tiens encore remercier mes chers amis Mehdi MAHJOUB, Sarra ZOGHLAMI, Dhaker KROUMI, Dorra RIAHI et Mouna SELMI pour leur soutien moral et leurs encouragements.

Merci à Tarek BENGUEDOUR et Corentin CAMAND pour avoir expliqué des trucs nouveaux pour moi.

Merci à Leppänen JAAKKO pour ses réponses rapides à mes questions concernant le code SERPENT.

Merci à tous ceux qui sont venus à ma présentation.

Merci une autre fois à ma famille qui m'a donné l'envie d'étudier et m'a permis de le faire avec un soutien sans faille.

Merci à ceux que j'aurais pu oublier.

RÉSUMÉ

Le réacteur SLOWPOKE-2 de l'École Polytechnique de Montréal est utilisé pour effectuer des analyses chimiques d'échantillons en utilisant la technique d'analyse par activation neutronique (AAN). Cette technique fonctionne très bien si l'échantillon à analyser absorbe peu les neutrons. Cependant, dans le cas où l'échantillon contient une grande quantité d'un isotope qui capture fortement les neutrons, sa présence perturbera la distribution de flux dans l'échantillon et faussera les résultats d'analyse. Ce phénomène naturel appelé autoprotection spatiale est très difficile à modéliser numériquement, à cause de la taille des échantillons, en utilisant des codes tels SERPENT (code Monte Carlo) et DRAGON (code déterministe).

Ce projet consiste à proposer des modèles simplifiés du réacteur qui pourront être utilisés afin de simuler numériquement de façon efficace et précise de tels effets d'autoprotection spatiale.

ABSTRACT

The SLOWPOKE reactor at École Polytechnique de Montréal is used to perform chemical analysis for samples using neutron activation analysis (NAA). This technique works correctly when the sample to analyze is a weak neutron absorber. However, when a sample contains a large amount of isotopes that are strong neutron absorbers, the analysis result will be wrong because the presence of this type of isotopes changes the flux distribution in the sample. This natural effect, known as spatial self-shielding, is difficult to model using codes like SERPENT (Monte Carlo code) and DRAGON (deterministic code) because of the small size of the samples.

The aim of this project is to propose simplifying models that can be used in simulation codes to evaluate in an accurate and efficient way the spatial neutron self-shielding effect.

TABLE DES MATIÈRES

DÉDICACE	iii
REMERCIEMENTS	iv
RÉSUMÉ	v
ABSTRACT	vi
TABLE DES MATIÈRES	vii
LISTE DES FIGURES	xi
LISTE DES TABLEAUX	xiv
LISTE DES ANNEXES	xv
INTRODUCTION	1
 I Généralités	 5
CHAPITRE 1 GÉNÉRALITÉS SUR LA NEUTRONIQUE	6
1.1 Les réactions neutron-matière	6
1.1.1 Réactions nucléaires	6
1.1.2 Réactions par neutrons	7
1.1.3 Sections efficaces neutroniques	9
1.2 Traitement des données nucléaires	11
1.3 Équation de transport	13
1.3.1 Présentation de l'équation	13
1.3.2 Méthodes de résolution	15
CHAPITRE 2 DESCRIPTION DU RÉACTEUR SLOWPOKE-2	18
2.1 Le coeur	19

2.1.1	La barre de contrôle	19
2.1.2	Le combustible	22
2.1.2.1	Combustible HEU	22
2.1.2.2	Combustible LEU	22
2.2	Le caloporteur	23
2.3	Le réflecteur en béryllium	23
2.4	Le modérateur	25
2.5	La piscine	25
CHAPITRE 3	ANALYSE PAR ACTIVATION NEUTRONIQUE	26
3.1	Sources de neutrons	26
3.2	Radioactivité induite par l'irradiation	27
3.3	Traitement du spectre γ	31
3.3.1	Spectrométrie γ	31
3.3.1.1	Détecteurs	31
3.3.1.2	Sources de bruit	32
3.3.1.3	Interactions des rayons gamma	33
3.3.2	Méthodes de calcul expérimentales	35
3.3.2.1	Mesures absolues	35
3.3.2.2	Mesures relatives	36
3.3.3	Correction empirique de la masse	37
3.3.3.1	Facteur d'autoprotection	37
3.3.3.2	Études récentes pour la correction de masse pour l'AAN	38
II	Simulations et expériences	43
CHAPITRE 4	SIMULATIONS SLOWPOKE EN 2-D	44
4.1	Simulation SERPENT	45
4.1.1	Modélisation de la géométrie SLOWPOKE-2	45
4.1.2	Matériaux	52
4.1.3	Séquences de calcul SERPENT	54

4.2	Simulation DRAGON	57
4.2.1	Le modèle exact	57
4.2.1.1	Modélisation de la géométrie SLOWPOKE-2	57
4.2.1.2	Séquences de calcul DRAGON	61
4.2.2	Le modèle simplifié	63
4.2.2.1	Description de la géométrie modifiée	63
4.2.2.2	Le calcul par partie	65
CHAPITRE 5	SIMULATIONS SLOWPOKE EN 3-D	68
5.1	Simulation SERPENT	68
5.1.1	Description de la géométrie	68
5.1.2	Options de calcul	73
5.2	Simulation DRAGON	73
5.2.1	Modèle exact	73
5.2.2	Modèle simplifié	75
CHAPITRE 6	PROCESSUS EXPÉRIMENTAL D'IRRADIATION	76
6.1	Échantillonnage	76
6.1.1	Choix du matériau	76
6.1.2	Préparation de l'échantillon	77
6.2	Procédures d'irradiation	81
6.2.1	Temps d'irradiation	81
6.2.2	Temps de décroissance	81
6.2.3	Temps de comptage	83
6.3	Traitement du spectre	83
CHAPITRE 7	RÉSULTATS ET DISCUSSIONS	89
7.1	Comparisons DRAGON-SERPENT	89
7.2	Flux DRAGON du réacteur SLOWPOKE-2	101
7.3	Validation du modèle simplifié DRAGON	103
7.4	Validation expérimentale du calcul DRAGON pour l'échantillon de cuivre	112

7.5	Correction DRAGON de la formule semi-empirique de G'_{th}	119
7.6	Méthode DRAGON pour la correction du masse expérimentale	123
CONCLUSION		125
RÉFÉRENCES		126
ANNEXES		129

LISTE DES FIGURES

Figure 1	Phénomène d'autoprotection spatiale	1
Figure 1.1	Collision flux neutroniques matière	10
Figure 1.2	Processus d calcul du réacteur (Hébert, 2009)	12
Figure 1.3	Position du neutron dans l'espace	13
Figure 2.1	Coupe horizontale du réacteur SLOWPOKE	20
Figure 2.2	Barre de contrôle	21
Figure 2.3	Refroidissement du coeur de SLOWPOKE-2	24
Figure 2.4	Positions des sites d'irradiation pour le SLOWPOKE-2	24
Figure 3.1	Décroissance de l'activité pour une période t_d	30
Figure 3.2	Temps d'analyse	30
Figure 3.3	Spectre d'une source γ monochromatique	31
Figure 3.4	Effet du phénomène d'empilement sur la distorsion d'un spectre	32
Figure 3.5	Effet Compton	33
Figure 3.6	La distorsion Compton	34
Figure 3.7	Méthodes de calcul de surface sous le photopic	35
Figure 3.8	Variation de G_{th}	41
Figure 3.9	Variation de G_{ep}	42
Figure 4.1	Coeur du réacteur SLOWPOKE-2	45
Figure 4.2	Réseau hexagonal	47
Figure 4.3	Assemblage coeur et réflecteur du réacteur SLOWPOKE-2	48
Figure 4.4	Site d'irradiation 1 contenant l'échantillon	48
Figure 4.5	La Géométrie PAD	49
Figure 4.6	PAD imbriqués	52
Figure 4.7	Premier niveau de la géométrie du SLOWPOKE-2	58
Figure 4.8	Séquences de calcul DRAGON	62
Figure 4.9	Géométrie du coeur avant et après la modification des régions	64
Figure 4.10	Tracking du SLOWPOKE-2	67
Figure 5.1	Premier niveau géométrique SERPENT 3-D	69

Figure 5.2	Positions des plans et les rayons de cylindres	71
Figure 5.3	Deux cylindres emboîtées en 3-D	72
Figure 5.4	Régions du site 1 contenant l'échantillon	72
Figure 5.5	Cellules SLOWPOKE 3-D	74
Figure 6.1	Échantillon de cuivre avec détecteurs en cuivre	79
Figure 6.2	Position des fils de cuivre	80
Figure 6.3	Organisation des capsules contenant les fils de cuivre	81
Figure 6.4	Organisation des capsules contenant les morceaux de fils de cuivre	82
Figure 7.1	Flux épithermique DRAGON normalisé dans le réacteur SLOWPOKE-2 .	92
Figure 7.2	Flux thermique DRAGON normalisé dans le réacteur SLOWPOKE-2 . .	93
Figure 7.3	Points correspondant aux collisions neutroniques SERPENT dans le réacteur SLOWPOKE-2 en 2-D où plus la zone est blanche plus la densité des neu- trons est importante : coupe horizontale (flux total normalisé)	94
Figure 7.4	Points correspondant aux collisions neutroniques SERPENT dans le réacteur SLOWPOKE-2 en 3-D où plus la zone est blanche plus la densité des neu- trons est importante : coupe verticale (flux total normalisé)	95
Figure 7.5	Numérotation des régions en 3-D pour le site 1 plan	96
Figure 7.6	Flux thermique DRAGON et SERPENT en 2-D	98
Figure 7.7	Flux épithermique DRAGON et SERPENT en 2-D	98
Figure 7.8	Flux thermique DRAGON et SERPENT en 3-D	99
Figure 7.9	Flux épithermique DRAGON et SERPENT en 3-D	100
Figure 7.10	Flux thermique DRAGON dans le réacteur SLOWPOKE-2	101
Figure 7.11	Flux épithermique DRAGON dans le réacteur SLOWPOKE-2	102
Figure 7.12	a) Parcours des neutrons rapides dans le combustible pour le modèle DRAGON exact , b) Les neutrons les plus proche du réflecteur naissent dans la frontière entre les deux régions donc le parcours est nul dans le combustible pour le modèle simplifié	104
Figure 7.13	Flux thermique modèle exact et simplifié dans le réacteur SLOWPOKE-2 en 2-D	106

Figure 7.14	Flux épithermique modèle exact et simplifié dans le réacteur SLOWPOKE-2 en 2-D	107
Figure 7.15	Flux thermique modèle exact et simplifié dans le réacteur SLOWPOKE-2 en 3-D	108
Figure 7.16	Flux épithermique modèle exact et simplifié dans le réacteur SLOWPOKE-2 en 3-D	109
Figure 7.17	Flux thermique avec et sans échantillon en 3-D	110
Figure 7.18	Flux épithermique avec et sans échantillon en 3-D	111
Figure 7.19	Positions des plans radiaux dans l'échantillon de cuivre	113
Figure 7.20	Variation de G_{eff} dans l'échantillon de cuivre donné par DRAGON	114
Figure 7.21	Variation de G_{eff} dans l'échantillon de cuivre plan 0°	115
Figure 7.22	Variation de G_{eff} dans l'échantillon de cuivre plan 45°	116
Figure 7.23	Variation de G_{eff} dans l'échantillon de cuivre plan 90°	117
Figure 7.24	Variation de G_{eff} dans l'échantillon de cuivre plan 135°	118
Figure 7.25	Comparaison des facteurs d'autoprotection spatiale théoriques et simulés pour le cuivre	120
Figure 7.26	Interpolation du facteur d'autoprotection thermique dans l'échantillon de cuivre	121
Figure 7.27	Comparaison des facteurs d'autoprotection spatiale théoriques et simulés pour l'or	121
Figure 7.28	Interpolation du facteur d'autoprotection thermique dans l'or	122
Figure 7.29	Processus itératif DRAGON pour la correction de la masse de l'AAN	124

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1.1	Principales réactions subies par les neutrons dans les réacteurs (Reuss, 2003)	9
Tableau 1.2	Principales listes d'évaluation mondiales	12
Tableau 2.1	Caractéristiques du réacteur SLOWPOKE-2 (Boisvert, 1976)	19
Tableau 2.2	Propriétés des combustibles HEU et LEU (Hajjaji, 1999)	23
Tableau 3.1	Quelques exemples de sources de neutrons (Perdijon, 1967)	27
Tableau 4.1	Composition isotopique des mélanges	53
Tableau 6.1	Demi-vies radioactives de différents isotopes du cuivre (KAERI, 2000) . .	77
Tableau 6.2	Premier niveau le long de l'axe des fils (le plus haut)	85
Tableau 6.3	Deuxième niveau le long de l'axe des fils	86
Tableau 6.4	Troisième niveau le long de l'axe des fils	87
Tableau 6.5	Quatrième niveau le long de l'axe des fils (le plus bas)	88
Tableau 7.1	Temps de calcul DRAGON et SERPENT en 2-D et 3-D	90
Tableau 7.2	Temps de calcul DRAGON	105
Tableau 7.3	Paramètres de l'équation 7.2 pour le cuivre	120
Tableau 7.4	Paramètres de l'équation 7.2 pour l'or	120

LISTE DES ANNEXES

ANNEXE I	MODÈLE EXACT 2-D DRAGON	129
I.1	Programme principal	129
I.2	Geométrie SLOWPOKE-2 en 2-D	130
I.3	Mélanges	142
ANNEXE II	MODÈLE 2-D SERPENT	145
ANNEXE III	MODÈLE SIMPLIFIÉ 2-D DRAGON	152
III.1	Première partie	152
III.2	Deuxième partie	153
ANNEXE IV	MODÈLE EXACT 3-D DRAGON	156
IV.1	Programme principal	156
IV.2	Geométrie 3-D SLOWPOKE-2	158
ANNEXE V	MODÈLE EXACT 3-D SERPENT	166
ANNEXE VI	MODÈLE SIMPLIFIÉ 3-D DRAGON	176
VI.1	Première partie	176
VI.2	Deuxième partie	178

INTRODUCTION

Problématique

Le réacteur SLOWPOKE-2 de l'École Polytechnique de Montréal (Townes, 1985) est utilisé pour effectuer des analyses chimiques des échantillons en utilisant la technique d'analyse par activation neutronique (AAN) (Knoll, 1999). Cette technique consiste à irradier un échantillon inconnu dans un flux neutronique connu, afin d'activer les éléments chimiques. Pour le cas idéal où toutes les composantes de l'échantillon sont activées, les rayons gammas émis peuvent être comptés par un dispositif à semi-conducteur relié à un ordinateur. Cependant cette technique donne des valeurs inexactes dans le cas où l'échantillon contient une grande quantité d'un isotope qui capture fortement les neutrons. En effet, l'absorption des neutrons dans l'échantillon, est équivalente à un blindage qui ne laisse pas les neutrons pénétrer profondément dans la matière (voir figure 1a). De plus, pour un échantillon de grande taille et contenant une faible quantité d'un isotope fortement absorbant, le flux de neutrons sera aussi perturbé à l'entrée de l'échantillon (voir figure 1b). Ce phénomène naturel qu'on a associé au blindage, est appelé autoprotection spatiale.

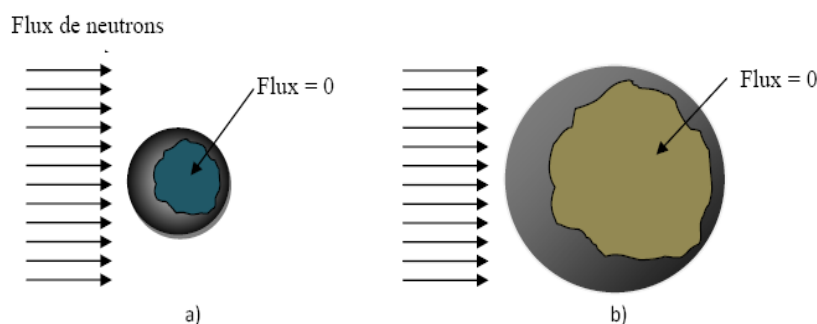


Figure 1 Phénomène d'autoprotection spatiale

L'étude de ce phénomène a été un sujet très répandu durant les années 50. L'idée la plus utilisée à ce jour, est de trouver un facteur d'autoprotection noté habituellement G_{eff} (Gonçalves, 2004) (pour le flux neutronique total) et qui est utilisé pour corriger la masse trouvée par l'AAN. Ce facteur est toujours inférieurs ou égal à 1.

Récemment ce facteur a été déterminé en pondérant deux autres facteurs; le premier correspond au facteur d'autoprotection des neutrons thermiques noté G_{th} et l'autre au facteur d'autoprotection des neutrons épithermiques noté G_{ep} . I.F Gonçalves et al ont déterminé des formules semi-empiriques pour évaluer G_{th} et G_{ep} . Ces facteurs dépendent de plusieurs paramètres qui dépendent eux-même de la nature de chaque isotope et sont utilisés dans la majorité des laboratoires.

Ce projet consiste à développer des modèles simplifiés du réacteur SLOWPOKE-2 qui permettront de simuler numériquement de façon efficace et précise de tels effets d'autoprotection spatiale. De plus, nous désirons proposer de nouveaux modèles empiriques basés sur des calculs de transport, pour calculer les facteurs de correction d'autoprotection spatiale.

Choix des outils informatiques

L'analyse de l'effet d'autoprotection sera développée en utilisant deux codes de calculs numériques, le premier servant de référence et le deuxième comme outil pour définir un modèle efficace qui peut être couplé avec l'AAN. Les deux codes sont:

1. **SERPENT**: C'est un code Monte Carlo développé en Finlande, qui permet de résoudre l'équation de transport des neutrons en utilisant des méthodes probabilistes. Comme ce code nécessite peu d'approximations, il donne des résultats qui sont très proche de la réalité. On l'utilise dans notre projet comme référence pour valider le deuxième code (Lappänen, 2011).
2. **DRAGON**: C'est un code déterministe développé à l'École Polytechnique de Montréal qui permet de faire des calculs de cellules et de coeur en résolvant l'équation de transport neutronique. Ce code est utilisé dans ce projet comme l'outil numérique pour faire la correction du masse fournie par l'AAN sans passer par les formules semi-empiriques.

Méthodologie

La méthodologie que nous avons choisie afin d'atteindre nos objectifs consiste à modéliser le problème par étape en utilisant les deux codes disponibles et à confiner la solution à des régions spatiales de plus en plus réduites. Les étapes que nous considérerons sont:

1. Simuler numériquement le réacteur SLOWPOKE-2 en 2-D avec les codes DRAGON et SERPENT, comparer les résultats de ces deux simulations et résoudre les écarts.
2. Simuler le réacteur SLOWPOKE-2 en 3-D avec DRAGON et SERPENT, comparer les résultats des simulations à ceux obtenus en 2-D et conclure sur la nécessité d'inclure la direction axiale dans le modèle final. Comparer les résultats de ce modèle aux données expérimentales.
3. Proposer un modèle simplifié d'analyse permettant d'accélérer le processus de résolution du problème de transport en 2-d et en 3-D et comparer au modèle exact.
4. Raffiner le modèle afin d'en améliorer les résultats.
5. Comparer les résultats de ce modèle aux résultats expérimentaux obtenus avec le réacteur SLOWPOKE-2 de l'École Polytechnique.

Plan du mémoire

Le chapitre 1 présente les concepts de base de neutronique nécessaire pour résoudre le problème et définit l'équation de transport qui a permis de développer les deux codes de calculs que l'on utilise dans notre recherche.

Le chapitre 2 présente le réacteur SLOWPOKE-2 de l'École Polytechnique de Montréal, qu'on utilisera pour irradier un échantillon de cuivre dans le site 1 afin de vérifier, expérimentalement, les résultats du calculs numériques.

Le chapitre 3 introduit la présentation de la technique d'analyse par activation neutronique, et explique le processus expérimental pour mesurer la concentration d'un élément d'un échantillon.

Les chapitres 4 et 5 présentent les modèles SERPENT et DRAGON pour des calculs 2-D et 3-D dans le réacteur SLOWPOKE-2. Les calculs sont faits pour le réacteur complet et sont ensuite simplifiés afin de réduire le temps du calculs.

Le chapitre 6 décrit le processus expérimental pour irradier un échantillon de cuivre dans le réacteur SLOWPOKE-2. Il présente aussi la façon de préparer l'échantillon et les mesures obtenues.

Finalement, le chapitre 7 présente nos comparaisons entre les résultats expérimentaux et ceux obtenus par les simulations numériques. Les simulations DRAGON sont comparées aux simulations SERPENT, et on évalue la fiabilité des modèles simplifiés DRAGON.

Partie I

Généralités

CHAPITRE 1

GÉNÉRALITÉS SUR LA NEUTRONIQUE

Le comportement d'un réacteur nucléaire est gouverné par le flux neutronique qui est une distribution en espace et en vitesse et une fonction du temps qui décrit le comportement des neutrons voyageant dans différentes régions du coeur. De ce fait, le problème majeur en théorie des réacteurs est de prédire cette distribution avec précision. En principe, elle peut être déterminée par la résolution de l'équation de transport, souvent appelée équation de Boltzmann grâce à sa similitude à l'équation obtenue par L. Boltzmann (1844-1906) pour la loi de cinétique des gaz. En effet, l'équation fondamentale consiste à décrire de façon statistique les interactions des neutrons avec les noyaux des atomes de la matière, l'approximation statistique étant validée à une énorme population du neutrons dans le réacteur. Ainsi le problème se traite de façon similaire à un fluide continu qui est une approche inspirée par L. Boltzmann.(Reuss, 2003; Glasstone, 1979)

Ce chapitre a pour objectif d'introduire les discrétisations de l'équation de transport employées, dans la deuxième partie, par le code DRAGON (Marleau, 2012) pour prédire la distribution neutronique dans un réacteur. On commence par un bref rappel sur les réactions induites par collision avec la matière. Puis, on examine la relation entre la physique nucléaire et la neutronique. Ensuite, l'équation de transport qui régit la population neutronique au sein du réacteur est décrite, ainsi que les discrétisations utilisées (en énergie et en espace) dans le cas stationnaire. Enfin, on mettra en évidence les méthodes de calcul employées par DRAGON.

1.1 Les réactions neutron-matière

1.1.1 Réactions nucléaires

On parle d'une réaction nucléaire induite lorsque un noyau réagit avec un "projectile", tel un neutron, un proton, un photon ou un autre noyau, pour éventuellement produire un ou plusieurs autres

noyaux différents accompagnés d'émissions de particules élémentaires et de rayons gamma. De plus, on peut parler d'une réaction nucléaire spontanée, contrairement au réaction induite, pour le cas de la radioactivité. En pratique, on distingue deux membres responsables d'une réaction nucléaire: un "projectile" qui a la quantité de mouvement la plus importante nommé a , percute une cible de faible quantité de mouvement nommée A , produisant deux noyaux (pour les réactions courantes) dont un de petite taille b et l'autre plus massif B . Une réaction nucléaire est écrite sous la forme:

$$a + A = B + b \quad (1.1)$$

ou, de façon plus concise:

$$A(a, b)B \quad (1.2)$$

Dans ces réactions, un nombre de grandeurs se conservent, les principales étant:

- Le nombre de nucléons;
- Le nombre (algébrique) de charges électriques;
- La quantité de mouvement;
- Le moment cinétique;
- L'énergie totale.

1.1.2 Réactions par neutrons

Le neutron est une particule élémentaire stable lorsqu'il est lié à un noyau par les forces nucléaire. A l'état libre, le neutron se désintègre en proton en 12 minutes, avec l'émission d'une particule β^- et d'un antineutrino. Dans un réacteur nucléaire, les neutrons libres sont absorbés dans la matière en moins de 10^{-3} s, de ce fait on ne parle pas d'instabilité du neutrons lors de l'étude des réactions neutroniques dans un réacteur.

Dans les interactions des neutrons avec la matière, il convient d'abord de distinguer entre les collisions nucléaires, qui font intervenir un noyau composé, et les diffusions potentielles. Dans la diffusion potentielle, le choc entre le neutron et le noyau cible est purement élastique, en effet, c'est une diffusion entre les champs nucléaire du neutron et du noyau cible. Par contre pour une collision nucléaire il y a pénétration du neutron dans le noyau (c'est à dire mise en jeu d'interaction forte).

Dans la gamme d'énergie disponible en physique des réacteurs une collision neutronique se généralise en trois étapes:

- *La voie d'entrée:* Collision du neutron incident avec le noyau cible, ce qui produit un isotope de nombre de masse augmenté d'une unité et ayant une énergie d'excitation égale à la somme de l'énergie de liaison du neutron supplémentaire et de l'énergie cinétique du projectile.
- *Période de vie:* L'isotope ainsi composé, reste dans son état excité un laps de temps de l'ordre de $10^{-14} s$.
- *La voie de sortie:* L'état excité se détruit rapidement par désintégration radioactive.

Le tableau 1.1 donne un résumé des principales interactions nucléaires possibles susceptibles de se produire sous l'effet d'un neutron.

Dans le contexte de la fission on parle souvent pour les noyaux lourds d'un classement isotopique selon le seuil d'énergie de cette réaction, on trouve ainsi:

- *Noyau fissile:* On dit qu'un noyau est fissile s'il peut subir une fission nucléaire avec des neutrons lents, dont l'énergie cinétique est très faible: ^{233}U , ^{235}U , ^{239}Pu et ^{241}Pu .
- *Noyau fissionnable:* Un noyau est dit fissionnable s'il ne peut être fissionné que par des neutrons rapides: ^{238}U et ^{240}Pu .
- *Noyau fertile:* Ce type noyau est capable de produire un noyau fissile suite à une capture neutronique d'énergie quelconque: ^{238}U et ^{232}Th .

Tableau 1.1 Principales réactions subies par les neutrons dans les réacteurs (Reuss, 2003)

Interaction sans formation d'un noyau composé		
Diffusion potentielle	$n + A \Rightarrow n + A$	Toujours possible
Interactions passant par la formation d'un noyau composé		
Diffusion résonnante élastique	$n + A \Rightarrow n + A$	Toujours possible
Diffusion résonnante inélastique	$n + A \Rightarrow n' + A^*$ $A^* \Rightarrow A + \gamma$	Seuil: premier niveau d'excitation
Réaction ($n, 2n$)	$n + A \Rightarrow n' + n'' + (A - 1)$	Seuil: énergie de séparation d'un neutron de A
Capture radiative	$n + A \Rightarrow \gamma + (A + 1)$	Toujours possible
Réaction (neutron, particule chargée)	$n + A \Rightarrow p + B$ $n + A \Rightarrow \alpha + C$	Le plus souvent avec seuil; parfois sans seuil
Fission	$n + A \Rightarrow PF' + PF'' + quelques\ neutrons$	Noyaux lourds: sans seuil si N impair, avec seuil si N pair; effet Tunnel (N est le nombre de nucléons du noyau composé).

1.1.3 Sections efficaces neutroniques

Les interactions des neutrons avec la matière sont décrites en termes de quantités appelées sections efficaces que l'on peut définir de la façon suivante (Hébert, 2009): un faisceau de neutrons monoénergétique de vitesse \vec{v} et de concentration n entre en collision selon une direction normale avec un bloc de N isotopes par cm^3 (voir figure 1.1).

Des études expérimentales ont montré que le taux de réaction nucléaire, T , (autrement dit le nombre de réactions par seconde) est proportionnel au flux de neutrons incidents, ϕ . Ce facteur de proportionnalité est aussi fonction de l'énergie du neutron incident et des propriétés nucléaires du

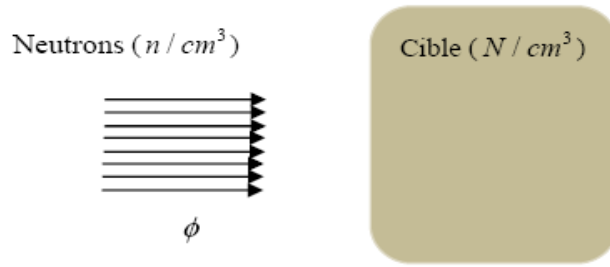


Figure 1.1 Collision flux neutroniques matière

noyau cible.

$$T = \sigma \phi N V \quad (1.3)$$

$$\sigma = \sigma(E, isotope) \quad (1.4)$$

où V est le volume de la cible.

Nous venons de voir des réactions subies par les neutrons dans les réacteurs dans le tableau 1.1. Comme il y a plusieurs types d'interactions possibles avec la matière, on est ainsi amené à décrire chaque type d'interaction par une section efficace microscopique (ici le terme "microscopique" est employé pour dire que la section efficace concerne un seul noyau) fonction du type d'interaction, de l'isotope et de l'énergie du neutron incident. La section efficace totale, σ_t , est la somme des sections efficaces de diffusion, σ_s ("s" pour scattering en anglais), et d'absorption, σ_a :

$$\sigma_t = \sigma_s + \sigma_a \quad (1.5)$$

La section efficace de diffusion comprend le terme de la diffusion élastique, σ_e , et la diffusion inélastique, σ_i .

$$\sigma_s = \sigma_e + \sigma_i \quad (1.6)$$

La section efficace d'absorption comprend la fission, σ_f , la capture radiative, σ_γ , et les réactions de type $(n, 2n)$, $(n, 3n)$, etc.:

$$\sigma_a = \sigma_f + \sigma_\gamma + \sigma_{n,2n} + \sigma_{n,3n} + \dots \quad (1.7)$$

En neutronique, on a pris l'habitude pour les milieux homogènes de travailler avec des sections efficaces macroscopiques au lieu de microscopiques, c'est dire pour un milieu physique homogène contenant des isotopes identiques la section efficace macroscopique est donnée par:

$$\Sigma_r = N\sigma_r \quad (1.8)$$

$$\Sigma_t = \sum_r \Sigma_r \quad (1.9)$$

où N est la densité des isotopes dans le milieu physique et r le type de réaction.

Pour les milieux composites, la section efficace macroscopiques du mélange (totale ou partielle) sera la somme des sections efficaces macroscopiques de chacun des composants:

$$\Sigma = \Sigma_1 + \Sigma_2 + \Sigma_3 + \dots \quad (1.10)$$

1.2 Traitement des données nucléaires

Le premier concept requis pour faire fonctionner un code de calcul du réacteur est d'avoir les sections efficaces de toutes les réactions possibles et leurs dépendances en énergie, pour chaque isotope.

L'évaluation des sections efficaces expérimentalement a un grand intérêt pour les experts du physique nucléaire. En effet, plusieurs expériences ont été effectuées pour déterminer les sections efficaces pour les différentes réactions des isotopes, et qui sont répétées pour plusieurs niveaux d'énergie afin de couvrir le plus possible la gamme d'énergie requise en physique des réacteurs (entre 10^{-11} MeV et 10 MeV).

Ces mesures nucléaires établies sur différents noyaux ont conduit à un énorme volume d'information. De ce fait les physiciens des réacteurs ont pensé à faire une organisation de ces donnés. À cette étape le processus consiste à choisir les mesures redondantes (où bien à faire la moyenne avec des poids adéquats), à combler les manques et à produire des évaluations nucléaires en format ENDF (Reuss, 2003).

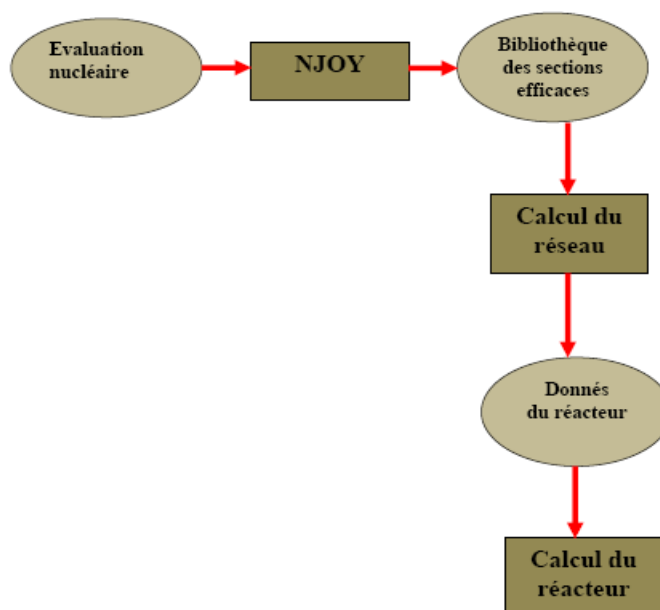


Figure 1.2 Processus d calcul du réacteur (Hébert, 2009)

Les principales listes d'évaluation utilisées aujourd'hui par les physiciens des réacteurs sont données au tableau 1.2. La bibliothèque formée par NJOY (voir figure 1.2) pour chaque liste d'évaluation

Tableau 1.2 Principales listes d'évaluation mondiales

Sigle	Nom de la liste	Origine
ENDF/B	Evaluated Nuclear Data File	USA
JEF	Joint European File	Europe (OCDE)
JENDL	Japanese Evaluated Nuclear Data Library	Japon
CENDL	Chinese Evaluated Nuclear Data Library	Chine
EFF	European Fusion File	Europe (UE)
FENDL	Fusion Evaluated Nuclear Data Library	AIEA
UKNDL	UK Nuclear Data Library	Royaume-Uni
KEDAK	Kerndaten Karlsruhe	Allemagne
BROND		Russie
EAF	European Activation File	Europe (UE)

est définie de façon à combler tout la plage d'énergie.

1.3 Équation de transport

1.3.1 Présentation de l'équation

Au sein d'un réacteur, l'état d'un neutron se caractérise par les variables suivantes (voir figure 1.3):

- \vec{r} le vecteur position localisant le neutron;
- $\vec{\Omega}$ le vecteur indiquant la direction de déplacement du neutron;
- E l'énergie cinétique du neutron;
- t l'instant d'observation.

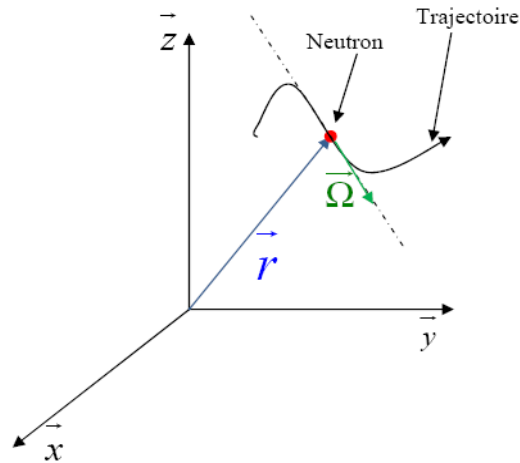


Figure 1.3 Position du neutron dans l'espace

Pour caractériser la population neutronique dans l'hyper-volume $(d\vec{r}, d\vec{\Omega}, dE)$, on utilise les deux grandeurs suivantes:

- La densité de neutron $n(\vec{r}, \vec{\Omega}, E, t)$. Ceci est équivalent à la densité de neutrons dans le volume élémentaire $(d\vec{r}, d\vec{\Omega}, dE)$ à un temps t donné par:

$$n(\vec{r}, \vec{\Omega}, E, t) d\vec{r} d\vec{\Omega} dE \quad (1.11)$$

- Le flux angulaire défini par:

$$\phi(\vec{r}, \vec{\Omega}, E, t) = v n(\vec{r}, \vec{\Omega}, E, t) \quad (1.12)$$

avec v la vitesse du neutron.

L'équation de transport résulte du bilan de la population neutronique dans l'hyper-volume $(d\vec{r}, d\vec{\Omega}, dE)$ autour de $(\vec{r}, \vec{\Omega}, E)$ photographié aux temps t et $t + \Delta t$ (Hébert, 2009):

$$\begin{aligned} \text{Variation du nombre de neutrons} &= \text{Neutrons créés dans l'hyper-volume} \\ &\quad - \text{Neutrons perdus par collisions} \\ &\quad - \text{Neutrons sortants du volume } d\vec{r} \end{aligned}$$

1. La variation du nombre de neutron pendant Δt dans l'hyper-volume $(d\vec{r}, d\vec{\Omega}, dE)$ s'écrit simplement:

$$n(\vec{r}, \vec{\Omega}, E, t + \Delta t) - n(\vec{r}, \vec{\Omega}, E, t) \quad (1.13)$$

2. La quantité des neutrons perdus par collisions (scattering et absorption) avec des noyaux pendant Δt est donnée par:

$$\Sigma_t(\vec{r}, \vec{\Omega}, E, t) \phi(\vec{r}, \vec{\Omega}, E, t) d\vec{r} d\vec{\Omega} dE \Delta t \quad (1.14)$$

3. Les neutrons quittant le volume de contrôle par migration (fuite) sont donnés par :

$$\vec{\nabla} \cdot (\vec{\Omega} \phi(\vec{r}, \vec{\Omega}, E, t)) d\vec{r} d\vec{\Omega} dE \Delta t \quad (1.15)$$

4. Les neutrons issus de la diffusion correspondent à;

$$\left(\int_0^{+\infty} \int_0^{4\pi} \Sigma_s(\vec{r}, \vec{\Omega}' \rightarrow \vec{\Omega}, E' \rightarrow E, t) \phi(\vec{r}, \vec{\Omega}', E', t) d\vec{\Omega}' dE' \right) d\vec{r} d\vec{\Omega} dE \Delta t \quad (1.16)$$

où $\Sigma_s(\vec{r}, \vec{\Omega}' \rightarrow \vec{\Omega}, E' \rightarrow E, t)$ est la probabilité pour un neutron d'état $(\vec{r}, \vec{\Omega}', E', t)$ de passer dans un état $(\vec{r}, \vec{\Omega}, E, t)$

5. Les neutrons créés par fission dans cet hyper-volume pendant dt (fission des atomes fissiles présents dans le combustible) s'écrivent sous la forme:

$$\chi(\vec{r}, E) \left(\int_0^{+\infty} \int_0^{4\pi} \nu(\vec{r}, E') \Sigma_f(\vec{r}, \vec{\Omega}', E', t) \phi(\vec{r}, \vec{\Omega}', E', t) d\vec{\Omega}' dE' \right) d\vec{r} d\vec{\Omega} dE \Delta t \quad (1.17)$$

où:

- $\nu(\vec{r}, E')$ représente le nombre moyen des neutrons émis par une fission;
- $\chi(\vec{r}, E)$ représente le spectre de fission.

6. La source extérieure permettant l'initialisation de la réaction en chaîne est donnée par:

$$S_{ext}(\vec{r}, \vec{\Omega}, E, t) d\vec{r} d\vec{\Omega} dE \Delta t \quad (1.18)$$

En divisant l'équation résultante par Δt et en faisant tendre Δt vers 0, nous obtenons la forme locale de l'équation de transport:

$$\begin{aligned} \frac{1}{v} \frac{\partial \phi(\vec{r}, \vec{\Omega}, E, t)}{\partial t} = & -\text{div}(\vec{\Omega} \phi(\vec{r}, \vec{\Omega}, E, t)) \\ & -\Sigma_t(\vec{r}, \vec{\Omega}, E, t) \phi(\vec{r}, \vec{\Omega}, E, t) \\ & +S_{ext}(\vec{r}, \vec{\Omega}, E, t) \\ & + \left(\int_0^{+\infty} \int_0^{4\pi} \Sigma_s(\vec{r}, \vec{\Omega}' \rightarrow \vec{\Omega}, E' \rightarrow E, t) \phi(\vec{r}, \vec{\Omega}', E', t) d\vec{\Omega}' dE' \right) \\ & +\chi(\vec{r}, E) \left(\int_0^{+\infty} \int_0^{4\pi} \nu(\vec{r}, E') \Sigma_f(\vec{r}, \vec{\Omega}', E', t) \phi(\vec{r}, \vec{\Omega}', E', t) d\vec{\Omega}' dE' \right) \end{aligned} \quad (1.19)$$

1.3.2 Méthodes de résolution

La résolution analytique directe de l'équation de transport n'est pas en général possible. Même si les géométries étaient très simples (ce qui n'est généralement pas le cas pour les réacteurs actuels), les variations des sections efficaces rendraient la solution analytique du problème presque impossible. Des méthodes numériques ont donc été élaborées pour la résoudre dont:

- La méthode P_N qui consiste à limiter la variation angulaire du flux et à développer la distribution angulaire ϕ en harmoniques sphériques et de limiter l'expansion à seulement quelques termes (Pomraning, 1993).
- La méthode de probabilités de collision qui consiste à discrétiser, relativement à l'espace, l'équation de transport sous forme intégrale (Carlvik, 1965).
- La méthode S_N qui consiste à faire une discrétisation de l'espace angulaire pour résoudre l'équation uniquement dans un nombre fini de directions (Carlson, 1958).
- La méthode des caractéristiques qui consiste à calculer le flux angulaire le long de chaque trajectoire de façon itérative (Hébert, 2009).
- La méthode Monte Carlo, qui consiste à recréer, grâce à l'ordinateur, l'histoire d'un très grand nombre de neutrons en respectant les lois de probabilités des différentes variables aléatoires (Gelbard, 1961).

D'ailleurs, afin d'obtenir un système d'équations algébriques pouvant être résolu de façon efficace sur ordinateur, il faudra encore simplifier la dépendance en énergie de l'équation de transport avant même de considérer la discrétisation spatiale et angulaire. Par conséquent, on a recours à une discrétisation du domaine de la variable énergie $[0, E_0]$ en un nombre G d'intervalles nommés groupes d'énergie. Ces intervalles ne sont pas nécessairement de la même largeur, et les groupes d'énergie sont rangés dans un ordre croissant ($g = 1$ correspondant au groupe d'énergie minimum);

$$\Delta E_g = E_{g-1} - E_g \quad (1.20)$$

où $g = 1, 2, 3, \dots, G$.

Pour chaque groupe d'énergie le flux neutronique est défini par:

$$\phi^g(\vec{r}, \vec{\Omega}) = \int_{E_g}^{E_{g-1}} \phi(\vec{r}, \vec{\Omega}, E) dE \quad (1.21)$$

et, les sections efficaces multigroupes seront données par:

$$\Sigma_t^g(\vec{r}) = \frac{1}{\phi^g(\vec{r})} \int_{E_g}^{E_{g-1}} \Sigma_t(\vec{r}, E) \phi(\vec{r}, E) dE \quad (1.22)$$

$$\Sigma_s^{g' \rightarrow g}(\vec{r}) = \frac{1}{\phi^{g'}(\vec{r})} \int_{E_g}^{E_{g-1}} dE \int_{E_{g'}}^{E_{g'-1}} dE' \Sigma_s(\vec{r}, E' \rightarrow E) \phi(\vec{r}, E') \quad (1.23)$$

CHAPITRE 2

DESCRIPTION DU RÉACTEUR SLOWPOKE-2

SLOWPOKE-2 est l'acronyme de **Safe Low Power Critical Experiment**. C'est un réacteur de type piscine conçu par EACL à la fin des années 1960, qui est utilisé pour des activités de recherche nucléaire. Son champ d'application permet essentiellement l'analyse par activation neutronique (AAN).

Actuellement il y a quatre réacteurs en opération au Canada. Il est conçu pour fonctionner à un flux de neutron thermique allant jusqu'à 10^{12} neutrons par cm^2 par seconde, avec une puissance maximale de 20 *KW*.

Le réacteur SLOWPOKE-2 est composé de six grandes régions cylindriques concentriques (voir figure 2.1). Le premier cylindre, le centre du réacteur, permet l'insertion de la barre de contrôle. Les deux autres cylindres contenant le combustible et le réflecteur sont immergés dans le quatrième cylindre contenant le caloporteur. Le coeur (c'est à dire le combustible et la barre de contrôle), le réflecteur et le caloporteur sont enfermés dans une cuve en aluminium. La cuve en aluminium est immergée dans une piscine d'eau légère afin de ralentir les neutrons provenant du réacteur, dont les dimensions sont données dans le tableau 2.1.

Tableau 2.1 Caractéristiques du réacteur SLOWPOKE-2 (Boisvert, 1976)

Diamètre de la piscine	2.5 <i>m</i>
Hauteur de la piscine	6.1 <i>m</i>
Diamètre de la cuve	0.6 <i>m</i>
Hauteur de la cuve	5.3 <i>m</i>
Diamètre du coeur	0.22 <i>m</i>
Hauteur du coeur	0.22 <i>m</i>
Épaisseur de l'anneau de béryllium	0.102 <i>m</i>
Diamètre du réflecteur inférieur	0.322 <i>m</i>
Hauteur du réflecteur inférieur	0.102 <i>m</i>

2.1 Le coeur

2.1.1 La barre de contrôle

Le contrôle du réacteur est assuré par le déplacement de la barre de contrôle. La longueur complète de cette barre est de 38.63 *cm*. Elle est totalement recouverte d'aluminium et contient une partie active (hautement absorbante) constituée d'un tube de cadmium de diamètre 4 *mm* et de longueur 25.3 *cm* (voir figure 2.2). Lorsqu'elle est complètement insérée, la distance qui la sépare du réflecteur inférieur de béryllium est de 5.71 *cm*, par contre lorsqu'elle est complètement retirée la distance de séparation est de 20.32 *cm* (Hajjaji, 1999). Cette barre se déplace dans une région cylindrique d'aluminium d'épaisseur 1.13 *mm* et de rayon intérieur de 11.45 *mm*.

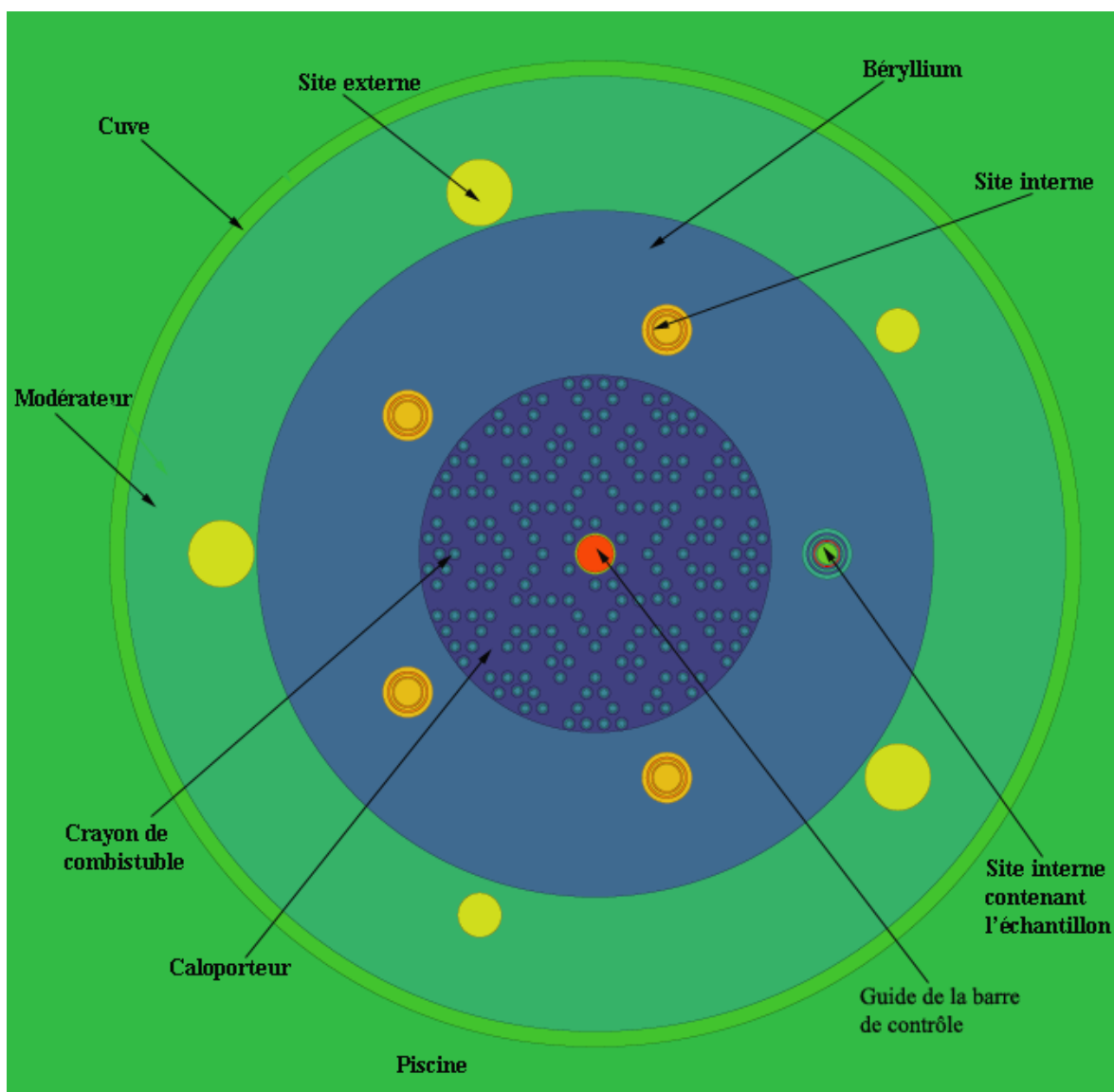


Figure 2.1 Coupe horizontale du réacteur SLOWPOKE

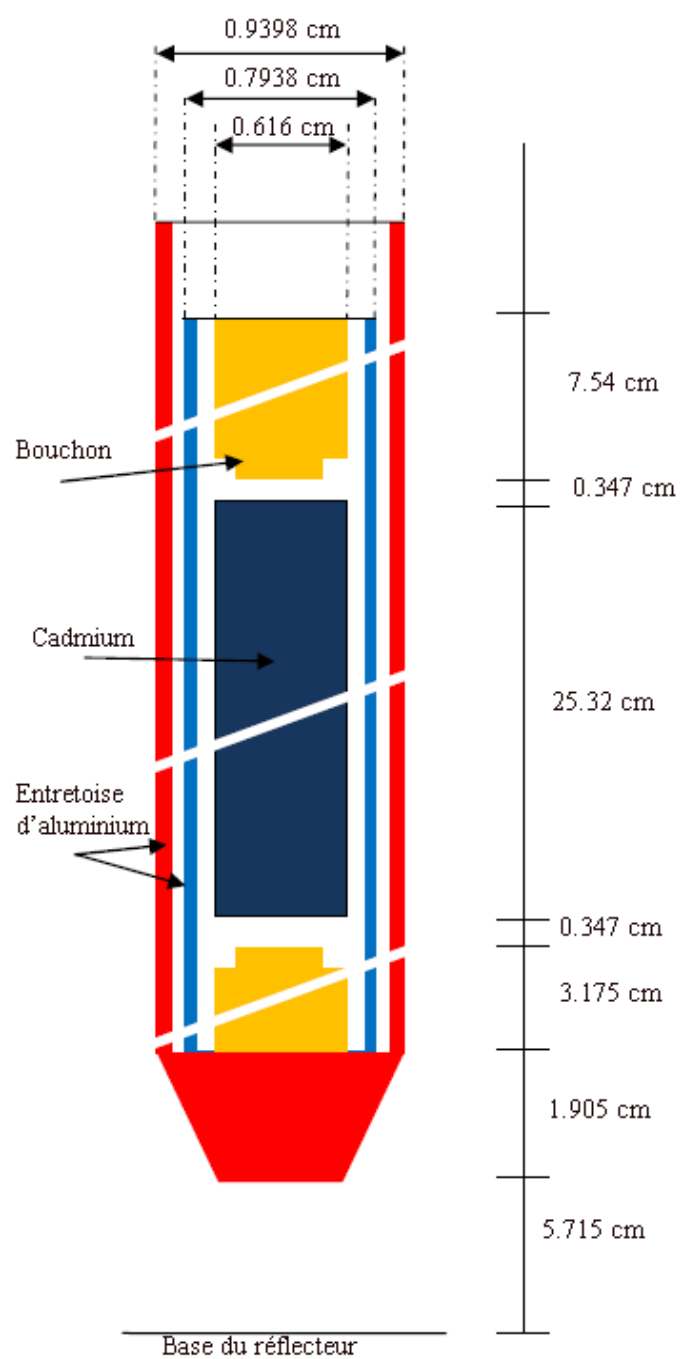


Figure 2.2 Barre de contrôle

2.1.2 Le combustible

2.1.2.1 Combustible HEU

Le coeur HEU abréviation de **Highly Enriched Uranium**, est un coeur contenant 295 crayons de combustible de masse critique totale de 820 g d'uranium ^{235}U sous forme d'alliage d'aluminium dans lequel l'uranium est enrichi à 93 %.

Le première coeur HEU fut installé en 1967 à la société radiochimique de l'Énergie Atomique de Canada, il contient 875 g d'uranium ^{235}U avec 317 crayons (Townes, 1985).

Cependant, dû au fort enrichissement d'uranium, le HEU est vu comme une potentielle source d'armes nucléaires, ainsi l'installation de ce type de coeur est devenue impossible.

2.1.2.2 Combustible LEU

LEU (**Low Enrichment Uranium**) est choisi pour remplacer le coeur HEU du SLOWPOKE-2, ainsi l'enrichissement en uranium est diminué à 19.76 % et la densité d'uranium est augmenté à 10.6 g.cm^{-3} (voir tableau 2.2).

SLOWPOKE-2 à coeur LEU de l'École Polytechnique est le deuxième du genre après celui installé à RMC, et c'est aussi le premier réacteur SLOWPOKE à être converti de HEU à LEU.

Due à la densité élevée en uranium des pastilles de céramique UO_2 le nombre des crayons qui donnent la même réactivité que les crayons HEU est beaucoup plus faible. Ainsi, les calculs ont montré que 180 crayons faiblement enrichis sous forme d'alliage d'oxyde d'uranium peuvent donner la même réactivité initiale que celle de 317 crayons fortement enrichis sous forme d'alliage $\text{U} - \text{Al}$ (Townes, 1987).

Tableau 2.2 Propriétés des combustibles HEU et LEU (Hajjaji, 1999)

Coeur	HEU	LEU
Combustible	Alliage U/Al	Céramique UO_2
Enrichissement U^{235} (%)	93	19.76
Nombre de crayons	296	198
Longueur du crayon (mm)	220	227
Masse totale de U^{235} (Kg)	0.818	1.118
Rayon des crayons (mm)	2.108	2.083
Densité du combustible ($g.cm^{-3}$)	3.45	10.6
Gaine		
Matière	Al	$Zr - 4$
Rayon interne (mm)	2.108	2.121
Rayon externe (mm)	2.616	2.629

2.2 Le caloporteur

La chaleur issue du combustible est transférée par convection naturelle via le caloporteur, qui n'est autre que de l'eau légère, à la cuve du réacteur. L'eau circule entre les crayons de combustible dans un seul sens (voir figure 2.3). Ainsi, elle passe par un orifice en bas du coeur et elle sort par l'espacement entre l'anneau et la plaque supérieure de béryllium.

2.3 Le réflecteur en béryllium

Le réflecteur est composé à 100 % en béryllium et entoure complètement le coeur du réacteur. Il comporte cinq sites d'irradiations d'échantillon et un site de détection neutronique (voir figure 2.4). Son diamètre intérieur est de 22.09 cm, d'épaisseur 10.2 cm et sa hauteur est de 22.748 cm. De plus, deux disques en béryllium limitent le coeur en bas et en haut. Le réflecteur supérieur est formé de plaques en béryllium de forme semi-circulaires et d'épaisseur variable, qui a atteint 6.032 cm en 1991. Leur diamètre extérieur est de 24.13 cm tandis que leur diamètre intérieure est de 2.778 cm avec un petit espacement de 0.24 cm entre les deux demi-disques (Guertin, 1991).

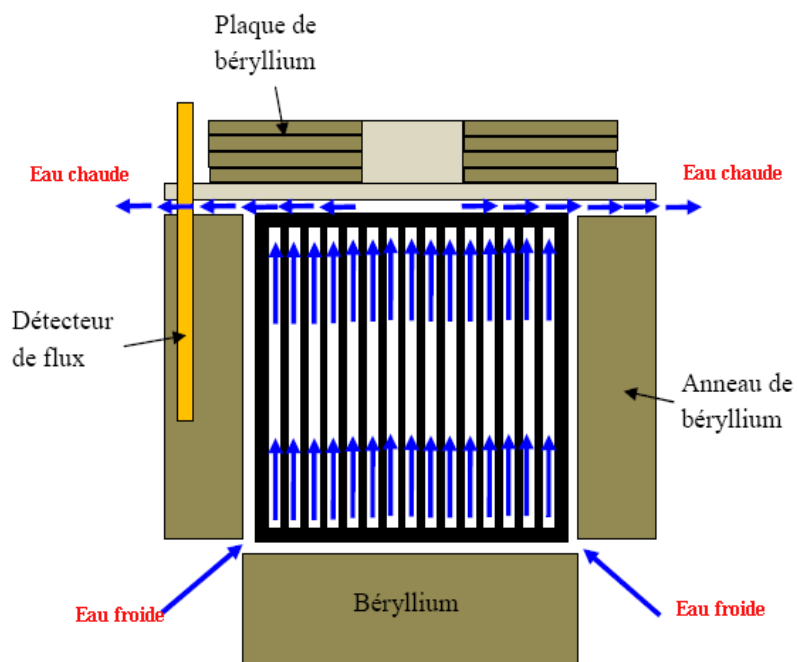


Figure 2.3 Refroidissement du cœur de SLOWPOKE-2

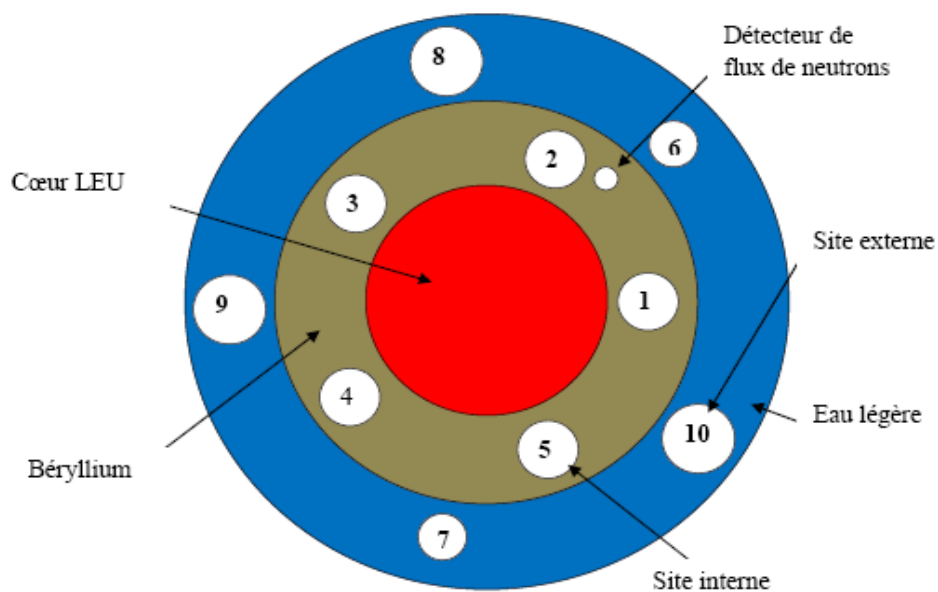


Figure 2.4 Positions des sites d'irradiation pour le SLOWPOKE-2

2.4 Le modérateur

Le modérateur est une région d'eau légère limitée par le réflecteur en béryllium et la cuve en aluminium. En dessous du réflecteur, une partie du modérateur entre dans le coeur pour refroidir le combustible, et il sort par la partie supérieure du réflecteur pour revenir au modérateur.

Dans cette région d'eau il y a deux sites d'irradiations de petites tailles et trois autre de grandes tailles qui servent à irradier des échantillons dans un flux neutroniques presque totalement thermique.

2.5 La piscine

Afin d'isoler le réacteur du milieu extérieur, la cuve en aluminium est immergée dans une piscine d'eau légère de grandes dimensions par rapport à la taille du réacteur. Cette piscine ralentit complètement les neutrons qui ont réussi à passer à travers le réflecteurs et le modérateur. Elle sert aussi de barrière biologique.

CHAPITRE 3

ANALYSE PAR ACTIVATION NEUTRONIQUE

L'analyse par activation neutronique (AAN) est une méthode qui permet la détermination de la quantité d'un élément particulier dans un échantillon en mesurant la radioactivité gamma induite par une irradiation à l'aide des neutrons. Cette méthode est très sensible et sa limite de détection peut atteindre 10^{-12} g (et parfois même une valeur plus faible).

Dans ce chapitre nous allons présenter les principales sources de neutrons qui peuvent fournir les neutrons utilisés pour l'irradiation d'un échantillon, ensuite nous présenterons une description détaillée de l'AAN.

3.1 Sources de neutrons

La principale source de neutrons est constituée par des réacteurs nucléaires destinés à usage industriel ou expérimental. Généralement ces réacteurs sont équipés de sites d'irradiation, et un dispositif de transfert des échantillons irradiés du réacteur au laboratoire d'analyse (Revel, 2009). Le réacteur SLOWPOKE-2 de l'École Polytechnique de Montréal est équipé d'un système pneumatique qui assure un transfert rapide d'échantillons. Les accélérateurs peuvent aussi être utilisés comme sources des neutrons en générant des neutrons par des réactions nucléaires, dont les principales sont données dans le tableau 3.1.

L'AAN est basée sur la détection des rayons gamma issus des radio-isotopes. Or, pour produire ces radio-isotopes en quantité suffisante il est préférable d'irradier l'échantillon dans un flux de neutrons thermiques puisqu'il donne la réaction de capture radiative (n, γ) qui mène à un isotope du noyau cible.

Cependant, quelle que soit la source de neutron utilisée, on trouve toujours un flux de neutrons rapides très important, et il est donc nécessaire de ralentir les neutrons avant qu'ils passent à travers

Tableau 3.1 Quelques exemples de sources de neutrons (Perdijon,1967)

La fission de ^{235}U	Elle donne un spectre de neutrons qui s'étend depuis zéro jusqu'à plusieurs MeV
Réaction $D - T$ $^3_1\text{H}(^2_1\text{H}, ^1_0\text{n})^4_2\text{He}$	C'est une source pratiquement isotrope qui donne des neutrons monoénergétiques de 14 MeV
Réaction $D - D$ $^2_1\text{H}(^2_1\text{H}, ^1_0\text{n})^3_2\text{He}$	C'est une source non isotrope mais pratiquement monoénergétique (environ 2.6 MeV)
Réaction $^9_4\text{Be}(^2_1\text{H}, ^1_0\text{n})^{10}_5\text{B}$	C'est une source non isotrope et non monoénergétique (spectre allant de 1 à 6 MeV)
Réaction $^9_4\text{Be}(\gamma, ^1_0\text{n})^8_4\text{Be}$	C'est une source non isotrope et non monoénergétique (spectre allant de 0 à 1 MeV)
Réaction $^9_4\text{Be}(\alpha, ^1_0\text{n})^{12}_6\text{C}$	C'est une source non isotrope et non monoénergétique (spectre allant de 1 à 6 MeV)

l'échantillon. Le béryllium du réflecteur et l'eau du caloporteur ralentissent fortement les neutrons rapides issues du combustible. Ainsi dans le site 1 le pourcentage des neutrons thermique est de 76 % de la totalité des neutrons incidents (Perdijon,1967).

3.2 Radioactivité induite par l'irradiation

Une réaction de capture radiative d'un neutron par un isotope ^A_NX peut être écrite de la façon suivante:



Habituellement on écrit cette équation sous la forme:

$$^A_N\text{X}(n, \gamma)^{A+1}_N\text{X} \quad (3.2)$$

Le nombre N^F d'isotope $^{A+1}_N\text{X}$ formés durant l'irradiation pour une période de temps dt est proportionnel au nombre d'isotopes de la cible (N_0), à la section efficace de capture radiative ($\sigma_{n\gamma}$) et au flux des neutrons incident (ϕ):

$$N^F = N_0 \sigma_{n\gamma} \phi dt \quad (3.3)$$

Le nombre d'isotope radioactifs ${}^{A+1}_N X$ détruits par décroissance radioactive pendant le même temps est, pour un nombre N d'isotopes présents à l'instant t :

$$N^D = N(t)\lambda dt \quad (3.4)$$

où λ étant la constante de désintégration du radio-isotope ${}^{A+1}_N X$.

Le taux de croissance des radio-isotopes dans la cible à l'instant t est donnée par la relation suivante:

$$dN = N^F - N^D = (N_0\phi\sigma_{n\gamma} - N(t)\lambda)dt \quad (3.5)$$

Compte tenu de la faible valeur de probabilité de réaction, on peut considérer N_0 comme étant constant et en intégrant cette équation par rapport au temps pour une cible supposée initialement inactive ($t = 0$ s, $N = 0$) on obtient:

$$N(t) = \frac{N_0\phi\sigma_{n\gamma}}{\lambda}(1 - e^{-\lambda t}) \quad (3.6)$$

L'activité induite qui s'exprime en Bq (désintégration par seconde) est obtenue en multipliant par λ l'équation précédente:

$$A(t) = N_0\phi\sigma_{n\gamma}(1 - e^{-\lambda t}) \quad (3.7)$$

Il est préférable d'exprimer cette relation en fonction de la masse de l'échantillon, puisque c'est la masse qui est le paramètre cherché par l'AAN.

À $t = 0$ s, le nombre de noyau dans la cible est :

$$N_0 = \frac{N_A m \theta}{M_a} \quad (3.8)$$

d'où on obtient l'activité induite en fonction de la masse:

$$A = \frac{N_A \phi \sigma_{n\gamma} \theta m}{M_a}(1 - e^{-\lambda t}) \quad (3.9)$$

où:

N_A nombre d'Avogadro ;

θ abondance de l'isotope cible dans l'élément considéré ;

m masse de l'élément recherché dans l'échantillon (g) ;

M_a masse atomique de l'isotope irradié.

Lorsque le temps d'irradiation augmente et tend vers l'infini, $e^{-\lambda t}$ tend vers 0 et l'activité A tend vers une valeur limite appelée activité de saturation:

$$A_s = \frac{N_A \phi \sigma_{n\gamma} \theta m}{M_a} \quad (3.10)$$

Après un temps d'irradiation t_i l'activité de la cible est:

$$A(t_i) = A_s(1 - e^{-\lambda t_i}) \quad (3.11)$$

Ensuite, la cible est mise au repos pour une période t_d , durant laquelle il y aura une décroissance radioactive (voir figure 3.1), et l'activité sera:

$$A(t_i, t_d) = A_s(1 - e^{-\lambda t_i})(e^{-\lambda t_d}) \quad (3.12)$$

Ici le terme $e^{-\lambda t_d}$ représente la décroissance radioactive à partir de la fin de l'irradiation. Suite à ce repos, on commence le comptage et on définit le début d'un axe de temps t_c (c'est à dire temps du comptage) (voir figure 3.2).

Ainsi, le nombre d'isotope qui se désintégreront pendant une période de temps t_c est donné par:

$$N(t_i, t_d, t_c) = \int_0^{t_c} A(t_i, t_d) e^{-\lambda t} dt \quad (3.13)$$

Ce qui donne:

$$N(t_i, t_d, t_c) = \frac{A(t_i, t_d)}{\lambda} (1 - e^{-\lambda t_c}) \quad (3.14)$$

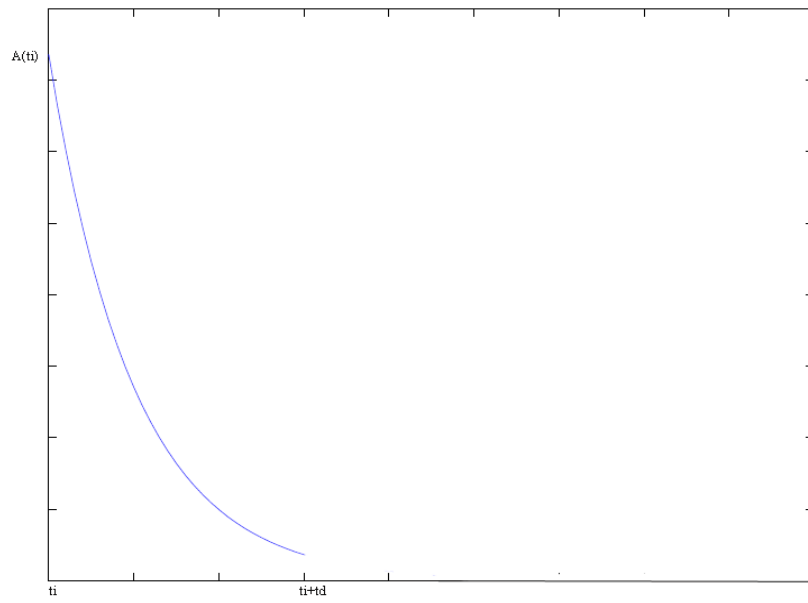


Figure 3.1 Décroissance de l'activité pour une période t_d

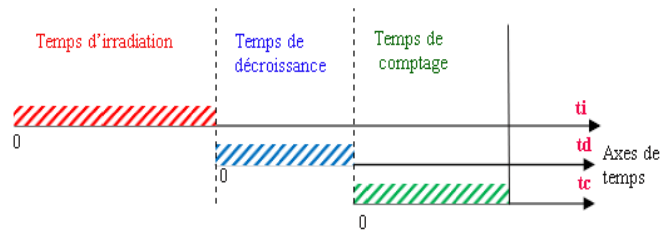


Figure 3.2 Temps d'analyse

d'où l'activité accumulée (Kassakov, 2006; Revel, 2009):

$$A(t_i, t_d, t_c) = \frac{N_A \phi \sigma_{n\gamma} \theta m}{M_a} (1 - e^{-\lambda t_i}) (1 - e^{-\lambda t_c}) e^{-\lambda t_d} \quad (3.15)$$

3.3 Traitement du spectre γ

3.3.1 Spectrométrie γ

3.3.1.1 Détecteurs

La détection des photons γ au laboratoire SLOWPOKE se fait en utilisant un système à semi-conducteur contenant du germanium de très haute pureté. Ces détecteurs permettent de mesurer les rayons γ dans une gamme d'énergie de l'ordre de la centaines de KeV jusqu'à quelques MeV . Le pouvoir de séparation (distance minimale entre deux pics successives) est de 1.5 à 1.8 KeV pour une énergie de l'ordre du MeV (Revel, 2009).

La figure 3.3 illustre le signal de sortie de la spectrométrie γ monochromatique d'énergie ε_0 modérée. L'objectif de la spectrométrie étant de déterminer l'énergie et le nombre de coups par canal des rayonnements avec la meilleure précision possible, il convient alors, afin d'optimiser la résolution, d'éliminer les différentes sources de bruit susceptibles de provoquer un élargissement des raies.

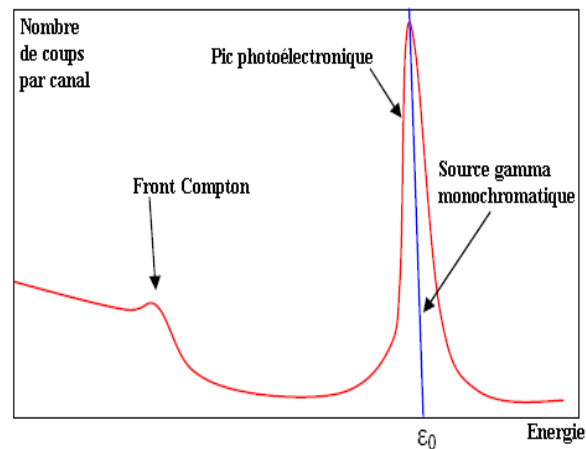


Figure 3.3 Spectre d'une source γ monochromatique

3.3.1.2 Sources de bruit

Les contributions au bruit sont de nature diverse et sont liées à la qualité du détecteur et à celle de l'électronique de traitement:

- **Effet d'empilement:** Le temps mort est essentiellement dû au dispositif de détection du rayons γ . En effet lorsque le taux de production des gammas devient très élevé, il peut arriver que deux évènements se produisent dans un intervalle de temps inférieur au temps nécessaire au traitement du signal par la chaîne de spectrométrie. Il en résulte un recouvrement (empilement) des impulsions qui sont vues par l'amplificateur comme issues d'une seule interaction. De ce fait, il en découle une distorsion des spectres (voir figure 3.4). Le temps mort peut être dû à des radio-isotopes autres que celui utilisé pour le dosage mais aussi au radio-isotope à mesurer (Kassakov, 2006).

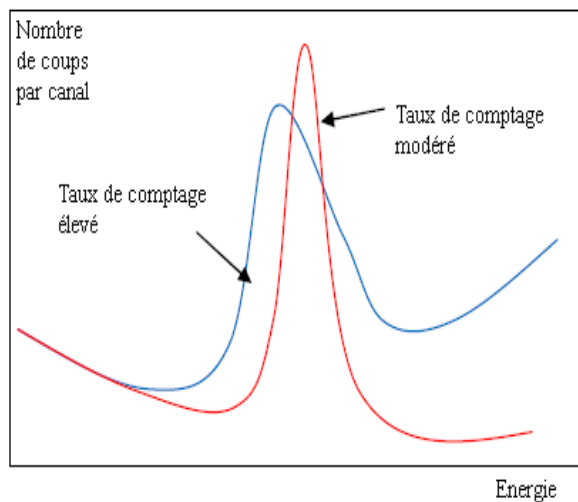


Figure 3.4 Effet du phénomène d'empilement sur la distorsion d'un spectre

- **Bruit électronique:** Le bruit électrique est essentiellement lié au courant d'obscurité (courant dû à la jonction pn), à sa capacité, à la capacité d'entrée du préamplificateur, aux capacités parasites (Ponpon, 2007).
- **Interactions parasites:** Ce sont des réactions qui produisent des rayons X .

3.3.1.3 Interactions des rayons gamma

Bien qu'il y a plusieurs types d'interaction des rayons gamma avec la matière, seulement trois types jouent un rôle important pour la mesure des photons gamma. Les trois types d'interaction conduisent au transfert complet ou partiel de l'énergie des photons gamma en énergie cinétique électronique.

- **Effet Compton:** Les rayons γ induits entrent en collision avec les électrons des atomes de la cibles. En effet, un photon gamma qui percute un électron du cortège électronique (voir figure 3.5), absorbe l'énergie du photon et quitte son orbite avec une énergie cinétique ε_{e^-} en émettant un autre photon gamma de moindre énergie (Knoll, 1999).

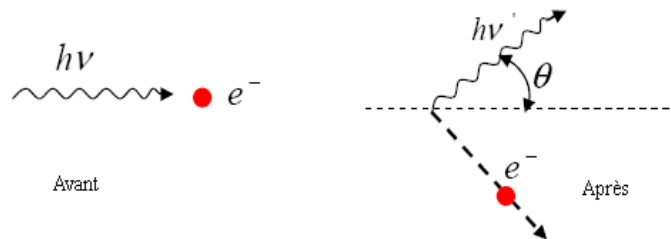


Figure 3.5 Effet Compton

L'énergie cinétique de l'électron est:

$$\varepsilon_{e^-} = \varepsilon_{\gamma^i} - \varepsilon_{\gamma^t} \quad (3.16)$$

L'énergie du nouveau photon dépend de l'angle de sortie θ :

$$\varepsilon_{\gamma^t}(\theta) = h\nu' = \frac{h\nu}{1 + (h\nu/m_0c^2)(1 - \cos\theta)} \quad (3.17)$$

Dans la cible toutes les directions θ sont produites, donc un continuum d'énergie est transmis à l'électron éjecté (voir figure 3.6).

- **La production des paires:** Au delà de 1.02 MeV , le rayon γ incident, peut entraîner la production d'une paire positron-électron qui sera absorbée dans quelques secondes. Comme une énergie minimum de $2m_0c^2$ est requise pour la création de la paire positron-électron, l'énergie du rayon γ incident doit être au moins de 1.02 MeV pour rendre possible ce phénomène.

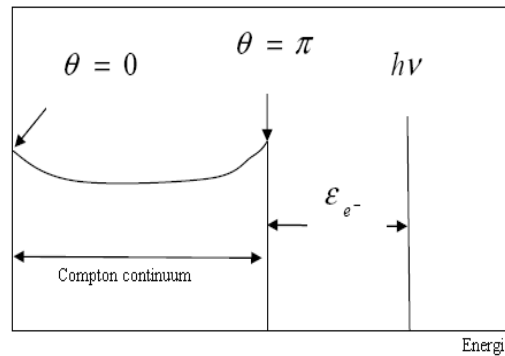


Figure 3.6 La distorsion Compton

Si le photon γ a une énergie plus grande que 1.02 MeV , l'excès d'énergie est transmise sous forme d'énergie cinétique à la paire positron-électron. L'énergie cinétique totale de la paire est:

$$E_{e^+} + E_{e^-} = h\nu - 2m_0c^2 \quad (3.18)$$

De plus lors d'une rencontre du positron et d'un électron en orbite dans la cible, il y aura annihilation des deux particules avec émission de deux rayons γ d'énergie chacun $m_0c^2 = 0.511 \text{ MeV}$ (Knoll, 1999).

- **absorption photoélectrique:** L'effet photoélectrique est produit lorsqu'un photon gamma est complètement absorbé par un atome. L'énergie du photon sert à arracher un électron du cortège électronique. L'électron est éjecté avec une énergie cinétique de valeur:

$$\varepsilon_{e^-} = \varepsilon_{\gamma^i} - E \quad (3.19)$$

où E est l'énergie de l'électron initialement dans son orbite.

3.3.2 Méthodes de calcul expérimentales

3.3.2.1 Mesures absolues

Dans cette méthode, on emploie le nombre des coups comptés sous le photopic (voir figure 3.7) et l'équation (3.15) est corrigée comme (Kassakov, 2006):

$$S = \frac{N_A \sigma_{n\gamma} \phi \theta m \epsilon I}{M_a \lambda} (1 - e^{-\lambda t_i})(1 - e^{-\lambda t_c}) e^{-\lambda t_d} \quad (3.20)$$

où:

- I fraction du nombre de coups sous le photopic d'énergie ε sur le nombre de coups sous le spectre complet donné par les γ d'énergie ε ;
- S surface du pic ;
- ϵ efficacité du détecteur.

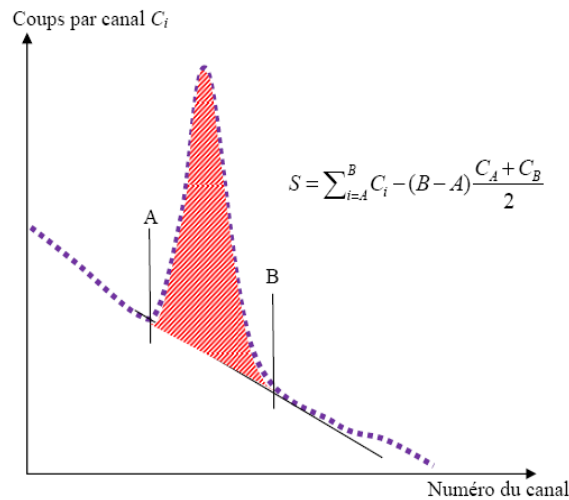


Figure 3.7 Méthodes de calcul de surface sous le photopic

Autrement dit, on considère que le nombre de coups compté sur le photopic est égal à l'activité corrigée (Eq. 3.20), d'où on trouve une relation de proportionnalité entre la masse et le nombre de coups.

On conçoit que les mesures peuvent être absolues si on connaît les valeurs de tous les paramètres d'irradiation et de comptage, mais comme c'est rarement le cas il est préférable de faire des mesures relatives (Kassakov, 2006; Perdijon, 1967).

3.3.2.2 Mesures relatives

Au laboratoire SLOWPOKE de l'École Polytechnique de Montréal les concentrations des échantillons sont calculées par la méthode relative. Cette méthode consiste à irradier un étalon (de composition connu) et un échantillon, de même géométrie, pour trouver leurs rapport d'activités mesurées qui donne la concentration de l'échantillon.

En AAN, la concentration d'un élément donné dans un échantillon à analyser est calculée en comparant sa surface de pic avec celle d'un étalon dilué irradié (de composition connue) et compté dans les mêmes conditions. L'équation fondamentale reliant la surface du pic à la concentration est (Kassakov, 2006):

$$A = \frac{CW N_A \theta \sigma I \varepsilon \phi (1 - e^{-\lambda t_i}) e^{-\lambda t_d} (1 - e^{-\lambda t_c})}{M_a \lambda} \quad (3.21)$$

où:

A	air du pic ;
C	concentration de l'élément ;
W	poids de l'échantillon utilisé ;
θ	abondance isotopique ;
σ	section efficace ;
I	intensité du rayon gamma ;
ε	efficacité du détecteur ;
ϕ	flux de neutron ;

λ constante de décroissance radioactif ;

M_a masse atomique.

On définit la constante de sensibilité B comme suit;

$$B = \frac{N_A \theta \sigma I \varepsilon}{M_a} \quad (3.22)$$

d'où:

$$A = \frac{CWB\phi(1 - e^{-\lambda t_i})e^{-\lambda t_d}(1 - e^{-\lambda t_e})}{\lambda} \quad (3.23)$$

La constante B est déterminée à partir de l'équation 3.23 en utilisant l'aire du pic mesuré avec l'étalon. Une fois la constante de sensibilité connue, on peut déterminer la concentration de l'élément recherché dans l'échantillon. Le programme EPAA calcule les concentrations avec la formule suivante:

$$C = \frac{A\lambda}{WB\phi(1 - e^{-\lambda t_i})e^{-\lambda t_d}(1 - e^{-\lambda t_e})} \quad (3.24)$$

3.3.3 Correction empirique de la masse

3.3.3.1 Facteur d'autoprotection

Le coefficient d'absorption des neutrons ou facteur d'autoprotection est le rapport du flux moyen à travers l'échantillon sur le flux qu'il y aurait au même endroit en l'absence de l'échantillon. L'activité induite due à un radio-isotope se calcule alors en remplaçant le flux perturbé ϕ par un flux corrigé ϕ' :

$$\phi' = G_{eff}\phi \quad (3.25)$$

où G_{eff} est le coefficient d'absorption des neutrons pour l'échantillon utilisé (Kassakov, 2006).

3.3.3.2 Études récentes pour la correction de masse pour l'AAN

Des formules semi-empiriques ont été proposées pour déterminer les facteurs d'autoprotection spatiale pour différentes géométries (Gonçalves, 2004; Martinho, 2004). Ces facteurs dépendent de la composition isotopique et de la dimension de l'échantillon ainsi que du flux de neutrons.

L'activité d'un radio-isotope ${}^A_{Z}X^*$ est généralement fonction du flux thermique et épithermique corrigés par les facteurs G_{th} et G_{ep} et s'écrit sous la forme (Chilian, 2006):

$$A = N(G_{th}\sigma_{th}\phi_{th} + G_{ep}\sigma_{ep}\phi_{ep})(1 - e^{-\lambda t}) \quad (3.26)$$

où:

G_{th} facteur d'autoprotection thermique ;

σ_{th} section efficace de capture thermique ;

ϕ_{th} flux thermique ;

G_{ep} facteur d'autoprotection épithermique ;

σ_{ep} section efficace de capture épithermique ;

ϕ_{ep} flux épithermique.

Dans leurs articles, I.F Gonçalves et al, proposent une définition générale pour ces facteurs pour une géométrie cylindrique de rayon R et de hauteur h . Ils sont définis comme le rapport entre le taux de réaction de capture par atome dans l'échantillon et dans un échantillon équivalent infiniment dilué.

Ainsi:

$$G(R, h) = \frac{\int_{E_1}^{E_2} \phi(E)\sigma_{n\gamma}(E)dE}{\int_{E_1}^{E_2} \phi_0(E)\sigma_{n\gamma}(E)dE} \quad (3.27)$$

où:

G facteur d'autoprotection (thermique ou épithermique) ;

$\sigma_{n\gamma}$ section efficace de capture radiative (thermique ou épithermique) ;

ϕ flux (thermique ou épithermique) dans l'échantillon ;

ϕ_0 flux (thermique ou épithermique) dans l'échantillon infiniment dilué ;

E_1, E_2 bornes du domaine d'énergie.

Les expressions semi-empiriques récemment publiées par I.F Gonçalves et *al* pour déterminer les facteurs d'autoprotection sont les suivantes (Gonçalves, 2004; Martinho, 2004):

$$G_{th} = \frac{1.00}{1 + \left(\frac{z}{z_0}\right)^{1.061}} \quad (3.28)$$

où $z_0 = 0.635$ et z est un paramètre qui dépend de tous les isotopes de l'échantillon. Il est déterminé suite à plusieurs études expérimentales par:

$$z = \frac{Rh}{(R + h)} \Sigma_t \left(\frac{\Sigma_a}{\Sigma_t} \right)^k \quad (3.29)$$

où, $k=0.85 \pm 0.05$ et Σ_t et Σ_a sont la section efficace totale et d'absorption respectivement.

Le facteur d'autoprotection épithermique prend la forme:

$$G_{ep} = \frac{0.94}{1 + \left(\frac{z}{z_0}\right)^{0.82}} + 0.06 \quad (3.30)$$

où $z_0=0.270$ et z est défini pour ce cas comme:

$$z = 1.65 \frac{Rh}{(R + h)} \Sigma_t(E_{res}) \left(\frac{\Gamma_\gamma}{\Gamma} \right)^{0.5} \quad (3.31)$$

avec, $\Sigma_t(E_{res})$ la section efficace totale du pic de résonance de demie largeur totale et radiative Γ et Γ_γ respectivement.

Le but de ce travail est de trouver les facteurs d'autoprotections en fonction de la masse de l'échantillon. Or dans le papier de Chilian (Chilian, 2006), une adaptation des formules semi-empiriques précédentes

a été proposé pour l'AAN (voir figures 3.8 et 3.9):

$$G_{th} = \frac{1.00}{1 + \left(\frac{m}{m_{th}}\right)^{1.061}} \quad (3.32)$$

$$G_{ep} = \frac{0.94}{1 + \left(\frac{m}{m_{ep}}\right)^{0.82}} + 0.06 \quad (3.33)$$

où m est la masse réelle de l'échantillon et m_{th} et m_{ep} sont des paramètres, déterminés expérimentalement, qui dépendent de tous les isotopes présents dans l'échantillon.

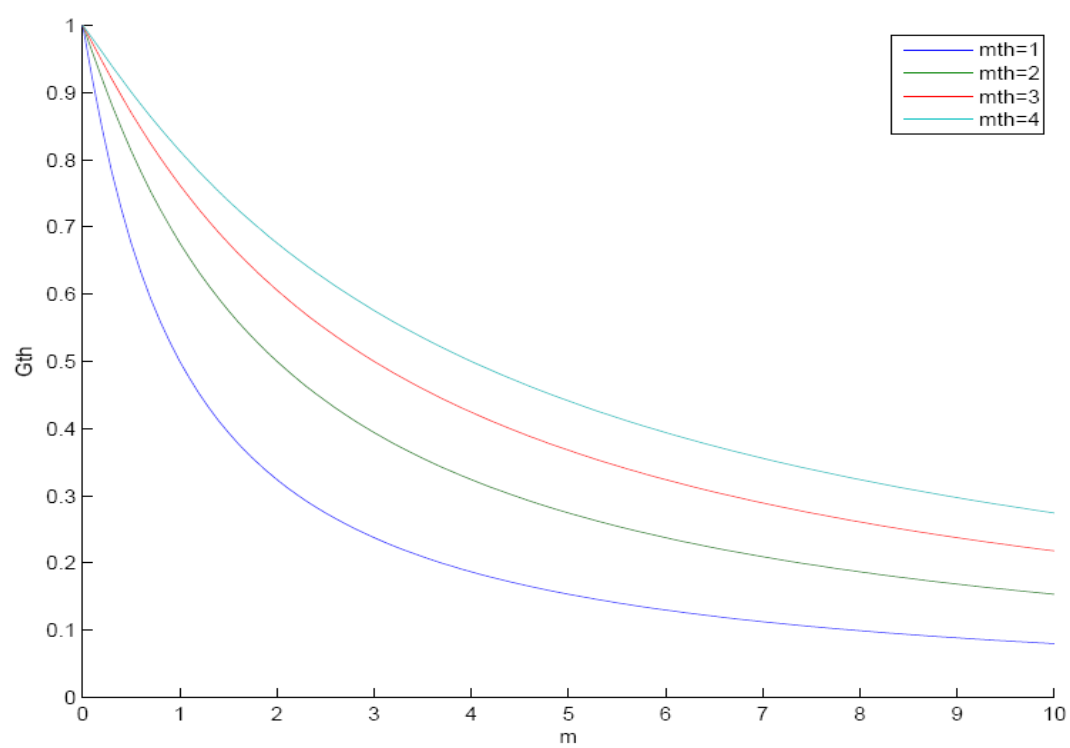


Figure 3.8 Variation de G_{th}

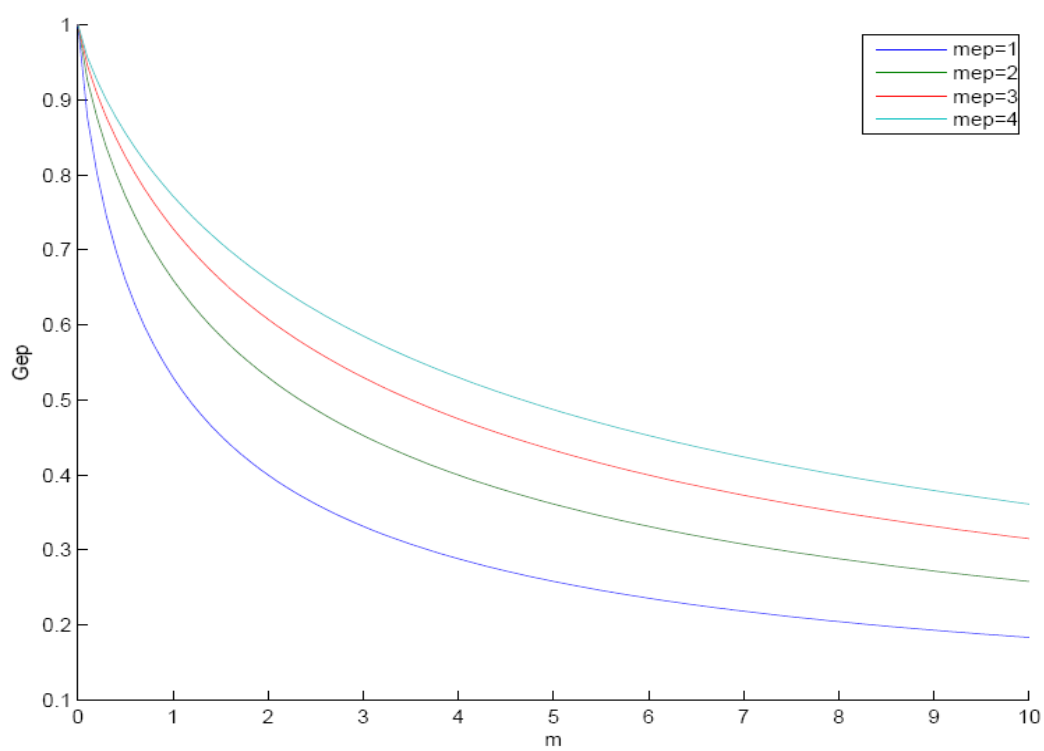


Figure 3.9 Variation de G_{ep}

Partie II

Simulations et expériences

CHAPITRE 4

SIMULATIONS SLOWPOKE EN 2-D

L'AAN permet d'identifier les composantes d'un échantillon inconnu, et de déterminer leurs concentrations isotopiques. Dans cette technique on suppose que la composition isotopique de l'échantillon est homogène. De plus, on suppose que le flux neutronique est uniforme dans toutes les régions de l'échantillon. Cependant, ces approximations ne sont justifiées que pour certains échantillons. En effet, pour un échantillon contenant un isotope absorbant, la distribution du flux sera perturbée donnant naissance à l'effet d'autoprotection spatiale des neutrons. De même, l'augmentation de la dimension d'un échantillon contenant une impureté d'un isotope absorbant, modifie la distribution du flux dans l'échantillon.

Afin d'évaluer la variation de la distribution du flux dans un échantillon connu, on utilise des méthodes numériques qui permettent de simuler le comportement des neutrons qui traversent l'échantillon. Ainsi, on utilise les deux codes DRAGON et SERPENT pour définir des modèles en 2-D capables de calculer la distribution du flux dans le réacteur SLOWPOKE-2. Ce choix de codes nous permettra de faire une comparaison des résultats des calculs.

Dans ce chapitre, on présente les modèles DRAGON et SERPENT en 2-D requis pour simuler le réacteur SLOWPOKE-2. On définit pour le code SERPENT un modèle exact qui simule le réacteur avec sa vraie géométrie. Pour le code DRAGON on définit deux modèles où le premier ressemble au modèle SERPENT, et l'autre fait appel à une géométrie modifiée et des mélanges ajustés.

4.1 Simulation SERPENT

4.1.1 Modélisation de la géométrie SLOWPOKE-2

Le tube guide de la barre de contrôle est modélisé en utilisant deux cylindres concentriques à l'origine du plan. Ces cylindres peuvent être obtenus en utilisant l'option `cyl` (voir figure 4.1).

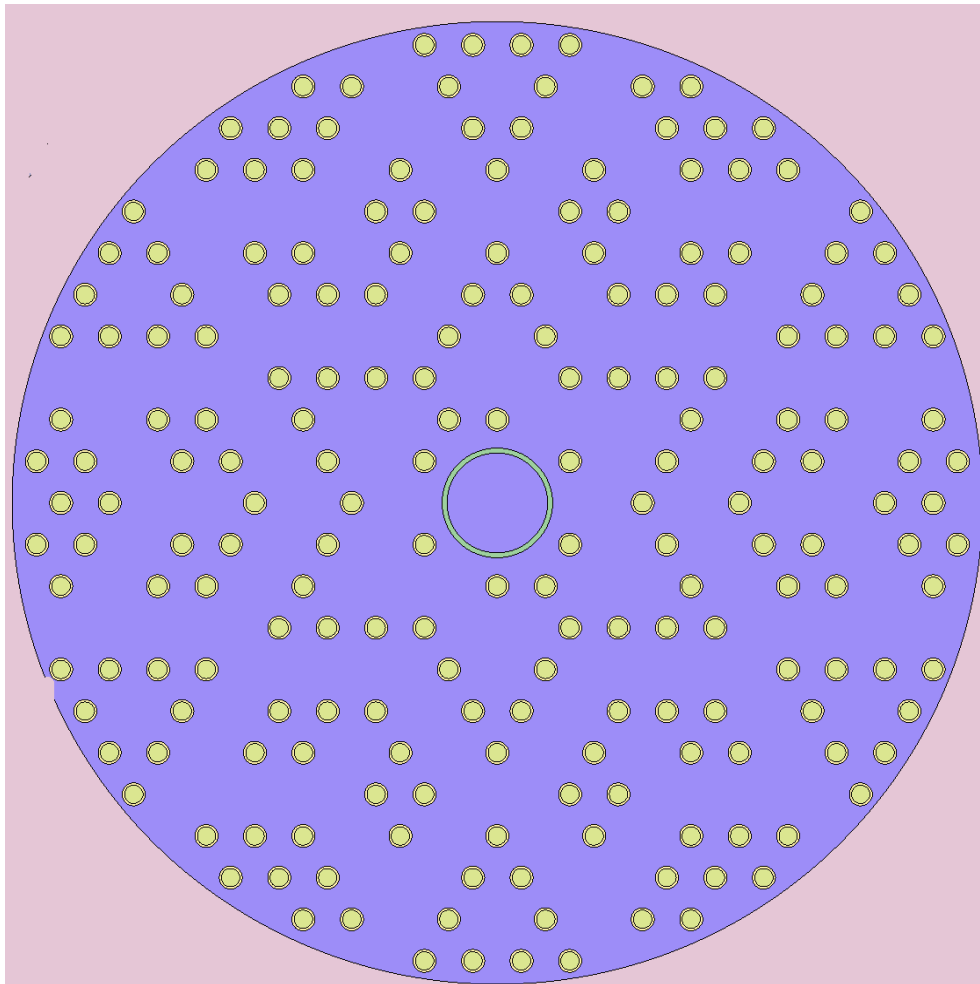


Figure 4.1 Coeur du réacteur SLOWPOKE-2

Au niveau du coeur les crayons de combustible occupent le centre de cellules dans un réseau hexagonal de pas 1.10363 cm (voir figure 4.2). Dans les options géométrique de SERPENT, ce type de réseau est défini par:

$$\text{lat } u \ 2 \ x_0 \ y_0 \ n_x \ n_y \ p$$

où:

- u numéro de l'univers du réseau: l'association de ce numéro à un réseau le rend équivalent à une cellule qui peut être insérée dans un autre réseau;
- 2 numéro caractéristique du réseau hexagonal ;
- x_0 abscisse de la cellule origine dans le plan (X, Y) ;
- y_0 ordonnée de la cellule origine dans le plan (X, Y) ;
- n_x nombre de cellules selon l'axe X' ;
- n_y nombre de cellules selon l'axe Y' ;
- p pas du réseau.

Les 198 crayons de combustible sont organisés dans le réseau hexagonal de façon à générer la géométrie de la figure 4.1.

La région radiale suivante (voir figure 4.3), contient le réflecteur de béryllium et cinq sites d'irradiation.

La région de béryllium est limitée par deux surfaces cylindriques. On modélise cette région on utilisant l'option `cyl` pour définir deux cylindres concentrique à l'origine du plan. Pour remplir cette région on définit un univers contenant cinq sites d'irradiations immergés dans le béryllium.

En fait, nous supposerons que toutes nos expériences d'irradiation se feront dans le site 1 et c'est la distribution de flux dans ce site qui nous intéresse. Les régions élémentaires de la subdivision

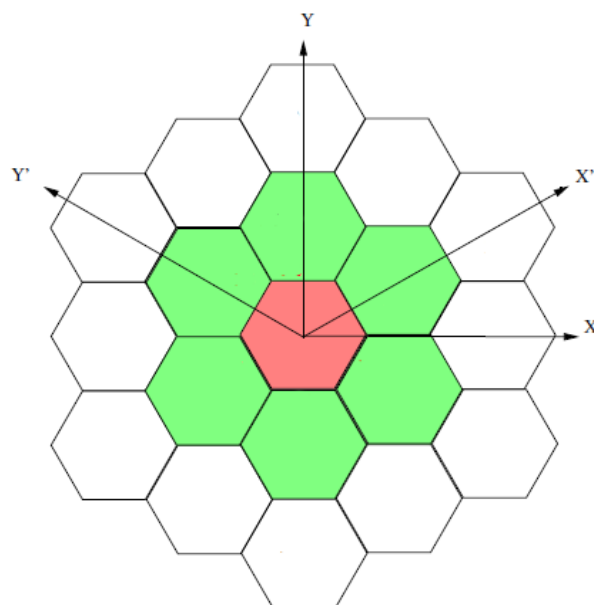


Figure 4.2 Réseau hexagonal

qu'on a proposé pour le site 1 dans la figure 4.4 ont la forme d'un demi-couronne. Cette géométrie est disponible dans le code SERPENT par l'option PAD (voir figure 4.5).

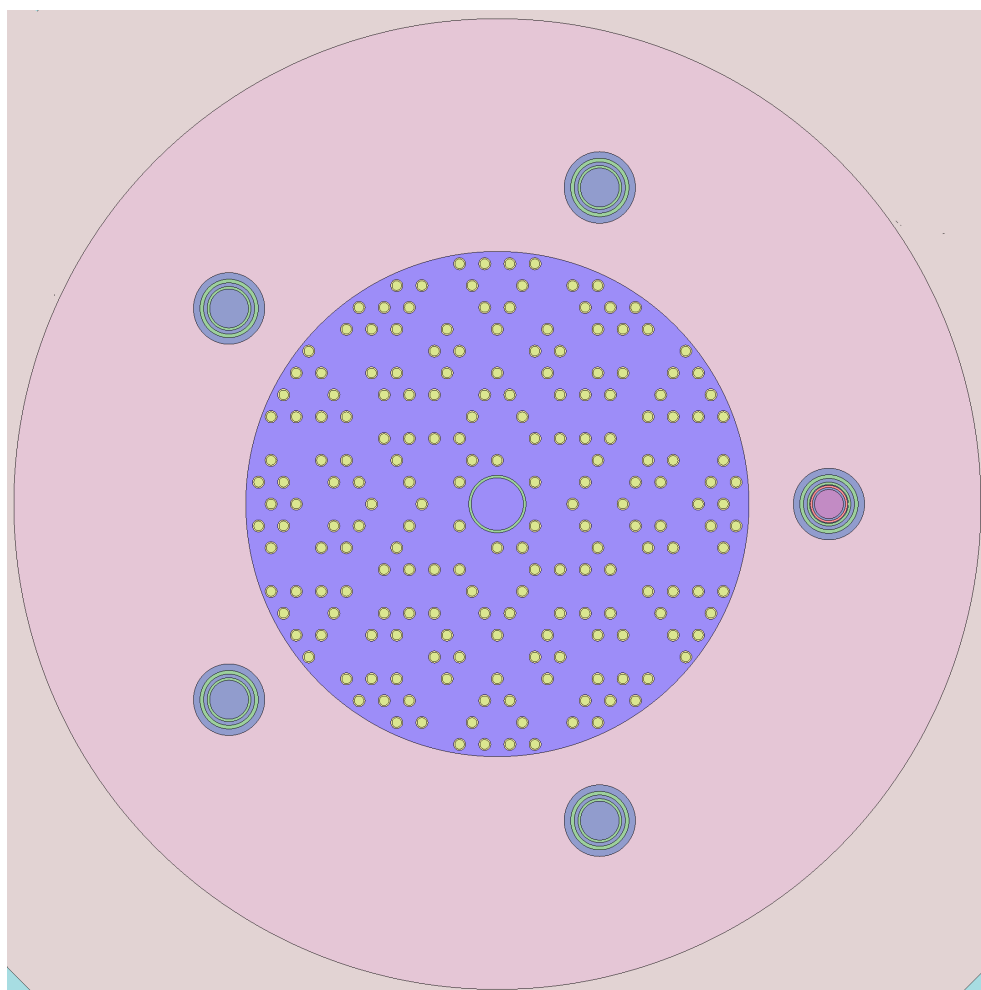


Figure 4.3 Assemblage coeur et réflecteur du réacteur SLOWPOKE-2

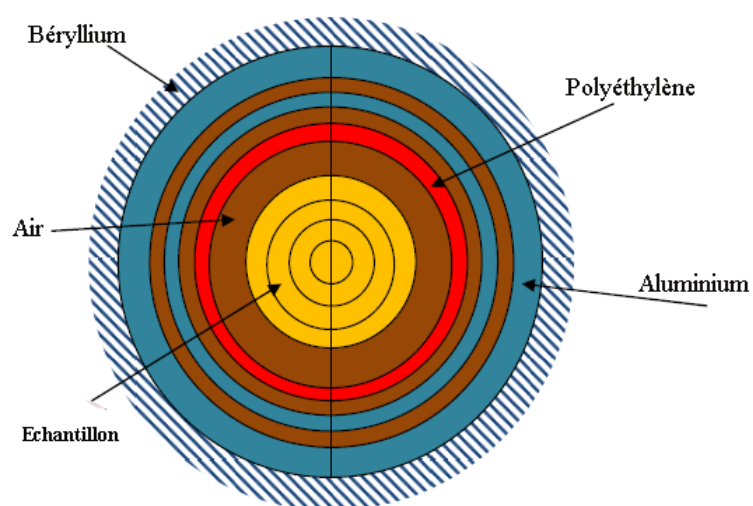


Figure 4.4 Site d'irradiation 1 contenant l'échantillon

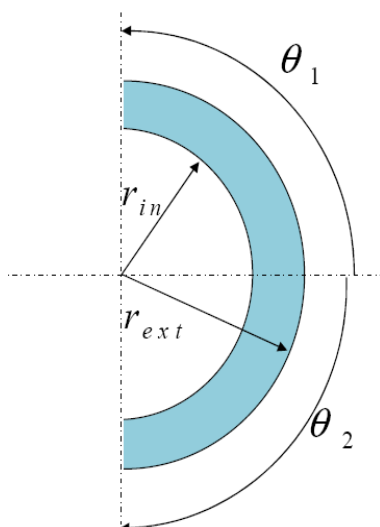


Figure 4.5 La Géométrie PAD

Les subdivisions du site 1 sont décrites par les étapes suivantes:

1. Définir la première surface PAD

`surf ind pad x0 y0 rint rext θ1 θ2`

où:

<code>surf</code>	un mot clé pour définir une surface;
<code>ind</code>	numéro, ou indice, du contour du PAD ;
<code>x₀</code>	abscisse de la surface;
<code>y₀</code>	ordonnée de la surface;
<code>r_{in}</code>	rayon interne du disque;
<code>r_{ex}</code>	rayon externe du disque;
<code>θ₁ et θ₂</code>	positions angulaires du coupure du disque.

2. Définir cette surface comme une cellule et la remplir par le mélange désiré, et définir l'extérieur comme appartenant à un autre univers qui sera rempli en utilisant l'option `fill`.

`cell nom1 nc mat -ind`

`cell nom2 nc fill 50 ind`

où:

<code>cell</code>	mot clé pour définir une cellule;
<code>mat</code>	matériel qui remplit la surface demandée;
<code>nom₁, nom₂</code>	numéro d'univers internes (<code>nom₁</code>) et externes (<code>nom₂</code>) du PAD ;
<code>nc</code>	numéros de la cellule (son nom);
<code>-ind</code>	indique que cette cellule représente l'intérieur du PAD;
<code>ind</code>	indique que cette cellule représente l'extérieur du PAD;
<code>fill 50</code>	sert à remplir l'extérieur du PAD par l'univers numéro 50.

où l'univers 50 est défini de la façon suivante:

`lat nl 4 x0 y0 nr`

`n r0 θ0 u1 u2 ... un`

où:

<code>lat</code>	mot clé pour définir un réseau ;
<code>nl</code>	nom du réseau ;
<code>4</code>	type du réseau (ici un réseau annulaire) ;
<code>x0</code>	abscisse du réseau dans l'espace ;
<code>y0</code>	ordonnée du réseau dans l'espace ;
<code>nr</code>	nombre de rangées qui vont contenir les cellules ;
<code>n</code>	nombre de cellules dans chaque rangé ;
<code>r0</code>	position radiale de la première cellule ;
<code>θ0</code>	position angulaire de la première cellule ;
<code>u1 u2 ... un</code>	noms des cellules de chaque rangée.

3. Ensuite on définit un autre PAD collé au premier (Voir Fig 4.6), et on lui associe le numéro d'univers nécessaire pour remplir l'extérieur du premier.
4. Une fois le deuxième PAD défini, on le remplit de la même façon que le premier.
5. L'univers extérieur du dernier PAD est rempli de béryllium.

De cette façon par des surfaces imbriquées on associe pour chaque PAD un numéro d'univers, ce qui permet de diviser le site 1 en secteurs de cylindres. Après la modélisation du site 1 et les quatre autres sites (vides), on utilise le numéro d'univers de premier PAD et le numéro d'univers d'un site vide pour définir un autre réseau composite (quatre sites vides et le site rempli). Et après, on remplit la région du béryllium par le réseau composite en utilisant la commande `fill`.

La région suivante contient aussi deux petits sites et trois autres grands. Pour cette région il suffit de définir les sites comme des cylindres en respectant les positions radiales et angulaires (on ne s'intéresse pas au flux dans ces sites). Des conditions de réflexion sont appliquées à la limite de la

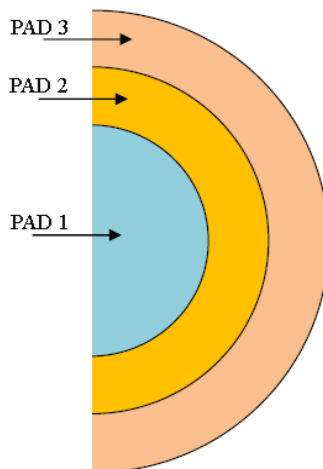


Figure 4.6 PAD imbriqués

géométrie de la façon suivante;

```
set bc 2
```

où:

`set` mot clé pour activer l'option `bc` ;

`bc` fonction qui définit les conditions aux limites ;

`2` indice pour conditions aux limites de réflexion.

4.1.2 Matériaux

Après la définition de la géométrie, il est maintenant nécessaire de donner les compositions des mélanges et de donner leurs bibliothèques de section efficaces.

Le réacteur contient essentiellement les mélanges suivants:

1. Eau de densité $0.998418 \text{ g.cm}^{-3}$;
2. Aluminium de densité $2.70339 \text{ g.cm}^{-3}$;
3. Béryllium (100 % ${}^9_4\text{Be}$) de densité 1.848 g.cm^{-3} ;
4. Uranium de densité 10.6 g.cm^{-3} et enrichi 19.76 %;
5. Gaine de zirconium de densité $6.27696 \text{ g.cm}^{-3}$;
6. Air (100 % oxygène 16) de densité 0.0014 g.cm^{-3} ;
7. Polyéthylène de densité 0.941 g.cm^{-3} ;
8. Échantillon de compositions et densité variables;

Les compositions isotopiques de chacun de ces mélanges sont données à température 300 K dans le tableau 4.1:

Tableau 4.1 Composition isotopique des mélanges

Matériaux	Isotope	(% poids)
Eau	${}^1_1\text{H}$	11.2093
	${}^2_1\text{H}$	0.0033
	${}^{16}_8\text{O}$	88.7495
Aluminium	${}^{27}_{13}\text{Al}$	99.7400
	${}^{24}\text{Cr}_{nat}$	0.2600
Uranium	${}^{16}_8\text{O}$	11.8725
	${}^{235}_{92}\text{U}$	17.4047
	${}^{238}_{92}\text{U}$	70.7228
Gaine	${}^{40}\text{Zr}_{nat}$	99.6698
	${}^{11}_5\text{B}$	0.0003
	${}^{26}\text{Fe}_{nat}$	0.1600
	${}^{24}\text{Cr}_{nat}$	0.1100
	${}^{28}\text{Ni}_{nat}$	0.0006
Polyéthylène	${}^1_1\text{H}$	14.37
	${}^{12}_6\text{C}$	85.63
Air	${}^{16}_8\text{O}$	100
Béryllium	${}^9_4\text{Be}$	100

4.1.3 Séquences de calcul SERPENT

Pour tenir compte de la liaison moléculaire (H-O)- de l'eau légère (Glasstone, 1979), les sections efficaces thermiques de l'hydrogène sont modifiées spécialement pour ce cas. La bibliothèque des sections efficaces du modérateur est définie de la façon suivante:

- On ajoute l'option suivante dans la ligne contenant le pourcentage en poids de l'isotope d'hydrogène.

`moder nom ID`

- On définit les modifications pour les sections efficaces thermiques comme suit:

`therm nom ext.00t`

où:

<code>moder</code>	mot clé pour spécifier que l'isotope d'hydrogène du modérateur correspondra à une molécule ayant des liaisons hydrogène ;
<code>therm</code>	mot clé pour activer l'option qui modifie les sections efficaces thermiques ;
<code>nom</code>	nom associé à l'isotope d'hydrogène lié ;
<code>ID</code>	indice associé à l'isotope d'hydrogène ;
<code>ext.00t</code>	nom de l'isotope d'hydrogène lié à 300 °C.

Après la définition de la bibliothèque des section efficaces thermiques du modérateur, on donne le chemin de la bibliothèque des sections efficaces des mélanges. On utilise dans notre calculs la bibliothèque ENDF/B7, et on la définit ainsi:

`set acelib chemin`

où:

set mot clé pour activer l’option *acelib* ;

acelib fonction qui collecte les sections efficaces dans le fichier donné ;

chemin chemin du fichier des sections efficaces.

Le calcul SERPENT fonctionne selon des cycles neutroniques. En voyageant dans le réacteur les neutrons ont des collisions avec la matière. De ce fait, un cycle sera complété lorsque tout les neutrons disparaissent du réacteur soit par absorption ou par initialisation d’une réaction de fission. Ceci déclenche alors un nouveau cycle avec le même nombre des neutrons que celui du cycle précédent. SERPPENT peut prendre automatiquement le nombre de neutrons égal à 5000 neutrons et 500 cycles avec 100 cycles inactifs (c’est-à-dire au total 600 cycles). Or pour le réacteur SLOWPOKE ces paramètres standards ne suffisent pas. Afin de minimiser les erreurs statistiques associées aux simulations il est nécessaire d’augmenter le nombre de cycles. On ajuste la population neutronique et les cycles de la façon suivante:

```
set pop nn nca nci
```

où:

set mot clé pour activer l’option *pop* ;

pop fonction qui ajuste le nombre de neutrons et le nombre du cycles ;

nn nombre de neutrons par cycle ;

nca nombre de cycles actifs ;

nci nombre de cycles inactifs.

Les résultats de calculs sont édités pour deux groupes d’énergie; un groupe thermique et un groupe épithermique. Pour éditer les résultats de calculs en deux groupes d’énergies on ajoute la commande:

`set nfg ng lim1 ... limng`

où:

`set` mot clé pour activer l'option `nfg` ;

`nfg` fonction qui divise le domaine d'énergie ;

`ng` nombre de groupes d'énergie ;

`lim1 ... limng` énergie séparant les groupes.

Pour trouver la distribution de flux dans le site 1 on insère un détecteur de flux dans chaque région du site. Le détecteur utilisé pour déterminer le flux dans une région est de type "cellule" qui donne le flux moyen dans chaque cellule. Ainsi, avec ce détecteur on utilise l'option `dv` pour normaliser le flux trouvé au volume de chaque région. L'insertion d'un détecteur se fait de la façon suivante:

`det par1 de par2 dv V dc u`

où:

`det` fonction qui insère des détecteurs dans les régions choisies ;

`par1` numéro du détecteur ;

`de` option pour activer la sousdivision de domaines d'énergie pour éditer les résultats ;

`par2` nom de la division d'énergie proposée ;

`dv` fonction pour normaliser le flux selon le volume de chaque région ;

`V` volume de la région dans laquelle le détecteur est inséré ;

`dc` option pour choisir un détecteur de type "cellule" ;

`u` univers dans lequel le détecteur sera inséré ;

4.2 Simulation DRAGON

4.2.1 Le modèle exact

4.2.1.1 Modélisation de la géométrie SLOWPOKE-2

La géométrie DRAGON est plus facile à définir que la géométrie SERPENT. En effet le problème du réseau hexagonal du combustible et les sousdivisions en régions du site 1 est assez simple avec DRAGON. Premièrement, la géométrie du réacteur SLOWPOKE-2 est définie selon des niveaux géométriques. Ainsi le réacteur est constitué, en gros, de sept régions (Marleau, 1997) organisées comme suit:

1. Le trou central où s'insère la barre de contrôle ;
2. Le tube guide en aluminium pour la barre de contrôle ;
3. La zone combustible contenant l'eau ;
4. Le réflecteur en béryllium ;
5. L'eau extérieure du réflecteur contenant les sites d'irradiations externes ;
6. La cuve en aluminium ;
7. La piscine.

Ces sept régions représentent le premier niveau géométrique, et sont définies par l'option *CARCEL* (c'est à dire une cellule carré en 2-D contenant des sous régions cylindriques). Cette cellule contient sept cercles concentriques dont le dernier est de rayon de 35.56 *cm*. La piscine est un carré de 40 *cm* de côté où des conditions aux limites de réflexion sont utilisées (voir figure 4.7).

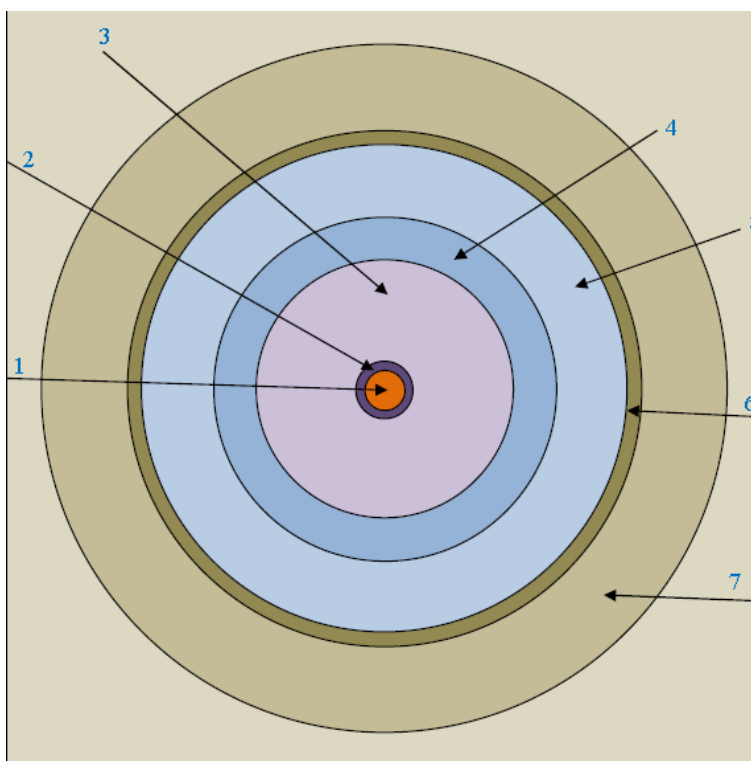


Figure 4.7 Premier niveau de la géométrie du SLOWPOKE-2

Le deuxième niveau contient:

1. Les crayons de combustible
2. Les sites d'irradiations internes
3. Les sites d'irradiations externes

Les crayons du combustible contiennent deux régions, remplies par les mélanges donnés dans le tableau 4.1;

1. Uranium enrichi 19.76 % ;
2. Une gaine en zirconium.

Ces crayons sont définis en utilisant l'option *TUBE* avec un nombre de rayons, lr , égal à 2. Les sites d'irradiation sont classés en quatre types:

1. Site interne plein
2. Site interne vide
3. Site externe grand
4. Site externe petit

Pour ces quatre types de sites on définit de quatre façons des "TUBE" en modifiant chaque fois le nombre de rayons lr . Les crayons de combustibles sont organisés en 21 régions dans la zones de combustible selon des rayons caractéristiques (pour chaque groupement de crayon). Pour les placer à la bonne position, on utilise l'option suivante:

$$NPIN \ nbr \ RPIN \ R \ APIN \ \theta_1 \dots \theta_{nbr}$$

où:

NPIN mot clé pour ajuster le nombre de crayons dans un groupement ;

nbr nombre de crayons dans le groupement ;

RPIN mot clé pour ajuster la position radiale du groupement ;

R position radiale du groupement ;

APIN mot clé pour ajuster les positions angulaire des crayons d'un groupement ;

$\theta_1 \dots \theta_{nbr}$ positions angulaire des crayons d'un groupement ;

On place de la même façon les sites d'irradiations (internes et externes).

La séquence DRAGON pour définir la géométrie complète est la suivante:

```
Geom := GEO: :: CARCEL  $lr_1$ 
X- REFL MESHX  $x^-$   $x^+$  X+ REFL
Y- REFL MESHY  $y^-$   $y^+$  Y+ REFL
RADIUS 0.0  $r_1^1 \dots r_{lr_1}^1$ 
MIX  $mix_1^1 \dots mix_{lr_1}^1$ 

::: RODREF01 := GEO: TUBE  $lr_2$ 
RADIUS 0.0  $r_1^2 \dots r_{lr_2}^2$ 
MIX  $mix_1^2 \dots mix_{lr_2}^2$  ;
::: RD010101 := GEO: RODREF01
NPIN  $nbr$  RPIN R APIN  $\theta_1 \dots \theta_{nbr}$  ;
CLUSTER
RD010101;
```


où:

$x^- \quad x^+$	positions droite et gauche du cellule ;
$y^- \quad y^+$	positions haut et bas du cellule ;
$r_1^1 \quad \dots \quad r_{lr_1}^1$	rayons du premier niveau géométrique ;
$mix_1^1 \quad \dots \quad mix_{lr_1}^1$	mélanges du premier niveau ;
$r_1^2 \quad \dots \quad r_{lr_2}^2$	rayons du second niveau géométrique ;
$mix_1^2 \quad \dots \quad mix_{lr_2}^2$	mélanges du second niveau.

4.2.1.2 Séquences de calcul DRAGON

Le calcul DRAGON se fait en utilisant des modules (autrement dit "fonctions") prédéfini. Chaque module a ses paramètres d'entrées et de sortie. Les paramètres d'entrée sont, pour la majorité des modules, des sorties d'un ou plusieurs autres modules. On utilise un module de la façon suivante:

$S_1 \dots S_n := \text{NOM} : ::$

E_1

\dots

E_m

options

;

où:

$S_1 \quad \dots \quad S_n$	les paramètres de sortie du module ;
NOM :	nom du module ;
$E_1 \quad \dots \quad E_m$	paramètres d'entrées ;
<i>options</i>	options propres au module qui servent à contrôler l'exécution du module.

Afin de lancer un calcul DRAGON, il faut tout d'abord générer le fichier de la géométrie. Ce fichier est donné par le module `GEO` : . Parfois, on extrait le fichier géométrie pour l'utiliser directement dans d'autres calculs sans passer par le module `GEO` : .

La squelette du calcul pour le modèle 2-D du réacteur SLOWPOKE-2 est donné dans la figure 4.8. Ainsi le calcul commence par générer la géométrie du réacteur SLOWPOKE-2. Dans cette étape la simulation de la géométrie se fait deux fois afin de générer deux fichiers de sorties: le premier contient la géométrie utilisée pour l'autoprotection des résonances et le deuxième contient la géométrie du calcul de flux. Le deuxième fichier donne les informations qui concernent une géométrie SLOWPOKE-2 sousdivisée en petites régions.

Les sousdivisions du réacteur permet de calculer le taux de réactions locale pour chaque région, et permet de suivre la variation du flux d'une région à une autre (Hébert, 2009). Ainsi, les sept régions du premier niveau sont sousdivisées radialement de la façon suivante; 5,1,48,50,41,4, et 25 en utilisant l'option `SPLITR`, les crayons de combustible sont subdivisé en deux partitions selon l'axe y en utilisant l'option `SPLITY`. De plus le site 1 est subdivisé radialement de la façon suivante; 4,1,1,1,1,1,1 et selon l'axe y en deux partitions (Marleau, 1997). La deuxième étape consiste à générer les fichiers de tracking en utilisant les données de sortie du module `GEO` : et le module `NXT` : .

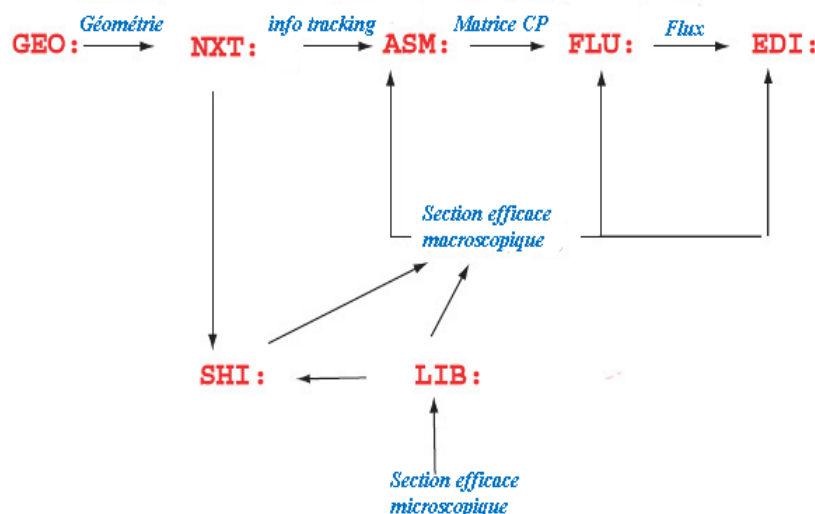


Figure 4.8 Séquences de calcul DRAGON

Ensuite les fichiers de tracking pour l'auto-protection sont utilisés par le module `SHI` : (qui sert à faire l'autoprotection des résonances). Pour que ce module fonctionne on doit lui fournir un troisième fichier venant du module `LIB` : qui sert à générer les sections efficaces macroscopiques en utilisant le fichier de mélanges du réacteur et la bibliothèque ENDF/B-VII.

L'étape suivante consiste à calculer la matrice des probabilités de collision (CP) pour toutes les sousdivisions du réacteurs. Le module `ASM` : nécessite pour fonctionner la bibliothèque des sections efficaces macroscopiques auto-protégées et les fichiers de tracking. Ensuite, on utilise le module `FLU` : pour résoudre l'équation de transport discrétisée multigroupe. Ce module prend la matrice CP et le combine avec la bibliothèque des sections efficaces macroscopiques pour calculer le flux dans chaque région.

Une fois le module `FLU` : terminé, on utilise ses fichiers de sorties avec la bibliothèque des sections efficaces macroscopiques pour activer le module `EDI` : . Ce module fait l'édition des résultats et donne le flux et les taux de réactions dans chaque région.

4.2.2 Le modèle simplifié

4.2.2.1 Description de la géométrie modifiée

Notre objectif de calcul DRAGON est de trouver la distribution de flux dans le site 1 du réacteur. Le modèle exact permet de résoudre l'équation de transport dans tout le réacteur. Ces calculs demandent un grand temps d'exécution et une énorme mémoire de stockage.

De ce fait, on a pensé à simplifier ce modèle pour le reste du réacteur afin de diminuer le temps du calcul le plus possible. Pour ce faire, on a modifié la géométrie du réacteur de façon à assurer que la distribution de flux dans le site 1 ne change pas. La géométrie du réacteur SLOWPOKE est modifiée dans notre modèle comme suit;

1. **La zone centrale:** cette zone contient le trou de la barre de contrôle mélangée avec le tube en aluminium.

2. **La pâte de combustible:** cette zone est une pâte composée de crayons de combustible et du caloporteur.
3. **Pâte de réflecteur:** dans cette zone on utilise seulement le site 1 pour irradier l'échantillon et les autres sites ne sont pas utilisés, donc on mélange le béryllium et les quatre sites internes vides pour définir un nouveau réflecteur contenant seulement le site 1.
4. **Pâte du modérateur:** Dans cette zone il y a cinq sites externes qui ne servent à rien dans notre calcul, donc on définit un nouveau modérateur en générant le mélange impliquant des sites d'irradiations et l'eau légère de la piscine.

Cette modification de géométrie consiste à remplacer des petites régions (indice m) par une structure formée d'un nombre moindre de régions plus grandes (indice M) comme c'est le cas dans la figure 4.9 qui montre la géométrie du coeur avant et après la modification. Le respect des taux de

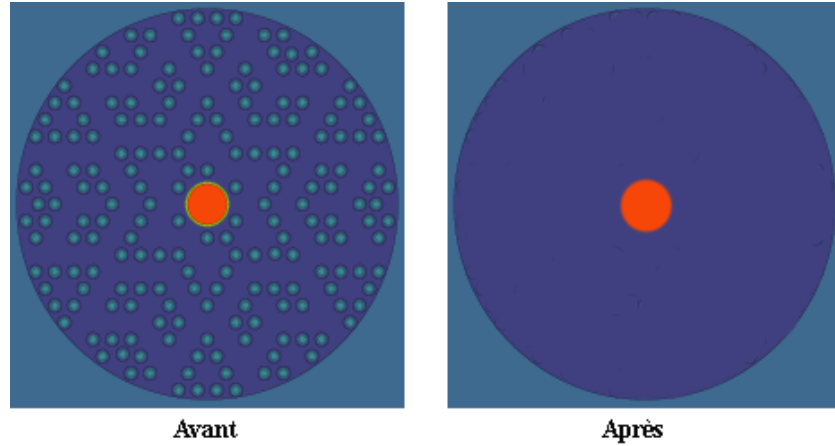


Figure 4.9 Géométrie du coeur avant et après la modification des régions

réaction pour toutes les réactions conduit à adopter la règle:

$$V_M \phi_M \Sigma_M = \sum_{m \in M} V_m \phi_m \Sigma_m \quad (4.1)$$

soit:

$$\Sigma_M = \frac{\sum_{m \in M} V_m \phi_m \Sigma_m}{V_M \phi_M} \quad (4.2)$$

où:

Σ_M section efficace du mélange de la région M ;

Σ_m section efficace du mélange de la région m ;

V_M volume de la région M ;

V_m volume de la région m ;

ϕ_M flux moyen dans la région M ;

ϕ_m flux moyen dans la région m .

Malheureusement, le respect des taux de réaction que semble assurer cette règle de pondération n'est en fait qu'une illusion: si on refait le calcul dans la géométrie qu'on vient de définir avec ces sections efficaces, on ne retrouvera pas les taux de réaction attendu (Hébert, 2009; Reuss, 2003)

La solution de ce problème est de corriger les sections efficaces en utilisant le principe d'équivalence. Ce principe consiste à déterminer des sections efficaces des régions M de façon à ce que le calcul neutronique avec ces sections efficaces donne le taux de réactions correct. Ce principe permet de trouver un facteur dit "SPH" (abréviation de "superhomogénéisation") défini de la façon suivante:

$$\mu_{M,g} = \frac{\Sigma_{M,g}^{cor}}{\Sigma_{M,g}^{moy}} \quad (4.3)$$

où:

$\Sigma_{M,g}^{cor}$ section efficace du mélange de la région M corrigée ;

$\Sigma_{M,g}^{moy}$ section efficace du mélange de la région M pondérée par le flux ;

$\mu_{M,g}$ facteur SPH.

4.2.2.2 Le calcul par partie

Comme mentionné dans la paragraphe précédente l'homogénéisation des régions dans le réacteur nécessite la correction des sections efficaces macroscopiques des macro-régions. Dans le module

EDI : cette option est disponible, en effet il suffit d'ajouter les fichiers de tracking de la géométrie simplifiée et faire l'homogénéisation par mélange, et d'ajouter l'option:

SPH MTRK

Suite à ce calcul, on obtient la bibliothèque des sections efficaces macroscopiques corrigées selon la méthode "SPH". Cette bibliothèque sera utilisée pour tout les calculs qui suivent.

Une autre simplification du modèle consiste à diviser le calcul en deux parties. En effet, les deux modules NXT : et ASM : prennent presque 80 % du temps de calcul. La division du calcul en deux parties consiste à faire un premier calcul partiel où on ne tient pas compte du site 1 et après on complète le calcul dans le deuxième calcul en tenant compte di site 1 En effet, on extrait tout les lignes de tracking qui passent à travers le site 1 (voir figure 4.10) et on poursuit le calcul avec les fichiers de tracking (où on a extrait les donnés de tracking du site 1) jusqu'au module ASM : . A la fin de ce calcul on sauve les fichiers de matrices CP partielles, le fichiers de tracking du réacteur complet et aussi le fichier contenant les lignes d'intégration associées au site 1. La deuxième partie de calcul consiste à utiliser les fichiers sauvés du premier calcul, et à compléter le calcul des matrice CP avec les donnés de tracking du site 1, et poursuivre le reste du calcul, c'est à dire le module FLU : et le module EDI : pour générer le flux dans le site 1.

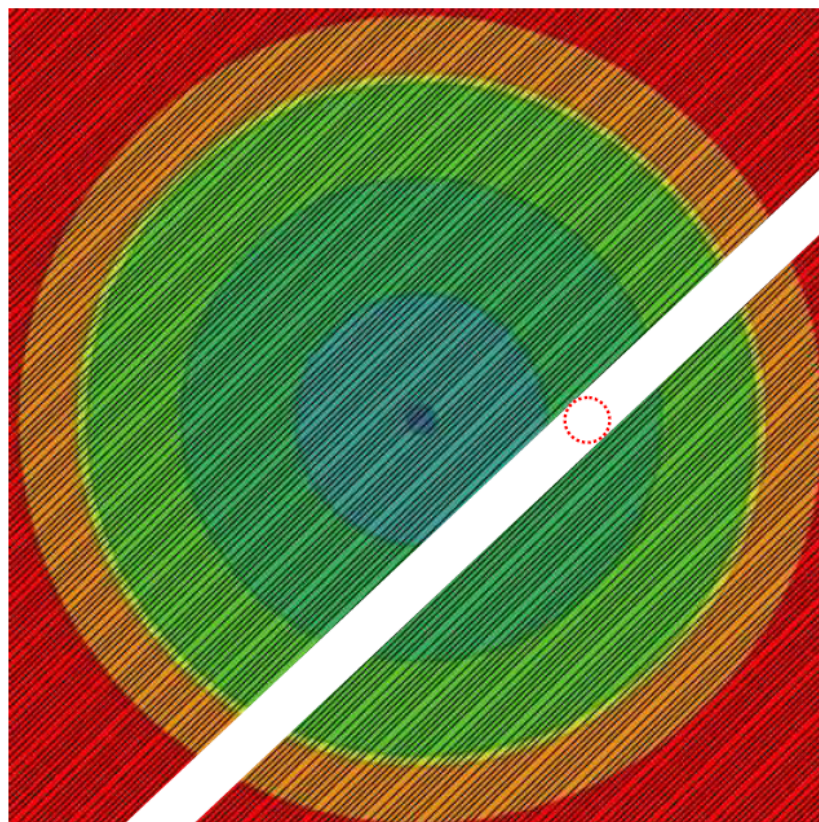


Figure 4.10 Tracking du SLOWPOKE-2

CHAPITRE 5

SIMULATIONS SLOWPOKE EN 3-D

Dans le chapitre précédent nous avons fait une description de la géométrie 2-D du réacteur SLOWPOKE-2, ainsi que les séquences de calculs SERPENT et DRAGON. Dans ces modèles nous n'avons cependant pas pris en compte la composante axiale du réacteur (cette composante est supposée infinie). Cependant, le facteur d'autoprotection spatiale dépend de la hauteur de l'échantillon. Ici, nous ajouterons dans nos modèles 2-D la composante axiale pour évaluer correctement le facteur d'autoprotection spatiale d'un échantillon simulé par les deux codes DRAGON et SERPENT.

Ce chapitre consiste à présenter le modèle 3-D SERPENT du réacteur SLOWPOKE-2 contenant un échantillon divisé radialement et axialement. Ensuite, dans la section suivante, nous présenterons les modèles 3-D DRAGON (exact et simplifié).

5.1 Simulation SERPENT

5.1.1 Description de la géométrie

La géométrie 3-D est plus complexe que celle en 2-D. En effet, le réacteur contient plusieurs détails selon l'axe z . On définit dans la figure 5.1, un premier niveau géométrique. Ce niveau est composé de:

1. Le cylindre central où s'insère la barre de contrôle
2. Le tube guide en aluminium pour la barre de contrôle
3. La zone de combustible
4. L'anneau de réflecteur en béryllium

5. Le réflecteur en béryllium supérieur
6. Le réflecteur en béryllium inférieur
7. Le modérateur
8. La cuve en aluminium
9. La piscine
10. Les cinq sites d'irradiation externes

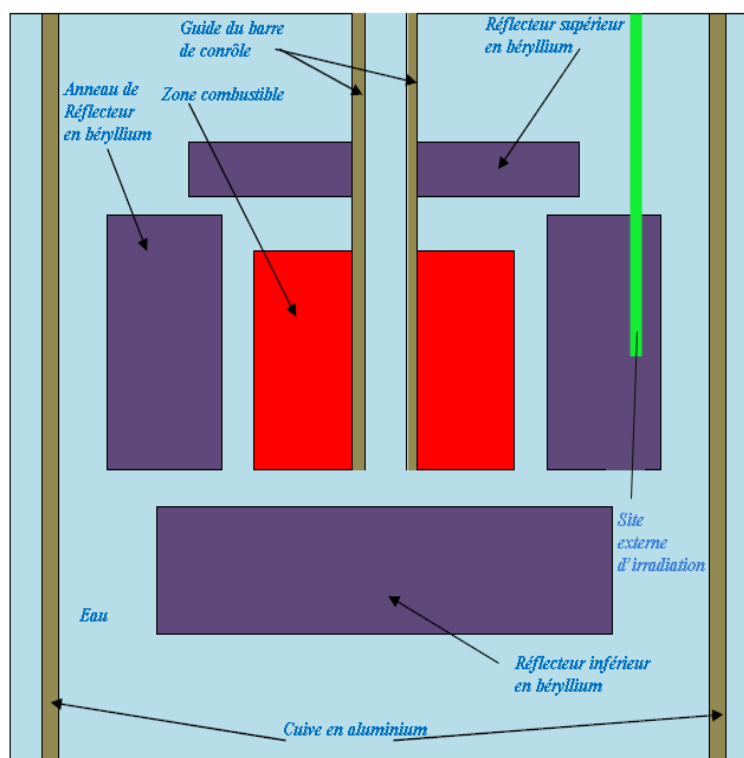


Figure 5.1 Premier niveau géométrique SERPENT 3-D

Ce niveau géométrique est composé de neuf plans perpendiculaires à l'axe z et 15 cylindres. Pour générer cette géométrie on commence par définir les plans en utilisant l'option `pz`, et après on définit les cylindres (voir figure 5.2). Ensuite, on remplit les régions obtenues par les mélanges adéquats. Dans la figure 5.3 on illustre un exemple simple décrivant comment obtenir la géométrie de la figure 5.3a. Pour chaque surface (cylindre ou plan) on associe un numéro qui sera le nom de cette région lors de tout appel. Ce numéro est positif pour une région supérieure ou droite et négatif

pour une région inférieure ou gauche (voir figure 5.3b). Les régions $R1$, $R2$ et $R3$ sont définies comme suit:

$$1. R1 = (-01) \cap (-05) \cap (+04)$$

$$2. R2 = (+01) \cap (-02) \cap (+05) \cap (+04) \cap (-06) \cap (+03)$$

$$3. R3 = (-03) \cap (+02) \cap (+06)$$

De cette façon on définit le premier niveau géométrique SERPENT.

Afin de compléter la géométrie, les crayons de combustible, le site 1 (rempli ou vide) et les quatre autres sites sont définies dans un deuxième niveau géométrique.

Les crayons sont définis de la même façon que pour la géométrie 2-D, il suffit de mettre le numéro de l'univers avec l'option `fill` dans la région que l'on veut remplir.

Le site 1 contient une autre sous-géométrie qui définit les sousdivisions de l'échantillon. En effet, l'échantillon est divisé selon z en quatre régions, selon y en deux régions et radialement en quatre parties, donc on définit cinq plans perpendiculaires à l'axe z , un plan perpendiculaire à l'axe x et huit cylindres pour obtenir les divisions requises (voir figure 5.4).

On utilise pour cette géométrie des conditions aux limites de réflexion sur toutes les surfaces externes.

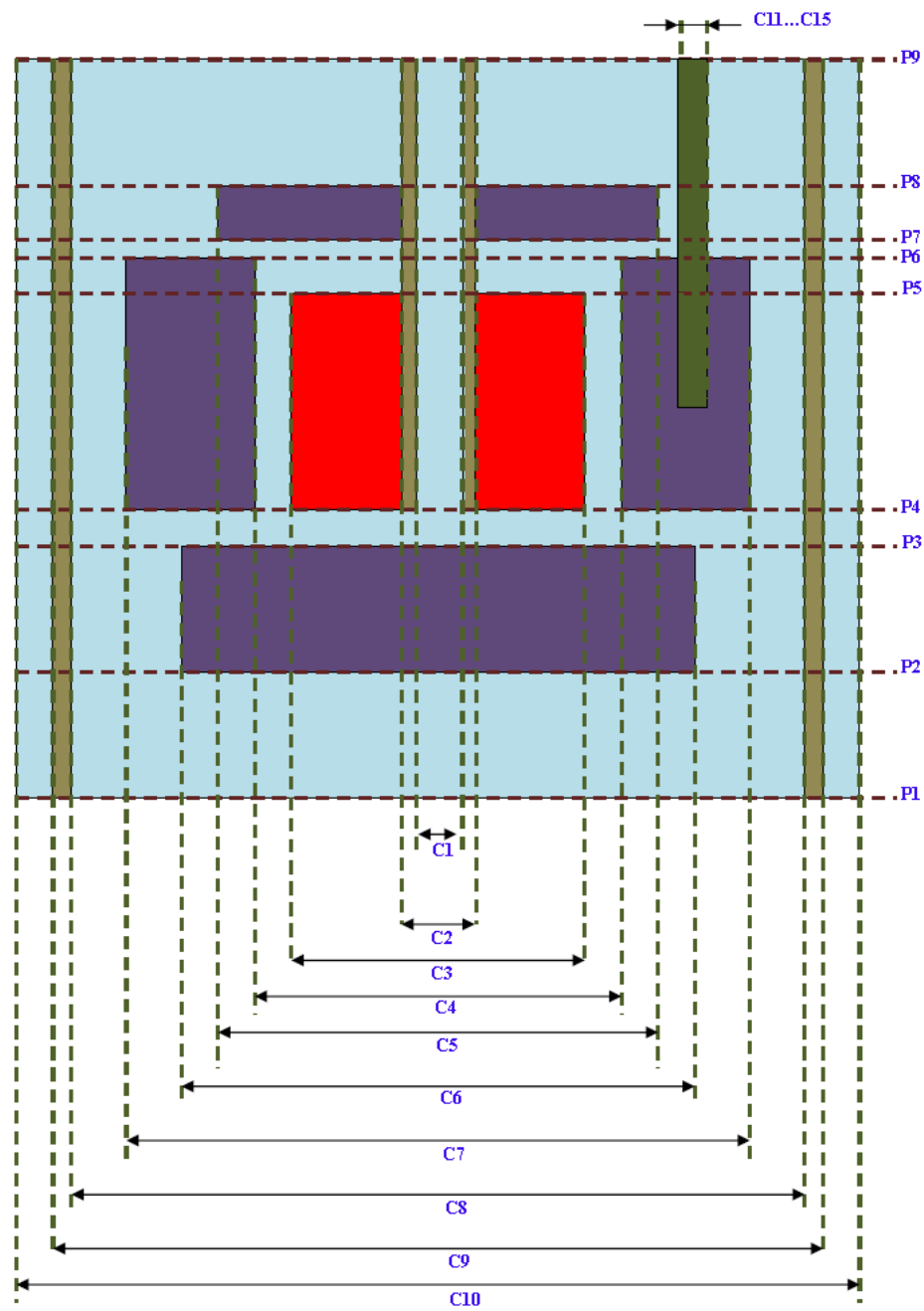


Figure 5.2 Positions des plans et les rayons de cylindres

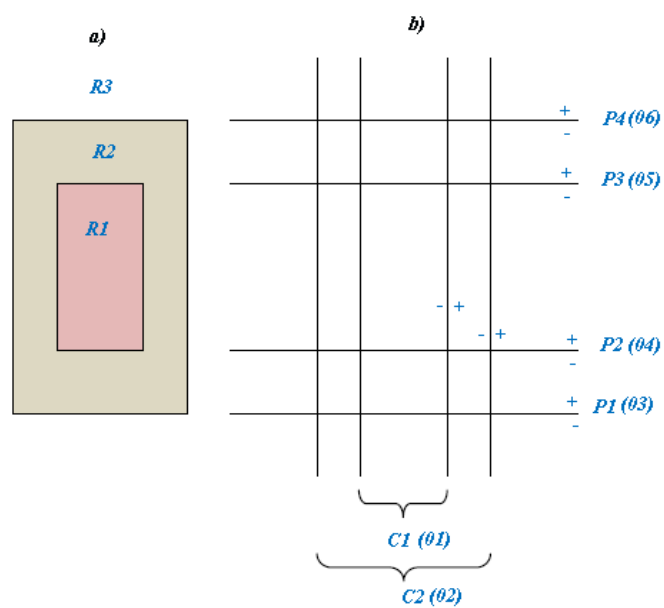


Figure 5.3 Deux cylindres emboîtées en 3-D

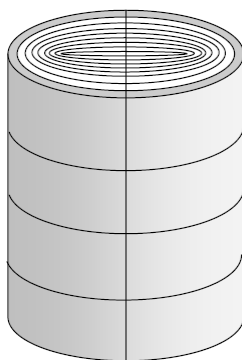


Figure 5.4 Régions du site 1 contenant l'échantillon

5.1.2 Options de calcul

La partie du site 1 contenant l'échantillon est divisée en 88 régions, où on place 88 détecteurs de flux afin de calculer les flux (thermique et épithermique) dans chaque région, chaque détecteur est de type cellule normalisé par le volume de la cellule dans laquelle il est inséré (Lappänen, 2011). Dans le modèle 2-D nous avons utilisé une population de 10^5 *neutrons* pour chaque cycle, cependant dans le modèle 3-D l'ajout de l'axe z augmente énormément la dimension de la géométrie et cette population est insuffisante pour faire le calcul. Dans nos calculs on utilise une population de 10^7 *neutrons* qui permet de diminuer l'erreur statistique. Afin d'évaluer les distributions de flux thermique et épithermique dans l'échantillon on condense les résultats de notre calcul à deux groupes d'énergie; la limite entre les groupes se situant à 0.625 eV.

5.2 Simulation DRAGON

5.2.1 Modèle exact

Pour construire la géométrie 3-D DRAGON, on utilise une division en cellules tel qu'illustré à la figure 5.5. Entre chaque plan consécutif on définit une cellule qui contient un nombre de cylindres. La géométrie SLOWPOKE-2 est divisée en 10 cellules et chaque cellule à ses régions caractéristiques (cylindres). Les cylindres de chaque cellule sont définis en utilisant un CARCELZ dont la longueur est définie par l'option MESHZ. Ces cellules définissent le deuxième niveau géométrique DRAGON (le premier niveau est un CAR3D contenant toutes les sous géométries).

Dans chaque cellule on ajoute un troisième niveau géométrique pour placer les crayons de combustible ou les sites d'irradiations (externes et internes). La cellule CE contient la partie du site 1 contenant l'échantillon. Uniquement pour cette partie du site 1 on fait des divisions selon l'axe z , radialement et selon l'axe y .

La bibliothèque des sections efficaces est définie en utilisant le fichier des mélanges en pâtes donné par le modèle 2-D et le fichier des mélanges exacts défini en utilisant la bibliothèque ENDF/B-VII.

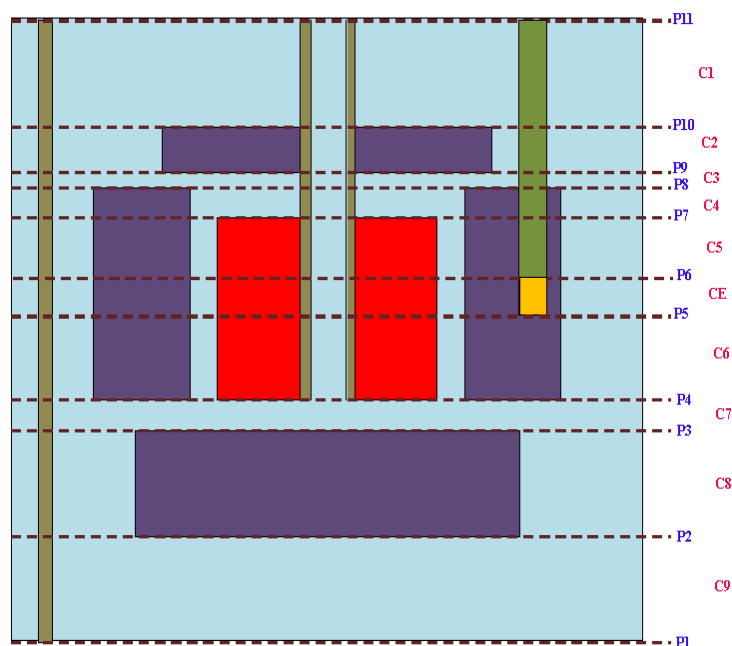


Figure 5.5 Cellules SLOWPOKE 3-D

Dans notre modèle on a choisi de ne pas utiliser les pâtes des mélanges suivantes:

1. La pâte de la zone centrale
2. La pâte du modérateur

Pour que les lignes de tracking atteignent toutes les petits divisions du sites 1 il faut augmenter considérablement la densité des lignes d'intégration. Dans nos calculs le tracking est définie de la façon suivante:

TISO 10 10.0

Dans le modèle 2-D on a utilisé des paramètres de tracking élevés pour réduire le plus possible l'erreur sur les résultats. Cependant, dans le calcul 3-D on a choisi de travailler avec des paramètres de tracking plus faible que le cas 2-D pour réduire l'espace d'occupation sur ordinateur et aussi le temps d'exécution. La densité des lignes et le nombre des angles qu'on a choisie permet d'évaluer les distributions de flux dans le site 1. Les résultats de nos calculs sont ensuite édités en utilisant une condensation à deux groupes d'énergie (thermique et épithermique).

5.2.2 Modèle simplifié

Une augmentation des paramètres de tracking (soit les angles soit la densité des lignes) augmente significativement le temps d'exécution et l'espace d'occupation dans le mémoire de la machine. Ainsi, puisqu'on a besoin seulement d'évaluer le flux dans la partie du site 1 contenant l'échantillon, on fait une extraction des données de tracking qui dépend seulement de la présence de l'échantillon et on fait un calcul de probabilité de collision avec le reste des fichiers de tracking. Ensuite, on sauve le fichier contenant les données de tracking du site 1 contenant l'échantillon et le fichier de probabilités des collision partiel, ainsi que le fichier initial de tracking. Dans une seconde étape on lance un nouveau calcul pour compléter la matrice CP afin de trouver la distribution de flux dans le site 1.

CHAPITRE 6

PROCESSUS EXPÉRIMENTAL D'IRRADIATION

Dans les chapitres précédents nous avons décrit les méthodes numériques que nous utiliserons pour le calcul des flux thermique et épithermique dans les différentes régions du réacteur SLOWPOKE-2. Les deux codes proposés (DRAGON et SERPENT) seront utilisés pour évaluer la dépression du flux dans un échantillon localisé dans le site 1 du réacteur due à l'auto-protection spatiale. Afin de valider nos calculs numérique nous irradions un échantillon de cuivre dans le site 1 du réacteur SLOWPOKE-2 et nous comparons ces mesures aux résultats numériques.

Dans ce chapitre nous décrirons la méthodologie d'irradiation d'un échantillon de cuivre dans le site 1 du réacteur SLOWPOKE-2. Nous présenterons aussi la méthodologie de traitement du spectre des rayons γ détecté par un dispositif à semi-conducteur.

6.1 Échantillonnage

6.1.1 Choix du matériau

Avant de procéder à une irradiation dans le réacteur SLOWPOKE-2 certaines précautions doivent être prises incluant le choix de l'échantillon qui ne doit pas être très radioactif après sa sortie du site d'irradiation (Boisvert, 1976). De plus, comme l'expérience sera utilisée pour valider les résultats numérique, il est préférable de choisir un matériau qui n'est pas coûteux et qui donne un bon rendement à la fin de l'irradiation.

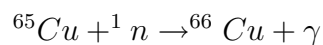
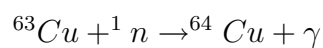
Le cuivre est un matériau qui a plusieurs applications et qui est peu coûteux à son état pur. De plus, pour un échantillon de cuivre de longueur 3 *cm* et de rayon 0.635 *cm* l'activité induite ne présente pas un grand danger pour l'opérateur. D'autre part, le cuivre a une grande section efficace d'absorption des neutrons thermiques, ce qui permet d'avoir un taux de comptage suffisamment

important pour faire l'analyse. De ce fait, dans cette recherche on utilise le cuivre pur comme un échantillon.

Dans la nature le cuivre est formé essentiellement de deux isotopes:

1. ^{63}Cu : avec un abondance atomique de 69.2 % et une section efficace de capture radiative de 4.5 *barns*.
2. ^{65}Cu : avec un abondance atomique de 30.8 % et une section efficace de capture radiative de 2.2 *barns*.

L'interaction de ces isotopes avec un neutron du réacteur donne:



Les isotopes résultants, ^{64}Cu et ^{66}Cu sont radioactifs avec des demi-vies présentées au tableau 6.1 :

Tableau 6.1 Demi-vies radioactives de différents isotopes du cuivre (KAERI, 2000)

Isotope	$T_{1/2}$
^{64}Cu	12.7 heures
^{66}Cu	5.10 minutes

6.1.2 Préparation de l'échantillon

Dans notre recherche on a divisé l'échantillon en 32 régions correspondant à:

- Deux parties selon l'axe y (où sa direction est celle du centre du réacteur vers le centre du site);

- Quatre parties selon l'axe z du réacteur;
- Quatre parties radialement;

Ainsi, pour comparer les résultats expérimentaux aux résultats numériques, il faut respecter le même modèle utilisé pour la simulation. Dans notre expérience, on utilise un bloc cylindrique de cuivre comme échantillon qui sera irradié dans le site 1 du réacteur SLOWPOKE-2. Afin de trouver la variation du flux dans cet échantillon on utilise des fils de cuivre très minces (pour minimiser l'effet d'autoprotection spatiale dans les fils eux mêmes) comme détecteurs de flux, et on les place dans des trous percés dans le bloc cylindrique (voir figure 6.1). Les procédures de préparation de cet échantillon sont les suivantes:

1. **Préparation du support de la grappe de fils de cuivre** : Les détecteurs de flux, autrement dit les fils de cuivre, sont au nombre de 25 et organisés selon un ordre bien défini. Ainsi, afin de respecter cet ordre on doit maintenir les fils avec au moins deux supports. Ici, deux disques en polyéthylène de rayons identiques et égaux au rayon interne de la capsule qui va contenir l'échantillon sont percés avec une mèche de diamètre égale au diamètre des fils de cuivre en respectant les positions géométrique demandées (voir figure 6.2) et sont utilisés comme supports pour les fils de cuivre.
2. **Préparation de la grappe de fils de cuivre**: Le cuivre des fils est d'une pureté de 99.99 % et avec la même composition isotopique naturelle (25 fils). Ils ont tous la même longueur (21 *mm*). Afin de les débarrasser de la couche de plastique qui les recouvrent, ils sont premièrement brûlés avec un bec bunsen avant d'être nettoyés à l'aide de méthanol.
3. **Préparation de la limaille du cuivre**: Cette tâche consiste à produire une poudre de cuivre en utilisant une plaque en cuivre (99.99 % en cuivre) râpée par un tube tournant de surface granuleux. Cette poudre est ensuite insérée dans une capsule pleine de méthanol afin de diminuer l'effet d'oxydation de cuivre jusqu'à ce que l'on soit prêt à l'utiliser.
4. **Remplissage de la capsule**: Une capsule en polyéthylène de diamètre interne 14.53 *mm* , diamètre externe 16.29 *mm* et de longueur fermé 55.67 *mm* est remplie par la grappe et de la limaille de cuivre qui est qui va perturber le flux incident.

Les fils de cuivre sont placés en quatre rangées radiales, où la première rangée représente le centre de l'échantillon et contient un seul fil, tandis que les autres rangées contiennent chacune huit fils. Le choix de huit fils par rangée est justifié par le fait qu'on ne peut pas connaître la position exacte de la capsule dans le site 1 lors de l'irradiation. De ce fait, on tentera d'identifier la position angulaire de l'échantillon en utilisant les mesures effectuées sur les huit fils.

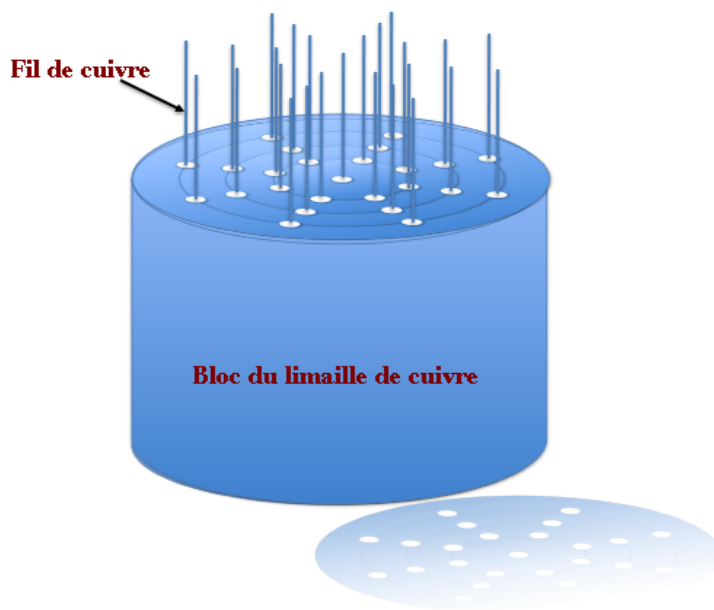


Figure 6.1 Échantillon de cuivre avec détecteurs en cuivre

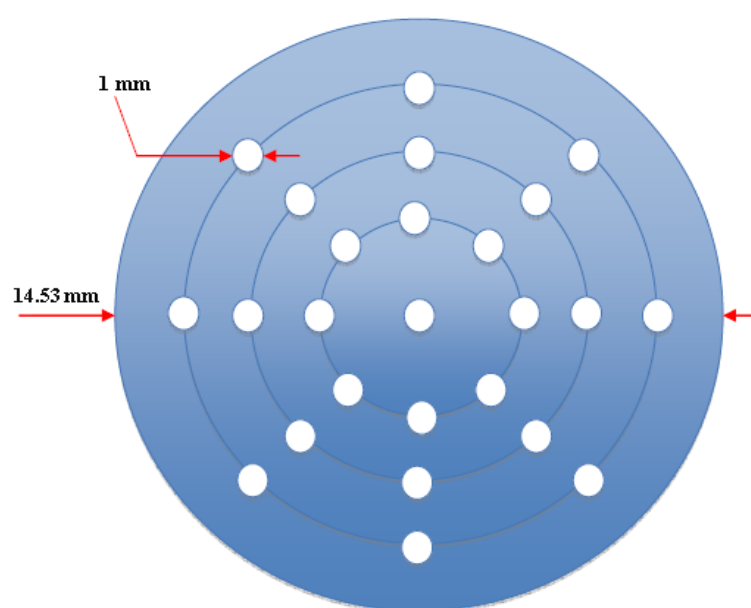


Figure 6.2 Position des fils de cuivre

6.2 Procédures d'irradiation

6.2.1 Temps d'irradiation

La capsule contenant l'échantillon est envoyée par un système pneumatique vers le site 1 et à la fin de l'irradiation ce système éjecte la capsule. Le temps d'irradiation est fixé par l'opérateur (dans notre cas 350 *secondes*). Ici le comptage commence au moment où la capsule entre dans le site d'irradiation et se termine au moment où elle sort du réacteur.

6.2.2 Temps de décroissance

À la sortie du réacteur on laisse reposer la capsule une journée afin de réduire son activité. Ce temps est mesuré à l'aide d'un chronomètre et commence à la sortie de la capsule et se termine lorsque le comptage commence. Après s'être assuré que l'activité a suffisamment diminuée on enlève les fils de cuivre un par un, en respectant l'ordre géométrique et la position verticale, et on les place dans des capsules identifiées (voir figure 6.3). Ensuite, on prépare 100 autre petites capsules numérotées

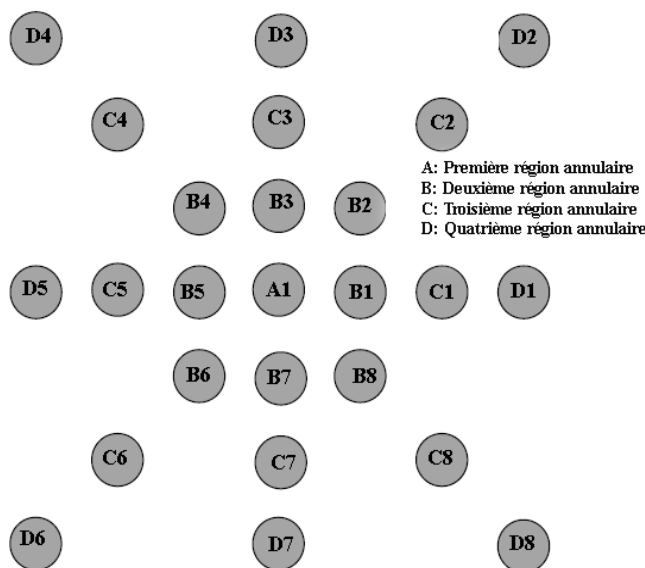


Figure 6.3 Organisation des capsules contenant les fils de cuivre

dans l'ordre pour placer les fils de cuivre coupés (voir figure 6.4). Ensuite, on prend chaque fil de

cuivre on le coupe en quatre morceaux en respectant la position verticale, que l'on pèse avant de les placer dans les capsules de comptage appropriées.

DIV8	DIV7	DIV6	DIV5	DIV4	DIII8	DIII7	DIII6	DIII5	DIII4
DIV3	DIV2	DIV1	CIV8	CIV7	DIII3	DIII2	DIII1	CIII8	CIII7
CIV6	CIV5	CIV4	CIV3	CIV2	CIII6	CIII5	CIII4	CIII3	CIII2
CIV1	BIV8	BIV7	BIV6	BIV5	CIII1	BIII8	BIII7	BIII6	BIII5
BIV4	BIV3	BIV2	BIV1	AIV1	BIII4	BIII3	BIII2	BIII1	AIII1
DII8	DII7	DII6	DII5	DII4	DI8	DI7	DI6	DI5	DI4
DII3	DII2	DII1	CII8	CII7	DI3	DI2	DI1	CI8	CI7
CII6	CII5	CII4	CII3	CII2	CI6	CI5	CI4	CI3	CI2
CII1	BII8	BII7	BII6	B5	CI1	BI8	BI7	BI6	BI5
BII4	BII3	BII2	BII1	AII1	BI4	BI3	BI2	BI1	AI1

Figure 6.4 Organisation des capsules contenant les morceaux de fils de cuivre

6.2.3 Temps de comptage

Le cuivre ^{64}Cu émet des photons gammas γ de 511 KeV , ces photons gammas sont comptés à l'aide d'un dispositif de spectrométrie γ composé de plusieurs éléments (Hajjaji, 1999):

- **Un détecteur au Germanium:** C'est un détecteur de très haute pureté, de volume 63.62 cm^3 et de surface active de 15.9 cm^2 (Hajjaji, 1999). Ce détecteur permet de mesurer les rayons γ d'énergie de l'ordre de centaine de KeV jusqu'à quelques MeV avec un pouvoir de séparation de 1.75 KeV (Revel, 2009).
- **Un préamplificateur:** Le détecteur est associé à un préamplificateur pour amplifier l'impulsion produite.
- **Un codeur:** Le signal sortant de l'amplificateur est envoyé dans un codeur multical qui mesure l'impulsion.
- **Micro-ordinateur:** Pour piloter à la fois la mesure et le traitement du signal.

Les mesures sont faites pendant 120 *minutes* pour avoir un spectre de haute résolution.

6.3 Traitement du spectre

Le spectre de chaque morceau de cuivre est enregistré séparément, et ensuite transmis au logiciel EPAA (Ecole Polytechnique Activation Analysis) qui évalue la quantité du cuivre dans chacun des échantillons. Ce programme a été créé pour les besoins du laboratoire SLOWPOKE de l'École Polytechnique de Montréal, est écrit en Fortran et permet de déterminer la concentration des éléments présents dans un échantillon irradié (Kassakov, 2006). Il suffit d'entrer les paramètres tels que le poids de l'échantillon, le temps de décroissance, et le flux moyen des neutrons dans le site d'irradiation vide (donnée fournie par le technicien du réacteur SLOWPOKE-2), pour qu'il donne la masse en cuivre naturel de chaque morceau.

Ainsi, on entre le temps d'irradiation, le temps de décroissance, le temps de comptage, le nombre de masse et le numéro atomique de l'isotope dont on veut calculer la masse, et le logiciel EPAA trouve les autres paramètres nécessaires pour faire le calcul dans sa propre bibliothèque.

Pour les 100 morceaux de cuivre le calcul donne, pour un flux donné de $5.12 \times 10^{12} \text{ neutrons}/(\text{cm}^2 \cdot \text{s})$, les résultats présentés aux tableaux 6.2 à 6.5. Dans chaque tableau on donne le nom du détecteur qu'on a utilisé pour faire le comptage (ici on a utilisé les détecteurs *S* et *C* au germanium du laboratoire SLOWPOKE-2) et la position de l'échantillon dans chaque détecteur. De plus, on y retrouve les temps d'irradiation, de décroissance et de comptage qui sont nécessaires pour calculer la masse donné par l'AAN de chaque morceau du fil $Masse_{AAN}$. On donne aussi la masse réelle, $Masse_m$, de chaque morceau pesé à l'aide d'une balance de haute précision (erreur de 1 mg). Cette masse sert à déterminer les facteurs d'autoprotection spatiale locaux dans l'échantillon du cuivre. Ces facteurs se calculent en utilisant:

$$G_{local} = \frac{Masse_{AAN}}{Masse_m} \quad (6.1)$$

On présente aussi dans ces tableau les valeurs des facteurs d'autoprotection. Ces valeurs servent à tracer les profils de dépression du flux qui seront analysés dans le chapitre suivant.

Tableau 6.2 Premier niveau le long de l'axe des fils (le plus haut)

	Masse_m (10 ⁻⁶ g)	Masse_{AAN} (10 ⁻⁶ g)	Détec.	Pos.	ti(m)	td(h)	tc(s)	Glocal
<i>A1</i>	50000	48808.58	<i>S</i>	1	5	144.77	1200	0.9762
<i>B1</i>	49100	47218.93	<i>S</i>	1	5	145.11	1200	0.9617
<i>B2</i>	53800	52626.42	<i>S</i>	1	5	145.45	1200	0.9782
<i>B3</i>	63100	59888.69	<i>S</i>	1	5	145.79	1200	0.9491
<i>B4</i>	52000	50037.94	<i>S</i>	1	5	146.14	1200	0.9623
<i>B5</i>	52600	49850.93	<i>S</i>	1	5	146.48	1200	0.9477
<i>B6</i>	53600	52200.42	<i>S</i>	1	5	146.82	1200	0.9739
<i>B7</i>	52600	50974.74	<i>S</i>	1	5	147.16	1200	0.9691
<i>B8</i>	52600	50448.49	<i>S</i>	1	5	147.5	1200	0.9591
<i>C1</i>	46300	45662.00	<i>S</i>	1	5	147.84	1200	0.9862
<i>C2</i>	52000	50013.43	<i>S</i>	1	5	148.18	1200	0.9618
<i>C3</i>	54400	50072.72	<i>S</i>	1	5	148.52	1200	0.9205
<i>C4</i>	57400	55295.94	<i>S</i>	1	5	148.86	1200	0.9633
<i>C5</i>	47500	47068.57	<i>S</i>	1	5	149.21	1200	0.9909
<i>C6</i>	57500	55894.93	<i>S</i>	1	5	149.55	1200	0.9721
<i>C7</i>	50800	49272.43	<i>S</i>	1	5	149.89	1200	0.9699
<i>C8</i>	57500	52903.53	<i>S</i>	1	5	150.23	1200	0.9201
<i>D1</i>	62200	60826.69	<i>S</i>	1	5	150.57	1200	0.9779
<i>D2</i>	51000	49438.17	<i>S</i>	1	5	150.91	1200	0.9694
<i>D3</i>	57200	55266.25	<i>S</i>	1	5	151.25	1200	0.9662
<i>D4</i>	45100	44374.97	<i>S</i>	1	5	151.59	1200	0.9839
<i>D5</i>	49300	49043.39	<i>S</i>	1	5	151.94	1200	0.9948
<i>D6</i>	60500	59354.68	<i>S</i>	1	5	152.28	1200	0.9811
<i>D7</i>	58000	56378.57	<i>S</i>	1	5	152.62	1200	0.9720
<i>D8</i>	50800	50796.98	<i>S</i>	1	5	152.96	1200	0.9999

Tableau 6.3 Deuxième niveau le long de l'axe des fils

	Masse_m (10 ⁻⁶ g)	Masse_{AAN} (10 ⁻⁶ g)	Détec.	Pos.	ti(m)	td(h)	tc(s)	Glocal
A1	56100	49183.38	<i>S</i>	1	5	173.04	1200	0.8767
B1	49500	44674.92	<i>S</i>	1	5	173.38	1200	0.9025
B2	52700	48946.10	<i>S</i>	1	5	173.72	1200	0.9288
B3	57000	49713.75	<i>S</i>	1	5	174.07	1200	0.8722
B4	46200	44127.01	<i>S</i>	1	5	174.41	1200	0.9551
B5	50300	45629.69	<i>S</i>	1	5	174.75	1200	0.9072
B6	48300	45304.64	<i>S</i>	1	5	175.09	1200	0.9380
B7	50100	48071.55	<i>S</i>	1	5	175.43	1200	0.9595
B8	55500	51229.18	<i>S</i>	1	5	175.77	1200	0.9230
C1	52200	44016.19	<i>S</i>	1	5	176.11	1200	0.8432
C2	48100	45730.54	<i>S</i>	1	5	176.45	1200	0.9507
C3	45400	43870.52	<i>S</i>	1	5	176.8	1200	0.9663
C4	45400	40556.01	<i>S</i>	1	5	177.14	1200	0.8933
C5	49400	48399.51	<i>S</i>	1	5	177.48	1200	0.9797
C6	46300	43430.94	<i>S</i>	1	5	177.82	1200	0.9380
C7	47500	43582.87	<i>S</i>	1	5	178.16	1200	0.9175
C8	49500	45962.33	<i>S</i>	1	5	178.5	1200	0.9285
D1	47800	45417.51	<i>S</i>	1	5	178.84	1200	0.9502
D2	51000	44511.48	<i>S</i>	1	5	179.18	1200	0.8728
D3	46200	45447.91	<i>S</i>	1	5	179.53	1200	0.9837
D4	45300	45284.66	<i>S</i>	1	5	179.87	1200	0.9997
D5	45700	43635.00	<i>S</i>	1	5	180.21	1200	0.9548
D6	50700	42947.95	<i>S</i>	1	5	180.55	1200	0.8471
D7	49600	43512.38	<i>S</i>	1	5	180.89	1200	0.8773
D8	51800	47043.87	<i>S</i>	1	5	181.23	1200	0.9082

Tableau 6.4 Troisième niveau le long de l'axe des fils

	Masse_m (10 ⁻⁶ g)	Masse_{AAN} (10 ⁻⁶ g)	Détec.	Pos.	ti(m)	td(h)	tc(s)	Glocal
A1	57700	51040.53	C	1	5	171.18	1200	0.8846
B1	48300	39577.86	C	1	5	171.52	1200	0.8194
B2	54000	44102.62	C	1	5	171.85	1200	0.8167
B3	48200	40134.82	C	1	5	172.18	1200	0.8327
B4	50900	45050.36	C	1	5	172.52	1200	0.8851
B5	49700	42053.09	C	1	5	172.85	1200	0.8461
B6	47400	41132.65	C	1	5	173.19	1200	0.8678
B7	44800	38503.03	C	1	5	173.52	1200	0.8594
B8	54700	47711.66	C	1	5	173.86	1200	0.8722
C1	56600	51360.78	C	1	5	174.19	1200	0.9074
C2	55000	48599.92	C	1	5	174.52	1200	0.8836
C3	50500	42662.48	C	1	5	174.86	1200	0.8448
C4	53300	45665.42	C	1	5	175.19	1200	0.8568
C5	49100	43328.07	C	1	5	175.53	1200	0.8824
C6	53900	46415.44	C	1	5	175.86	1200	0.8611
C7	58000	51349.28	C	1	5	176.19	1200	0.8853
C8	50500	42491.70	C	1	5	176.53	1200	0.8414
D1	50900	47188.14	C	1	5	176.86	1200	0.9271
D2	48500	45176.15	C	1	5	177.2	1200	0.9315
D3	53200	47885.72	C	1	5	177.53	1200	0.9001
D4	53000	46114.29	C	1	5	177.87	1200	0.8701
D5	54800	48481.35	C	1	5	178.2	1200	0.8847
D6	49000	42855.23	C	1	5	178.53	1200	0.8746
D7	45000	40837.88	C	1	5	178.87	1200	0.9075
D8	49300	45080.49	C	1	5	179.2	1200	0.9144

Tableau 6.5 Quatrième niveau le long de l'axe des fils (le plus bas)

	Masse_m (10 ⁻⁶ g)	Masse_{AAV} (10 ⁻⁶ g)	Détec.	Pos.	ti(m)	td(h)	tc(s)	Glocal
A1	49900	48126.74	<i>S</i>	1	5	164.19	1200	0.9645
B1	53000	50307.11	<i>S</i>	1	5	164.53	1200	0.9492
B2	47300	44691.27	<i>S</i>	1	5	164.87	1200	0.9448
B3	48600	45029.40	<i>S</i>	1	5	165.21	1200	0.9265
B4	59300	55317.39	<i>S</i>	1	5	165.55	1200	0.9328
B5	51700	48549.17	<i>S</i>	1	5	165.9	1200	0.9391
B6	51800	47255.67	<i>S</i>	1	5	166.24	1200	0.9123
B7	51900	47327.84	<i>S</i>	1	5	166.58	1200	0.9119
B8	52100	48855.34	<i>S</i>	1	5	166.92	1200	0.9377
C1	52500	50983.46	<i>S</i>	1	5	167.26	1200	0.9711
C2	55300	51757.37	<i>S</i>	1	5	167.6	1200	0.9359
C3	54200	49062.75	<i>S</i>	1	5	167.94	1200	0.9052
C4	51200	46993.87	<i>S</i>	1	5	168.28	1200	0.9178
C5	52300	49242.40	<i>S</i>	1	5	168.63	1200	0.9415
C6	57000	54153.90	<i>S</i>	1	5	168.97	1200	0.9501
C7	55600	50826.24	<i>S</i>	1	5	169.31	1200	0.9141
C8	55100	50340.99	<i>S</i>	1	5	169.65	1200	0.9136
D1	52100	51485.33	<i>S</i>	1	5	169.99	1200	0.9882
D2	53600	50790.87	<i>S</i>	1	5	170.65	1200	0.9476
D3	52400	50538.17	<i>S</i>	1	5	170.99	1200	0.9645
D4	56100	53121.48	<i>S</i>	1	5	171.34	1200	0.9469
D5	56800	52957.77	<i>S</i>	1	5	171.68	1200	0.9324
D6	47900	46527.96	<i>S</i>	1	5	172.02	1200	0.9714
D7	55200	52949.29	<i>S</i>	1	5	172.36	1200	0.9592
D8	48700	46363.90	<i>S</i>	1	5	172.7	1200	0.9520

CHAPITRE 7

RÉSULTATS ET DISCUSSIONS

Le but principal des calculs décrits dans les chapitres précédents est de trouver un modèle DRAGON simple et rapide qui permette d'évaluer l'effet d'auto-protection spatiale dans des échantillons fortement absorbants et de taille important.

Dans ce chapitre on présente les résultats des calculs DRAGON et SERPENT en 2-D et en 3-D. On compare ensuite nos résultats numérique au profil de variation de G_{eff} déterminé expérimentalement dans l'échantillon de cuivre.

Finalement, on propose un programme DRAGON qui permet de corriger les formules semi-empiriques pour la correction de masse dans l'AAN.

7.1 Comparisons DRAGON-SERPENT

Ici nous comparerons le comportement des flux DRAGON et SERPENT dans le site 1, dans deux situations:

1. Site vide
2. Site contenant un échantillon de cuivre

Il est à noter que DRAGON est aussi capable de donner le flux dans toutes les régions du réacteur. En utilisant notre modèle 2-D et en faisant une condensation à deux groupes d'énergies (groupe épithermique et groupe thermique), on génère les figures 7.1 et 7.2 qui donnent le profil de flux thermique et épithermique du réacteur.

Dans le cas du code SERPENT il est beaucoup plus difficile de trouver le flux dans des régions très petites, ceci est le résultat d'une combinaison de deux facteurs:

1. **Insertion des détecteurs:** Pour trouver le flux local dans plusieurs région dans le réacteurs on doit mettre dans chaque région un détecteur. Or le fait d'ajouter un détecteur augmente le temps du calcul. Ainsi si le réacteur est divisé en 3000 sousdivisions et que l'on doit insérer un détecteur par région, le temps de calcul devient alors supérieure à un mois !
2. **Division de la géométrie:** Pour insérer les détecteur on doit diviser le géométrie selon le choix que l'on veut, mais toute sousdivision de la géométrie augmente aussi le temps de calculs.

Donc avec SERPENT on ne peut pas évaluer le profil de flux dans le réacteur, mais ce qu'on peut simuler c'est la position des collisions des neutrons dans le réacteur. Aux figures 7.3 (calcul 2-D) et 7.4 (calcul 3-D) les positions des collisions des neutrons sont représentées par des points blancs.

De plus, le calcul SERPENT est très long par rapport le calcul DRAGON (voir tableau 7.1), ce qui est normal car le code SERPENT fait un calcul probabiliste où il suit chaque neutron dans le réacteur depuis sa naissance jusqu'à sa disparition. Ce processus est répété pour chaque cycle. Pour le code DRAGON, qui résout l'équation de transport en utilisant des méthodes numérique, le temps de calcul est beaucoup plus faible.

Tableau 7.1 Temps de calcul DRAGON et SERPENT en 2-D et 3-D

	Cycles actifs	Population	Temps de calcul
DRAGON 2-D	n/a	n/a	10 heures 27 minutes
DRAGON 3-D	n/a	n/a	1 jour 18 heures 32 minutes
SERPENT 2-D	5000	10^6	30 jours 5 heures 7 minutes
SERPENT 3-D	300	10^7	34 jours 2 heures

L'échantillon de cuivre est simulé dans les deux codes à une densité de puissance de 0.0 W.g^{-1} afin de comparer la dépression du flux résultant du calcul déterministe et du calcul probabiliste. Les flux, thermique et épithermique, pour chaque code sont normalisés au flux total à l'extrémité du site 1 la plus proche du combustible. De plus, les 22 régions (2-D) sont numérotées de la région la plus proche du réacteur vers la région la plus éloignée. Pour le modèle 3-D les régions sont numérotées

comme en 2-D pour chaque plan, et le passage d'un plan à un autre se fait par ordre croissant selon l'axe z comme le montre la figure 7.5.

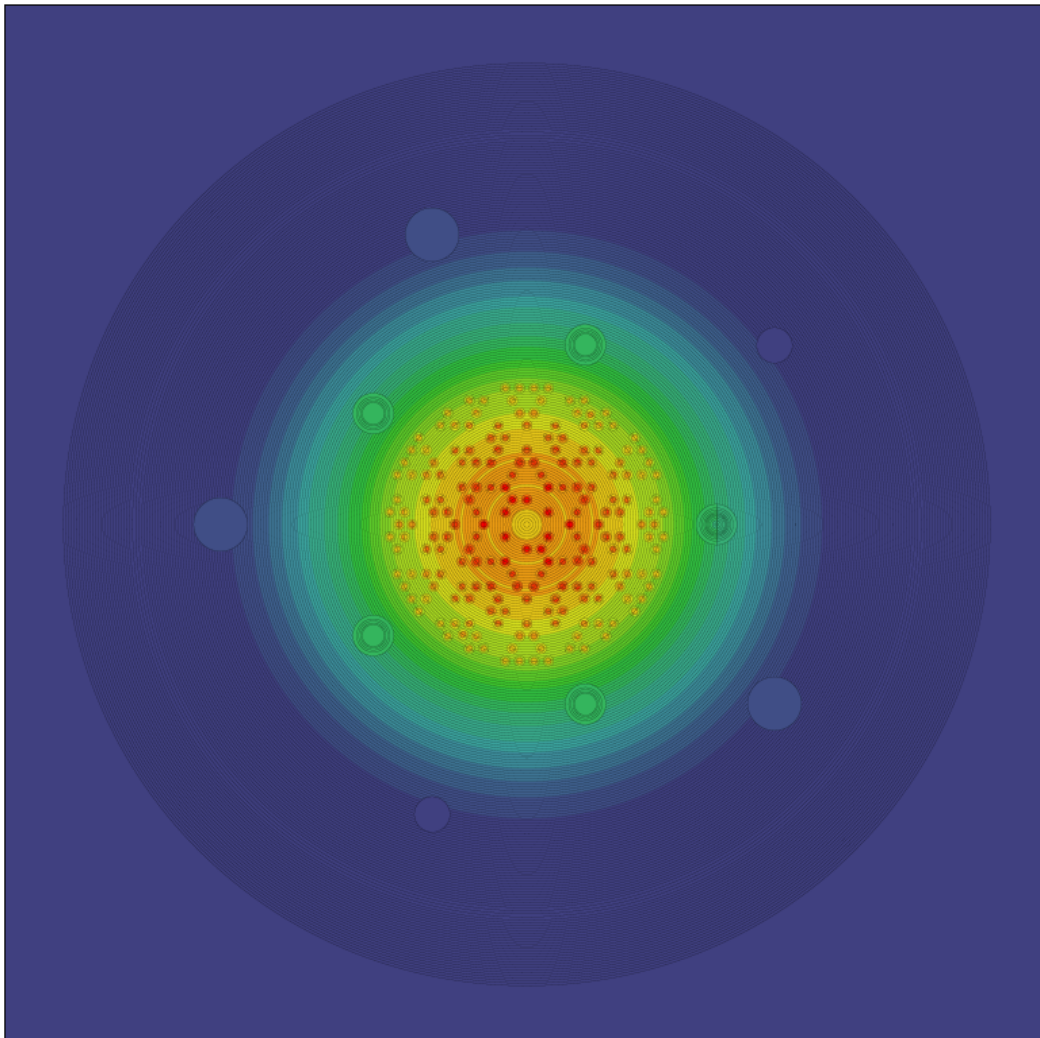
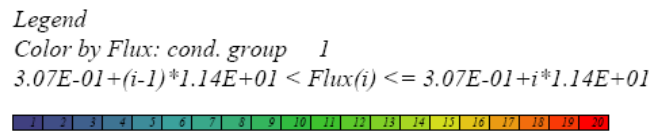


Figure 7.1 Flux épithermique DRAGON normalisé dans le réacteur SLOWPOKE-2

Legend

Color by Flux: cond. group 2

$2.02E+00 + (i-1)*5.73E+00 < \text{Flux}(i) \leq 2.02E+00 + i*5.73E+00$

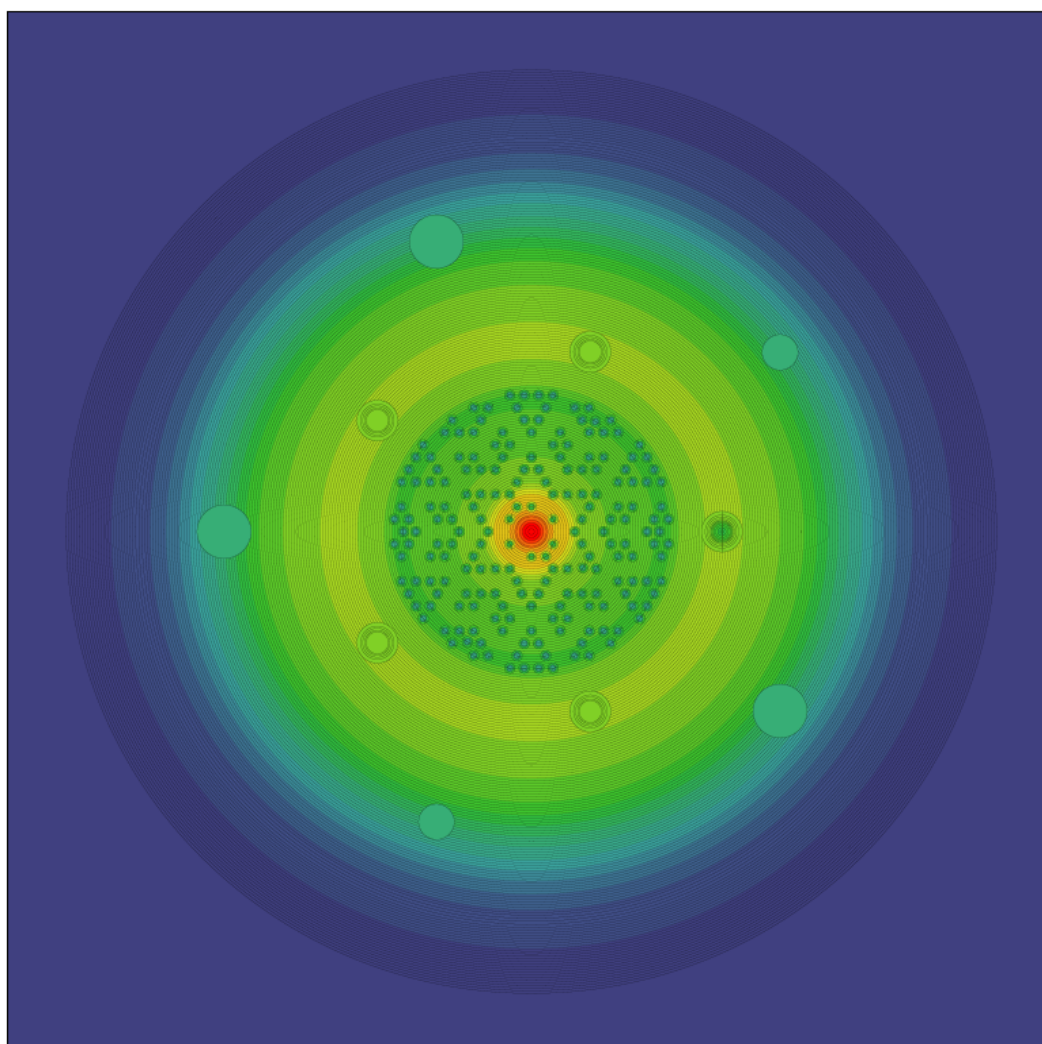


Figure 7.2 Flux thermique DRAGON normalisé dans le réacteur SLOWPOKE-2

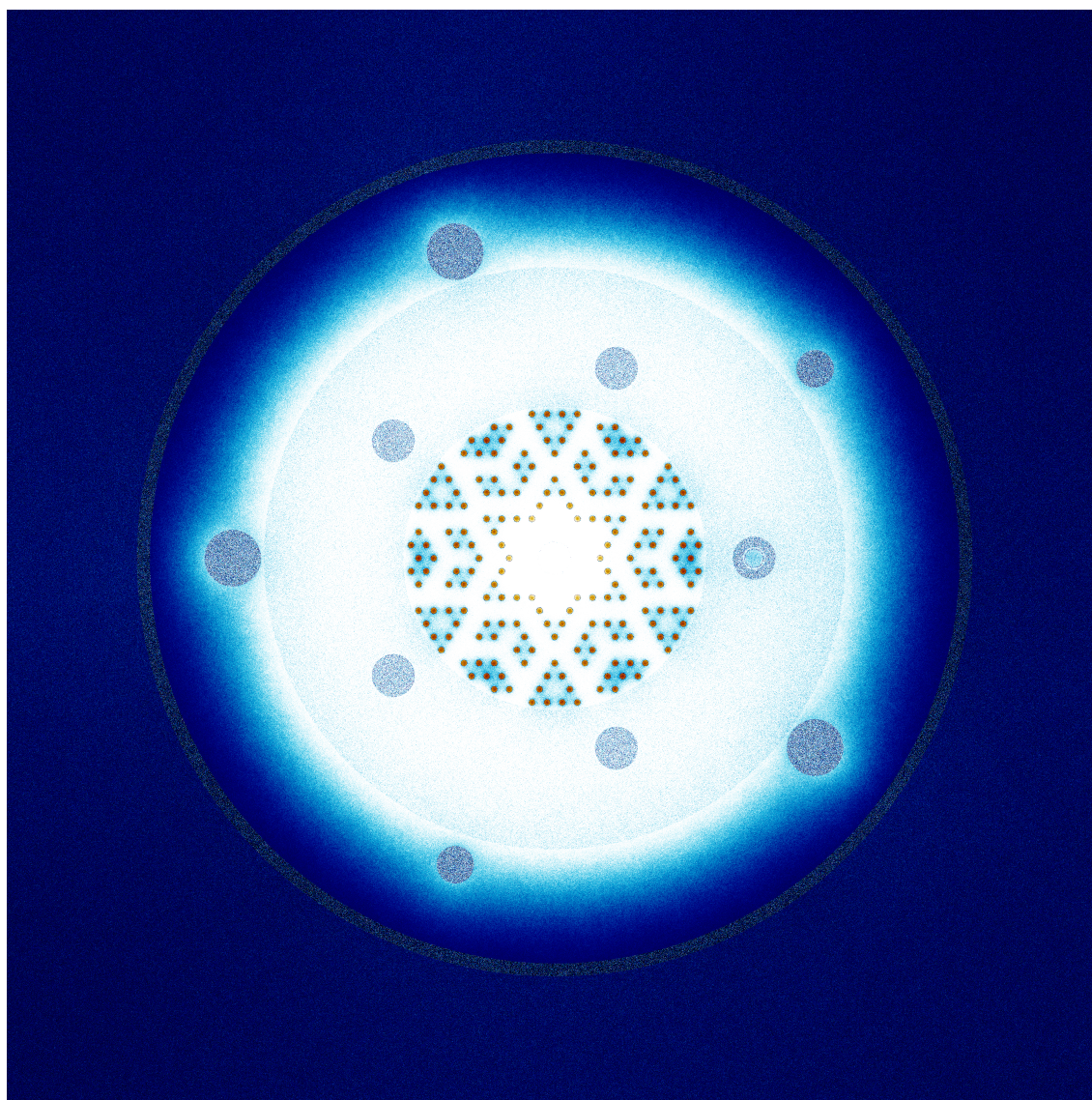


Figure 7.3 Points correspondant aux collisions neutroniques SERPENT dans le réacteur SLOWPOKE-2 en 2-D où plus la zone est blanche plus la densité des neutrons est importante : coupe horizontale (flux total normalisé)

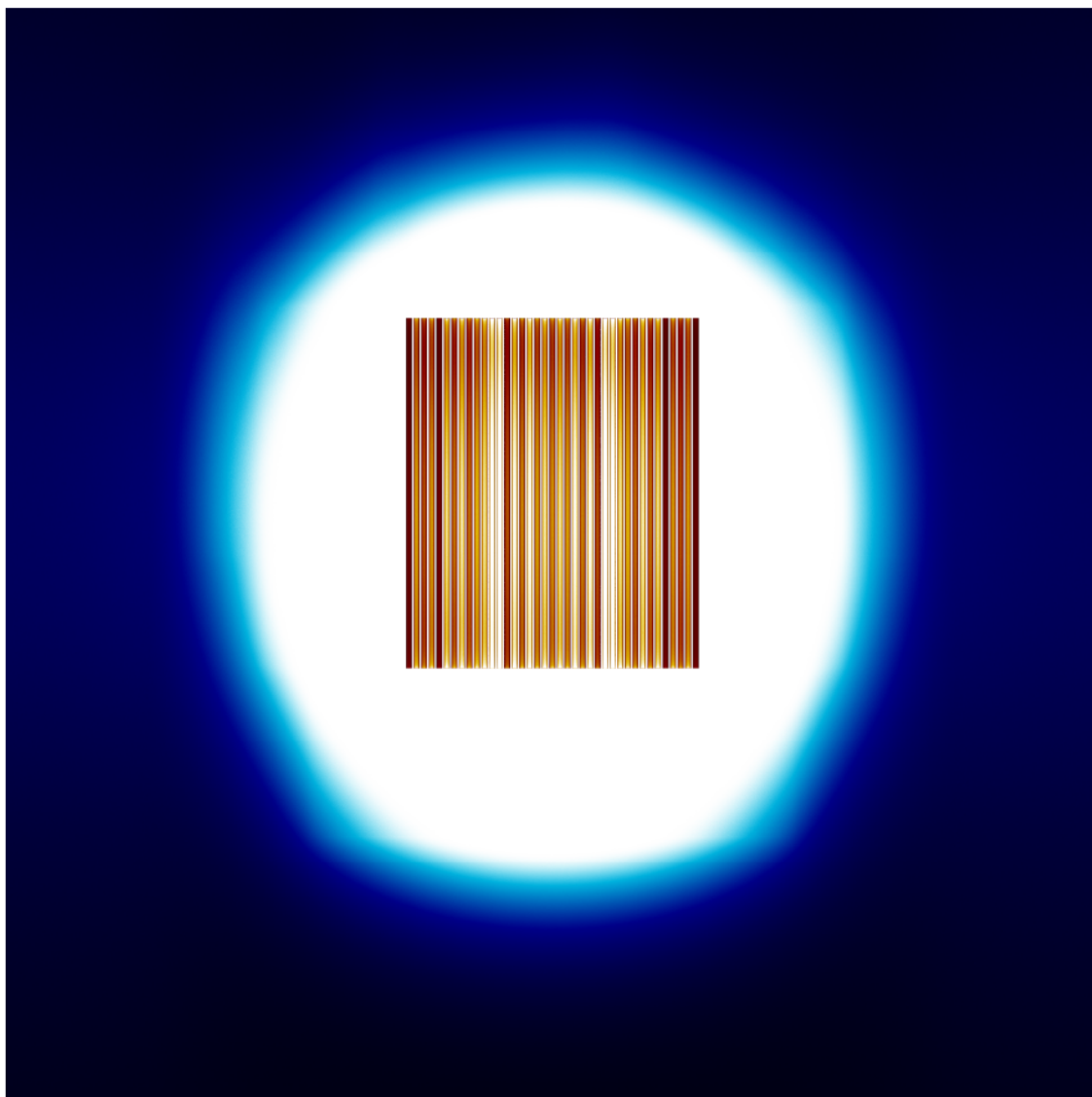


Figure 7.4 Points correspondant aux collisions neutroniques SERPENT dans le réacteur SLOWPOKE-2 en 3-D où plus la zone est blanche plus la densité des neutrons est importante : coupe verticale (flux total normalisé)

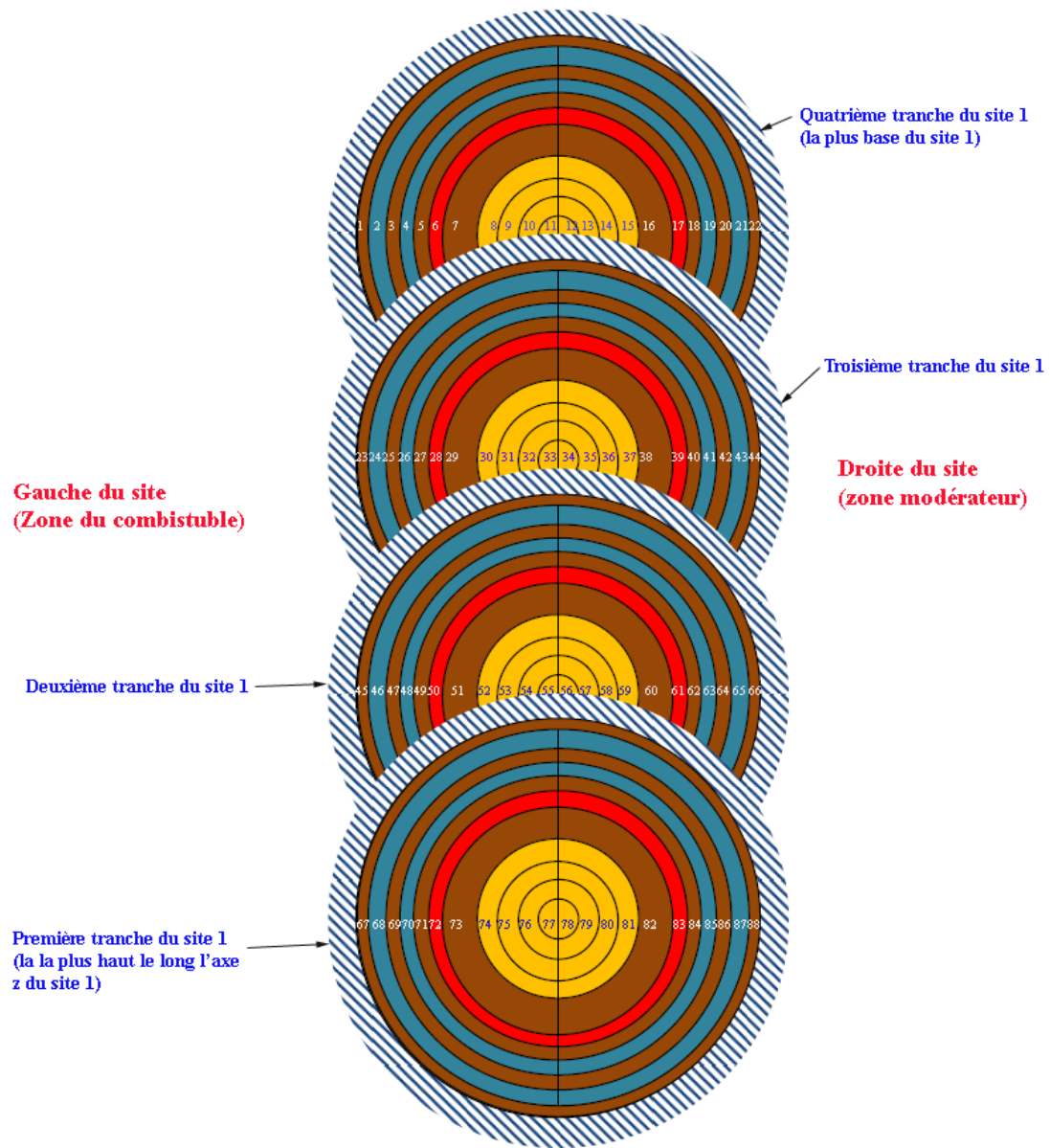


Figure 7.5 Numérotation des régions en 3-D pour le site 1 plan

Les figures 7.6, 7.7, 7.8 et 7.9 montrent les distribution de flux pour les deux codes (en 2-D et 3-D) dans toutes les régions du site 1.

Dans ces figures la légende correspond à:

1. Modèle exact DRAGON ou SERPENT sans échantillon (/S)
2. Modèle exact DRAGON avec échantillon plein dans le niveau Ni (NiD/P)
3. Modèle SERPENT avec échantillon plein dans le niveau Ni (NiS/P)

Comme on le voit, le calcul déterministe de DRAGON donne des résultats très similaire au calcul probabiliste SERPENT. L'erreur statistique SERPENT maximale est de 0.4 % dans le modèle 2-D et de 0.6 % dans le modèle 3-D.

Le flux thermique présente la même variation pour les deux codes, mais une augmentation globale de l'ordre de 2.5 % du flux DRAGON est observée. De même pour le flux épithermique, on remarque une forte ressemblance entre les deux résultats, mais cette fois c'est le flux SERPENT qui est supérieur au flux DRAGON (2.8 %).

Le flux épithermique diminue de la région la plus proche du combustible vers le modérateur. Cette diminution est due au ralentissement des neutrons dans le réflecteur en béryllium. Le flux thermique diminue rapidement vers le centre de l'échantillon et augmente vers la région la plus près du modérateur pour atteindre une valeur inférieure au flux initial de la première région. Cette importante diminution du flux thermique dans l'échantillon est due à la forte section efficace d'absorption du cuivre dans le domaine thermique qui conduit à une réduction de la population des neutrons thermiques qui atteint le centre de l'échantillon. L'augmentation du flux vers le modérateur est due au ralentissement des neutrons épithermiques et la réflexion des neutrons du réflecteur vers l'échantillon. On peut observer dans le modèle 3-D que les flux thermique et épithermique sont plus importants près des surfaces inférieure et supérieure de l'échantillon (voir figure 7.8 et figure 7.9).

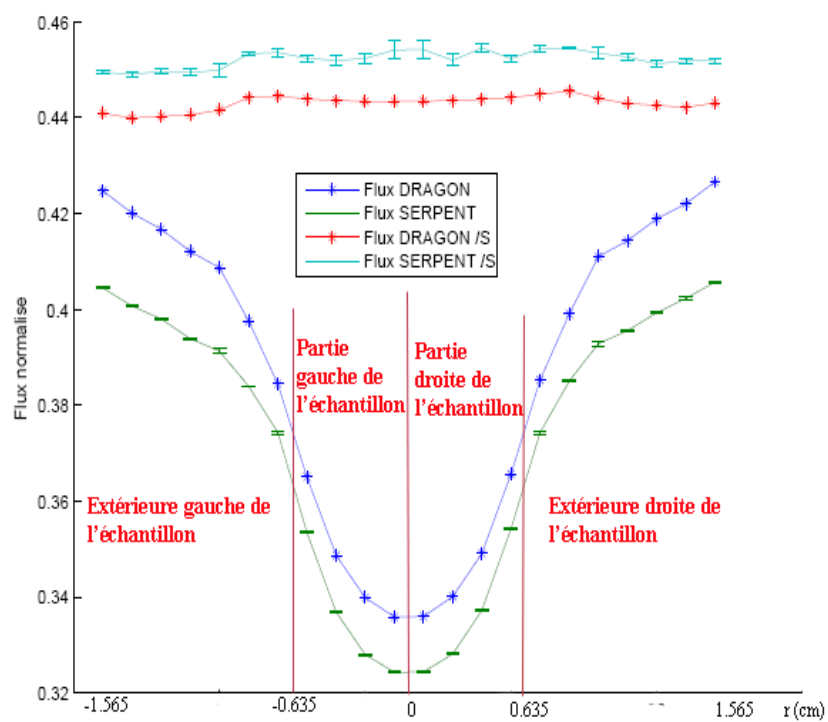


Figure 7.6 Flux thermique DRAGON et SERPENT en 2-D

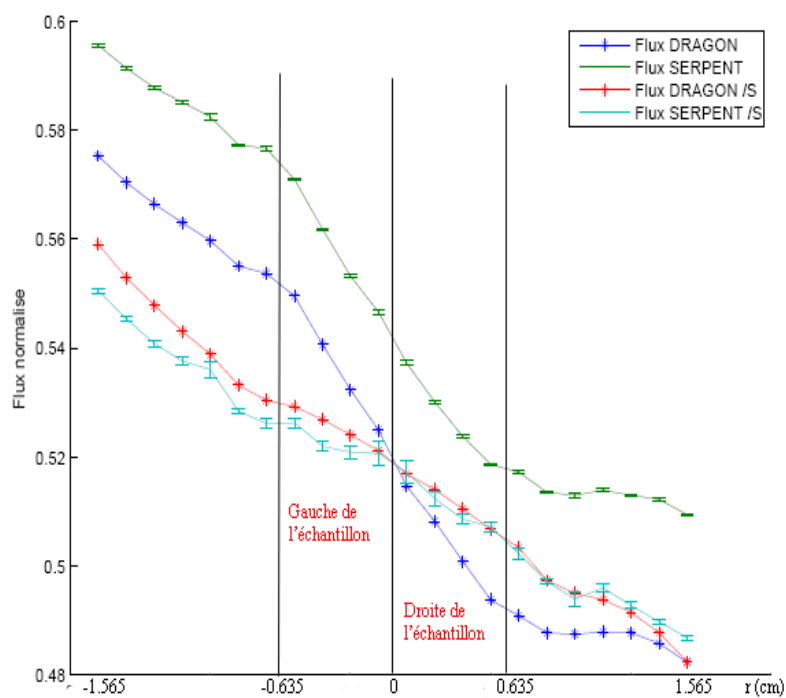


Figure 7.7 Flux épithermique DRAGON et SERPENT en 2-D

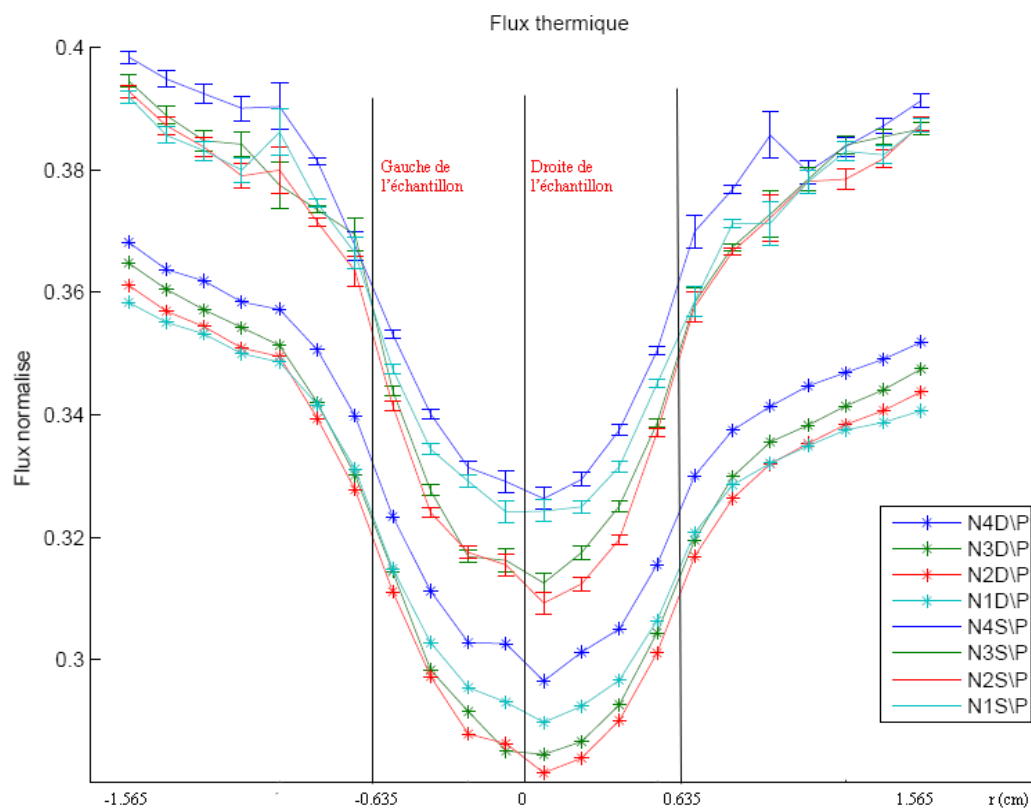


Figure 7.8 Flux thermique DRAGON et SERPENT en 3-D

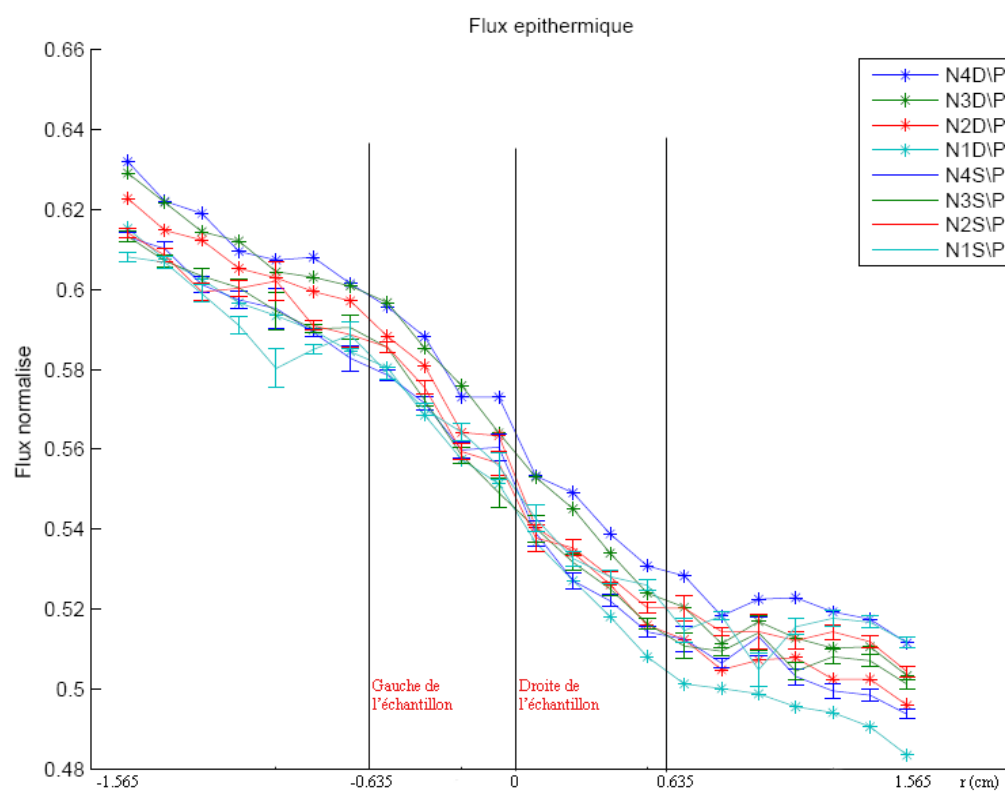


Figure 7.9 Flux épithermique DRAGON et SERPENT en 3-D

7.2 Flux DRAGON du réacteur SLOWPOKE-2

Dans les figures 7.10 et 7.11 les distributions du flux (thermique et épithermique) radiales calculées par DRAGON dans le SLOWPOKE-2 sont présentées (à noter que dans la région du combustible seule le flux dans le caloporteur est présenté). Tel qu'illustré, le flux thermique est important dans la zone centrale qui contient seulement l'eau. Par contre, dans la région du combustible c'est le flux épithermique qui domine. De plus, on observe une augmentation du flux thermique dans le centre du réflecteur. Cette augmentation est due au ralentissement des neutrons rapide dans le béryllium et aux réflexions de neutrons vers le centre du réflecteur.

Après le réflecteur en béryllium les deux flux thermique et épithermique diminuent rapidement grâce aux captures neutroniques et aux fuites.

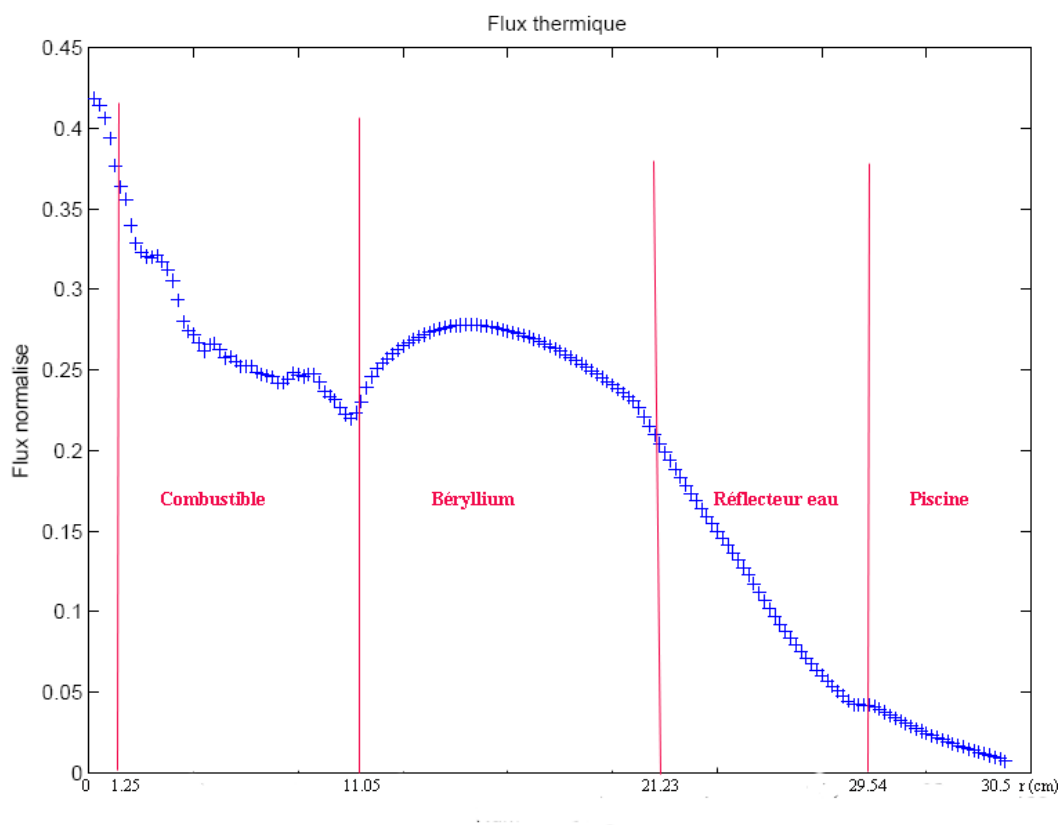


Figure 7.10 Flux thermique DRAGON dans le réacteur SLOWPOKE-2

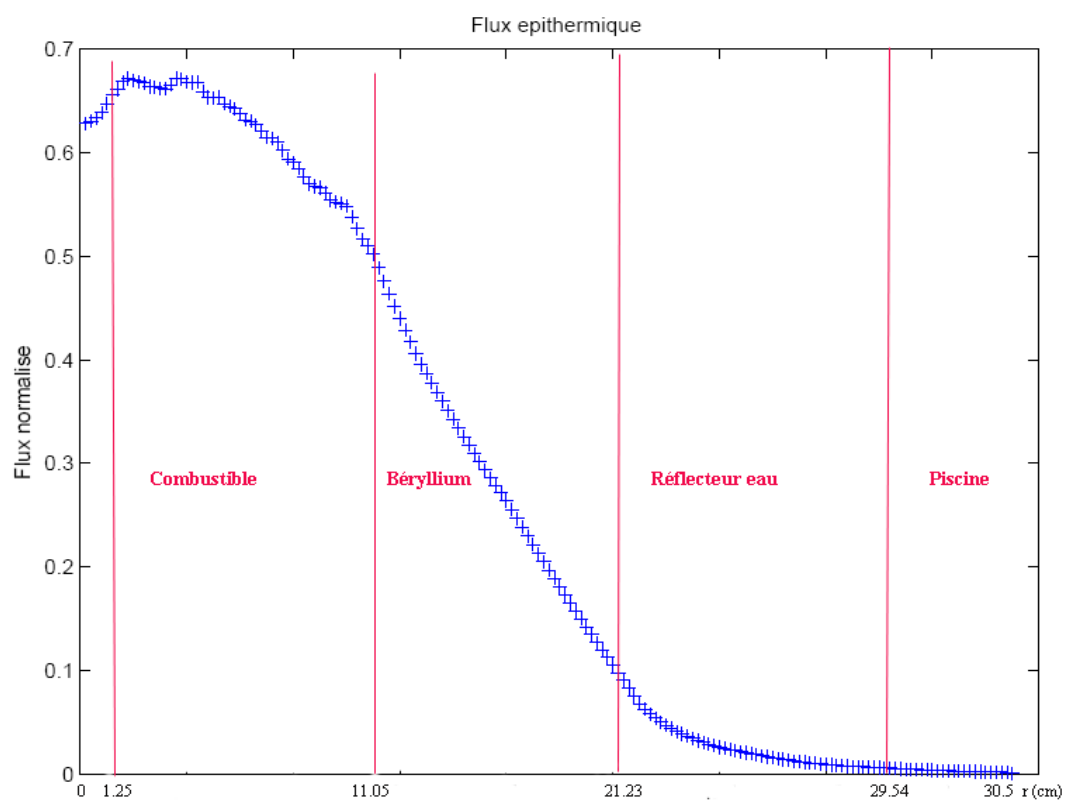


Figure 7.11 Flux épithermique DRAGON dans le réacteur SLOWPOKE-2

7.3 Validation du modèle simplifié DRAGON

Les modèles DRAGON, 2-D et 3-D, donnent de bons résultats lorsque comparés au modèle SERPENT, mais leurs temps de calculs sont très long si on veut les utilisés pour l'AAN (voir tableau 7.1). Afin de réduire le temps de calcul DRAGON nous avons utilisé le modèle simplifié décrit à les sections 4.2.2 et 5.2.2.

Les résultats des flux thermique et épithermique dans le site 1 sont comparés dans les figures 7.13 à 7.16 pour les cas suivants:

Calcul 2-D pour les figures 7.13 et 7.14

1. Modèle exact avec échantillon plein (ME/P)
2. Modèle exact avec échantillon vide (ME/V)
3. Modèle simplifié avec échantillon plein (MS/P)
4. Modèle simplifié avec échantillon vide (MS/V)

Calcul 3-D pour les figures 7.15 et 7.16

1. Modèle exact avec échantillon plein dans le niveau Ni (ENi/P)
2. Modèle simplifié avec échantillon plein dans le niveau Ni (MNi/P)

Calcul 3-D pour les figures 7.17 et 7.18

1. Calcul DRAGON avec échantillon plein dans le niveau Ni (Ni/P)
2. Calcul DRAGON sans échantillon dans le niveau Ni (Ni/V)

Comme on peut le constater (voir figure 7.13 et figure 7.14) les deux modèles donnent des distributions de flux thermique et épithermique très similaires en 2-D. Le flux thermique baisse un peu

lorsqu'on fait le calcul simplifié tandis que le flux épithermique augmente un peu. En effet, on observe une réduction de flux thermique approximativement de 1.06 % en présence du l'échantillon du cuivre et de 1.60 % sans échantillon. D'autre part, l'augmentation du flux épithermique varie entre 0.32 % et 0.93 % en présence du l'échantillon et entre 0.02 % et 0.53 % sans échantillon. Cette légère différence entre le modèle exact et le modèle simplifié est justifiés par le fait que dans le modèle exact les neutrons naissent dans les crayons de combustible et ils ne peuvent atteindre le réflecteur qu'après avoir traversé un volume de caloporteur (Voir figure 7.12a). Ce parcours dans le caloporteur ralentit les neutrons rapide. Dans le modèle simplifié, la naissance des neutrons est hémogène dans toutes la pâte de combustible, donc une partie des neutrons rapides peut atteindre le réflecteur sans subir de ralentissement (voir figure 7.12b). De ce fait, le nombre de neutrons thermiques dans le modèle exact est légèrement plus élevé que dans le modèle simplifié, et inversement pour les neutrons épithermiques.

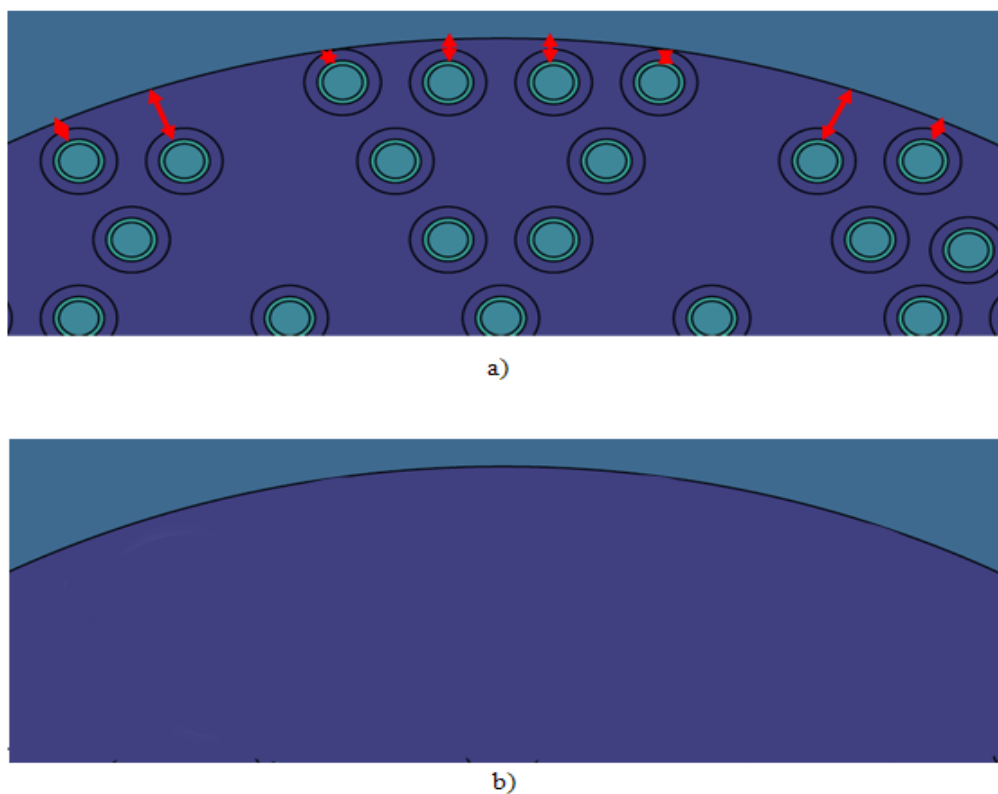


Figure 7.12 a) Parcours des neutrons rapides dans le combustible pour le modèle DRAGON exact , b) Les neutrons les plus proche du réflecteur naissent dans la frontière entre les deux régions donc le parcours est nul dans le combustible pour le modèle simplifié

Pour le modèle simplifié 3-D (voir figure 7.15 et figure 7.16), on voit bien que les distributions de flux thermique et épithermique sont parfaitement confondues aux distributions données par le modèle exact. De plus, dans les figures 7.15 et 7.16 on compare les distributions de flux dans le site 1 avec et sans échantillon (dans notre modèle on utilise un échantillon infiniment dilué pour modéliser le vide dans le site 1). En présence de l'échantillon le niveau de flux de la région supérieure et inférieure de l'échantillon sont très proche. Ceci est justifié par le fait que l'effet d'autoprotection spatiale des neutrons thermique est faible aux extrémités de l'échantillon. Dans le cas où l'échantillon est infiniment dilué l'autoprotection spatiale est négligeable, ce qui donne des niveaux de flux très proches et presque indépendant de la position axiale.

Nous avons utilisé le cuivre comme échantillon pour faire les simulations DRAGON, cet échantillon présente un fort effet d'autoprotection spatiale pour les neutrons thermiques. Cependant, l'effet d'autoprotection spatiale des neutrons épithermiques n'est pas très important. En effet, dans la figure 7.18 la distribution de flux épithermique avec ou sans échantillon sont très proches, la baisse de flux observée étant due essentiellement au ralentissement dans le réflecteur en béryllium. Le calcul par partie décrit dans les chapitres précédents donne une excellente réduction en temps de calcul (voir tableau 7.2) avec la même distributions de flux que celle obtenue avec le calcul exact.

Tableau 7.2 Temps de calcul DRAGON

Géométrie	modèle	Temps du première partie	Temps du deuxième partie
2-D	Exact	10 heures	n/a
	Simplifié	1 heure 15 minutes	5 minutes
3-D	Exact	1 jour 18 heures	n/a
	Simplifié	3 jours et 4 heures	14 heures et 32 minutes

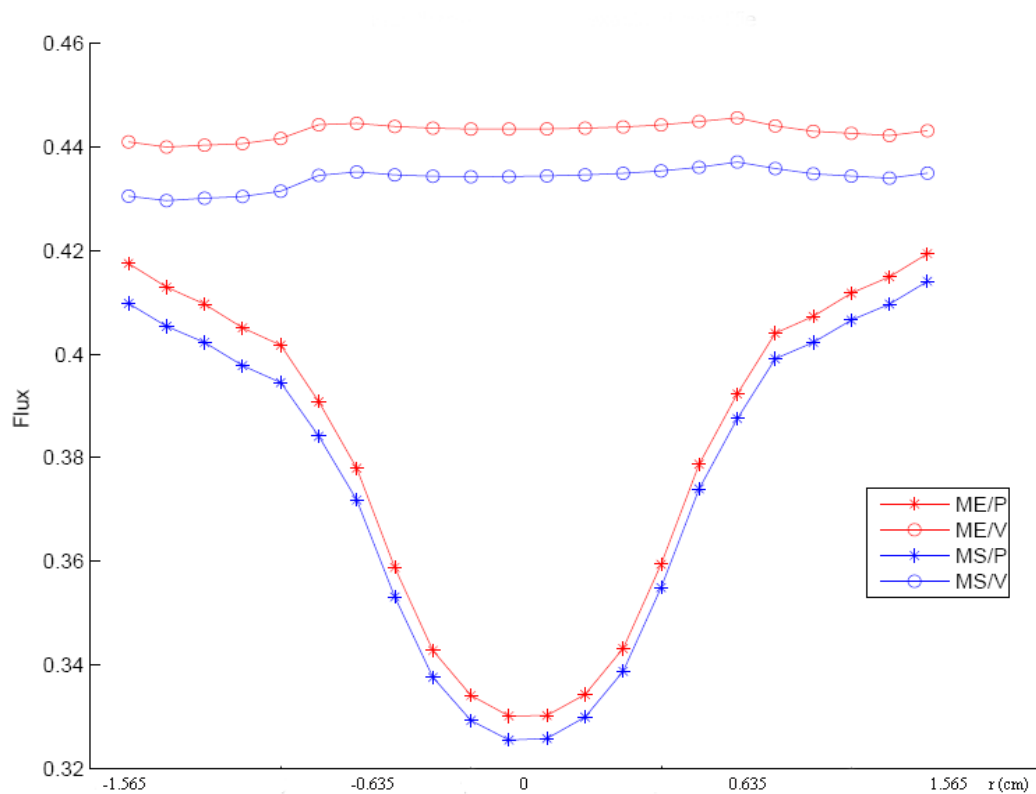


Figure 7.13 Flux thermique modèle exact et simplifié dans le réacteur SLOWPOKE-2 en 2-D

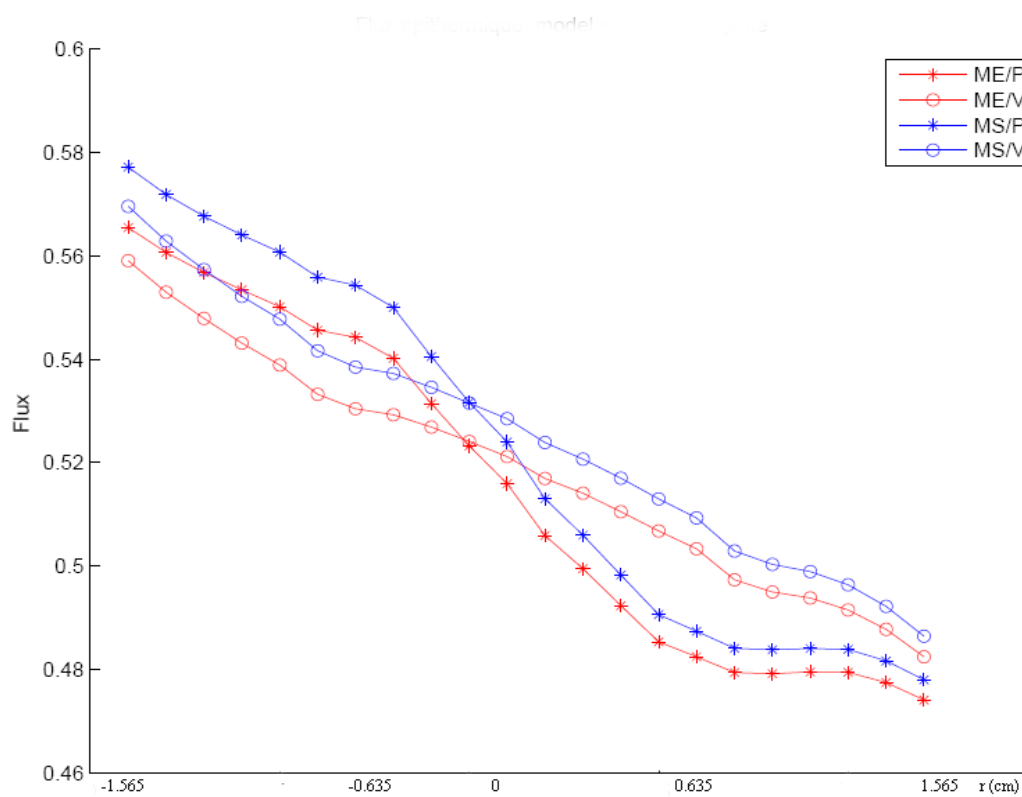


Figure 7.14 Flux épithermique modèle exact et simplifié dans le réacteur SLOWPOKE-2 en 2-D

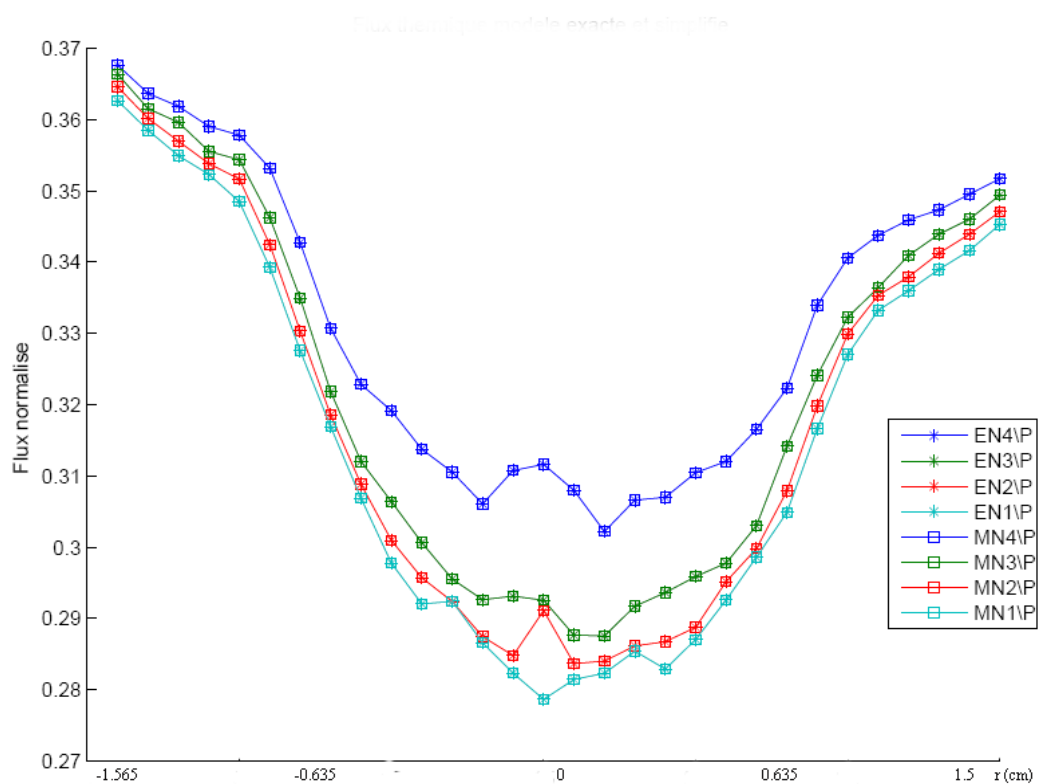


Figure 7.15 Flux thermique modèle exact et simplifié dans le réacteur SLOWPOKE-2 en 3-D

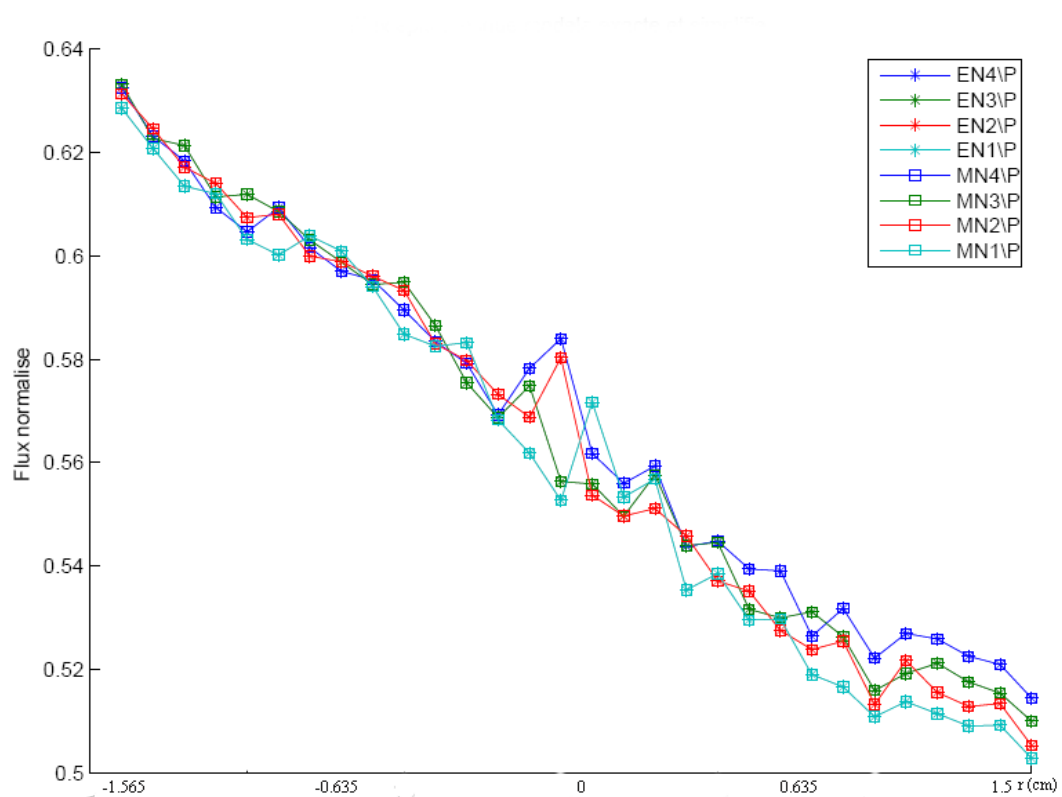


Figure 7.16 Flux épithermique modèle exact et simplifié dans le réacteur SLOWPOKE-2 en 3-D

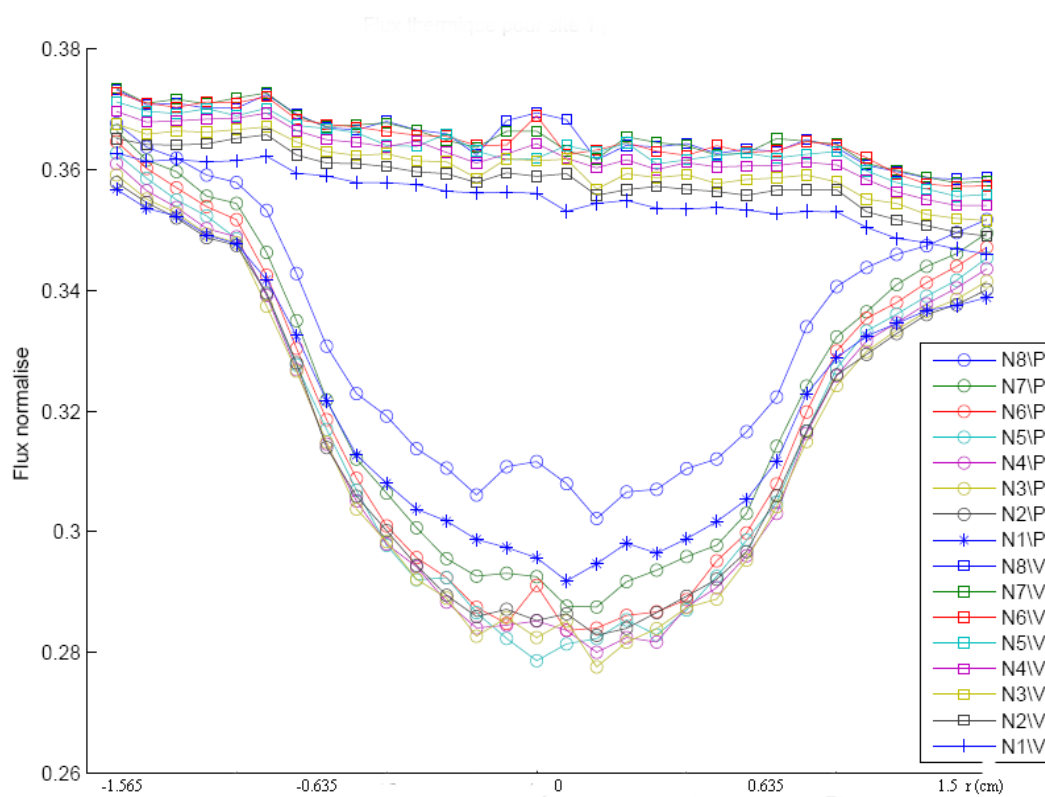


Figure 7.17 Flux thermique avec et sans échantillon en 3-D

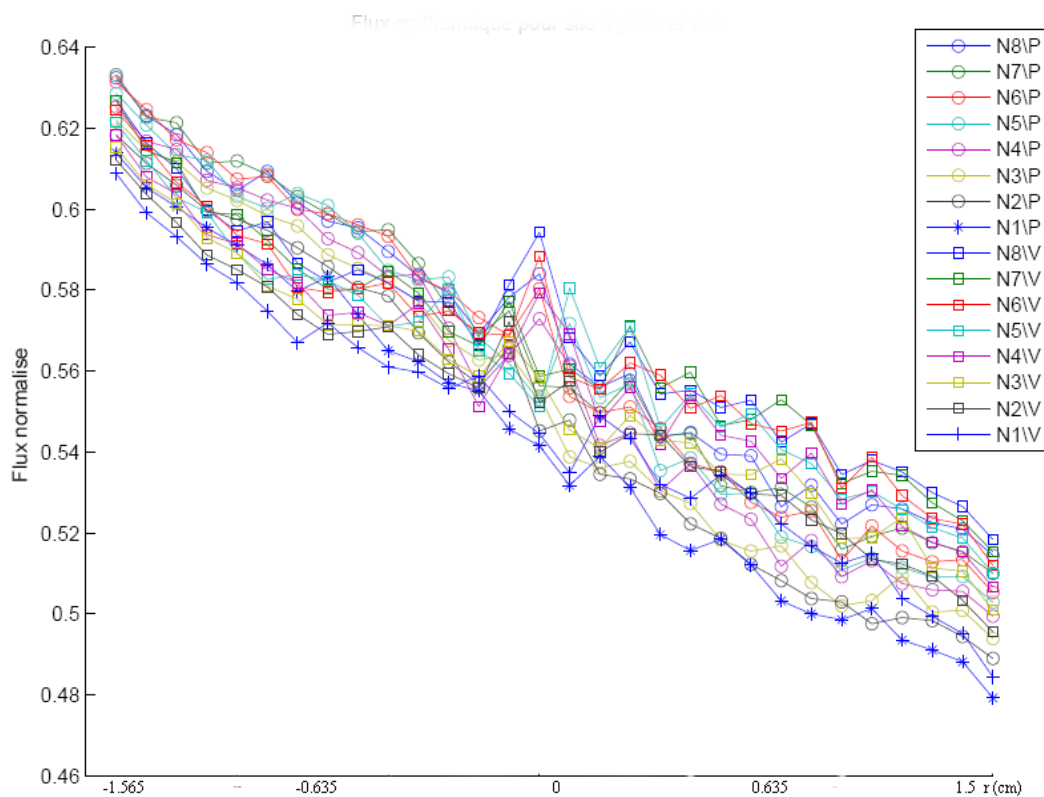


Figure 7.18 Flux épithémique avec et sans échantillon en 3-D

7.4 Validation expérimentale du calcul DRAGON pour l'échantillon de cuivre

Afin de valider le modèle DRAGON, on doit comparer les résultats numériques aux résultats réels d'un échantillon de cuivre irradié dans le réacteur SLOWPOKE-2. Cette expérience dont on a décrit le processus dans le chapitre 6, donne le facteur d'autoprotection effectif G_{eff} dans l'échantillon de cuivre.

Ici, on représente le profil de G_{eff} pour les quatre plans axiaux, et ce pour chaque plan radial contenant les détecteurs localisés aux angles 0° 45° 90° 135° (voir figure 7.19).

La variation du facteur G_{eff} dans l'échantillon de cuivre donnée par le modèle DRAGON 3-D est représentée dans la figure 7.20. Les profils de G_{eff} pour les quatre plans radiaux sont présentés dans les figures 7.21 à 7.24. Les erreurs expérimentales pour chaque point de la courbe sont de l'ordre de 5 %.

La comparaison entre les distributions de flux expérimentaux et celle de DRAGON montre une forte ressemblance entre le profil de G_{eff} simulé par DRAGON et celui donné par l'expérience. En effet, on voit les comportements suivants:

1. Le flux est moins réduit aux surfaces inférieure et supérieure de l'échantillon: ce comportement apparaît très bien dans les résultats expérimentaux et aussi dans le modèle DRAGON.
2. Le profil de G_{eff} présente une légère augmentation au centre de l'échantillon, qui est très importante aux surfaces inférieure et supérieure. Ainsi, l'expérience donne le même comportement même avec la présence des barres d'erreurs, car les erreurs sur chaque point de la courbe sont égales. Cette augmentation est due aux réflexions des neutrons vers le centre de l'échantillon.

Cette correspondance donne deux conclusions importantes, premièrement le modèle DRAGON est justifié expérimentalement et d'autre part ce modèle peut être utilisé pour faire des corrections de la masse donnée par l'AAN.

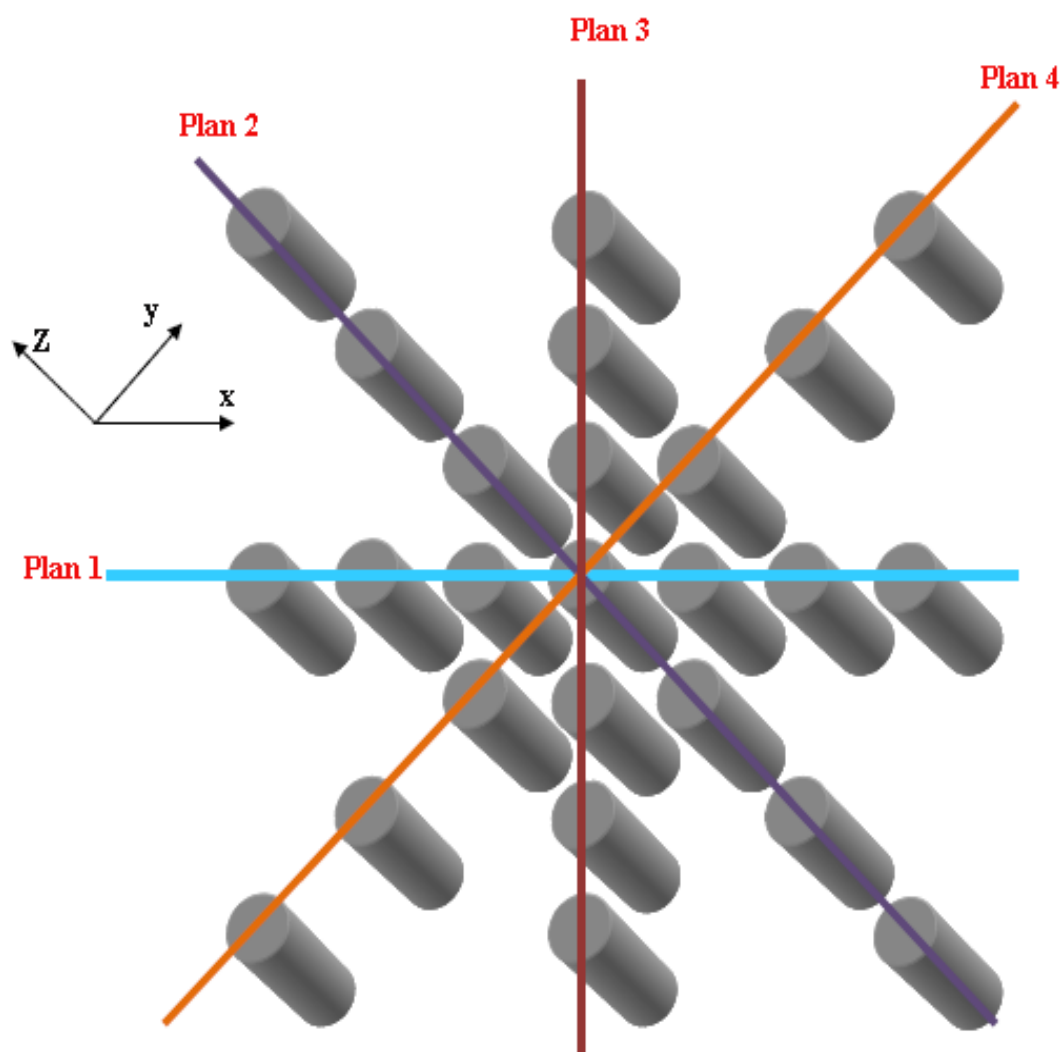


Figure 7.19 Positions des plans radiaux dans l'échantillon de cuivre

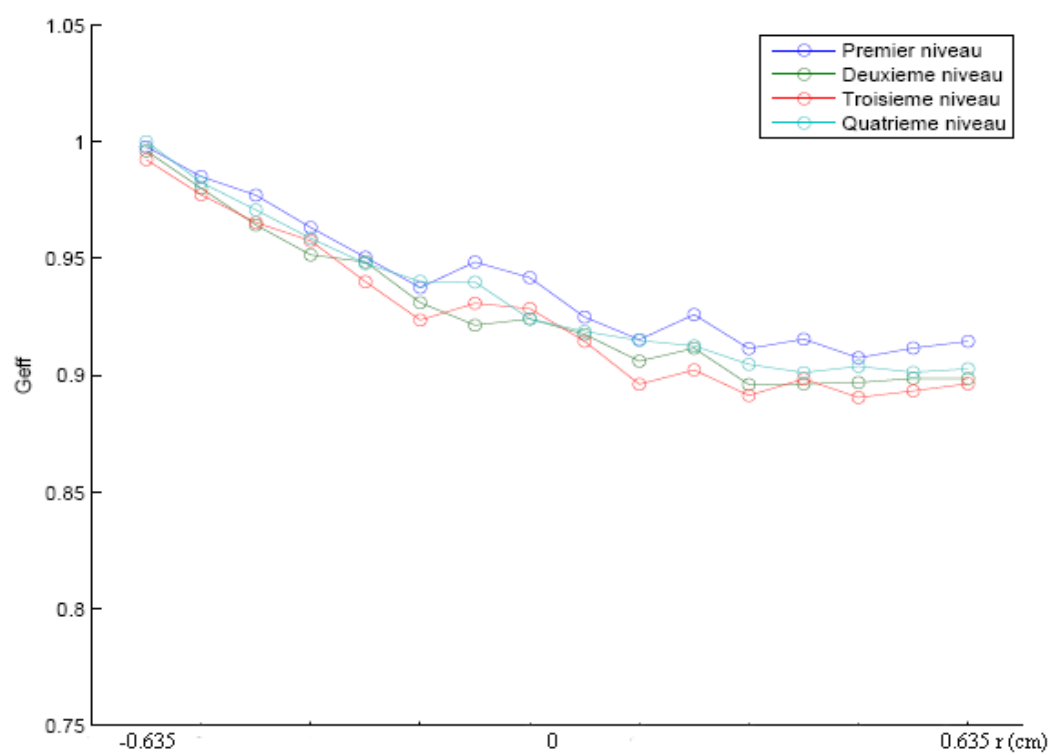


Figure 7.20 Variation de G_{eff} dans l'échantillon de cuivre donné par DRAGON

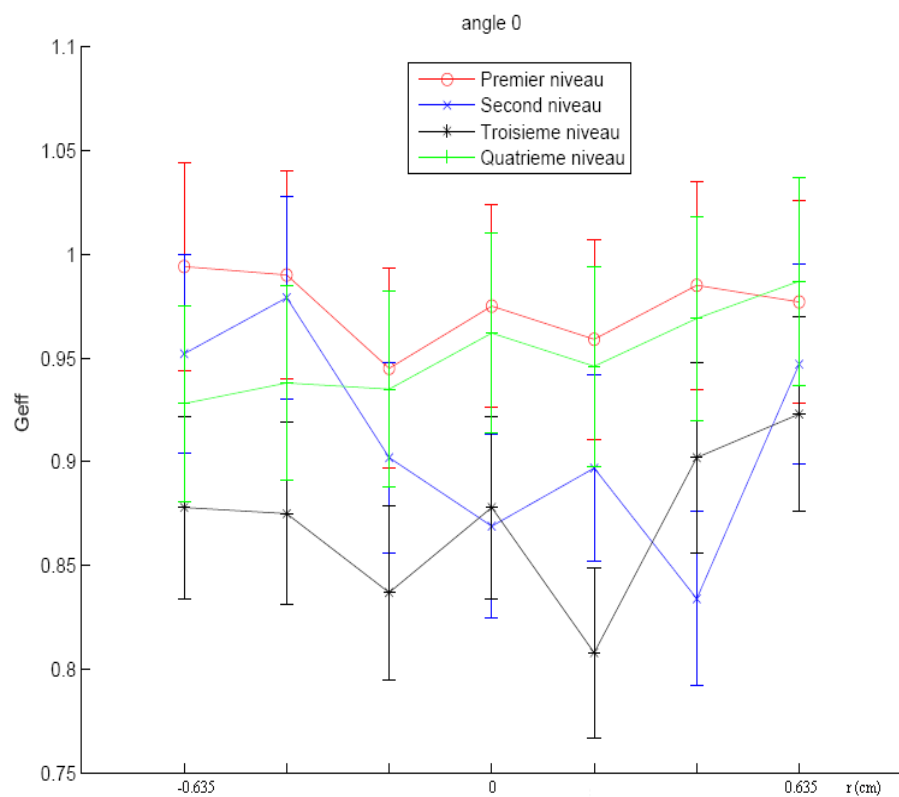


Figure 7.21 Variation de G_{eff} dans l'échantillon de cuivre plan 0°

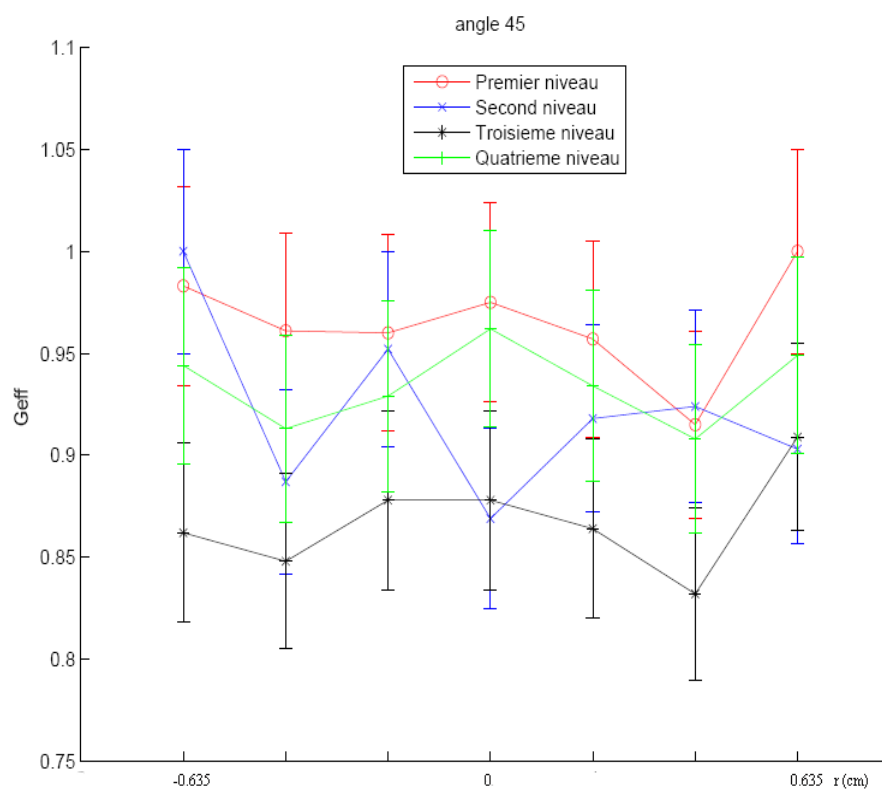


Figure 7.22 Variation de G_{eff} dans l'échantillon de cuivre plan 45°

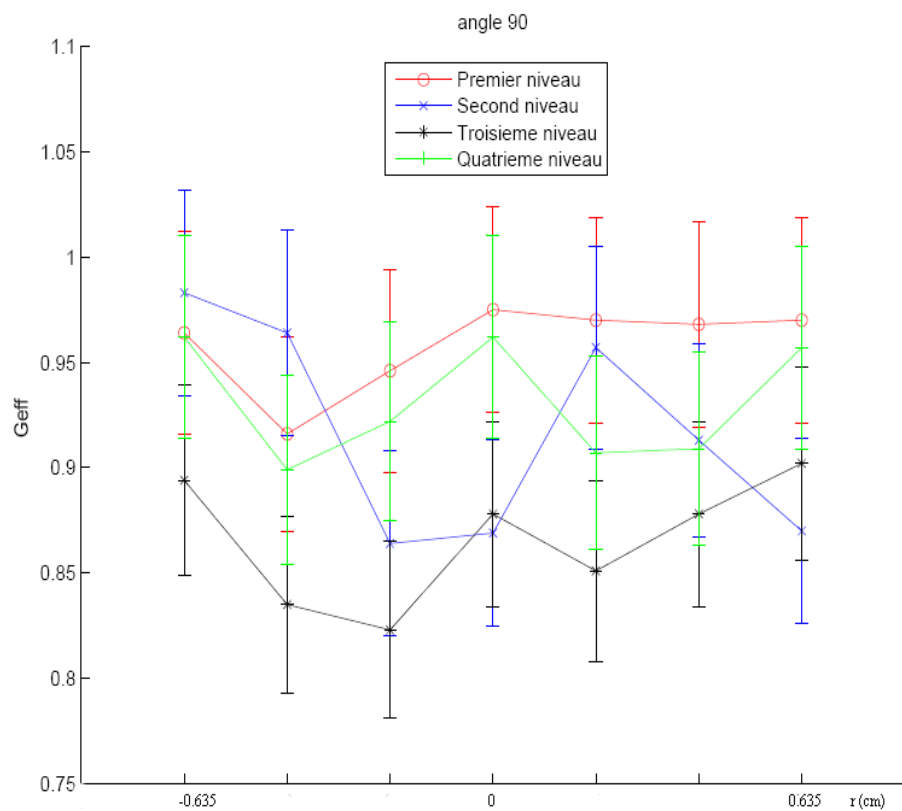


Figure 7.23 Variation de G_{eff} dans l'échantillon de cuivre plan 90°

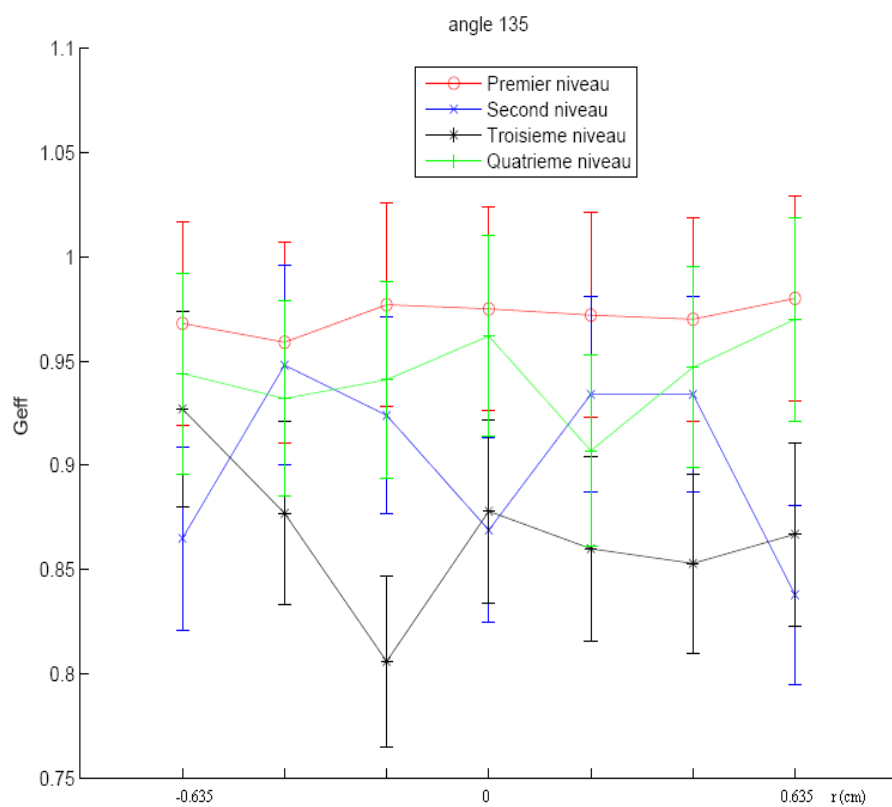


Figure 7.24 Variation de G_{eff} dans l'échantillon de cuivre plan 135°

7.5 Correction DRAGON de la formule semi-empirique de G_{th}

Dans le chapitre 3 nous avons présenté les formules semi-empiriques du facteurs d'autoprotection pour l'AAN, mais il reste toujours le problème de trouver les valeurs des paramètres m_{th} et m_{ep} . Ici nous utiliserons le modèle 2-D DRAGON déjà décrit pour calculer les facteurs d'autoprotections spatiales dans un échantillon.

L'équation 3.27 s'écrit pour DRAGON sous la forme:

$$G(R, h) = \frac{\int_{V_i} \int_{E_1}^{E_2} \phi(E, r) \sigma_{n\gamma}(E) dE dr^3}{\int_{V_i} \int_{E_1}^{E_2} \phi_0(E, r) \sigma_{n\gamma}(E) dE dr^3} \quad (7.1)$$

Cette définition est utilisée pour calculer les facteurs d'autoprotection pour l'isotope de cuivre $^{63}_{29}Cu$ et l'isotope d'or $^{197}_{79}Au$. Le premier isotope est un bon absorbeur de neutrons thermiques tandis que le second est un bon absorbeur de neutrons épithermiques.

Les résultats de nos simulations pour l'isotope de cuivre sont présentés dans la figure 7.25 et comparés aux formules semi-empiriques. On observe que les simulations DRAGON confirment très bien les sigmoïdes proposés par Gonçalves (Gonçalves, 2004; Martinho, 2004) pour l'autoprotection spatiale thermique et épithermique.

Les paramètres m_{th} et m_{ep} sont déterminés par une interpolation des résultats DRAGON. Les valeurs moyennes trouvées sont $m_{th}=33.5 g$ et $m_{ep}=274.8 g$.

L'expression corrigée du facteur d'autoprotection thermique G_{th} obtenue par les calculs DRAGON est de la forme:

$$G_{th} = \frac{1}{1 + \left(\frac{m}{m_{th2}}\right)^2 + \left(\frac{m}{m_{th1}}\right)} \quad (7.2)$$

où les paramètres m_{th2} et m_{th1} sont donnés dans le tableau suivant:

Afin de confirmer cette équation, l'or est aussi simulé dans le même site et avec la même géométrie. Premièrement une comparaison des résultats des simulations avec les équations proposés par Gonçalves confirme une autre fois que DRAGON simule correctement l'autoprotection spatiale (voir figure 7.27).

Tableau 7.3 Paramètres de l'équation 7.2 pour le cuivre

Paramètre	$m_{th1} \text{ g}$	$m_{th2} \text{ g}$
Valeur	34.8048	103.1421

Les paramètres m_{th} et m_{ep} sont encore déterminées par une interpolation des résultats, qui donne 4.1 g et 0.217 g respectivement.

En utilisant l'équation 7.2, on trouve une autre fois une forte similitude entre la courbe de simulation et l'équation corrigée (voir figure 7.28). Les paramètres m_{th2} et m_{th1} obtenus sont donnés dans le tableau 7.4.

Tableau 7.4 Paramètres de l'équation 7.2 pour l'or

Paramètre	$m_{th1} \text{ g}$	$m_{th2} \text{ g}$
Valeur	4.3478	33.1497

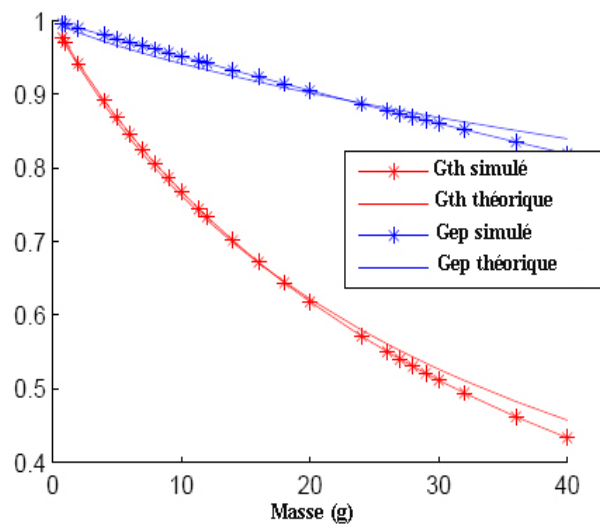


Figure 7.25 Comparaison des facteurs d'autoprotection spatiale théoriques et simulés pour le cuivre

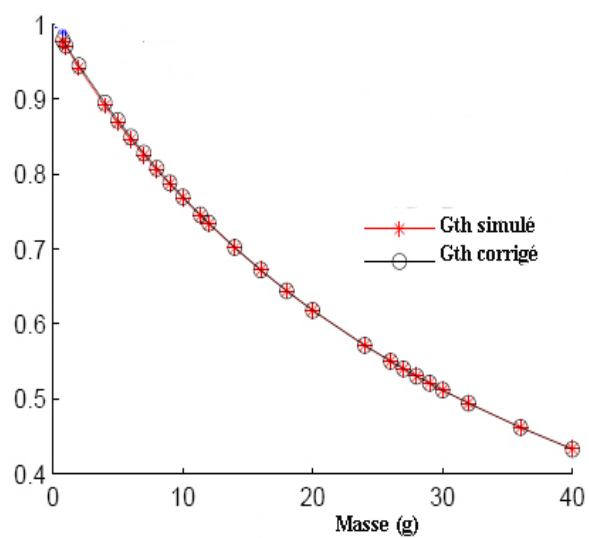


Figure 7.26 Interpolation du facteur d'autoprotection thermique dans l'échantillon de cuivre

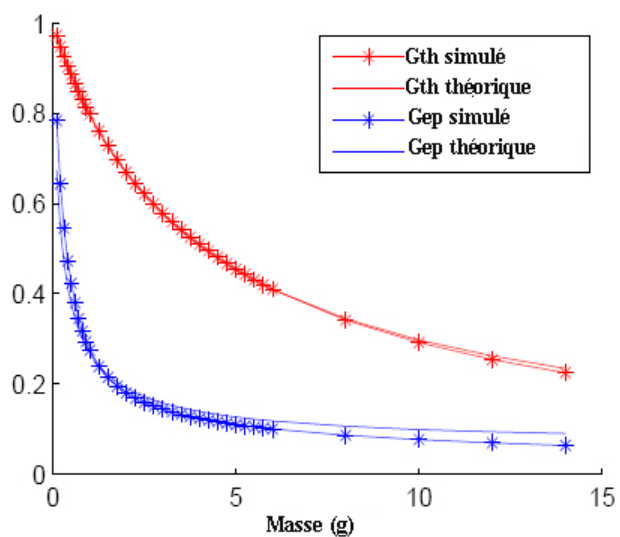


Figure 7.27 Comparaison des facteurs d'autoprotection spatiale théoriques et simulés pour l'or

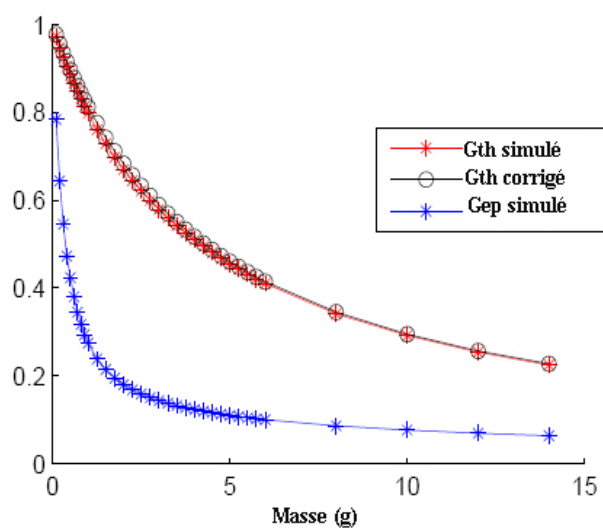


Figure 7.28 Interpolation du facteur d'autoprotection thermique dans l'or

7.6 Méthode DRAGON pour la correction du masse expérimentale

Dans les deux sections précédentes on a trouvé deux importantes résultats qui peuvent être de grande importance pour l'AAN:

1. L'AAN donne des masses que l'on doit corriger avec les formules semi-empiriques de Gançalves. Cependant, il reste toujours le problème de trouver les paramètres expérimentaux propre à chaque isotope (on parle du m_{th} , m_{ep}). Cependant, l'AAN nous donne **le taux de réaction exact** dans l'échantillon, qui sera le premier paramètre pour notre modèle.
2. DRAGON peut donner d'une façon très proche du facteur prévu **le facteur d'autoprotection** (soit thermique, épithermique ou total) si on connaît la composition exacte de l'échantillon.

Nous proposons de combiner ces deux informations pour déterminer la composition d'un échantillon inconnu. L'idée consiste à itérer DRAGON en utilisant le modèle simplifié 2-D et les paramètres d'entrées suivants:

1. La masse non corrigée fournie par l'AAN
2. Le taux de réactions fourni par l'AAN

L'algorithme de correction est illustré à la figure 7.29. En utilisant comme valeur de départ la masse non corrigé de l'AAN dans une boucle *WHILE*, elle pourra être ajustée en utilisant le facteur d'autoprotection total calculé par DRAGON jusqu'à la convergence du taux du réaction DRAGON et AAN.

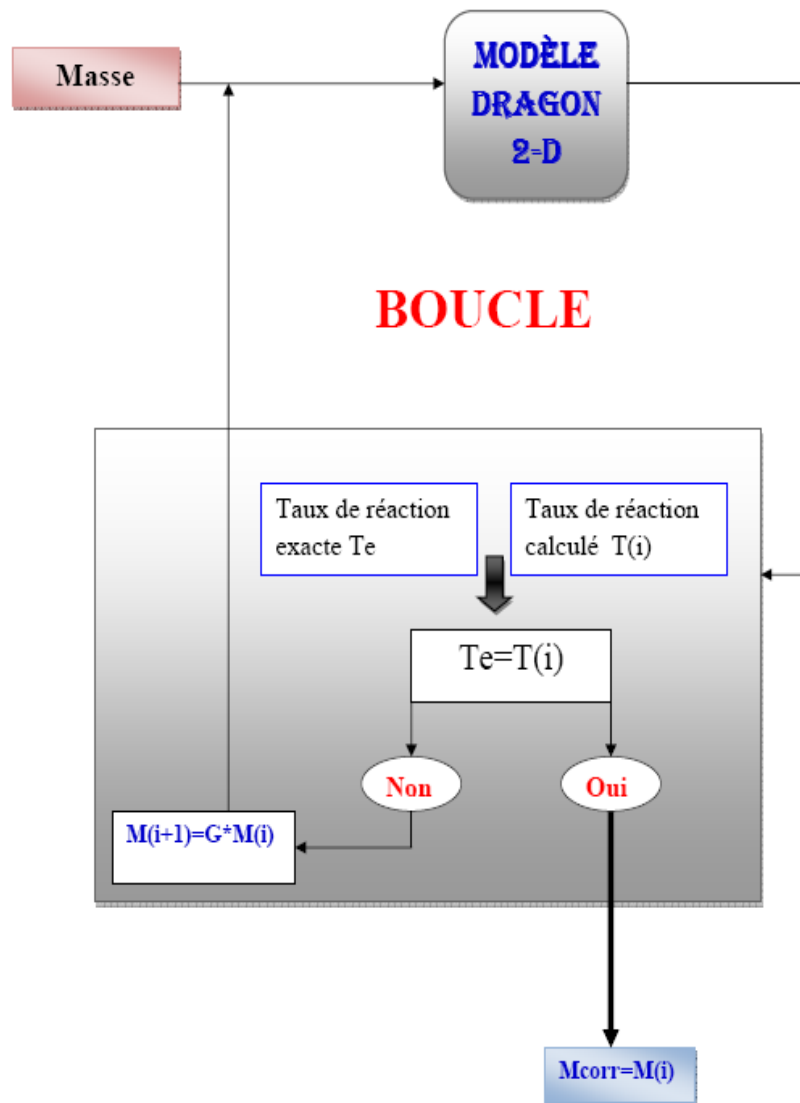


Figure 7.29 Processus itératif DRAGON pour la correction de la masse de l'AAN

CONCLUSION

La comparaison des modèles SERPENT et DRAGON a montré une excellente similitude des distributions de flux à deux groupes d'énergies dans le réacteurs complet et le sites d'irradiation 1 du réacteur SLOWPOKE-2. Cette comparaison indique clairement que DRAGON est capable de modéliser correctement la distribution de flux dans le site 1 pour n'importe quel type d'échantillon. Le modèle DRAGON simplifié montre une efficacité et une précision acceptable pour évaluer l'effet de l'autoprotection spatiale des neutrons.

Ce modèle simplifié DRAGON sera de grande valeur pour l'AAN du réacteur SLOWPOKE-2 de l'École Polytechnique de Montréal. L'intégration de ce modèle dans le logiciel EPAA pourrait permettre d'évaluer la quantité exacte des éléments d'un échantillon inconnu.

RÉFÉRENCES

- Bell, G.I., Glasstone, S. (1970). *Nuclear reactor theory*. New York: Van Nostrand Reinhold Company.
- Reuss, P. (2003). *Précis de neutronique*. France: EDP Sciences.
- Lathuilière, B. (2009). *Méthode de décomposition de domaine pour les équations du transport simplifiées en neutronique*. PhD, Université de Bordeaux I, France.
- Marleau, G., Hébert, A., Roy, R. (2012). *A user guide for DRAGON 3.06Kb* (IGE-174 Rev. 10). Montréal: Éditions de l'École Polytechnique de Montréal.
- Rozon, D. (1992). *Introduction à la cinétique des réacteurs nucléaires*. Montréal: Édition de l'École Polytechnique de Montréal.
- Hébert A. (2009). *Applied reactor physics* (3^e éd). Montréal: Édition de l'École Polytechnique de Montréal.
- Févotte, F. (2008). *Techniques de traçage pour la méthode des caractéristiques appliquée à la résolution de l'équation du transport des neutrons en domaines multi-dimensionnels*. PhD. Université Paris-11, France.
- Hajjaji, O. (1999). *La physique du réacteur SLOWPOKE-2 de l'École Polytechnique*. PhD. École Polytechnique de Montréal, Montréal.
- Hilborn, J.W., Townes, B.M. (1987). Converting the SLOWPOKE reactor to low-enrichment uranium fuel. *Journal of radioanalytical and nuclear chemistry*, 110 (2), 385-392.
- Kassakov, M. (2006). *Analyse par activation neutronique de substances ayant des sections efficaces macroscopiques élevées pour l'absorption de neutrons thermiques*. M.Sc.A. École Polytechnique de Montréal, Montréal.
- Townes, B.M., Hilborn, J.M. (1985) The SLOWPOKE-2 reactor with with low enrichment uranium oxide fuel. *Annual conference of the canadian nuclear society*, (pp. 1-7). Ottawa.

Irish, J. D., Hilborn, J. W. (1985) Longer life cores for SLOWPOKE-2 reactors. *Annual conference of the canadian nuclear society*, (pp. 1-4). Ottawa.

Guertin, C. (1991). *Calcul du coefficient de température du réacteur SLOWPOKE-2*. M.Sc.A. École Polytechnique de Montréal, Montréal.

Boisvert, J. (1976). *Opération du réacteur SLOWPOKE-2 de l'École Polytechnique*. (ING-168). Montréal: Édition de l'École Polytechnique de Montréal.

Revel, G. (2009). Analyse par activation. *Technique de l'ingénieur, traité analyse et caractérisation*, 1-21.

Perdijon, J. (1967). *L'analyse par activation: traitement des informations en spectrométrie gamma après irradiation aux neutrons*. Paris: Masson et cie Paris.

Ponpon J. P. (2007) *Détecteurs à semi-conducteurs: Principes et matériaux pour la détection et l'imagerie des rayonnements nucléaires*. Paris: Ellipse.

Knoll, G. F. (1999). *Radiation detection and measurement* (3^e éd). New York: John Wiley Sons, Inc.

Teillac J. (1960). *Travaux pratiques de physique nucléaire et de radiochimie*. Paris: Masson et cie édition.

Lappanen J. (2011) *PSG2/serpent-a continous-energy Monte Carleau reactor physics burnup calculation code*. Finland: VTT technical research centre of Finland.

Marleau, G., Noceir, S., Roy, R. (1997). DRAGON modelling of the SLOWPOKE-2 reactor at Ecole Polytechnique. *Annual conference of the canadian nuclear association*, (Vol.1, pp.227-239). Montréal.

Korea Atomic Energy Research Institute. *Table of nuclides: Cross section plotter*. Consulté le 1 juin 2012, Tiré de <http://atom.kaeri.re.kr/>

Gonçalves, I., Martinho, E., Salgado, J. (2004). Extension to cylindrical sample of the universal curve of resonance neutron self-shielding factors. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms*, 213, 186-188.

Martinho, E., Salgado, J., Gonçalves, I. (2004). Universal curve of the thermal neutron self-shielding factor in foils, wires, spheres and cylinders. *Journal of radioanalytical and nuclear chemistry*, 261, 637-643.

Chilian, C., Kassakov, M., St-Pierre, J., Kennedy, G. (2006). Extending NAA to materials with high concentrations of neutron absorbing elements. *Journal of radioanalytical and nuclear chemistry*, 270, 417-423.

Carlvik, I. (1965). A method for calculating collision probabilities in general cylindrical geometry and applications to flux distributions and Dancoff factors. *Proc. U.N. Int. Conf. on the peaceful uses of atomic energy*. Vol. 2, p. 225, Geneva.

Carlson, B. G., Bell, G. I. (1958). Solution of the transport equation by the S_N method. *Proc. U.N. Int. Conf. on the peaceful uses of atomic energy*. Geneva 1958.

Pomraning, G. C. (1993). Asymptotic and variational derivations of the simplified P_N equation. *Annals of Nuclear Energy*. Vol. 20. p.481.

Gelbard, E. M. Ondis, Jerome Spanier H. B. (1961). MARC, a Multigroup Monte Carlo Program for the Calculation of Capture Probabilities. *AEC research and development report*. Vol. 273. Bettis Plant.

ANNEXE I

MODÈLE EXACT 2-D DRAGON

I.1 Programme principal

```

!*-----
!* Modele DRAGON 2-D exacte
!*-----
!* Declaration des modules, procedures, structures de donnees
!* et parametres locaux.
!*-----
STRING      Biblio := "endfb7" ;
REAL        RE RCI RCE := 0.635 0.726 0.8145 ;
MODULE      NXT: DELETE: END: PSP: FLU: ASM: EDI: SHI: ;
PROCEDURE   GeoSlowpoke MixSlowpoke ;
LINKED_LIST GeomS GeomF VolTrkS VolTrkF MicLib PIJ FLUX EDIF ;
SEQ_BINARY  INTLINS INTLINF ;
SEQ_ASCII   GeoS.ps GeoF.ps GeoFF.ps GeoSS.ps FFLU FLEDI ;
!*-----
!* Creer les geometries
!*-----
MicLib := MixSlowpoke :: <<Biblio>> ;
GeomS GeomF := GeoSlowpoke :: <<RE>> <<RCI>> <<RCE>> ;
VolTrkS INTLINS := NXT: GeomS :: EDIT 2 TISO 60 100.0 ;
VolTrkF INTLINF := NXT: GeomF :: EDIT 2 TISO 60 100.0 ;
MicLib := SHI: MicLib VolTrkS INTLINS :: EDIT 0 ;
PIJ := ASM: MicLib VolTrkF INTLINF :: ;
FLUX := FLU: PIJ MicLib VolTrkF ::
EDIT 4
TYPE K ;
FFLU := FLUX ;
EDIF := EDI: FLUX MicLib VolTrkF ::
EDIT 4
TAKE REGI 127 128 129 130 131 132 133 134 135 136 137 138 139
          140 141 142 143 144 145 146 147 148
COND 45 69
SAVE ;
FLEDI := EDIF ;
GeoFF.ps := PSP: VolTrkF FLUX :: TYPE MGFLUX 45 69 ;
GeoS.ps := PSP: VolTrkS :: TYPE MIXTURE ;

```

```

GeoSS.ps := PSP: VolTrkS ;
GeoF.ps  := PSP: VolTrkF ;

!*----
!* Nettoyer et terminer
!*----
PIJ := DELETE: PIJ ;
GeomS GeomF := DELETE: GeomS GeomF ;
INTLINF INTLINS := DELETE: INTLINF INTLINS ;
END: ;
QUIT "LIST" .
!*QUIT .

```

I.2 Géométrie SLOWPOKE-2 en 2-D

```

!*DECK GeoSlowpoke.c2m
!*----
!* Procedure pour definir les geometries d'auto-protection et de
!* calcul de flux pour le SLOWPOKE-2 de EPM apres le rechargement
!* au LEU de 1997.
!*
!* Appel:
!*   GeomS GeomF := GeoSlowpoke :: <<RE>> <<RCI>> <<RCE>> ;
!* Parametres d'entree:
!*   R  -> Rayon de l'echantillon
!* Structures de donnees de sortie:
!*   GeomS  -> geometrie d'autoprotection.
!*   GeomF  -> geometrie de calcul de flux.
!*----
!* Declaration des structures de donnees
!* et parametres d'entree et de sortie.
!*----
PARAMETER  GeomS GeomF ::
    ::: LINKED_LIST GeomS GeomF ; ;
REAL  RE RCI RCE ;
:: >>RE<< >>RCI<< >>RCE<< ;
!*----
!* Declaration des modules, procedures, structures de donnees
!* et parametres locaux.
!*----
MODULE  GEO: DELETE:  END:  ;
!*----
!*   1 -> Eau legere
!*   2 -> Aluminium

```

```

!*      3 -> Beryllium
!*      4 -> UO2
!*      5 -> Gaine de zirconium
!*      6 -> Air
!*      7 -> Eau exterieur Be
!*      8 -> Eau piscine
!*      9 -> Aluminium cuve
!*     10 -> Echantillon
!*     11 -> Aluminium coeur
!*     12 -> Air sites externes
!*     13 -> Air sites internes vides
!*     14 -> Aluminium sites internes vides
!*     15 -> Eau leger dans le centre du coeur
!*     16 -> Polyethylene
!*-----
!*-----
!*  a) definition de la geometrie d'auto-protection
!*-----

GeomS := GEO: :: CARCEL    7 1 1

X- REFL MESHX -40.0 40.0 X+ REFL
Y- REFL MESHY -40.0 40.0 Y+ REFL

RADIUS  0.0
  1.145540    1.257726    11.049000    21.234400    29.549999    30.500000
  35.560001
MIX   15          11          1          3          7          9
      8          8

::: RODREF01 := GEO: TUBE    3
  RADIUS  0.0  0.209500  0.263000  0.4
  MIX 4 5 1 ;
::: RD010101 := GEO: RODREF01
  NPIN   6    RPIN   1.911543    APIN   .523599 ;
::: RD010102 := GEO: RODREF01
  NPIN   2    RPIN   2.207260    APIN  2.09439510 ;
::: RD010202 := GEO: RODREF01
  NPIN   6    RPIN   3.310890    APIN   .000000 ;
::: RD010301 := GEO: RODREF01
  NPIN  12    RPIN   3.979195    APIN   .242564
                                   1.28976
                                   2.33696
                                   3.38416
                                   4.43135
                                   5.47886

```

```

-.242564
.804634
1.85183
2.89903
3.94623
4.99342 ;

::: RD010401 := GEO: RODREF01
  NPIN   12   RPIN   4.810612   APIN   .408638
                                         1.45584
                                         2.50303
                                         3.55023
                                         4.55974
                                         5.66463
                                         -.408638
                                         .638560
                                         1.68576
                                         2.73296
                                         3.78015
                                         4.82735 ;

::: RD010403 := GEO: RODREF01
  NPIN    6   RPIN   5.518150   APIN   0.00000 ;

::: RD010501 := GEO: RODREF01
  NPIN    6   RPIN   5.734630   APIN   .523599 ;

::: RD010503 := GEO: RODREF01
  NPIN   12   RPIN   6.144752   APIN   .156177
                                         1.20337
                                         2.25057
                                         3.29777
                                         4.34497
                                         5.39217
                                         -.156177
                                         .891021
                                         1.93822
                                         2.98542
                                         4.03262
                                         5.07982
                                         ;

::: RD010602 := GEO: RODREF01
  NPIN   12   RPIN   6.892167   APIN   .281035
                                         1.32823
                                         2.37543
                                         3.42263
                                         4.46983
                                         5.51703
                                         -.281035

```



```

0.76616
1.81336
2.86056
3.90776
4.95496
;

::: RD010603 := GEO: RODREF01
  NPIN  12      RPIN  7.236986  APIN  .132455
                                1.17965
                                2.22685
                                3.27405
                                4.32125
                                5.36845
                                -.132455
                                .914743
                                1.96194
                                3.00914
                                4.05634
                                5.10354
                                ;

::: RD010701 := GEO: RODREF01
  NPIN   6      RPIN  7.647153  APIN  .523599 ;
::: RD010703 := GEO: RODREF01
  NPIN  12      RPIN  7.958389  APIN  .242564
                                1.28976
                                2.33696
                                3.38416
                                4.43136
                                5.47856
                                -.242564
                                0.80463
                                1.85183
                                2.89903
                                3.94623
                                4.99343
                                ;

::: RD010705 := GEO: RODREF01
  NPIN   6      RPIN  8.829040  APIN  .000000 ;
::: RD010801 := GEO: RODREF01
  NPIN  12      RPIN  8.619626  APIN  .459536
                                1.50673
                                2.55393
                                3.60113
                                4.64833
                                5.69553

```

```

-.459536
0.58766
1.63486
2.68206
3.72926
4.77646
;

::: RD010804 := GEO: RODREF01
  NPIN  12      RPIN  9.429419  APIN  .101535
                                1.14873
                                2.19593
                                3.24313
                                4.29033
                                5.33753
                                -.101535
                                0.94566
                                1.99286
                                3.04006
                                4.08726
                                5.13446
                                ;

::: RD010805 := GEO: RODREF01
  NPIN   4      RPIN  9.784842  APIN  0.00000
                                1.047197551
                                3.141592654
                                4.188790205 ;

::: RD010902 := GEO: RODREF01
  NPIN  12      RPIN  9.621223  APIN  .408638
                                1.45584
                                2.50303
                                3.55023
                                4.59743
                                5.64463
                                -.408638
                                0.63856
                                1.68576
                                2.73295
                                3.78015
                                4.82735
                                ;

::: RD010904 := GEO: RODREF01
  NPIN  12      RPIN  10.114936 APIN  .190126
                                1.23732
                                2.28452
                                3.33172

```

```

4.37892
5.42611
-.190126
.857072
1.90427
2.95147
3.99866
5.04586
;

::: RD010905 := GEO: RODREF01
  NPIN  12      RPIN  10.527959  APIN  .090909
                                         1.13811
                                         2.18530
                                         3.23250
                                         4.27970
                                         5.32690
                                         -.090909
                                         .956289
                                         2.00349
                                         3.05068
                                         4.09788
                                         5.14508
;

::: RD011001 := GEO: RODREF01
  NPIN  12      RPIN  10.527959  APIN  .471160
                                         1.51836
                                         2.56556
                                         3.61275
                                         4.65995
                                         5.70715
                                         -.471160
                                         .576038
                                         1.62324
                                         2.67043
                                         3.71763
                                         4.76483
;

::: RD011002 := GEO: RODREF01
  NPIN  12      RPIN  10.643022  APIN  0.367422
                                         1.41462
                                         2.46182
                                         3.50901
                                         4.55621
                                         5.60341
                                         -.367422

```

```

                                0.67978
                                1.72697
                                2.77417
                                3.82137
                                4.86857
                                ;
::: RD031101 := GEO: TUBE   8
  RADIUS  0.0 <<RE>> <<RCI>> <<RCE>> 0.85 0.96 1.12 1.28 1.565
  MIX      10 6 16 6 2 6 2 6
  NPIN    1      RPIN  14.561820      APIN    0.00000 ;
::: RD031102 := GEO: TUBE   5
  RADIUS  0.0 0.85 0.96 1.12 1.28 1.565
  MIX      13 14 13 14 13
  NPIN    4      RPIN  14.561820      APIN    1.25664
                                           2.51327
                                           3.76991
                                           5.02655 ;
::: RD041201 := GEO: TUBE   1
  RADIUS  0.0      2.063731
  MIX      12
  NPIN    3      RPIN  23.500000      APIN    2.51327 ;
::: RD051201 := GEO: TUBE   1
  RADIUS  0.0      1.36575
  MIX      12
  NPIN    2      RPIN  23.500000      APIN    0.000000 ;
CLUSTER
RD010101 RD010102
RD010202
RD010301
RD010401 RD010403
RD010501 RD010503
RD010602 RD010603
RD010701 RD010703 RD010705
RD010801 RD010804 RD010805
RD010902 RD010904 RD010905
RD011001 RD011002
RD031101 RD031102
RD041201
RD051201
;
!*----
!*  b) definition de la geometrie de calcul de flux
!*----
GeomF := GEO: :: CARCEL   7 1 1
      X- REFL MESHX -40.0 40.0 X+ REFL

```

```

Y- REFL MESHY -40.0 40.0 Y+ REFL
RADIUS 0.0
1.145540 1.257726 11.049000 21.234400 29.549999 30.5
35.560001
MIX 15 11 1 3 7
9 8 8
SPLITR
5 1 48 50 41 4
25
::: RODREF01 := GEO: TUBE 3 1 1
RADIUS 0.0 0.209500 0.263000 0.4
MESHX -0.5 0.5
MESHY -0.5 0.5 SPLIT 2
MIX 4 5 1 ;
::: RD010101 := GEO: RODREF01
NPIN 6 RPIN 1.911543 APIN .523599 ;
::: RD010102 := GEO: RODREF01
NPIN 2 RPIN 2.207260 APIN 2.09439510 ;
::: RD010202 := GEO: RODREF01
NPIN 6 RPIN 3.310890 APIN .000000 ;
::: RD010301 := GEO: RODREF01
NPIN 12 RPIN 3.979195 APIN .242564
1.28976
2.33696
3.38416
4.43135
5.47886
-.242564
.804634
1.85183
2.89903
3.94623
4.99342 ;
::: RD010401 := GEO: RODREF01
NPIN 12 RPIN 4.810612 APIN .408638
1.45584
2.50303
3.55023
4.55974
5.66463
-.408638
.638560
1.68576
2.73296
3.78015

```

```

                                4.82735 ;

::: RD010403 := GEO: RODREF01
    NPIN   6    RPIN   5.518150    APIN   0.00000 ;

::: RD010501 := GEO: RODREF01
    NPIN   6    RPIN   5.734630    APIN   .523599 ;

::: RD010503 := GEO: RODREF01
    NPIN  12    RPIN   6.144752    APIN   .156177
                                1.20337
                                2.25057
                                3.29777
                                4.34497
                                5.39217
                                -.156177
                                .891021
                                1.93822
                                2.98542
                                4.03262
                                5.07982
                                ;

::: RD010602 := GEO: RODREF01
    NPIN  12    RPIN   6.892167    APIN   .281035
                                1.32823
                                2.37543
                                3.42263
                                4.46983
                                5.51703
                                -.281035
                                0.76616
                                1.81336
                                2.86056
                                3.90776
                                4.95496
                                ;

::: RD010603 := GEO: RODREF01
    NPIN  12    RPIN   7.236986    APIN   .132455
                                1.17965
                                2.22685
                                3.27405
                                4.32125
                                5.36845
                                -.132455
                                .914743
                                1.96194
                                3.00914
                                4.05634

```

```

5.10354
;
::: RD010701 := GEO: RODREF01
  NPIN   6      RPIN   7.647153  APIN   .523599 ;
::: RD010703 := GEO: RODREF01
  NPIN  12      RPIN   7.958389  APIN   .242564
1.28976
2.33696
3.38416
4.43136
5.47856
-.242564
0.80463
1.85183
2.89903
3.94623
4.99343
;
::: RD010705 := GEO: RODREF01
  NPIN   6      RPIN   8.829040  APIN   .000000 ;
::: RD010801 := GEO: RODREF01
  NPIN  12      RPIN   8.619626  APIN   .459536
1.50673
2.55393
3.60113
4.64833
5.69553
-.459536
0.58766
1.63486
2.68206
3.72926
4.77646
;
::: RD010804 := GEO: RODREF01
  NPIN  12      RPIN   9.429419  APIN   .101535
1.14873
2.19593
3.24313
4.29033
5.33753
-.101535
0.94566
1.99286
3.04006

```

```

                                4.08726
                                5.13446
                                ;

::: RD010805 := GEO: RODREF01
  NPIN   4      RPIN   9.784842   APIN   0.00000
                                1.047197551
                                3.141592654
                                4.188790205 ;

::: RD010902 := GEO: RODREF01
  NPIN   12      RPIN   9.621223   APIN   .408638
                                1.45584
                                2.50303
                                3.55023
                                4.59743
                                5.64463
                                -.408638
                                0.63856
                                1.68576
                                2.73295
                                3.78015
                                4.82735
                                ;

::: RD010904 := GEO: RODREF01
  NPIN   12      RPIN   10.114936   APIN   .190126
                                1.23732
                                2.28452
                                3.33172
                                4.37892
                                5.42611
                                -.190126
                                .857072
                                1.90427
                                2.95147
                                3.99866
                                5.04586
                                ;

::: RD010905 := GEO: RODREF01
  NPIN   12      RPIN   10.527959   APIN   .090909
                                1.13811
                                2.18530
                                3.23250
                                4.27970
                                5.32690
                                -.090909
                                .956289

```



```

2.00349
3.05068
4.09788
5.14508
;
::: RD011001 := GEO: RODREF01
  NPIN  12      RPIN  10.527959      APIN   .471160
                                         1.51836
                                         2.56556
                                         3.61275
                                         4.65995
                                         5.70715
                                         -.471160
                                         .576038
                                         1.62324
                                         2.67043
                                         3.71763
                                         4.76483
;
::: RD011002 := GEO: RODREF01
  NPIN  12      RPIN  10.643022      APIN   0.367422
                                         1.41462
                                         2.46182
                                         3.50901
                                         4.55621
                                         5.60341
                                         -.367422
                                         0.67978
                                         1.72697
                                         2.77417
                                         3.82137
                                         4.86857
;
::: RD031101 := GEO: TUBE   8 1 1
  RADIUS  0.0 <<RE>> <<RCI>> <<RCE>> 0.85 0.96 1.12 1.28 1.565
  MIX      10 6 16 6 2 6 2 6
  SPLITR   4 1 1 1 1 1 1 1
  MESHX -1.7 1.7
  MESHY -1.7 1.7 SPLITY 2
  NPIN    1      RPIN  14.561820      APIN   0.00000 ;
::: RD031102 := GEO: TUBE   5 1 1
  RADIUS  0.0 0.85 0.96 1.12 1.28 1.565
  MESHX -1.7 1.7
  MESHY -1.7 1.7
  MIX      13 14 13 14 13

```

```

      NPIN   4      RPIN  14.561820      APIN   1.25664
                                           2.51327
                                           3.76991
                                           5.02655 ;

::: RD041201 := GEO: TUBE   1
      RADIUS  0.0      2.063731
      MIX     12
      NPIN   3      RPIN  23.500000      APIN   2.51327 ;

::: RD051201 := GEO: TUBE   1
      RADIUS  0.0      1.36575
      MIX     12
      NPIN   2      RPIN  23.500000      APIN   0.000000 ;

CLUSTER
RD010101 RD010102
RD010202
RD010301
RD010401 RD010403
RD010501 RD010503
RD010602 RD010603
RD010701 RD010703 RD010705
RD010801 RD010804 RD010805
RD010902 RD010904 RD010905
RD011001 RD011002
RD031101 RD031102
RD041201
RD051201
;

!*----
!* Nettoyer et terminer
!*----
END: ;
QUIT "LIST" .

```

I.3 Mélanges

```

!** MixSlowpoke.c2m
!**
!* Appel:
!* MicLib := MixSlowpoke ::<<Biblio>>
!**
PARAMETER MicLib ::
      ::: LINKED_LIST MicLib ; ;

```

```

STRING    Biblio ;
:: >>Biblio<< ;

!*-----
!*  Declaration des modules
!*-----

MODULE  LIB: DELETE: END: ;

!*-----

!*  Melanges utilises pour les geometries (tous a 40.3 C)
!*      1 -> Eau legere
!*      2 -> Aluminium
!*      3 -> Beryllium
!*      4 -> UO2
!*      5 -> Gaine de zirconium
!*      6 -> Air
!*      7 -> Eau exterieur Be
!*      8 -> Eau piscine
!*      9 -> Aluminium cuve
!*     10 -> Echantillon
!*     11 -> Aluminium coeur
!*     12 -> Air sites externes
!*     13 -> Air sites internes vides
!*     14 -> Aluminium sites internes vides
!*     15 -> Eau leger dans le centre du coeur
!*     16 -> Polyethylene
!*-----
!*-----

!* Mixture
!*-----

MicLib  := LIB: ::

    NMIX  16

    CTRA WIMS

    MIXS LIB: WIMSD4 FIL: <<Biblio>>

    MIX      1      313.46      9.98418E-01
H2O  = '3001'      1.12093E-01
D2O  = '3002'      3.36070E-05
O    = '6016'      8.87495E-01

    MIX      2      313.46      2.70339E+00
Al   = '27'        99.7400
Cr   = '52'         0.26

    MIX      3      313.46      1.84800E+00
Be   = '9'          1.00000E+00

    MIX      4      313.46      1.06000E+01
O    = '6016'      1.18725E-01
U235 = '2235'      1.74047E-01    1
U238 = '8238'      7.07228E-01    1

```

```

MIX          5          313.46          6.27696E+00
Zr   = '91'      99.66980
B    = '1011'    0.00031
Fe   = '2056'    0.16
Cr   = '52'      0.11
Ni   = '58'      0.06
MIX          6          313.46          1.40000E-03
O    = '6016'    100.0
MIX          7      COMB 1 1.0
MIX          8          313.46          9.98418E-01
H2O  = '3001'    1.12093E-01
D2O  = '3002'    3.36070E-05
O    = '6016'    8.87495E-01
MIX          9          313.46          2.70339E+00
Al   = '27'      99.7400
Cr   = '52'      0.26
MIX          10         313.46          8.96E+00
Cu   = '3063'    1.00000E+00
MIX          11      COMB 2 1.0
MIX          12      COMB 6 1.0
MIX          13      COMB 6 1.0
MIX          14      COMB 2 1.0
MIX          15      COMB 1 1.0
MIX          16         313.46          0.941E+00
C    = '2012'    85.63
H    = '3001'    14.37
;
END:  ;
QUIT "LIST" .

```

ANNEXE II

MODÈLE 2-D SERPENT

```

% --- SLOWPOKE cluster -----
set title "GeoSLOWPOKE"
%-----
%-----
% -----Geometrie d'autoprotection dans le site 1-
%-----

surf 1000 pad    0.0    0.0    0.00000 0.15875  90 -90
surf 2000 pad    0.0    0.0    0.15875 0.31750  90 -90
surf 3000 pad    0.0    0.0    0.31750 0.47625  90 -90
surf 4000 pad    0.0    0.0    0.47625 0.63500  90 -90
surf 1100 pad    0.0    0.0    0.63500 0.72600  90 -90
surf 2100 pad    0.0    0.0    0.72600 0.81450  90 -90
surf 3100 pad    0.0    0.0    0.81450 0.85000  90 -90
surf 4100 pad    0.0    0.0    0.85000 0.96000  90 -90
surf 5100 pad    0.0    0.0    0.96000 1.12000  90 -90
surf 6100 pad    0.0    0.0    1.12000 1.28000  90 -90
surf 7100 pad    0.0    0.0    1.28000 1.56500  90 -90

surf 5000 pad    0.0    0.0    0.00000 0.15875 -90 90
surf 6000 pad    0.0    0.0    0.15875 0.31750 -90 90
surf 7000 pad    0.0    0.0    0.31750 0.47625 -90 90
surf 8000 pad    0.0    0.0    0.47625 0.63500 -90 90
surf 1200 pad    0.0    0.0    0.63500 0.72600 -90 90
surf 2200 pad    0.0    0.0    0.72600 0.81450 -90 90
surf 3200 pad    0.0    0.0    0.81450 0.85000 -90 90
surf 4200 pad    0.0    0.0    0.85000 0.96000 -90 90
surf 5200 pad    0.0    0.0    0.96000 1.12000 -90 90
surf 6200 pad    0.0    0.0    1.12000 1.28000 -90 90
surf 7200 pad    0.0    0.0    1.28000 1.56500 -90 90

cell 100 100 echantillon    -1000
cell 101 100 fill 50        1000
cell 200 200 echantillon    -2000
cell 201 200 fill 51        2000
cell 300 300 echantillon    -3000
cell 301 300 fill 52        3000
cell 400 400 echantillon    -4000

```

cell 401 400 fill 53	4000
cell 110 110 air	-1100
cell 111 110 fill 54	1100
cell 210 210 PE	-2100
cell 211 210 fill 55	2100
cell 310 310 air	-3100
cell 311 310 fill 56	3100
cell 410 410 aluminium	-4100
cell 411 410 fill 57	4100
cell 510 510 air	-5100
cell 511 510 fill 58	5100
cell 610 610 aluminium	-6100
cell 611 610 fill 59	6100
cell 710 710 air	-7100
cell 711 710 fill 60	7100

cell 500 500 echantillon	-5000
cell 501 500 fill 61	5000
cell 600 600 echantillon	-6000
cell 601 600 fill 62	6000
cell 700 700 echantillon	-7000
cell 701 700 fill 63	7000
cell 800 800 echantillon	-8000
cell 801 800 fill 64	8000
cell 120 120 air	-1200
cell 121 120 fill 65	1200
cell 220 220 PE	-2200
cell 221 220 fill 66	2200
cell 320 320 air	-3200
cell 321 320 fill 67	3200
cell 420 420 aluminium	-4200
cell 421 420 fill 68	4200
cell 520 520 air	-5200
cell 521 520 fill 69	5200
cell 620 620 aluminium	-6200
cell 621 620 fill 70	6200
cell 720 720 air	-7200
cell 721 720 beryllium	7200

lat 50 4 0.0 0.0	1
1 0.0 0.0 200	
lat 51 4 0.0 0.0	1

```

1  0.0 0.0 300
lat 52 4 0.0 0.0      1
1  0.0 0.0 400
lat 53 4 0.0 0.0      1
1  0.0 0.0 110
lat 54 4 0.0 0.0      1
1  0.0 0.0 210
lat 55 4 0.0 0.0      1
1  0.0 0.0 310
lat 56 4 0.0 0.0      1
1  0.0 0.0 410
lat 57 4 0.0 0.0      1
1  0.0 0.0 510
lat 58 4 0.0 0.0      1
1  0.0 0.0 610
lat 59 4 0.0 0.0      1
1  0.0 0.0 710
lat 60 4 0.0 0.0      1
1  0.0 0.0 500
lat 61 4 0.0 0.0      1
1  0.0 0.0 600
lat 62 4 0.0 0.0      1
1  0.0 0.0 700
lat 63 4 0.0 0.0      1
1  0.0 0.0 800
lat 64 4 0.0 0.0      1
1  0.0 0.0 120
lat 65 4 0.0 0.0      1
1  0.0 0.0 220
lat 66 4 0.0 0.0      1
1  0.0 0.0 320
lat 67 4 0.0 0.0      1
1  0.0 0.0 420
lat 68 4 0.0 0.0      1
1  0.0 0.0 520
lat 69 4 0.0 0.0      1
1  0.0 0.0 620
lat 70 4 0.0 0.0      1
1  0.0 0.0 720

```

%-----

[illegible]


```

lat 11 4 14.561820 0.0 1
5 14.561820 0.0 100 2 2 2 2
% --- Surfaces-----
surf 1 cyl 0.0 0.0 1.145540
surf 2 cyl 0.0 0.0 1.257726
surf 3 cyl 0.0 0.0 11.049000
surf 4 cyl 0.0 0.0 21.234400
surf 5 cyl 23.5 0.0 1.365750
surf 6 cyl -23.5 0.0 1.365750

surf 7 cyl -21.4683 -9.5583 2.063731
surf 8 cyl 19.0119 -13.8129 2.063731
surf 9 cyl 2.4564 23.3713 2.063731

surf 10 cyl 0.0 0.0 29.549999
surf 11 cyl 0.0 0.0 30.500000
surf 12 cyl 0.0 0.0 35.560001
surf 13 sqc 0.0 0.0 40.000000
% --- cellules-----
cell 1 0 eaulegers -1
cell 2 0 aluminium 1 -2
cell 3 0 fill 10 2 -3
cell 4 0 fill 11 3 -4
cell 5 0 air -5
cell 6 0 air -6
cell 7 0 air -7
cell 8 0 air -8
cell 9 0 air -9
cell 10 0 eauexterieurBe 4 5 6 7 8 9 -10
cell 11 0 aluminiumcuve 10 -11
cell 12 0 eaupiscine 11 -12
cell 13 0 eaupiscine 12 -13
cell 14 0 outside 13
%-----MIX-1 eau legers-----
mat eaulegers -9.98418E-01 moder lwtr 1001 moder hwtr 1002
1001.03c -1.12093E-01
1002.03c -3.36070E-05
8016.03c -8.87495E-01
%-----MIX-2 aluminium-----
mat aluminium -2.70339E+00
13027.03c -0.997400
24000.03c -0.26E-02
%-----MIX-3 beryllium-----
mat beryllium -1.84800
4009.03c -1

```

```

%-----MIX-4 UO2-----
mat UO2      -1.06E+01
8016.03c     -1.18725E-1
92235.03c    -1.74047E-1
92238.03c    -7.07228E-1
%-----MIX-5 gaine-----
mat gaine      -6.27696
40000.03c     -0.996698
5011.03c      -0.00031E-02
26000.03c    -0.16E-02
24000.03c    -0.11E-02
28000.03c    -0.06E-02
%-----MIX-6 air-----
mat air       -1.4E-3
8016.03c     -1
%-----MIX-7 eau exterieur Be-----
mat eauexterieurBe -9.98418E-01      moder lwtr 1001 moder hwtr 1002
1001.03c      -1.12093E-01
1002.03c      -3.36070E-05
8016.03c      -8.87495E-01
%-----MIX-8 eau piscine-----
mat eapiscine   -9.98418E-1      moder lwtr 1001 moder hwtr 1002
1001.03c     -1.12093E-2
1002.03c     -3.36070E-5
8016.03c     -8.87495E-1
%-----MIX-9 aluminium cuve-----
mat aluminiumcuve -2.70339
13027.03c    -0.9974
24000.03c    -0.26E-2
%-----MIX-10 echantillon-----
mat echantillon  -8.96E+00
29000.03c      -1
%-----MIX-11 echantillon-----
mat PE          -0.941E+00
1001.03c        -0.1437
6012.03c        -0.8563
% ---Donnes de diffusion thermique pour l'eau lourde et lgre:
therm lwtr lwe7.00t
therm hwtr hwe7.00t
%-----Bibliotheque des sections efficaces-----
set acelib "/home/nucl/serpent/xs/endfb7/sss_endfb7.data"
%-----Condition au frontiere-----
set bc 2
% --- Group constant generation:
set nfg      2 0.625E-6

```

```
ene 1 1 1E-11 0.625E-6 10
```

```
%---Flux-----
```

```
det 1 de 1 dv 0.0395 dc 100
```

```
det 2 de 1 dv 0.1187 dc 200
```

```
det 3 de 1 dv 0.1979 dc 300
```

```
det 4 de 1 dv 0.2771 dc 400
```

```
det 5 de 1 dv 0.1945 dc 110
```

```
det 6 de 1 dv 0.2141 dc 210
```

```
det 7 de 1 dv 0.0928 dc 310
```

```
det 8 de 1 dv 0.3127 dc 410
```

```
det 9 de 1 dv 0.5227 dc 510
```

```
det 10 de 1 dv 0.6031 dc 610
```

```
det 11 de 1 dv 1.2736 dc 710
```

```
det 12 de 1 dv 0.0395 dc 500
```

```
det 13 de 1 dv 0.1187 dc 600
```

```
det 14 de 1 dv 0.1979 dc 700
```

```
det 15 de 1 dv 0.2771 dc 800
```

```
det 16 de 1 dv 0.1945 dc 120
```

```
det 17 de 1 dv 0.2141 dc 220
```

```
det 18 de 1 dv 0.0928 dc 320
```

```
det 19 de 1 dv 0.3127 dc 420
```

```
det 20 de 1 dv 0.5227 dc 520
```

```
det 21 de 1 dv 0.6031 dc 620
```

```
det 22 de 1 dv 1.2736 dc 720
```

```
set pop 1000000 5000 100
```

```
%---Geometrie-----
```

```
plot 3 4000 4000
```

```
mesh 3 4000 4000
```

```
% -----
```

ANNEXE III

MODÈLE SIMPLIFIÉ 2-D DRAGON

III.1 Première partie

```

! Model2DALTI.x2m
!-----
! Declaration des modules, procedures, structures de donnees
! et parametres locaux.
!-----
STRING      Biblio := "endfb7" ;
REAL        RE RCI RCE := 0.635 0.726 0.8145 ;
MODULE      NXT: DELETE: END: PSP: ASM: EDI: UTL: MAC: MRG: ;
PROCEDURE   GeoSlowpokeM MixSlowpoke ;
LINKED_LIST GeomS GeomF Maclib MicLib ;
SEQ_BINARY  INTLINF ILK ILE ;
XSM_FILE    PIJPART VolTrkF ;
SEQ_ASCII   GeoF.ps FLEDISPH ;
!-----
! Bibliotheque
!-----
MicLib := MixSlowpoke :: <<Biblio>> ;
!-----
! Macrolib sortie de l'homogenisation des 6 melanges
!-----
Maclib := FLEDISPH ;
!-----
! Aller au repertoire MACROLIB de MicLib
! qui contient aussi une macrolib
!-----
MicLib := UTL: MicLib ::
    STEP UP 'MACROLIB' ;
!-----
! Compliter la macrolib
!-----
!     MIX 7  <--Air
!     MIX 8  <--Aluminium
!     MIX 9  <--Echantillon
!     MIX 10 <--polyethylene
!-----

```

```

MacLib := MAC: MacLib MicLib ::
    EDIT 10
    NMIX 10
    MIX 7 6 MIX 8 2 MIX 9 10 MIX 10 16 ;
!-----
! Revenir au repertoire principal de MicLib
!-----
MicLib := UTL: MicLib ::
    STEP DOWN ;
!-----
! Calcul de flux
!-----
GeomS GeomF := GeoSlowpokeM :: <<RE>> <<RCI>> <<RCE>> ;
VolTrkF INTLINF := NXT: GeomF :: EDIT 2 TISO 60 100.0 ;
GeoF.ps := PSP: VolTrkF ;
!-----
! Extraire les donnees de NXT: du site 1
!-----
ILK ILE := MRG: VolTrkF INTLINF ::
EXTR 1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11 12 13 14 15 16 17 18 19 20 21 22 ;
!-----
! Probabilite de collision dans le site 1
!-----
PIJPART := ASM: MacLib VolTrkF ILK :: MTRK 2 ;
!-----
! Effacer les dossiers
!-----
INTLINF := DELETE: INTLINF ;
ILK := DELETE: ILK ;
!*----
!* Il devrait rester ILE (SEQ_BINARY), PIJPART (XSM_FILE) et
!* VolTrkF (XSM_FILE)
!* pour Model2DAL2
!*----
END: ;
QUIT "LIST" .

```

III.2 Deuxième partie

```

! Model2DAL2.x2m
!----
! Declaration des modules, procedures, structures de donnees
! et parametres locaux.

```

```

!----
STRING      Biblio := "endfb7" ;
MODULE      NXT: DELETE: END: FLU: ASM: EDI: UTL: MAC: ;
PROCEDURE   MixSlowpoke ;
SEQ_BINARY  ILE ;
XSM_FILE    PIJPART VolTrkF ;
LINKED_LIST MaclibE MaclibS PIJ FLUX01 FLUX02 VOLMATF
            EDIF01 EDIF02 EDIF03 EDIF04 MicLib ;
SEQ_ASCII   FLEDISPH ;
!-----
! Bibliotheque des vrais melanges
!-----
MicLib := MixSlowpoke :: <<Biblio>> ;
!-----
! Macrolib sortie de l'homogenisation des 6 melanges
!-----
MaclibE := FLEDISPH ;
MaclibS := FLEDISPH ;
!-----
! Aller au repertoire MACROLIB de MicLib
! qui contient aussi une macrolib
!-----
MicLib := UTL: MicLib ::
    STEP UP 'MACROLIB' ;
!-----
! Compliter la macrolib
!-----
!     MIX 7  <--Air
!     MIX 8  <--Aluminium
!     MIX 9  <--Echantillon
!     MIX 10 <--polyethylene/AIR
!-----
MaclibE := MAC: MaclibE MicLib ::
    EDIT 10
    NMIX 10
    MIX 7 6 MIX 8 2 MIX 9 10 MIX 10 16 ;

MaclibS := MAC: MaclibS MicLib ::
    EDIT 10
    NMIX 10
    MIX 7 6 MIX 8 2 MIX 9 17 MIX 10 16 ;
!-----
! Revenir au repertoire principal de MicLib
!-----
MicLib := UTL: MicLib ::

```

```

STEP DOWN ;
!-----
! Calcul de flux AVEC
!-----
PIJ := PIJPART ;
PIJ := ASM: PIJ MaclibE VolTrkF ILE ;
FLUX01 := FLU: PIJ MaclibE VolTrkF :: EDIT 4 TYPE K ;
EDIF01 := EDI: FLUX01 MaclibE VolTrkF ::
EDIT 4
COND 45 69
TAKE REGI 1 2 3 4 5 6 7 8 9
10 11 12 13 14 15 16 17 18 19 20 21 22
SAVE ;
EDIF02 := EDI: FLUX01 MaclibE VolTrkF ::
EDIT 4
COND 45 69
TAKE MIX 9
SAVE ;
PIJ := DELETE: PIJ ;
!-----
! Calcul de flux SANS
!-----
PIJ := PIJPART ;
PIJ := ASM: PIJ MaclibS VolTrkF ILE ;
FLUX02 := FLU: PIJ MaclibS VolTrkF :: EDIT 4 TYPE K ;
EDIF03 := EDI: FLUX02 MaclibE VolTrkF ::
EDIT 4
COND 45 69
TAKE REGI 1 2 3 4 5 6 7 8 9
10 11 12 13 14 15 16 17 18 19 20 21 22
SAVE ;
EDIF04 := EDI: FLUX02 MaclibE VolTrkF ::
EDIT 4
COND 45 69
TAKE MIX 9
SAVE ;
!*----
!* Nettoyer et terminer
!*----
PIJ := DELETE: PIJ ;
END: ;
QUIT "LIST" .

```

ANNEXE IV

MODÈLE EXACT 3-D DRAGON

IV.1 Programme principal

```

!** Test.x2m
!**-----
!**  Declaration des modules, procedures, structures de donnees
!**  et parametres locaux.
!**-----
STRING      Biblio := "endfb7" ;
MODULE      NXT: DELETE: END: FLU: ASM: EDI: UTL: MAC: ;
PROCEDURE   Geo3D MixSlowpoke ;
LINKED_LIST  Geom VolTrk MacLib PIJ FLUX EDIF MicLib ;
SEQ_BINARY   INTLIN ;
SEQ_ASCII    FFLU3 DATEDI3 FLEDISPH SGEO ;
!**-----
!** Bibliotheque MIC
!**-----
MicLib := MixSlowpoke :: <<Biblio>> ;
!**-----
!** MacroLib sortie de l'homogenisation SPH des 6 melanges
!**-----
MacLib := FLEDISPH ;
!**-----
!** Aller au repertoire MACROLIB de MicLib
!** qui contient aussi une macroLib
!**-----
MicLib := UTL: MicLib ::
    STEP UP 'MACROLIB' ;
!**-----
!** Editer la macroLib
!**-----
!**      1 -> Pate zone centrale
!**      2 -> Pate combustible
!**      3 -> Pate Be et sites internes sauf le site 1
!**      4 -> Pate eau et sites externes
!**      5 -> aluminium cuve
!**      6 -> Eau piscine
!**      7 <- Eau legere

```



```

!**      8 <- Aluminium
!**      9 <- Beryllium
!**     10 <- Air
!**     11 <- Echantillon
!**     12 <- Polyethylene
!**-----
MacLib := MAC: MacLib MicLib ::
    EDIT 10
    NMIX 12
    MIX 7 1 MIX 8 2 MIX 9 3 MIX 10 6 MIX 11 10 MIX 12 16 ;
!**-----
!** Revenir au repertoire principal de MicLib
!**-----
MicLib := UTL: MicLib ::
    STEP DOWN ;
!**-----
!** Calcul de flux
!**-----
Geom := Geo3D ;
SGEO := Geom ;
VolTrk INTLIN := NXT: Geom :: EDIT 2 TISO 10 10.0 ;
PIJ := ASM: MacLib VolTrk INTLIN ;
FLUX := FLU: PIJ MacLib VolTrk :: EDIT 4 TYPE K ;
EDIF := EDI: FLUX MacLib VolTrk ::
EDIT 4
TAKE REGI 914   915   916   917   918   919   920
          921   922   923   924   925   926   927   928
          929   930   931   932   933   934   935   936
          937   938   939   940   941   942   943   944
          945   946   947   948   949   950   951   952
          953   954   955   956   957   958   959   960
          961   962   963   964   965   966   967   968
          969   970   971   972   973   974   975   976
          977   978   979   980   981   982   983   984
          985   986   987   988   989   990   991   992
          993   994   995   996   997   998   999  1000
1001  1002  1003  1004  1005  1006  1007  1008
1009  1010  1011  1012  1013  1014  1015  1016
1017  1018  1019  1020  1021  1022  1023  1024
1025  1026  1027  1028  1029  1030  1031  1032
1033  1034  1035  1036  1037  1038  1039  1040
1041  1042  1043  1044  1045  1046  1047  1048
1049  1050  1051  1052  1053  1054  1055  1056
1057  1058  1059  1060  1061  1062  1063  1064
1065  1066  1067  1068  1069  1070  1071  1072

```

```

1073  1074  1075  1076  1077  1078  1079  1080
1081  1082  1083  1084  1085  1086  1087  1088
1089  1090  1091  1092  1093  1094  1095  1096
1097  1098  1099  1100  1101  1102  1103  1104
1105  1106  1107  1108  1109  1110  1111  1112
1113  1114  1115  1116  1117  1118  1119  1120
1121  1122  1123  1124  1125  1126  1127  1128
1129  1130  1131  1132  1133  1134  1135  1136
1137  1138  1139  1140  1141  1142  1143  1144
1145  1146  1147  1148  1149  1150  1151  1152
1153
COND 45 69
SAVE ;
DATEDI3 := EDIF ;
!*****
!*** Nettoyer et terminer
!*****
PIJ := DELETE: PIJ ;
Geom := DELETE: Geom ;
INTLIN := DELETE: INTLIN ;
END: ;
QUIT "LIST" .

```

IV.2 Géométrie 3-D SLOWPOKE-2

```

!***DECK Geo3D.c2m
!*****
!*** Procédure pour définir les géométries de calcul de flux pour
!*** le SLOWPOKE-2 de EPM après le rechargement au LEU de 1997.
!*****
!*** Appel:
!***   Geom := Geo3D ;
!*** Structures de données de sortie:
!***   Geom -> géométrie de calcul de flux.
!*****
!***   1 -> Pate zone centrale
!***   2 -> Pate combustible
!***   3 -> Pate Be et sites internes sauf le site 1
!***   4 -> Pate eau et sites externes
!***   5 -> aluminium cuve
!***   6 -> Eau piscine
!***   7 -> Eau legere

```

```

!**      8 -> Aluminium
!**      9 -> Beryllium
!**     10 -> Air
!**     11 -> Echantillon
!**     12 -> Polyethylene
!**-----
!**  Declaration des structures de donnees
!**  et parametres d'entree et de sortie.
!**-----
PARAMETER  Geom ::
          :: LINKED_LIST Geom ; ;
!**-----
!**  Declaration des modules.
!**-----
MODULE      END: GEO: ;
!**-----
!**  Definition de la geometrie de calcul de flux.
!**-----
Geom := GEO: :: CAR3D 1 1 10
      X- REFL X+ REFL
      Y- REFL Y+ REFL
      Z- REFL Z+ REFL
      CELL C9 C8 C7 C6 CE C5 C4 C3 C2 C1
!**-----
!**  REFERENCES
!**-----
::: CREF01 := GEO: CARCELZ 4 1
      MESHX -40.00 40.000
      MESHY -40.00 40.000
      MESHZ  0.00 16.591
      RADIUS 0.0  1.258  29.549  30.500  35.56
      MIX 1 7 5 6 6 ;
::: CREF02 := GEO: CARCELZ 7 1
      MESHX -40.00 40.000
      MESHY -40.00 40.000
      MESHZ  0.00 16.591
      RADIUS 0.0  1.258  10.825  11.049  21.235  29.549
              30.500  35.56
      SPLITR 6 46 2 50 41 4 25
      MIX 1 2 7 9 7 5 6 6 ;
!**-----
!**  CELLULES
!**-----
::: C1 := GEO: CREF01
      CLUSTER SI1 SGE1 SPE1

```

```

::: SI1 := GEO: TUBEZ 5 1
  MESHX -0.8 0.8
  MESHY -0.8 0.8
  MESHZ 0.0 16.591
  RADIUS 0.0 0.85 0.96 1.12 1.28 1.565
  MIX 10 8 10 8 10
  NPIN 5      RPIN 14.561820    APIN 0.00000
                                     1.25664
                                     2.51327
                                     3.76991
                                     5.02655 ;

::: SGE1 := GEO: TUBEZ 1 1
  MESHX -0.8 0.8
  MESHY -0.8 0.8
  MESHZ 0.0 16.591
  RADIUS 0.0      2.063731
  MIX 12
  NPIN 3      RPIN 23.500000    APIN 2.51327 ;

::: SPE1 := GEO: TUBEZ 1 1
  MESHX -0.8 0.8
  MESHY -0.8 0.8
  MESHZ 0.0 16.591
  RADIUS 0.0      1.36575
  MIX 12
  NPIN 2      RPIN 23.500000    APIN 0.000000 ; ;

::: C2 := GEO: CARCELZ 5 1
  MESHX -40.00 40.00
  MESHY -40.00 40.00
  MESHZ 0.0 1.34
  RADIUS 0.0 1.258 12.082 29.549 30.500 35.560
  MIX 1 9 7 5 6 6
  SPLITR 6 88 41 4 25
  SPLITZ 2
  CLUSTER SI2 SGE2 SPE2

::: SI2 := GEO: TUBEZ 5 1
  MESHX -0.8 0.8
  MESHY -0.8 0.8
  MESHZ 0.0 1.34
  RADIUS 0.0 0.85 0.96 1.12 1.28 1.565
  MIX 10 8 10 8 10
  NPIN 5      RPIN 14.561820    APIN 0.00000
                                     1.25664
                                     2.51327
                                     3.76991

```

```

5.02655 ;

::: SGE2 := GEO: TUBEZ 1 1
  MESHX -0.8 0.8
  MESHY -0.8 0.8
  MESHZ 0.0 1.34
  RADIUS 0.0 2.063731
  MIX 12
  NPIN 3 RPIN 23.500000 APIN 2.51327 ;
::: SPE2 := GEO: TUBEZ 1 1
  MESHX -0.8 0.8
  MESHY -0.8 0.8
  MESHZ 0.0 1.34
  RADIUS 0.0 1.36575
  MIX 12
  NPIN 2 RPIN 23.500000 APIN 0.000000 ; ;
::: C3 := GEO: CREF01
  MESHZ 0.0 0.853
  CLUSTER SI3 SGE3 SPE3
::: SI3 := GEO: TUBEZ 5 1
  MESHX -0.8 0.8
  MESHY -0.8 0.8
  MESHZ 0.0 0.853
  RADIUS 0.0 0.85 0.96 1.12 1.28 1.565
  MIX 10 8 10 8 10
  NPIN 5 RPIN 14.561820 APIN 0.00000
1.25664
2.51327
3.76991
5.02655 ;

::: SGE3 := GEO: TUBEZ 1 1
  MESHX -0.8 0.8
  MESHY -0.8 0.8
  MESHZ 0.0 0.853
  RADIUS 0.0 2.063731
  MIX 12
  NPIN 3 RPIN 23.500000 APIN 2.51327 ;
::: SPE3 := GEO: TUBEZ 1 1
  MESHX -0.8 0.8
  MESHY -0.8 0.8
  MESHZ 0.0 0.853
  RADIUS 0.0 1.36575
  MIX 12
  NPIN 2 RPIN 23.500000 APIN 0.000000 ; ;

::: C4 := GEO: CARCELZ 6 1

```

```

MESHX -40.00 40.00
MESHY -40.00 40.00
MESHZ 0.00 0.752
RADIUS 0.0 1.258 11.049 21.235 29.549 30.500 35.560
MIX 1 7 9 7 5 6 6
SPLITZ 5
SPLITR 6 48 50 41 4 25
CLUSTER SI4 SGE4 SPE4
::: SI4 := GEO: TUBEZ 5 1
  MESHX -0.8 0.8
  MESHY -0.8 0.8
  MESHZ 0.0 0.752
  RADIUS 0.0 0.85 0.96 1.12 1.28 1.565
  MIX 10 8 10 8 10
  NPIN 5 RPIN 14.561820 APIN 0.00000
                                     1.25664
                                     2.51327
                                     3.76991
                                     5.02655 ;

::: SGE4 := GEO: TUBEZ 1 1
  MESHX -0.8 0.8
  MESHY -0.8 0.8
  MESHZ 0.00 0.752
  RADIUS 0.0 2.063731
  MIX 12
  NPIN 3 RPIN 23.500000 APIN 2.51327 ;

::: SPE4 := GEO: TUBEZ 1 1
  MESHX -0.8 0.8
  MESHY -0.8 0.8
  MESHZ 0.00 0.752
  RADIUS 0.0 1.36575
  MIX 12
  NPIN 2 RPIN 23.500000 APIN 0.000000 ; ;

::: C5 := GEO: CREF02
MESHZ 0.0 12.016
SPLITZ 5
CLUSTER SI5 SGE5 SPE5
::: SI5 := GEO: TUBEZ 5 1
  MESHX -0.8 0.8
  MESHY -0.8 0.8
  MESHZ 0.0 12.016
  RADIUS 0.0 0.85 0.96 1.12 1.28 1.565
  MIX 10 8 10 8 10
  NPIN 5 RPIN 14.561820 APIN 0.00000
                                     1.25664

```

```

2.51327
3.76991
5.02655 ;

::: SGE5 := GEO: TUBEZ 1 1
MESHX -0.8 0.8
MESHY -0.8 0.8
MESHZ 0.0 12.016
RADIUS 0.0 2.063731
MIX 12
NPIN 3 RPIN 23.500000 APIN 2.51327 ;
::: SPE5 := GEO: TUBEZ 1 1
MESHX -0.8 0.8
MESHY -0.8 0.8
MESHZ 0.0 12.016
RADIUS 0.0 1.36575
MIX 12
NPIN 2 RPIN 23.500000 APIN 0.000000 ; ;

! CELLULE QUI CONTIENT L'ECHANTILLON
::: CE := GEO: CREF02
MESHZ 0.0 3.0
SPLITZ 4
CLUSTER SIE0 SIE1 SIE2 SIE3 SIE4 SGEE SPEE
::: SIE0 := GEO: TUBEZ 5 1
MESHX -0.8 0.8
MESHY -0.8 0.8
MESHZ 0.0 3.0
RADIUS 0.0 0.85 0.96 1.12 1.28 1.565
MIX 10 8 10 8 10
NPIN 1 RPIN 14.561820 APIN 1.25664 ;
::: SIE2 := GEO: TUBEZ 5 1
MESHX -0.8 0.8
MESHY -0.8 0.8
MESHZ 0.0 3.0
RADIUS 0.0 0.85 0.96 1.12 1.28 1.565
MIX 10 8 10 8 10
NPIN 1 RPIN 14.561820 APIN 2.51327 ;
::: SIE3 := GEO: TUBEZ 5 1
MESHX -0.8 0.8
MESHY -0.8 0.8
MESHZ 0.0 3.0
RADIUS 0.0 0.85 0.96 1.12 1.28 1.565
MIX 10 8 10 8 10
NPIN 1 RPIN 14.561820 APIN 3.76991 ;
::: SIE4 := GEO: TUBEZ 5 1
MESHX -0.8 0.8

```

```

    MESHY -0.8 0.8
    MESHZ 0.0 3.0
    RADIUS 0.0 0.85 0.96 1.12 1.28 1.565
    MIX 10 8 10 8 10
    NPIN 1 RPIN 14.561820 APIN 5.02655 ;
!*****
! ECHATILLON
!*****
::: SIE1 := GEO: TUBEZ 8 1
    MESHX -0.8 0.8
    MESHY -0.8 0.8 SPLITY 2
    MESHZ 0.0 3.0 SPLITZ 8
    RADIUS 0.0 0.635 0.726 0.8145 0.85 0.96 1.12 1.28 1.565
    SPLITR 8 1 1 1 1 1 1 1
    MIX 11 10 12 10 8 10 8 10
    NPIN 1 RPIN 14.561820 APIN 0.00000 ;
!*****
::: SGEE := GEO: TUBEZ 1 1
    MESHX -0.8 0.8
    MESHY -0.8 0.8
    MESHZ 0.0 3.0
    RADIUS 0.0 2.063731
    MIX 12
    NPIN 3 RPIN 23.500000 APIN 2.51327 ;
::: SPEE := GEO: TUBEZ 1 1
    MESHX -0.8 0.8
    MESHY -0.8 0.8
    MESHZ 0.0 3.0
    RADIUS 0.0 1.36575
    MIX 12
    NPIN 2 RPIN 23.500000 APIN 0.000000 ; ;
::: C6 := GEO: CREF02
    MESHZ 0.0 6.98
    SPLITZ 5 ;
::: C7 := GEO: CARCELZ 3 1
    MESHX -40.00 40.00
    MESHY -40.00 40.00
    MESHZ 0.0 0.513
    RADIUS 0.0 29.549 30.500 35.560
    MIX 7 5 6 6 ;
::: C8 := GEO: CREF01
    SPLITZ 5
    RADIUS 0.0 17.646 29.549 30.500 35.560
    MIX 9 7 5 6 6 ;
::: C9 := GEO: CARCELZ 3 1

```



```
MESHX -40.00 40.00
MESHY -40.00 40.00
MESHZ 0.0 16.591
RADIUS 0.0 29.549 30.500 35.560
MIX 7 5 6 6 ; ;
END: ;
```

ANNEXE V

MODÈLE EXACT 3-D SERPENT

```

surf 100 cyl 0.0 0.0 0.15875
surf 101 cyl 0.0 0.0 0.31750
surf 102 cyl 0.0 0.0 0.47625
surf 103 cyl 0.0 0.0 0.63500

surf 104 cyl 0.0 0.0 0.72600
surf 105 cyl 0.0 0.0 0.81450

surf 106 cyl 0.0 0.0 0.85000
surf 107 cyl 0.0 0.0 0.96000

surf 108 cyl 0.0 0.0 1.12000
surf 109 cyl 0.0 0.0 1.28000
surf 110 cyl 0.0 0.0 1.56500

surf 111 px 0.0
surf 112 pz -0.154
surf 113 pz 0.596
surf 114 pz 1.346
surf 115 pz 2.096
surf 116 pz 2.846
%%-----PREMIERE
cell 1200 1000 echantillon -111 112 -113 -100
cell 1201 1000 echantillon -111 112 -113 100 -101
cell 1202 1000 echantillon -111 112 -113 101 -102
cell 1203 1000 echantillon -111 112 -113 102 -103
cell 1204 1000 air -111 112 -113 103 -104
cell 1205 1000 PE -111 112 -113 104 -105
cell 1206 1000 air -111 112 -113 105 -106
cell 1207 1000 aluminium -111 112 -113 106 -107
cell 1208 1000 air -111 112 -113 107 -108
cell 1209 1000 aluminium -111 112 -113 108 -109
cell 1210 1000 air -111 112 -113 109 -110

cell 1300 1000 echantillon 111 112 -113 -100
cell 1301 1000 echantillon 111 112 -113 100 -101
cell 1302 1000 echantillon 111 112 -113 101 -102

```

```

cell 1303 1000 echantillon 111 112 -113 102 -103
cell 1304 1000 air          111 112 -113 103 -104
cell 1305 1000 PE          111 112 -113 104 -105
cell 1306 1000 air          111 112 -113 105 -106
cell 1307 1000 aluminium 111 112 -113 106 -107
cell 1308 1000 air          111 112 -113 107 -108
cell 1309 1000 aluminium 111 112 -113 108 -109
cell 1310 1000 air          111 112 -113 109 -110

```

% -----DEUXIEME

```

cell 2200 1000 echantillon -111 113 -114 -100
cell 2201 1000 echantillon -111 113 -114 100 -101
cell 2202 1000 echantillon -111 113 -114 101 -102
cell 2203 1000 echantillon -111 113 -114 102 -103
cell 2204 1000 air          -111 113 -114 103 -104
cell 2205 1000 PE          -111 113 -114 104 -105
cell 2206 1000 air          -111 113 -114 105 -106
cell 2207 1000 aluminium -111 113 -114 106 -107
cell 2208 1000 air          -111 113 -114 107 -108
cell 2209 1000 aluminium -111 113 -114 108 -109
cell 2210 1000 air          -111 113 -114 109 -110

```

```

cell 2300 1000 echantillon 111 113 -114 -100
cell 2301 1000 echantillon 111 113 -114 100 -101
cell 2302 1000 echantillon 111 113 -114 101 -102
cell 2303 1000 echantillon 111 113 -114 102 -103
cell 2304 1000 air          111 113 -114 103 -104
cell 2305 1000 PE          111 113 -114 104 -105
cell 2306 1000 air          111 113 -114 105 -106
cell 2307 1000 aluminium 111 113 -114 106 -107
cell 2308 1000 air          111 113 -114 107 -108
cell 2309 1000 aluminium 111 113 -114 108 -109
cell 2310 1000 air          111 113 -114 109 -110

```

% -----TROISIEME

```

cell 3200 1000 echantillon -111 114 -115 -100
cell 3201 1000 echantillon -111 114 -115 100 -101
cell 3202 1000 echantillon -111 114 -115 101 -102
cell 3203 1000 echantillon -111 114 -115 102 -103
cell 3204 1000 air          -111 114 -115 103 -104
cell 3205 1000 PE          -111 114 -115 104 -105
cell 3206 1000 air          -111 114 -115 105 -106
cell 3207 1000 aluminium -111 114 -115 106 -107
cell 3208 1000 air          -111 114 -115 107 -108
cell 3209 1000 aluminium -111 114 -115 108 -109
cell 3210 1000 air          -111 114 -115 109 -110

```

```

cell 3300 1000 echantillon 111 114 -115 -100
cell 3301 1000 echantillon 111 114 -115 100 -101
cell 3302 1000 echantillon 111 114 -115 101 -102
cell 3303 1000 echantillon 111 114 -115 102 -103
cell 3304 1000 air 111 114 -115 103 -104
cell 3305 1000 PE 111 114 -115 104 -105
cell 3306 1000 air 111 114 -115 105 -106
cell 3307 1000 aluminium 111 114 -115 106 -107
cell 3308 1000 air 111 114 -115 107 -108
cell 3309 1000 aluminium 111 114 -115 108 -109
cell 3310 1000 air 111 114 -115 109 -110

```

% -----QURTIEME

```

cell 4200 1000 echantillon -111 115 -116 -100
cell 4201 1000 echantillon -111 115 -116 100 -101
cell 4202 1000 echantillon -111 115 -116 101 -102
cell 4203 1000 echantillon -111 115 -116 102 -103
cell 4204 1000 air -111 115 -116 103 -104
cell 4205 1000 PE -111 115 -116 104 -105
cell 4206 1000 air -111 115 -116 105 -106
cell 4207 1000 aluminium -111 115 -116 106 -107
cell 4208 1000 air -111 115 -116 107 -108
cell 4209 1000 aluminium -111 115 -116 108 -109
cell 4210 1000 air -111 115 -116 109 -110

```

```

cell 4300 1000 echantillon 111 115 -116 -100
cell 4301 1000 echantillon 111 115 -116 100 -101
cell 4302 1000 echantillon 111 115 -116 101 -102
cell 4303 1000 echantillon 111 115 -116 102 -103
cell 4304 1000 air 111 115 -116 103 -104
cell 4305 1000 PE 111 115 -116 104 -105
cell 4306 1000 air 111 115 -116 105 -106
cell 4307 1000 aluminium 111 115 -116 106 -107
cell 4308 1000 air 111 115 -116 107 -108
cell 4309 1000 aluminium 111 115 -116 108 -109
cell 4310 1000 air 111 115 -116 109 -110

```

% -----CINQUIEME

```

cell 5206 1000 air -111 116 -106
cell 5207 1000 aluminium -111 116 106 -107
cell 5208 1000 air -111 116 107 -108
cell 5209 1000 aluminium -111 116 108 -109
cell 5210 1000 air -111 116 109 -110

```

```

cell 5306 1000 air          111 116   -106
cell 5307 1000 aluminium    111 116   106 -107
cell 5308 1000 air          111 116   107 -108
cell 5309 1000 aluminium    111 116   108 -109
cell 5310 1000 air          111 116   109 -110

cell 6000 1000 beryllium    112 110
cell 7000 1000 beryllium    -112

%-----
% -----Combustible-----
pin 1
UO2      0.2095
gaine    0.2630
eaulegers 0.4
eaulegers
%-----Site interne vide-----
pin 2
air 0.85
aluminium 0.96
air 1.12
aluminium 1.28
air 1.565
beryllium
%-----
surf 60 pz -0.154
cell 50 50 fill 2      60
cell 51 50 beryllium  -60
% -----Site externe vide-----
pin 3
eaulegers
%-----
pin 4
air 0.85
aluminium 0.96
air 1.12
aluminium 1.28
eaulegers
%--Reseau combustible (type = 2, pas = 1.10363 cm)
lat 10 2 0.0 0.0 25 25 1.10363
3 3 3 3 3 3 3 3 3 3 3 3 3 3 3 3 3 3 3 3 3 3 3 3 3 3 3 3 3 3 3 3
  3 3 3 3 3 3 3 3 3 3 3 3 3 3 3 1 1 1 1 3 3 3 3 3
    3 3 3 3 3 3 3 3 3 3 3 3 3 1 1 3 1 3 1 3 1 1 3 3 3
      3 3 3 3 3 3 3 3 3 3 3 1 1 1 3 3 1 1 3 3 1 1 1 3 3
        3 3 3 3 3 3 3 3 3 3 1 1 1 3 1 3 1 3 1 3 1 1 1 3 3

```

```

3 3 3 3 3 3 3 1 3 3 3 3 1 1 3 3 1 1 3 3 3 3 1 3
3 3 3 3 3 3 3 1 1 3 1 1 3 1 3 1 3 1 1 3 1 1 3
3 3 3 3 3 3 1 3 1 3 1 1 1 3 1 1 3 1 1 1 3 1 3
3 3 3 3 3 1 1 1 1 3 3 3 3 1 3 1 3 3 3 3 1 1 1 3
3 3 3 3 3 3 3 3 3 1 1 1 1 3 3 1 1 1 1 3 3 3 3 3
3 3 3 3 1 3 1 1 3 1 3 3 1 1 3 3 3 1 3 1 1 3 1 3 3
3 3 3 1 1 3 1 1 3 1 3 1 3 3 1 3 1 3 1 1 3 1 1 3 3
3 3 3 1 1 3 3 1 3 1 3 3 3 3 1 3 1 3 3 1 1 3 3 3
3 3 1 1 3 1 1 3 1 3 1 3 3 1 3 1 3 1 1 3 1 1 3 3 3
3 3 1 3 1 1 3 1 3 3 3 1 1 3 3 1 3 1 1 3 1 3 3 3 3
3 3 3 3 3 3 1 1 1 1 3 3 1 1 1 1 3 3 3 3 3 3 3 3 3
3 1 1 1 1 3 3 3 3 1 3 1 3 3 3 3 1 1 1 1 3 3 3 3 3
3 1 3 1 3 1 1 1 3 1 1 3 1 1 1 3 1 3 1 3 3 3 3 3 3
3 1 1 3 1 1 3 1 3 1 3 1 3 1 1 3 1 1 3 3 3 3 3 3 3
3 1 3 3 3 3 1 1 3 3 1 1 3 3 3 3 1 3 3 3 3 3 3 3 3
3 3 1 1 1 3 1 3 1 3 1 3 1 1 1 3 3 3 3 3 3 3 3 3 3
3 3 1 1 1 3 3 1 1 3 3 1 1 1 3 3 3 3 3 3 3 3 3 3 3
3 3 3 1 1 3 1 3 1 3 1 1 3 3 3 3 3 3 3 3 3 3 3 3 3
3 3 3 3 3 1 1 1 1 3 3 3 3 3 3 3 3 3 3 3 3 3 3 3 3
3 3 3 3 3 3 3 3 3 3 3 3 3 3 3 3 3 3 3 3 3 3 3 3

```

```

surf 1  cyl  0.0      0.0      1.145540
surf 2  cyl  0.0      0.0      1.257726
surf 3  cyl  0.0      0.0     10.825000
surf 4  cyl  0.0      0.0     11.049000
surf 5  cyl  0.0      0.0     12.082000
surf 6  cyl  0.0      0.0     17.646000
surf 7  cyl  0.0      0.0     21.234400
surf 8  cyl  0.0      0.0     29.549999
surf 9  cyl  0.0      0.0     30.500000
surf 10 cyl  0.0      0.0     35.560001
surf 11 sqc  0.0      0.0     40.000000

```

```

surf 12 pz   -34.398
surf 13 pz   -17.807
surf 14 pz    -7.647
surf 15 pz    -7.134
surf 16 pz    14.862
surf 17 pz    15.614
surf 18 pz    16.467
surf 19 pz    17.807
surf 20 pz    34.398

```

```

surf 21  cyl  23.5      0.0      1.365750

```

```

surf 22    cyl -23.5      0.0      1.365750

surf 23    cyl -21.4683  -9.5583   2.063731
surf 24    cyl  19.0119 -13.8129   2.063731
surf 25    cyl   2.4564  23.3713   2.063731

% -----Reseau 4me rgion-----
lat 11 4 14.561820 0.0 1
5  14.561820    0.0 1000 50 50 50 50
% -----Reseau 4me rgion-----
lat 12 4 14.561820 0.0 1
5  14.561820    0.0 4 4 4 4 4
% --- Surfaces-----

cell 1     0   eaupiscine    -10  9 12 -20
cell 2     0   aluminium     -9   8 12 -20
cell 3     0   eaulegers     -8   7 60 -20 21 22 23 24 25

cell 4     0   fill 12      -20  2 19 -7
cell 5     0   aluminium     -2   1 15 -20
cell 6     0   beryllium     -6  -14 13
cell 7     0   fill 11      -17 -7 15  4
cell 8     0   beryllium     -19 18  2 -5
cell 9     0   fill 10      -16 15  2 -3
cell 10    0   eaulegers     -1 14 -20
cell 11    0   eaupiscine    -20 10 12 -11
cell 12    0   eaupiscine    -12 -11
cell 13    0   eaupiscine     20 -11
cell 14    0   outside       11
cell 15    0   fill 12      -19  5 18 -7
cell 16    0   fill 12      -18  2 17 -7
cell 17    0   eaulegers     -17 16  2 -4
cell 18    0   eaulegers     -16 15  3 -4
cell 19    0   eaulegers     -15 14  1 -7
cell 20    0   eaulegers     -14 13  6 -7
cell 21    0   eaulegers     -13 12  1 -7
cell 22    0   eaulegers     -1 12 -13
cell 23    0   air           -21 -20 60
cell 24    0   air           -22 -20 60
cell 25    0   air           -23 -20 60
cell 26    0   air           -24 -20 60
cell 27    0   air           -25 -20 60
cell 28    0   eaulegers     -8   7 -60 12

%-----MIX-1 eau  legers-----

```

```

mat eaulegers      -9.98418E-01 moder lwtr 1001 moder hwtr 1002
1001.03c           -1.12093E-01
1002.03c           -3.36070E-05
8016.03c           -8.87495E-01
%----MIX-2 aluminium-----
mat aluminium      -2.70339E+00
13027.03c          -0.997400
24000.03c          -0.26E-02
%----MIX-3 beryllium-----
mat beryllium      -1.84800
4009.03c           -1
%----MIX-4 UO2-----
mat UO2            -1.06E+01
8016.03c           -1.18725E-1
92235.03c          -1.74047E-1
92238.03c          -7.07228E-1
%----MIX-5 gaine-----
mat gaine          -6.27696
40000.03c          -0.996698
5011.03c           -0.00031E-02
26000.03c -0.16E-02
24000.03c -0.11E-02
28000.03c -0.06E-02
%----MIX-6 air-----
mat air            -1.4E-3
8016.03c -1
%----MIX-7 eau exterieur Be-----
mat eauexterieurBe -9.98418E-01      moder lwtr 1001 moder hwtr 1002
1001.03c           -1.12093E-01
1002.03c           -3.36070E-05
8016.03c           -8.87495E-01
%----MIX-8 eau piscine-----
mat eaupiscine     -9.98418E-1      moder lwtr 1001 moder hwtr 1002
1001.03c -1.12093E-2
1002.03c -3.36070E-5
8016.03c -8.87495E-1
%----MIX-9 aluminium cuve-----
mat aluminiumcuve -2.70339
13027.03c -0.9974
24000.03c -0.26E-2
%----MIX-10 echantillon-----
mat echantillon    -8.96E+00
29000.03c          -1
%----MIX-11 echantillon-----
mat PE              -0.941E+00

```



```

1001.03c      -0.1437
6012.03c      -0.8563
% ---Donnes de diffusion thermique pour l'eau lourde et lgre:
therm lwtr lwe7.00t
therm hwtr hwe7.00t
%----Bibliotheque des sections efficaces-----
set acelib "/home/nucl/serpent/xs/endfb7/sss_endfb7.data"
%----Condition au frontiere-----
set bc 2
% --- Group constant generation:
set nfg      2 0.625E-6
ene 1 1 1E-11 0.625E-6 10

%----Flux-----
%niveau 1
%flux gauche
det  11  de 1 dv 0.0297 dc 1200
det  12  de 1 dv 0.0891 dc 1201
det  13  de 1 dv 0.1484 dc 1202
det  14  de 1 dv 0.2078 dc 1203
det  15  de 1 dv 0.1459 dc 1204
det  16  de 1 dv 0.1606 dc 1205
det  17  de 1 dv 0.0696 dc 1206
det  18  de 1 dv 0.2346 dc 1207
det  19  de 1 dv 0.3921 dc 1208
det  110 de 1 dv 0.4524 dc 1209
det  111 de 1 dv 0.9552 dc 1210
%flux droite
det  112 de 1 dv 0.0297 dc 1300
det  113 de 1 dv 0.0891 dc 1301
det  114 de 1 dv 0.1484 dc 1302
det  115 de 1 dv 0.2078 dc 1303
det  116 de 1 dv 0.1459 dc 1304
det  117 de 1 dv 0.1606 dc 1305
det  118 de 1 dv 0.0696 dc 1306
det  119 de 1 dv 0.2346 dc 1307
det  120 de 1 dv 0.3921 dc 1308
det  121 de 1 dv 0.4524 dc 1309
det  122 de 1 dv 0.9552 dc 1310
% niveau 2
% flux gauche
det  21  de 1 dv 0.0297 dc 2200
det  22  de 1 dv 0.0891 dc 2201
det  23  de 1 dv 0.1484 dc 2202

```

```

det  24  de 1 dv 0.2078 dc  2203
det  25  de 1 dv 0.1459 dc  2204
det  26  de 1 dv 0.1606 dc  2205
det  27  de 1 dv 0.0696 dc  2206
det  28  de 1 dv 0.2346 dc  2207
det  29  de 1 dv 0.3921 dc  2208
det  210 de 1 dv 0.4524 dc  2209
det  211 de 1 dv 0.9552 dc  2210
%flux droite
det  212 de 1 dv 0.0297 dc  2300
det  213 de 1 dv 0.0891 dc  2301
det  214 de 1 dv 0.1484 dc  2302
det  215 de 1 dv 0.2078 dc  2303
det  216 de 1 dv 0.1459 dc  2304
det  217 de 1 dv 0.1606 dc  2305
det  218 de 1 dv 0.0696 dc  2306
det  219 de 1 dv 0.2346 dc  2307
det  220 de 1 dv 0.3921 dc  2308
det  221 de 1 dv 0.4524 dc  2309
det  222 de 1 dv 0.9552 dc  2310
%niveau 3
%flux gauche
det  31  de 1 dv 0.0297 dc  3200
det  32  de 1 dv 0.0891 dc  3201
det  33  de 1 dv 0.1484 dc  3202
det  34  de 1 dv 0.2078 dc  3203
det  35  de 1 dv 0.1459 dc  3204
det  36  de 1 dv 0.1606 dc  3205
det  37  de 1 dv 0.0696 dc  3206
det  38  de 1 dv 0.2346 dc  3207
det  39  de 1 dv 0.3921 dc  3208
det  310 de 1 dv 0.4524 dc  3209
det  311 de 1 dv 0.9552 dc  3210
%flux droite
det  312 de 1 dv 0.0297 dc  3300
det  313 de 1 dv 0.0891 dc  3301
det  314 de 1 dv 0.1484 dc  3302
det  315 de 1 dv 0.2078 dc  3303
det  316 de 1 dv 0.1459 dc  3304
det  317 de 1 dv 0.1606 dc  3305
det  318 de 1 dv 0.0696 dc  3306
det  319 de 1 dv 0.2346 dc  3307
det  320 de 1 dv 0.3921 dc  3308
det  321 de 1 dv 0.4524 dc  3309
det  322 de 1 dv 0.9552 dc  3310

```

```

%niveau4
%flux gauche
det  41  de 1 dv 0.0297 dc  4200
det  42  de 1 dv 0.0891 dc  4201
det  43  de 1 dv 0.1484 dc  4202
det  44  de 1 dv 0.2078 dc  4203
det  45  de 1 dv 0.1459 dc  4204
det  46  de 1 dv 0.1606 dc  4205
det  47  de 1 dv 0.0696 dc  4206
det  48  de 1 dv 0.2346 dc  4207
det  49  de 1 dv 0.3921 dc  4208
det  410 de 1 dv 0.4524 dc  4209
det  411 de 1 dv 0.9552 dc  4210
%flux droite
det  412 de 1 dv 0.0297 dc  4300
det  413 de 1 dv 0.0891 dc  4301
det  414 de 1 dv 0.1484 dc  4302
det  415 de 1 dv 0.2078 dc  4303
det  416 de 1 dv 0.1459 dc  4304
det  417 de 1 dv 0.1606 dc  4305
det  418 de 1 dv 0.0696 dc  4306
det  419 de 1 dv 0.2346 dc  4307
det  420 de 1 dv 0.3921 dc  4308
det  421 de 1 dv 0.4524 dc  4309
det  422 de 1 dv 0.9552 dc  4310
set pop 10000000 300 100
%---Geometrie-----
plot 3 5000 5000
mesh 3 5000 5000
plot 1 5000 5000
mesh 1 5000 5000
plot 2 5000 5000
mesh 2 5000 5000
% -----

```

ANNEXE VI

MODÈLE SIMPLIFIÉ 3-D DRAGON

VI.1 Première partie

```

! ** MOD1.x2m
! **-----
! **  Declaration des modules, procedures, structures de donnees
! **  et parametres locaux.
! **-----

STRING      Biblio := "endfb7" ;
MODULE      NXT: DELETE: END: ASM: UTL: MAC: MRG: ;
PROCEDURE   Geo3D MixSlowpoke ;
LINKED_LIST Geom MacLib MicLib ;
SEQ_BINARY  INTLIN ILK ILE ;
SEQ_ASCII   FLEDISPH SGEO ;
XSM_FILE    PIJPART VolTrk ;
! **-----
! ** Bibliotheque MIC
! **-----
MicLib := MixSlowpoke :: <<Biblio>> ;
! **-----
! ** MacroLib sortie de l'homogenisation SPH des 6 melanges
! **-----
MacLib := FLEDISPH ;
! **-----
! ** Aller au repertoire MACROLIB de MicLib
! ** qui contient aussi une macroLib
! **-----
MicLib := UTL: MicLib ::
    STEP UP 'MACROLIB' ;
! **-----
! ** Editer la macroLib
! **-----
! **      1 -> Pate zone centrale
! **      2 -> Pate combustible
! **      3 -> Pate Be et sites internes sauf le site 1
! **      4 -> Pate eau et sites externes
! **      5 -> aluminium cuve

```

```

!**      6 -> Eau piscine
!**      7 <- Eau legere
!**      8 <- Aluminium
!**      9 <- Beryllium
!**     10 <- Air
!**     11 <- Echantillon
!**     12 <- Polyethylene
!**-----
MacLib := MAC: MacLib MicLib ::
    EDIT 10
    NMIX 12
    MIX 7 1 MIX 8 2 MIX 9 3 MIX 10 6 MIX 11 10 MIX 12 16 ;

!**-----
!** Revenir au repertoire principal de MicLib
!**-----
MicLib := UTL: MicLib ::
    STEP DOWN ;
!**-----
!** Calcul de flux
!**-----
Geom := Geo3D ;
SGEO := Geom ;

VolTrk INTLIN := NXT: Geom :: EDIT 2 TISO 10 10.0 ;

!-----
! Extraire les donnees de NXT: du site 1
!-----

ILK ILE := MRG: VolTrk INTLIN ::
EXTR 914   915   916   917   918   919   920
      921   922   923   924   925   926   927   928
      929   930   931   932   933   934   935   936
      937   938   939   940   941   942   943   944
      945   946   947   948   949   950   951   952
      953   954   955   956   957   958   959   960
      961   962   963   964   965   966   967   968
      969   970   971   972   973   974   975   976
      977   978   979   980   981   982   983   984
      985   986   987   988   989   990   991   992
      993   994   995   996   997   998   999  1000
    1001  1002  1003  1004  1005  1006  1007  1008
    1009  1010  1011  1012  1013  1014  1015  1016
    1017  1018  1019  1020  1021  1022  1023  1024

```

```

1025  1026  1027  1028  1029  1030  1031  1032
1033  1034  1035  1036  1037  1038  1039  1040
1041  1042  1043  1044  1045  1046  1047  1048
1049  1050  1051  1052  1053  1054  1055  1056
1057  1058  1059  1060  1061  1062  1063  1064
1065  1066  1067  1068  1069  1070  1071  1072
1073  1074  1075  1076  1077  1078  1079  1080
1081  1082  1083  1084  1085  1086  1087  1088
1089  1090  1091  1092  1093  1094  1095  1096
1097  1098  1099  1100  1101  1102  1103  1104
1105  1106  1107  1108  1109  1110  1111  1112
1113  1114  1115  1116  1117  1118  1119  1120
1121  1122  1123  1124  1125  1126  1127  1128
1129  1130  1131  1132  1133  1134  1135  1136
1137  1138  1139  1140  1141  1142  1143  1144
1145  1146  1147  1148  1149  1150  1151  1152
1153  ;

!-----
! Probabilite de collision dans le site 1
!-----

PIJPART := ASM: Maclib VolTrk ILK :: MTRK 2 ;

!-----
! Effacer les dossiers
!-----

INTLIN := DELETE: INTLIN ;
ILK := DELETE: ILK ;

END: ;
QUIT "LIST" .

```

VI.2 Deuxième partie

```

! ** Test.x2m
! **-----
! ** Declaration des modules, procedures, structures de donnees
! ** et parametres locaux.
! **-----

STRING      Biblio := "endfb7" ;
MODULE      NXT: DELETE: END: FLU: ASM: EDI: UTL: MAC: ;

```

```

PROCEDURE      MixSlowpoke ;
LINKED_LIST   MaclibE Maclibs PIJ FLUX01
  EDIF01 MicLib ;
SEQ_BINARY    ILE ;
SEQ_ASCII     FLEDISPH ;
XSM_FILE      PIJPART VolTrk ;

!*****
!** Bibliotheque MIC
!*****
MicLib := MixSlowpoke :: <<Biblio>> ;
!*****
!** Macrolib sortie de l'homogenisation SPH des 6 melanges
!*****
MaclibE := FLEDISPH ;
Maclibs := FLEDISPH ;
!*****
!** Aller au repertoire MACROLIB de MicLib
!** qui contient aussi une macrolib
!*****
MicLib := UTL: MicLib ::
  STEP UP 'MACROLIB' ;
!*****
!** Editer la macrolib
!*****
!**      1 -> Pate zone centrale
!**      2 -> Pate combustible
!**      3 -> Pate Be et sites internes sauf le site 1
!**      4 -> Pate eau et sites externes
!**      5 -> aluminium cuve
!**      6 -> Eau piscine
!**      7 <- Eau legere
!**      8 <- Aluminium
!**      9 <- Beryllium
!**     10 <- Air
!**     11 <- Echantillon
!**     12 <- Polyethylene
!*****
MaclibE := MAC: MaclibE MicLib ::
  EDIT 10
  NMIX 12
  MIX 7 1 MIX 8 2 MIX 9 3 MIX 10 6 MIX 11 10 MIX 12 16 ;
Maclibs := MAC: Maclibs MicLib ::
  EDIT 10
  NMIX 12
  MIX 7 1 MIX 8 2 MIX 9 3 MIX 10 6 MIX 11 17 MIX 12 16 ;

```

```

!***-----
!*** Revenir au repertoire principal de MicLib
!***-----
MicLib := UTL: MicLib ::
    STEP DOWN ;
!***-----
!*** Calcul de flux
!***-----
PIJ := PIJPART ;
PIJ := ASM: PIJ MaclibE VolTrk ILE ;

FLUX01 := FLU: PIJ MaclibE VolTrk :: EDIT 4 TYPE K ;

EDIF01 := EDI: FLUX01 MaclibE VolTrk ::
EDIT 4
TAKE REGI 914    915    916    917    918    919    920
          921    922    923    924    925    926    927    928
          929    930    931    932    933    934    935    936
          937    938    939    940    941    942    943    944
          945    946    947    948    949    950    951    952
          953    954    955    956    957    958    959    960
          961    962    963    964    965    966    967    968
          969    970    971    972    973    974    975    976
          977    978    979    980    981    982    983    984
          985    986    987    988    989    990    991    992
          993    994    995    996    997    998    999    1000
1001    1002    1003    1004    1005    1006    1007    1008
1009    1010    1011    1012    1013    1014    1015    1016
1017    1018    1019    1020    1021    1022    1023    1024
1025    1026    1027    1028    1029    1030    1031    1032
1033    1034    1035    1036    1037    1038    1039    1040
1041    1042    1043    1044    1045    1046    1047    1048
1049    1050    1051    1052    1053    1054    1055    1056
1057    1058    1059    1060    1061    1062    1063    1064
1065    1066    1067    1068    1069    1070    1071    1072
1073    1074    1075    1076    1077    1078    1079    1080
1081    1082    1083    1084    1085    1086    1087    1088
1089    1090    1091    1092    1093    1094    1095    1096
1097    1098    1099    1100    1101    1102    1103    1104
1105    1106    1107    1108    1109    1110    1111    1112
1113    1114    1115    1116    1117    1118    1119    1120
1121    1122    1123    1124    1125    1126    1127    1128
1129    1130    1131    1132    1133    1134    1135    1136
1137    1138    1139    1140    1141    1142    1143    1144

```



```
1145 1146 1147 1148 1149 1150 1151 1152
1153
COND 45 69
SAVE ;

PIJ := DELETE: PIJ ;
END: ;
QUIT "LIST" .
```