

**PREMIER MINISTRE
COMMISSARIAT A
L'ÉNERGIE ATOMIQUE**

C E A - R 3048

FLUX DE NEUTRONS RAPIDES DANS LES PILES A EAU LOURDE

par

Jacques BRISBOIS, Shlomo L. KATZ

Rapport C E A - R 3048

1966

Da

**CENTRE D'ÉTUDES NUCLÉAIRES
DE FONTENAY-AUX-ROSES**

CEA-R 3048 - BRISBOIS Jacques, KATZ Shlomo L.

FLUX DE NEUTRONS RAPIDES DANS LES PILES A EAU LOURDE

Sommaire. - La possibilité de calculer le flux de neutrons rapides dans un réseau d'uranium naturel - eau lourde par superposition des apports des divers barreaux, a été vérifiée en utilisant un code Monte-Carlo monodimensionnel.

Les résultats obtenus concordent avec des mesures expérimentales effectuées dans le coeur et réflecteur de la pile AQUILON.

1966

45 p.

Commissariat à l'Energie Atomique - France

CEA-R 3048 - BRISBOIS Jacques, KATZ Shlomo L.

FAST NEUTRON FLUX IN HEAVY WATER REACTORS

Summary. - The possibility of calculating the fast neutron flux in a natural uranium - heavy water lattice by superposition of the individual contributions of the different fuel elements was verified using a monodimensional Monte-Carlo code.

The results obtained are in good agreement with experimental measurements done in the core and reflector of the reactor AQUILON.

1966

45 p.

Commissariat à l'Energie Atomique - France

Département des Etudes de Piles
Service d'Etudes de Protections de Piles

FLUX DE NEUTRONS RAPIDES DANS LES PILES A EAU LOURDE

par

Jacques BRISBOIS, Shlomo L. KATZ

Les rapports du COMMISSARIAT A L'ENERGIE ATOMIQUE sont, à partir du n° 2200, en vente à la Documentation Française, Secrétariat Général du Gouvernement, Direction de la Documentation, 16, rue Lord Byron, PARIS VIIIème.

The C.E.A. reports starting with n° 2200 are available at the Documentation Française, Secrétariat Général du Gouvernement, Direction de la Documentation, 16, rue Lord Byron, PARIS VIIIème.

SOMMAIRE

INTRODUCTION

I - METHODE DE CALCUL

1.1 - Calculs en milieu infini

1.1.1 - Description du programme Monte-Carlo utilisé

1.1.2 - Les constantes utilisées

1.2 - L'addition sur le réseau

II - DESCRIPTION DES EXPERIENCES

III - EXEMPLE DE CALCUL ET COMPARAISON DES RESULTATS AVEC LES RESULTATS EXPERIMENTAUX

III.1 - Calculs en milieu infini

III.1.1 - Géométrie des calculs

III.1.2 - Description des divers calculs effectués

III.1.3 - Résultats

III.1.4 - Fluctuations statistiques

III.2 - Addition sur le réseau

III.2.1 - Calculs de structure fine

III.2.2 - Comparaison "en valeur relative" des calculs avec l'expérience

III.2.3 - Recalage en absolu

III.2.4 - Calculs dans le réflecteur et leur comparaison avec l'expérience

CONCLUSION

FLUX DE NEUTRONS RAPIDES DANS LES PILES A EAU LOURDE

INTRODUCTION

La possibilité de calculer le flux de neutrons rapides dans un réseau d'uranium - naturel - eau lourde par superposition des apports des divers barreaux a été vérifiée .

Des calculs Monte-Carlo, pour un barreau dans un milieu infini d'eau lourde ont été effectués. Une simple superposition basée sur ces résultats, permet d'obtenir les réponses des divers détecteurs dans un réseau. Les résultats de ces calculs ont été comparés avec des mesures effectuées dans le coeur et le réflecteur de la pile AQUILON.

En utilisant les sections différentielles élastiques de [1], des divergences importantes ont été obtenues entre les calculs et l'expérience. L'utilisation, pour le deutérium et l'oxygène, des sections différentielles élastiques données dans [3] aboutit à un bon accord avec l'expérience.

Les résultats obtenus indiquent que la méthode de calcul utilisée permet d'obtenir le flux de neutrons rapide dans un réseau d'uranium naturel - eau lourde avec une bonne précision.

1 - METHODE DE CALCUL

1.1 - Calculs en milieu infini

1.1.1 - Description du programme Monte-Carlo utilisé

Les calculs en milieu infini ont été faits à l'aide du programme Monte-Carlo monodimensionnel SDEF [4] qui est applicable à des géométries de symétrie axiale infinies dans le sens de l'axe.

Le programme peut traiter les chocs élastiques, n , $n' - n$, $2n$ et $3n$. On tient compte de l'absorption par l'intermédiaire d'un poids attribué aux neutrons. L'anisotropie éventuelle des divers chocs peut être prise en considération.

Les valeurs des sections efficaces sont fournies sous forme de découpage discret en moins de 100 bandes d'énergie. Les découpages des diverses sections sont indépendants l'un de l'autre permettant d'utiliser un découpage plus serré dans les zones où les sections efficaces varient rapidement.

Les sections différentielles sont introduites de la manière suivante :

Soit $P(\mu, E)$ la section différentielle normalisée à l'énergie E , μ étant le cosinus de déflexion dans le système de centre des masses. On calcule 21 valeurs de μ ; $\mu_i(E)$, $i = 1, 21$ telles que

$$\int_{\mu_i(E)}^{\mu_{i+1}(E)} P(\mu, E) d\mu = \frac{1}{20}$$

Ces valeurs sont calculées pour un maximum de 40 plages d'énergie comprises entre 10 keV et 15 MeV. Dans chaque plage d'énergie les $\mu_i(E)$ sont considérées constantes.

Les neutrons du spectre de fission sont répartis en moins de 100 groupes d'énergie d'émission à l'aide du programme PAEFA [4].

La variation radiale du taux des fissions dans la source est fournie sous formes de zones d'égale émission. Ces zones sont calculées au préalable à partir des résultats expérimentaux (5) à l'aide du programme PAECOP [4].

Des coefficients de détecteurs pris en (6) ont été injectés dans le programme pour permettre de calculer les réponses du phosphore $P^{31}(n,p)Si^{31}$, du $Rh(n,n')Rh^*$ et d'un détecteur de dommages en silicium exprimées en flux de fission équivalent défini par :

$$\Phi = \frac{1}{\sigma_F} \int_0^\infty \sigma(E) \phi(E) dE$$

σ_F - section efficace moyennée sur le spectre de fission.

SDEF calcule le spectre, le flux total ainsi que les réponses des divers détecteurs en fonction de la distance.

Le seul changement apporté au programme SDEF tel qu'il est décrit en [4] est l'introduction d'un générateur de nombres aléatoires donnant des suites connues et initialisables (11).

1.1.2 - Les constantes utilisées

Dans les calculs décrits au paragraphe III interviennent trois éléments, l'uranium naturel, l'oxygène et le deutérium.

Toutes les sections totales, pour ces trois éléments, sont prises dans la compilation de Schmidt [2] pour l'intervalle d'énergie entre 10 keV et 10 MeV. Les valeurs de ces sections pour l'intervalle entre 10 MeV et 15 MeV sont prises dans le rapport de A.W.R.E. [1].

Le découpage en énergie varie d'une section efficace à l'autre. Dans la majorité des cas le découpage est tel qu'une interpolation linéaire donne la section efficace en un point avec moins de 5 % d'erreur. Les découpages effectués pour les diverses sections efficaces totales et pour les trois éléments sont donnés dans le tableau ci-après

Eléments	Sections efficaces				
	élastique	inélastique	absorption	$n, 2n$	$n, 3n$
Oxygène	99	31	58	-	-
Deutérium	20	-	-	23	-
Uranium	61	23	-	6	1

Les lois inélastiques utilisées sont celles données dans le rapport A.W.R.E.

Pour l'oxygène la distribution angulaire des neutrons secondaires est supposée isotrope dans le système de laboratoire et la distribution en énergie est :

Seuil	$< E < 10 \text{ MeV}$	$E' = (E - 6.10) \text{ MeV}$
10 MeV	$\leq E \leq 15 \text{ MeV}$	$E' = (E - 6.10)$ dans la moitié des réactions $E' = 2 \text{ MeV}$ dans la moitié des réactions

E - l'énergie du neutron incident

E' - l'énergie du neutron secondaire

Dans le cas de l'uranium on peut supposer que la répartition angulaire des neutrons après choc inélastique est isotrope dans le système de laboratoire. L'énergie après choc est :

0.150 MeV	$< E < 0.800 \text{ MeV}$	$E' = E - 0.045 \text{ MeV}$ dans 8/9 des réactions $E' = E - 0.150 \text{ MeV}$ dans 1/9 des réactions
0.8 MeV	$< E < 1.5 \text{ MeV}$	$E' = E - 0.045 \text{ MeV}$ dans 2/4 des réactions $E' = E - 0.150 \text{ MeV}$ dans 1/4 des réactions $E' = E - 0.73 \text{ MeV}$ dans 1/4 des réactions
1.5 MeV	$< E < 8 \text{ MeV}$	$Q(x) = 16 \times e^{-4x}$ avec $x = E'/E$

$Q(x) dx$ est la probabilité de trouver x dans l'intervalle x à $x + dx$

Pour les interactions $(n, 2n)$ et $(n, 3n)$ les distributions énergétiques des neutrons secondaires prises sont celles de A.W.R.E. Elles se présentent toutes sous la forme de relations linéaires entre l'énergie avant et après le choc :

$$E' = A(E + b)$$

Pour les sections différentielles élastiques de l'oxygène et du deutérium deux compilations différentes ont été utilisées, celle donnée dans le A.W.R.E. et celle donnée par KALOS, GOLDSTEIN et RAY dans un rapport UNC [3].

Dans l'A.W.R.E. ces sections sont données, pour l'oxygène, groupées en 4 plages d'énergie comprises entre 0,25 MeV et 15 MeV en supposant que le choc est isotrope en dessous de 0,25 MeV et, pour le deutérium, groupées en 5 plages d'énergie comprises entre 10 keV et 15 MeV.

Dans le rapport UNC le découpage en énergie des sections efficaces est fin et on a été obligé, par raison de manque de place dans la mémoire rapide, de les regrouper en 40 plages d'énergie pour l'oxygène et en 33 plages pour le deutérium.

Pour les sections différentielles élastiques de l'uranium les valeurs données dans A.W.R.E. ont été utilisées. Elles sont groupées en 17 plages d'énergie comprises entre 0,05 MeV et 15 MeV. En dessous de 0.05 MeV le choc élastique est supposé isotrope dans le système de centre des masses.

Pour la densité de l'eau-lourde à 20° on a pris 1.1 g/cm^3 et pour la densité de l'uranium 18.7 g/cm^3 .

1.2 - L'addition sur le réseau

Pour obtenir le flux rapide dans un réseau on effectue une simple superposition des apports de chaque barreau. Ces apports sont calculés dans une géométrie infinie en l'absence des autres barreaux.

L'addition est effectuée par le programme ADRES [2].

Le flux $d\phi$ à un barreau est introduit, soit point par point, ou par une approximation de la forme :

$$AKo(\beta X)$$

x étant la distance au centre du barreau.

A part la géométrie du réseau on peut tenir compte aussi de la puissance relative des divers barreaux.

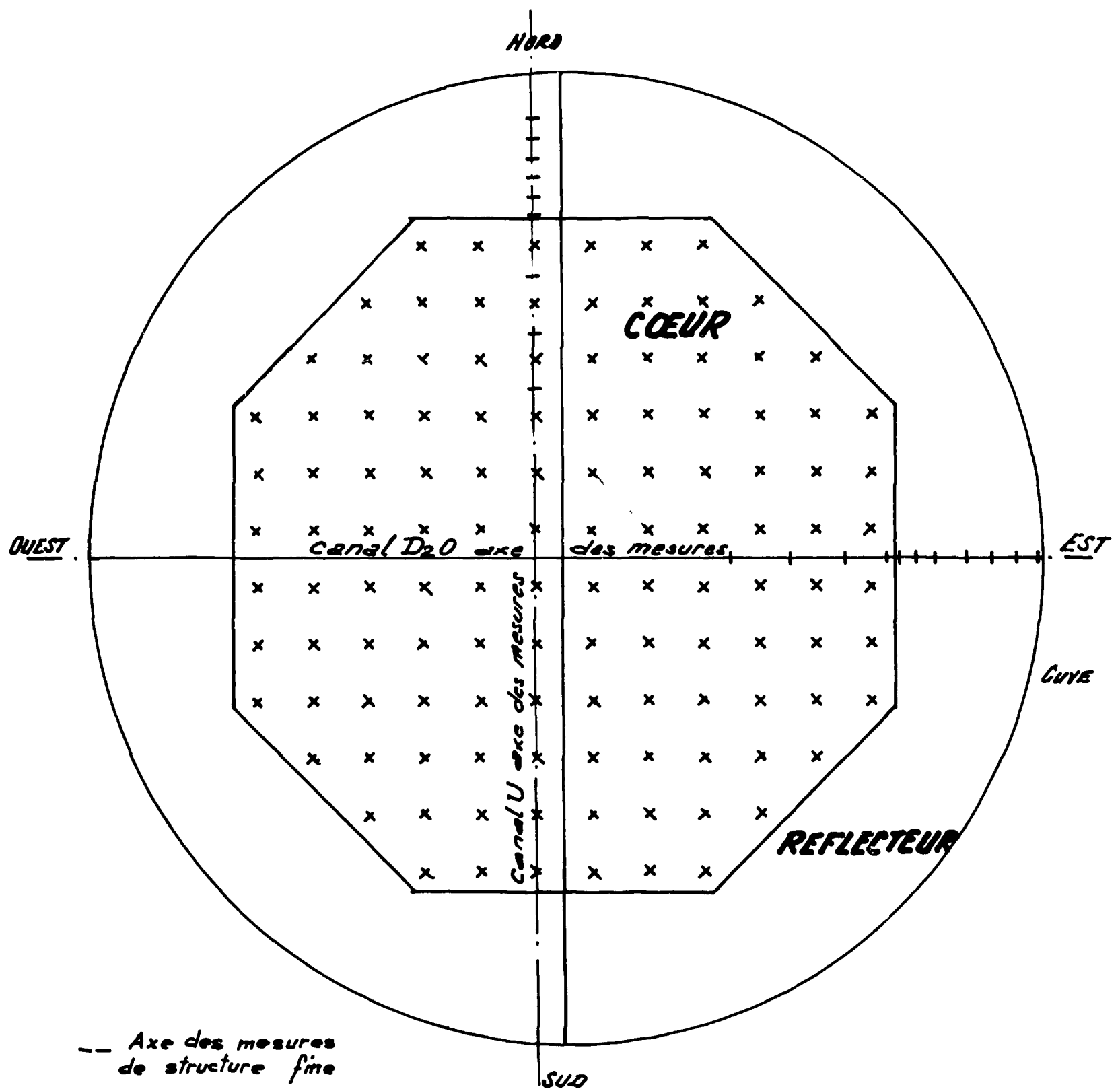
Les résultats donnés en III.2 démontrent que cette méthode simple donne une bonne concordance avec l'expérience dans le cas d'un réseau d'uranium naturel - eau lourde.

II - DESCRIPTION DES EXPERIENCES

Les expériences ont été effectuées dans le réseau d'uranium naturel modéré à l'eau lourde AQUILON.

La pile était chargée de 120 barreaux d'uranium naturel de diamètre 29.2 mm, dans un réseau carré de pas 170 mm (8) [voir figure ci-après].

CHARGEMENT PILE AQUILON



Les détecteurs utilisés sont :

- le phosphore $P^{31} (n,p) Si^{31}$
- le rhodium $Rh (n,n') Rh^+$
- le détecteur de dommages en silicium

Les réponses sont exprimées en flux de fission équivalent pour le détecteur considéré :

$$\bar{\phi} = \frac{1}{\sigma_F} \int_0^{\infty} \sigma(E) \phi(E) dE$$

$\bar{\sigma}_F$ - section efficace moyennée sur le spectre de fission

Les résultats des mesures sont rapportés à une valeur donnée du flux de neutrons thermiques au centre de la maille centrale, mesure à l'aide de détecteurs de manganèse.

Deux sortes de mesures ont été faites : mesure de structure fine entre deux barreaux d'uranium et mesure dans le réflecteur (voir figure 13).

Les mesures de structure fine ont été effectuées le long de la diagonale d'une maille voisine de la maille centrale.

Dans le réflecteur deux séries de mesures ont été effectuées : dans le plan d'une rangée de barreau (canal U) et dans le plan qui se situe entre les deux rangées de barreaux centrales (canal D₂O). Ces mesures commencent dans le coeur et se continuent dans le réflecteur. Elles sont faites uniquement avec des détecteurs de phosphore.

Toutes les mesures sont faites dans le plan médian du coeur.

III - EXEMPLE DE CALCUL ET COMPARAISON DES RESULTATS AVEC LES RESULTATS EXPERIMENTAUX

III.1 - Calculs en milieu infini

III.1.1 - Géométrie des calculs

Les calculs en milieu infini ont été effectués pour un barreau cylindrique d'uranium naturel de diamètre 29.2 mm infiniment long, plongé dans un

milieu infini d'eau lourde. Les résultats ont été obtenus en 20 points situés entre 1.5 cm et 80 cm de l'axe du barreau.

III.1.2 - Description des divers calculs effectués

Une étude générale de l'influence de l'anisotropie du choc élastique sur l'oxygène et le deutérium a été effectuée. On a trouvé que les résultats des calculs dépendent fortement de l'anisotropie.

Etant donné que les sections différentielles de l'oxygène et du deutérium données dans le rapport A.W.R.E. diffèrent de celles données dans le rapport U.N.C., une étude comparative des résultats avec les deux compilations a été faite.

Les sections différentielles utilisées dans les cinq calculs effectués sont résumées dans le tableau ci-après

	Calcul N° 1	Calcul N° 2	Calcul N° 3	Calcul N° 4	Calcul N° 5
Oxygène	A.W.R.E	A.W.R.E	UNC-5038	Isotrope	Isotrope
Deutérium	A.W.R.E	UNC-5038	UNC-5038	Isotrope	UNC-5038

Par la suite on va se référer aux divers calculs par leurs numéros dans le tableau.

Dans chaque calcul 4993 histoires de neutrons ont été suivies jusqu'à 10 keV et le flux ainsi que les réponses du phosphore et du rhodium ont été obtenues.

Les calculs 1, 2 et 3 ont été effectués 3 fois chacun en initialisant à chaque fois différemment le générateur des nombres aléatoires.

Des calculs avec 15.444 neutrons émis entre 1.475 MeV et 15 MeV ont été également effectués pour les cas n°s 1, 2 et 3. Dans ces calculs les neutrons ont été suivis jusqu'à 1.47 MeV. Ces calculs donnent le flux équivalent de fission du phosphore avec une meilleure précision.

III.1.3 - Résultats

Le flux total ainsi que le flux équivalent de fission pour le phosphore le rhodium et le silicium obtenus dans les calculs 1, 2 et 3 sont donnés dans les fig.n°1,2 et 3 respectivement. Les réponses obtenues par les calculs ayant comme seuil

1.47 MeV, sont également représentées sur ces figures sous la dénomination de calculs longs. Tous les calculs sont normalisés à 10^8 n/cm de barreau/S.

Les résultats du calcul n°3, dans les trois cas (générateur des nombres aléatoires initialisé à 1, 3 et 5 respectivement) sont tabulés dans l'annexe 1 avec la moyenne de ces résultats et l'écart quadratique moyen des trois calculs.

A partir de 15 cm de la source le flux et les réponses des détecteurs peuvent être assimilés à un $K_0(\beta x)$ dans tous les cas étudiés, avec

x - la distance de la source en cm

Les valeurs de β obtenues dans les cinq cas étudiés sont données dans le tableau ci-dessous :

	Calcul N°1	Calcul N°2	Calcul N°3	Calcul N°4	Calcul N°5
$\beta - 1$ en cm	0.115	0.125	0.130	0.150	0.150

Les rapports des résultats des calculs n°s 1, 4 et 5 avec les résultats du calcul n° 3 sont donnés, en fonction de la distance, dans les figures (6), (4) et (5) respectivement.

En analysant les résultats donnés en figure (4) et (5) on constate que l'anisotropie du choc élastique sur le deutérium influe sur le flux équivalent phosphore dès les premiers centimètres de la source. Cette influence s'accroît avec la distance. Le flux rhodium n'est changé, par contre, qu'à partir de 15 à 20 cm de la source.

L'anisotropie du choc élastique sur l'oxygène influe seulement sur les réponses à grande distance sans changer le rapport entre le flux phosphore et le flux rhodium. Ceci est dû au fait que l'anisotropie du choc élastique sur le deutérium change non seulement la propagation des neutrons, mais également la rapidité de leur dégradation énergétique, tandis que l'anisotropie du choc sur l'oxygène influe seulement sur le transport des neutrons.

La comparaison des résultats du calcul n° 1 avec ceux du calcul n°3 figure (6) démontre que, surtout à grande distance, les résultats obtenus avec la compilation de l'A.W.R.E. diffèrent de ceux obtenus avec la compilation de l'U.N.C. Aux alentours de 30 cm de la source le rapport des résultats obtenus avec les deux compilations est de 1.5.

III.1.4 - Fluctuations statistiques

Les calculs n°s 1, 2 et 3 ont été effectués chacun trois fois, avec des suites de nombres aléatoires différents. La comparaison de ces résultats donne une idée sur l'importance des fluctuations statistiques.

Jusqu'à 15 cm de la source les fluctuations statistiques observées sur les réponses intégrales étaient inférieures à 5 %. Entre 15 et 30 cm ces fluctuations restent inférieures à 10 %.

Au delà de 30 cm de la source les fluctuations augmentent rapidement avec la distance et au-delà de 45 cm les résultats des calculs ne peuvent pas être pris en considération.

Le coefficient β des fonctions $K_0(\beta x)$ est défini par les points de calcul qui se situent entre 15 et 45 cm. Au-delà de 45 cm les réponses sont représentées par cette fonction.

III.2 - Addition sur le réseau

III.2.1 - Calculs de structure fine

Tous les calculs d'addition sur le réseau sont effectués avec le programme ADRES par la méthode décrite au paragraphe 1.2.

La puissance relative des divers barreaux a été calculée par le Service Physique Mathématique de Saclay en utilisant un code hétérogène. Les résultats de ce calcul sont donnés en annexe II.

Les calculs de structure fine ont été effectués pour les points qui se situent sur la diagonale qui lie les barreaux ayant les coordonnées (25,5 cm ; 8,5 cm) et (8,5 cm ; 25,5 cm), relatifs au centre de la maille centrale. Les points de calcul (ou mesure) sont définis par leur distance du barreau ayant les coordonnées (25,5 cm ; 8,5 cm).

L'addition sur le réseau a été effectuée avec les résultats des calculs n°s 1, 2 et 3 en milieu infini.

III.2.2 - Comparaison "en valeur relative" des calculs avec l'expérience

On définit un critère numérique qui va refléter l'accord relatif réalisé entre les calculs des réponses phosphore, rhodium et silicium.

Des calculs d'addition sur réseau faits avec une puissance arbitraire de 10^8 n/cm de barreau central/S, servent comme point de départ.

Soit $\phi_{\text{calc}}(X_i)$ la réponse calculée de cette façon à la distance X_i et $\phi_{\text{mes}}(X_i)$ la valeur mesurée de la même réponse.

On définit pour chaque réponse $\phi(X_i)$ par :

$$\phi(X_i) = C \phi_{\text{calc}}(X_i)$$

ou C est une constante telle que l'écart quadratique relatif moyen du rapport $\phi(X_i)/\phi_{\text{mes}}(X_i)$ soit minimal. C représente, en unités de 10^8 n/cm de barreau/S., une puissance fictive des sources qui donne le meilleur accord entre le calcul considéré et l'expérience.

Un bon accord entre les calculs des réponses phosphore, rhodium et silicium se traduit par le fait que l'on obtient la même valeur de C pour les deux réponses.

δ est défini par

$$\delta = \sqrt{\sum_i \left(\frac{\phi(X_i)}{\phi_{\text{mes}}(X_i)} - 1 \right)^2 / N}$$

N est le nombre de points de mesure et la somme s'étend sur tous les points de mesure.

Posons :

$$\alpha_i = \frac{\phi_{\text{calc}}(X_i)}{\phi_{\text{mes}}(X_i)}$$

On obtient :

$$C = \frac{\sum \alpha_i}{\sum \alpha_i^2}$$

La tolérance de 3 mm dans le positionnement des détecteurs, l'épaisseur de ces détecteurs et l'influence sur la source du boîtier de cadmium du premier détecteur empêche toute analyse précise des résultats à moins d'un centimètre des barreaux. En conséquence on ne tient pas compte des trois premiers points de l'expérience dans l'évaluation de C .

Les valeurs ainsi obtenues pour C , dans les divers cas, ainsi que l'écart quadratique δ sont donnés dans le tableau suivant.

	Calcul n° 1			Calcul n° 2			Calcul n° 3		
	Ph	Rh	Si	Ph	Rh	Si	Ph	Rh	Si
C	1.18	0.96	1.26	1.28	1.29	1.56	1.44	1.40	1.70
écart quadratique	5,3 %	5,3 %	16,6 %	3 %	1,4 %	10,3 %	6,7 %	5,5 %	14 %

L'évaluation des sources décrites en III.2.3 et annexe III aboutit à la valeur de 1.45×10^8 n/cm de barreau/S. en très bon accord avec les valeurs de C obtenues à partir du calcul n°3.

III.2.3 - Recalage en absolu

Le recalage en absolu est effectué en se basant sur la connaissance du flux de neutrons thermiques au centre de la maille centrale pendant l'expérience. La connaissance du rapport cadmium et de la section efficace effective de fission de l'uranium est également nécessaire. Le calcul détaillé est effectué en annexe : III.

Au cours des expériences réalisées la puissance des barreaux de la maille centrale est évaluée à 1.45×10^8 n/cm de barreau/s.

Les résultats des calculs de structure fine basés sur les calculs n° 1, 2 et 3 en milieu infini, sont comparés avec les réponses expérimentales du Ph et du Rh dans les figures (7), (8) et (9) respectivement. La comparaison de ces calculs avec la réponse expérimentale du Silicium est effectuée dans les figures (10), (11) et (12). Les calculs ont été normés à 1.45 n/cm du barreau central/s.

Les résultats expérimentaux ainsi que ceux du calcul n°3 sont tabulés en annexe IV.

Le calcul n°1 est en désaccord avec les résultats expérimentaux.

Le flux phosphore calculé est trop fort de 20 % en moyenne, le flux rhodium se situe à 50 % au-dessus des valeurs expérimentales et le flux silicium est trop fort de 15 %. Donc il y a désaccord dans le niveau absolu des réponses et également dans les niveaux relatifs des trois réponses calculées.

L'accord relatif entre les réponses du phosphore et du rhodium basées sur le calcul n°2 est très bon mais les deux réponses sont en moyenne supérieures de 10 % aux réponses expérimentales.

L'accord avec l'expérience des réponses phosphore et rhodium basées sur le calcul n°3 est très bon en relatif et en valeur absolue également. Les écarts qui persistent sont de l'ordre des barres d'erreur sur les valeurs mesurées.

En ce qui concerne le silicium, l'accord est moins bon ; on enregistre un écart de 15 % au centre de la cellule. Les résultats expérimentaux présentant une assez grande dispersion, il paraît difficile toutefois d'imputer entièrement ce désaccord à la méthode de calcul.

III-2-4 - Calculs dans le réflecteur

Des calculs d'addition sur le réseau ont été effectués pour les deux cas ; canal $D_2 0$ et Canal U.

Les réponses phosphore obtenues en utilisant les calculs n°1, 2 et 3 sont comparées avec les résultats expérimentaux dans les figures (13), (14) et (15) respectivement. Les courbes calculées sont basées sur une puissance de source de 1.45×10^8 n/cm de barreau/S.

Les réponses phosphore expérimentales ainsi que les réponses calculées en se basant sur calcul n°3 en milieu infini, sont tabulées en annexe V.

La pente expérimentale ainsi que les pentes des trois calculs sont données dans le tableau ci-dessous

Pente expérimentale	Pente Calcul n°1	Pente Calcul n° 2	Pente Calcul n°3
7.2 cm	8.7 cm	7.9 cm	7.6 cm

Les résultats du calcul n°1 sont en désaccord avec les résultats expérimentaux.

Les calculs qui se situent dans le coeur, entre 50 et 100 cm du centre de la maille centrale donnent des courbes parallèles aux courbes expérimentales dans les deux cas (canal U et canal D) quoique décalées de 18 % en plus pour les calculs en canal U et de 22 % en plus pour les calculs en canal D.

Dans le réflecteur il n'y a pas de parallélisme entre les courbes calculées et expérimentales, la pente calculée étant de 20 % supérieure à la pente expérimentale.

Les résultats du calcul n°2 concordent mieux avec les résultats expérimentaux que ceux du calcul n° 1.

Le parralélisme des courbes expérimentales et calculées dans le coeur (50 à 100 cm) est conservé. Les courbes calculées ne sont plus décalées que de 10 % en plus environ. Par contre, il subsiste une divergence de 10 % entre les pentes calculées et expérimentales dans le réflecteur.

Les résultats du calcul n°3 suivent les résultats expérimentaux dans le coeur, les écarts étant de l'ordre des barres d'erreur sur les mesures. Une faible divergence de l'ordre de 5 % persiste entre les pentes calculées et expérimentales.

Etant donné que l'erreur statistique sur les valeurs calculées augmente rapidement avec la distance, un accord plus poussé entre les valeurs calculées et expérimentales dans le réflecteur ne peut pas être recherché avec le programme SIDEF dans son état actuel.

CONCLUSION

L'accord obtenu entre les calculs et l'expérience semble démontrer que la méthode de superposition des flux permet de calculer le flux de neutrons rapides dans un réseau d'uranium naturel - eau lourde avec une bonne précision.

Il apparaît clairement dans les résultats obtenus que l'influence de l'anisotropie du choc élastique sur le deutérium et l'oxygène est très importante. L'accord avec les résultats expérimentaux n'a pu être obtenu avec les sections efficaces de l'A.W.R.E.

Par contre la compilation de Kalos, Goldstein et Ray a permis d'obtenir un très bon accord tant dans le coeur que dans le réflecteur.

Les résultats concordent avec les remarques de K. Parker [13] indiquant que les sections différentielles élastiques du deutérium données dans l'A.W.R.E. sont erronées.

Manuscrit reçu le 15 juin 1966

BIBLIOGRAPHIE

- [1] A.W.R.E.
Report n° 0 - 28/60
- [2] SCHMIDT J.J.
Neutron cross sections for fast reactor material
KKK 120 (EANDC - E - 35 U)
- [3] KALOS M.H. , GOLDSTEIN H. , RAY J.
Revised cross sections for neutron interactions with oxygen
and deuterium, Rapport UNC 5038
- [4] SIVAGNAMAN
Rapport interne non diffusé
- [5] CHEROT J. , COULOMB P. , PAGES P.
Rapport interne non diffusé
- [6] BRISBOIS J. , LOTT M. , MANENT G.
Mesures des flux de neutrons thermiques intermédiaires
et rapides au moyen de détecteurs par activation,
Rapport CEA-R 2491
- [7] MANENT G. , CABARET G.
Rapport interne non diffusé
- [8] Catalogue des éléments combustibles AQUILON, note CEA-N 485
- [9] COGNE F.
Rapport interne non diffusé
- [10] BECKURTZ K.H. , WIRTZ K.
Neutron physics, Springer Verlag,1964
- [11] KATZ S.L.
Rapport interne non diffusé
- [12] BRISBOIS J.
Rapport interne non diffusé
- [13] PARKER K.
A review of evaluations of neutron cross sections available at
November 1964, A.W.R.E. Report n° 0 - 13/65

ANNEXE I - 1

FLUX TOTAL DANS LES TROIS CAS DU CALCUL N°3 AINSI QUE LE
FLUX MOYEN ET L'ECART QUADRATIQUE

Distance en cm	Flux total n/cm ² /sec			Flux moyen	Ecart en %
1.46	3.14 x 10 ⁷	3.28 x 10 ⁷	3.23 x 10 ⁷	3.22 x 10 ⁷	1.9
1.5	2.98	3.08	3.08	3.05	1.6
3	1.43	1.39	1.42	1.41	1
4	1.04	1.04	1.04	1.04	-
5	7.73 x 10 ⁶	7.94 x 10 ⁶	7.75 x 10 ⁶	7.81x10 ⁶	1.2
7	4.65	4.60	4.60	4.62	0.5
9	2.96	2.91	2.93	2.94	0.7
11	1.84	1.83	1.86	1.84	0.5
13	1.20	1.16	1.16	1.18	1.6
17	5.13 x 10 ⁵	5.14 x 10 ⁵	5.23 x 10 ⁵	5.17 x 10 ⁵	0.9
21	2.34	2.45	2.23	2.34	3.8
25	1.13	1.12	1.15	1.13	0.9
30	4.86 x 10 ⁴	4.04 x 10 ⁴	4.65 x 10 ⁴	4.52 x 10 ⁴	7.7
35	1.90	1.80	1.86	1.85	2.2
40	1.06	1.32	9.21 x 10 ³	1.10	15.
45	3.55 x 10 ³	7.83 x 10 ³	3.29	4.89 x 10 ³	43.
50	3.29	3.40	2.57	3.09	12.

ANNEXE I - 2

FLUX EQUIVALENT PHOSPHORE DANS LES TROIS CAS DU CALCUL N° 3

Distance en cm	Flux équivalent phosphore n/cm ² /s.			Flux équivalent moyen	Ecart en %
1.46	1.75 x 10 ⁷	1.82 x 10 ⁷	1.84 x 10 ⁷	1.80 x 10 ⁷	2.2
1.5	1.60	1.69	1.65	1.65	2.2
3	5.23 x 10 ⁶	5.28 x 10 ⁶	5.40 x 10 ⁶	5.30 x 10 ⁶	1.3
4	3.52	3.47	3.54	3.51	0.9
5	2.42	2.51	2.46	2.47	1.6
7	1.39	1.31	1.37	1.36	2.4
9	8.33 x 10 ⁵	8.18 x 10 ⁵	8.15 x 10 ⁵	8.22 x 10 ⁵	0.9
11	5.12	5.71	4.99	5.28	5.9
13	3.36	3.55	3.17	3.36	4.6
17	1.77	1.68	1.44	1.63	8.7
21	9.45 x 10 ⁴	9.36 x 10 ⁴	8.03 x 10 ⁴	8.95 x 10 ⁴	7.2
25	4.27	4.89	5.14	4.77	7.7
30	2.89	2.05	2.11	2.35	16.
35	8.76 x 10 ³	1.05	1.15	1.03	11.
40	6.63	7.83 x 10 ³	6.78 x 10 ³	7.08 x 10 ³	7.6
45	5.34	4.68	3.66	4.56	15.
50	1.69	1.82	1.87	1.79	4.3

ANNEXE I - 3

FLUX EQUIVALENT RHODIUM DANS LES TROIS CAS DU CALCUL N° 3

Distance en cm	Flux équivalent rhodium n/cm ² /s.			Flux équivalent moyen	Ecart en %
1.46	2.02 x 10 ⁷	2.12 x 10 ⁷	2.12 x 10 ⁷	2.09 x 10 ⁷	2.2
1.5	1.88	1.95	1.94	1.92	1.5
3	6.49 x 10 ⁶	6.39 x 10 ⁶	6.44 x 10 ⁶	6.44 x 10 ⁶	0.6
4	4.29	4.21	4.25	4.25	0.8
5	2.92	3.25	2.86	3.01	5.6
7	1.58	1.51	1.56	1.55	1.8
9	9.26 x 10 ⁵	8.88 x 10 ⁵	9.08 x 10 ⁵	9.07 x 10 ⁵	1.8
11	5.46	5.62	5.40	5.49	1.6
13	3.50	3.47	3.21	3.39	3.8
17	1.62	1.51	1.41	1.51	5.5
21	7.67 x 10 ⁴	8.02 x 10 ⁴	6.77 x 10 ⁴	7.49 x 10 ⁴	7.1
25	3.76	3.89	3.91	3.85	1.8
30	2.30	1.58	1.67	1.85	18.
35	6.79 x 10 ³	7.56 x 10 ³	8.33 x 10 ³	7.56 x 10 ³	8.4
40	5.16	5.63	4.39	5.06	10.
45	2.62	3.85	2.12	2.86	25.
50	1.03	1.33	1.28	1.21	11.

ANNEXE I - 4

FLUX EQUIVALENT SILICIUM DANS LES TROIS CAS DU CALCUL N°3

Distance en cm	Flux équivalent silicium n/cm ² /s			Flux équivalent moyen	écart en %
1.46	2.29 × 10 ⁷	2.40 × 10 ⁷	2.38 × 10 ⁷	2.35 × 10 ⁷	2 %
1.5	2.14	2.21	2.20	2.19	1.5
3	7.89 × 10 ⁶	7.82 × 10 ⁶	7.84 × 10 ⁶	7.85 × 10 ⁶	0.4
4	5.25	5.29	5.27	5.27	0.3
5	3.72	4.03	3.62	3.79	4.6
7	1.99	1.93	2.00	1.97	1.6
9	1.17	1.12	1.20	1.17	2.7
11	6.85 × 10 ⁵	7.04 × 10 ⁵	6.88 × 10 ⁵	6.92 × 10 ⁵	1.2
13	4.40	4.22	4.11	4.24	2.8
17	1.93	1.87	1.79	1.86	3.1
21	8.82 × 10 ⁴	9.28 × 10 ⁴	8.12 × 10 ⁴	8.74 × 10 ⁴	5.5
25	4.39	4.42	4.41	4.40	3.
30	2.50	1.78	1.87	2.05	15.6
35	7.62 × 10 ³	8.34 × 10 ³	9.03 × 10 ³	8.33 × 10 ³	6.9
40	5.53	5.91	4.80	5.41	8.5
45	2.82	4.09	2.03	2.98	28.
50	1.33	1.52	1.57	1.47	7.

ANNEXE II

REPARTITION RADIALE DES SOURCES DANS LA PILE AQUILON PENDANT LES EXPERIENCES

On numérote les barreaux du premier octant de la manière suivante :
- les numéros croissent avec l'abscisse du barreau et pour chaque abscisse avec l'ordonnée . Ainsi les coordonnées des barreaux sont :

- N° 1 : (8,5 cm ; 8,5 cm)
- N° 2 : (25,5 cm ; 8,5 cm)
- N° 3 : (25,5 cm ; 25,5 cm)
- etc
- N°17 : (93,5 cm ; 42,5 cm)

N° du Barreau	Flux moyen dans le barreau	N° du Barreau	Flux moyen dans le barreau
1	1.00	10	0.55
2	0.96	11	0.62
3	0.92	12	0.58
4	0.88	13	0.52
5	0.84	14	0.45
6	0.76	15	0.47
7	0.76	16	0.45
8	0.72	17	0.41
9	0.65		

ANNEXE III

Le nombre de neutrons émis par cm^3 du barreau est donné par :

$$S_v = \hat{\Sigma}_{fu} \cdot v \cdot \frac{\bar{\phi}_u}{\phi_{\text{mod}}} \cdot \phi_{\text{mod}}$$

$\hat{\Sigma}_{fu}$ - la section efficace effective macroscopique de fission de l'uranium. Sa valeur est déterminée en se basant sur le modèle de gaz lourd et en utilisant la valeur de l'indice du spectre :

$$\bar{r}_u = 0.061$$

On trouve en (9)

$$\hat{\Sigma}_{fu} = 0.190 \text{ cm}^{-1}$$

v - le nombre moyen de neutrons émis après fission. Sa valeur est de 2.43 n/fission.

$\frac{\bar{\phi}_u}{\phi_{\text{mod}}}$ - le rapport entre le flux moyen dans le combustible et le flux maximal dans le modérateur. Sa valeur est calculée avec un code hétérogène par le Service de Physique Mathématique.

$$\text{On trouve } \frac{\bar{\phi}_u}{\phi_{\text{mod}}} \approx 0.475$$

ϕ_{mod} - flux maximum dans le modérateur.

Le flux dans le modérateur est déterminé à partir de mesures effectuées avec des détecteurs de manganèse. L'activité des détecteurs de manganèse irradiés nus et sous cadmium permet de déterminer le flux de neutrons entre 0 et l'énergie de coupure du cadmium

$$\phi_o^{\text{cd}} = \frac{A_{\text{nu}} - A_{\text{Cd}}}{\sigma_{2200}}$$

A étant l'activité et σ_{2200} la section efficace d'activation du manganèse à 2200 m/s.

Dans les expériences réalisées nous avons trouvé

$$\phi_o^{\text{Cd}} = 0.98 \times 10^8 \text{ n/cm}^2 \cdot \text{s}$$

Il s'agit de déterminer le flux total

$$\phi = v_o \int_0^\infty n(v) dv \text{ à partir de } \phi_o^{\text{Cd}}$$

On a (10)

$$\phi = \phi_o^{\text{cd}} \frac{RCd \ 1/v}{RCd \ 1/v - 1}$$

$RCd \ 1/v$ étant le rapport cadmium d'un détecteur en $1/v$. Il est donné par

$$RCd \ 1/v = \frac{1}{r} \sqrt{\frac{\pi}{4}} \sqrt{\frac{E_{\text{Cd}}}{KT}}$$

r - indice du spectre. Dans le modérateur sa valeur est de 0.03

E_{Cd} - l'énergie de coupure du cadmium

On trouve

$$RCd \ 1/v = 77$$

En conséquence on a

$$\phi = 0.99 \times 10^8 \text{ n/cm}^2/\text{s} \text{ et}$$

$$S_v = 2.18 \times 10^7 \text{ n/cm}^3/\text{s}$$

La source par cm de barreau est :

$$S = 1.45 \times 10^8 \text{ n/cm de barreau/s}$$

ANNEXE IV - 1

RESULTATS EXPERIMENTAUX ET CALCULES POUR LA STRUCTURE FINE
 PUISSANCE DES SOURCES 1.45×10^8 n/cm de barreau central/S

Distance en mm	ϕ n/cm ² /S.			
	P. Expé- rimental	P. Calculé	Rh. Expé- rimental	Rh. Calculé
15	1.41×10^7	2.39×10^7	1.94×10^7	2.74×10^7
20	1.25	1.95	1.45	2.24
25	9.62×10^6	1.37	1.08	1.57
30	8.99	9.34×10^6	9.43×10^6	1.07
35	7.11	7.73	7.63	8.75×10^6
40	6.10	6.70	6.40	7.50
45	5.78	5.85	6.20	6.50
50	5.20	5.25	5.30	5.80
55	4.72	4.81	4.84	5.20
60	4.33	4.51	4.22	4.78
65	4.13	4.08	4.18	4.25
70	3.93	3.76	3.67	3.81
75	3.68	3.61	3.74	3.62
80	3.63	3.48	3.43	3.47
85	3.60	3.37	3.66	3.34
90	3.66	3.20	2.93	3.16
95	3.31	3.16	3.12	3.10
100	3.31	3.10	2.99	3.03
115	3.27	3.00	3.13	2.89
120	3.31	3.00	2.91	2.89
135	3.50	3.05	3.05	2.96
140	3.21	3.10	3.05	3.03

ANNE IV - 2

RESULTATS EXPERIMENTAUX ET CALCULES POUR LA STRUCTURE FINE
 EN SILICIUM

Distance en mm	ϕ neutrons/cm ² /s		Distance en mm	ϕ neutrons/cm ² /s	
	Si expérimental	Si calculé		Si experimental	Si calculé
15	2.44×10^7	3.12×10^7	70	5.28×10^6	4.75×10^6
20	1.85	2.58	75	5.39	4.53
25	1.44	1.85	80	4.96	4.32
30	1.28	1.30	85	4.94	4.15
35	1.04	1.07	90	4.92	3.94
40	9.23×10^6	9.22×10^6	95	5.13	3.87
45	8.39	8.03	100	4.31	3.76
50	7.03	7.18	115	4.57	3.57
55	6.90	6.47	120	4.50	3.57
60	5.94	5.97	135	4.84	3.66
65	5.65	5.30	140	4.21	3.76

ANNEXE V

RESULTATS EXPERIMENTAUX ET CALCULES POUR LE REFLECTEUR LATERAL

Puissance de sources 1.45×10^8 n/cm de barreau central/S.

Distance en mm	ϕ n/cm ² /S.			
	Canal U P. Expérimental	Canal U P. Calculé	Canal D P. Expérimental	Canal D P. Calculé
510	3.31×10^6	3.32×10^6	2.50×10^6	2.59×10^6
680	2.62	2.79	2.14	2.17
850	2.15	2.16	1.57	1.67
987	1.78	2.02	1.14	1.19
1060	4.17×10^5	4.19×10^5	4.36×10^5	4.68×10^5
1090	2.66	3.22	2.77	3.09
1120	1.72	2.14	1.92	2.04
1195	6.79×10^4	7.85×10^4	6.47×10^4	8.09×10^4
1225	4.31	5.25		5.10
1250	3.20	3.75	3.05	3.87
1260	-		2.95	
1280	2.02	2.64	1.77	2.64

