



HAL
open science

Echauffement des bobines supraconductrices de SISSI par le rayonnement neutronique

E. Baron, L. Bianchi, C. Grunberg, A. Joubert, J. Dural, F. Levesque, D.
Lelievre, J.M. Ramillon

► **To cite this version:**

E. Baron, L. Bianchi, C. Grunberg, A. Joubert, J. Dural, et al.. Echauffement des bobines supraconductrices de SISSI par le rayonnement neutronique. 1992, pp.31. in2p3-00675550

HAL Id: in2p3-00675550

<https://in2p3.hal.science/in2p3-00675550v1>

Submitted on 1 Mar 2012

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

GRAND ACCELERATEUR NATIONAL D'IONS LOURDS

GANIL

ECHAUFFEMENT DES BOBINES

SUPRACONDUCTRICES DE SISSI

PAR LE RAYONNEMENT NEUTRONIQUE

E. BARON, L. BIANCHI, C. GRUNBERG, A. JOUBERT (GANIL)
J. DURAL, F. LEVESQUE, D. LELIEVRE, J.M. RAMILLON (CIRIL)

GANIL R 92-01

Laboratoire commun CEA / DSM - CNRS / IN²P³

SECTEUR DEVELOPPEMENT
GANIL 92/Dév/03

Le 10/01/1992

ECHAUFFEMENT DES BOBINES
SUPRACONDUCTRICES DE SISSI
PAR LE RAYONNEMENT NEUTRONIQUE

E. BARON, L. BIANCHI, C. GRUNBERG, A. JOUBERT (GANIL)
J. DURAL, F. LEVESQUE, D. LELIEVRE, J.M. RAMILLON (CIRIL)

GANIL R 92-01

RESUME

La puissance déposée dans un élément supraconducteur par le flux de neutrons issu d'une cible bombardée par un faisceau d'ions ne doit pas être supérieure à la capacité frigorifique du cryogénérateur. Ce problème s'est posé pour le projet SISSI, en cours de réalisation actuellement à GANIL. Il s'agit d'un dispositif destiné à générer et à collecter de façon optimale les ions radioactifs produits par interaction d'un faisceau intense d'ions lourds avec une cible solide ; la focalisation du faisceau primaire et la collection du faisceau secondaire sont assurées par deux solénoïdes supraconducteurs entre lesquels la cible est placée.

On expose ici les calculs préliminaires qui ont donné une estimation de la puissance déposée dans les enroulements par le flux de neutrons émis ; ces calculs ont porté sur les interactions entre des faisceaux de ^{12}C et de ^{20}Ne et des cibles minces ou épaisses de carbone. Par ailleurs, une maquette a été élaborée pour faire une mesure calorimétrique du phénomène, et aussi pour estimer l'atténuation du rayonnement neutronique par des écrans constitués de matériaux divers à des fins de blindage des parties sensibles du dispositif.

Les résultats expérimentaux pour ^{12}C , ^{14}N , ^{20}Ne et ^{36}Ar bombardant des cibles épaisses de graphite et de tantale sont rapportés, ainsi que les mesures d'atténuation par Al, Cu, Cd, Pb, plexiglass et un composé de bore. Enfin, on montre que la puissance neutronique déposée dans l'hélium liquide est négligeable.

TABLE DES MATIERES

- 1. INTRODUCTION**
- 2. APPROCHE THEORIQUE DU PROBLEME**
 - 2.1. ESTIMATION DU SPECTRE DE NEUTRONS (CIBLE MINCE)
 - 2.2. CAS DES CIBLES EPAISSES
 - 2.3. ESTIMATION DE L'ABSORPTION PAR LE SOLENOIDE
 - 2.4. RESULTATS
- 3. MESURES D'ABSORPTION**
 - 3.1. PRINCIPES DE BASE
 - 3.2. DISPOSITIF EXPERIMENTAL
 - 3.3. PROCEDURE
 - 3.4. CORRECTIONS DES MESURES
 - 3.5. MESURES D'ATTENUATION
- 4. RESULTATS DES MESURES ET APPLICATION AU SOLENOIDE REEL**
 - 4.1. RESULTATS SUR MAQUETTE ET COMPARAISON AVEC LES CALCULS
 - 4.2. EXTRAPOLATION AU SOLENOIDE REEL
 - 4.3. MESURES D'ATTENUATION PAR DIFFERENTS MATERIAUX
 - 4.4. METHODE DE BLINDAGE DU SOLENOIDE
 - 4.5. MESURES D'ABSORPTION PAR L'HELIUM LIQUIDE
 - 4.6. REMARQUE RELATIVE AUX GAMMAS
- 5. CONCLUSION**

REFERENCES

1. INTRODUCTION

SISSI (Source d'Ions Secondaires à Supraconducteurs Intense (1,2)) est un instrument destiné à produire des ions radioactifs et à en assurer une transmission maximale dans les lignes de faisceaux du GANIL. Il est essentiellement constitué d'une cible placée entre deux solénoïdes supraconducteurs (figure 1) ; la lentille amont focalise un faisceau primaire d'ions lourds rapides sur la cible qui génère des ions radioactifs, et ceux-ci sont repris par la lentille aval. Les deux solénoïdes ont une très forte convergence de façon à former un faisceau de très petit diamètre au point d'interaction et à collecter les produits de réaction dans un angle solide maximal. Ces courtes focales, compte-tenu des énergies cinétiques élevées mises en jeu, impliquent des champs magnétiques de l'ordre de 11 teslas et par conséquent l'utilisation d'enroulements supraconducteurs (NbTi et Nb₃Sn). Un système cryogénique satellite produisant un bain d'hélium liquide assure le refroidissement et le maintien à 4,6K des bobinages logés dans deux cryostats. Pour des raisons de coût et d'inaccessibilité du dispositif lorsque l'accélérateur est en fonctionnement, le cryogénérateur est un réfrigérateur en circuit fermé dont la capacité frigorifique est de 3,5 watts ; compte-tenu des pertes thermiques propres au système, on estime à 1 watt la marge admissible pour les pertes par absorption d'énergie de rayonnements divers en provenance de la cible.

Les faisceaux du GANIL, limités pour le présent à une puissance maximale de 400 W, mais qui pourront atteindre 10 kW dans un futur proche, engendrent par interaction avec la cible (outre les ions radioactifs, objets des expériences), des neutrons, des gammas, des particules chargées stables et de la chaleur, tous rayonnements susceptibles de déposer de l'énergie dans les enroulements ou dans les parties froides voisines. Dans ce qui suit, nous ne parlerons pas de la protection contre la chaleur ou les particules chargées, ces problèmes étant traités par ailleurs au moyen de techniques bien connues.

Le problème de l'échauffement par les neutrons n'est pas simple à traiter, car on ne connaît pas de façon précise la structure spatiale et énergétique du spectre émis dans les interactions des ions incidents avec les atomes de la cible ; quantitativement, le problème comporte deux volets selon que l'on utilise une cible d'épaisseur juste suffisante pour créer les ions secondaires (100 à 200 mg/cm²) ou une cible épaisse qui permettrait en plus d'ajuster la rigidité magnétique de ces ions à celle de la ligne du faisceau, voire de stopper complètement le faisceau primaire. De plus, on ne dispose que de méthodes très approximatives pour calculer la façon dont l'énergie de ces neutrons est absorbée dans les matériaux environnants. Cette approche théorique du problème fait l'objet du chapitre 2.

Compte-tenu de l'étroitesse de la fourchette de puissance frigorifique disponible, des mesures étaient nécessaires ; elles ont été rendues possibles, avec les faisceaux actuels du GANIL et une maquette de solénoïde en cuivre, grâce à une méthode calorimétrique originale basée sur les propriétés thermiques de ce métal à basse température. La description du montage expérimental et de la méthode est faite au chapitre 3.

Les mesures de puissance neutronique absorbée par le cuivre de la maquette ont toutes été faites à 95 MeV/nucléon pour des puissances de faisceau voisines de 400 watts ; des cibles épaisses (c'est-à-dire d'épaisseur au moins égale au parcours) de graphite et de tantale ont été bombardées par ¹²C, ¹⁴N, ²⁰Ne et ³⁶Ar. Les résultats sont présentés dans le chapitre 4 et comparés aux prévisions pour les deux cas calculés (C sur C et Ne sur C) ; ils sont ensuite extrapolés à la fois à la puissance à venir des faisceaux GANIL, à la géométrie réelle du cryostat et des enroulements et au cas des cibles minces. Enfin, on élabore une méthode de blindage à partir des résultats de mesures d'atténuation du rayonnement neutronique par les matériaux utilisés dans ces tests : Al, Cu, Cd, Pb, plexiglass et un composé de bore.

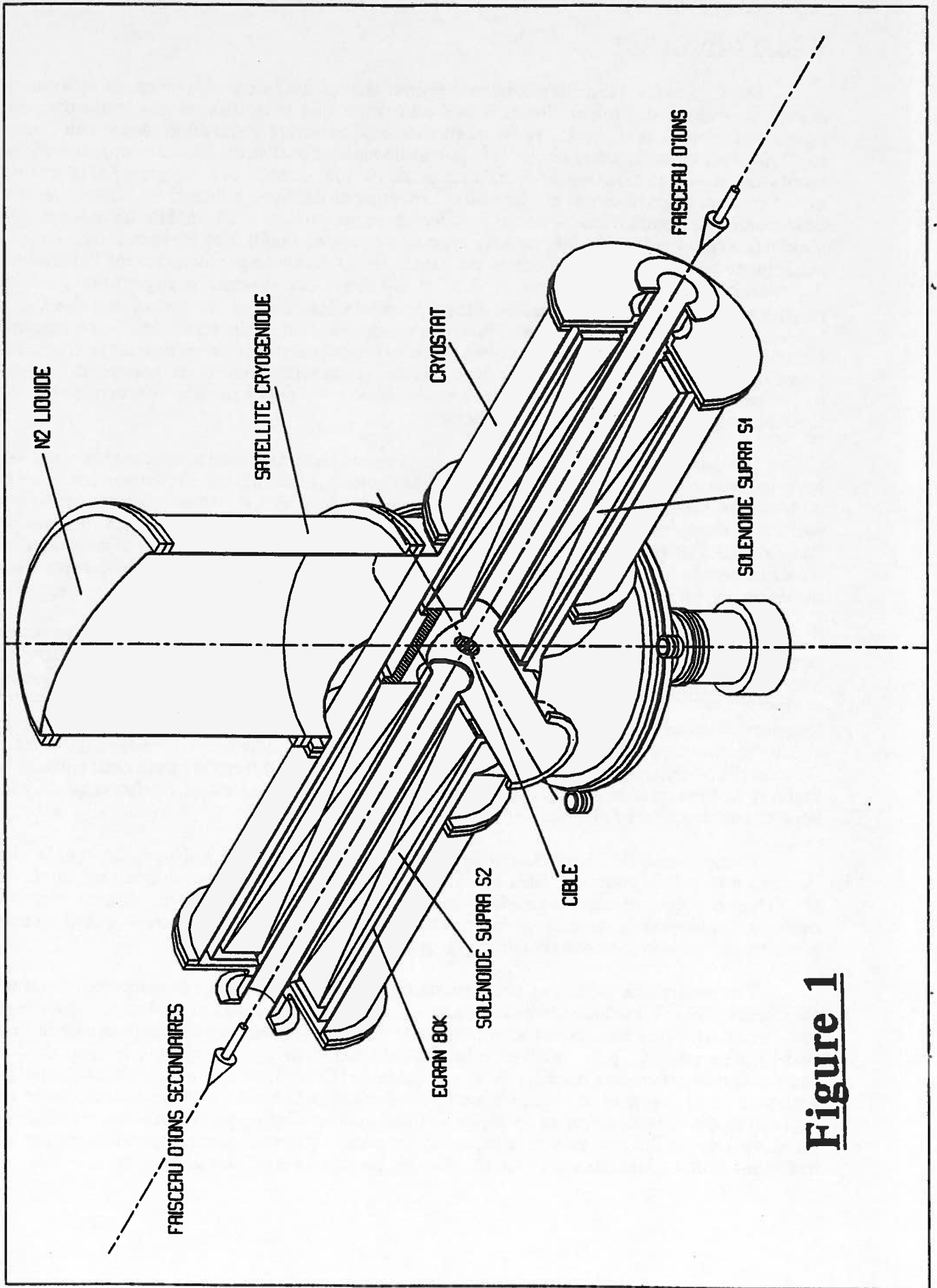


Figure 1

2. APPROCHE THEORIQUE DU PROBLEME

Un calcul de la puissance neutronique déposée dans un obstacle matériel disposé à proximité de la cible suppose la connaissance de :

- la distribution spatiale et en énergie des neutrons,
- leur ralentissement dans ce matériau.

2.1. ESTIMATION DU SPECTRE DE NEUTRONS (CIBLE MINCE)

Dans l'interaction faisceau-cible, les neutrons sont émis avec une distribution spatiale et en énergie qu'il s'agit d'estimer en premier lieu ; elle dépend naturellement de la section efficace différentielle de production $\sigma'' = d^2\sigma/d\Omega dE$ ($d\Omega$ = angle solide élémentaire autour de l'azimut d'émission θ et E = énergie du neutron) pour le couple cible-projectile considéré, de l'énergie W des ions et de l'épaisseur de la cible, pourvu que cette dernière soit suffisamment mince pour que la vitesse du projectile puisse être considérée comme constante. La quantité σ'' est en réalité une section efficace "effective" en ce sens qu'elle recouvre plusieurs processus de création de neutrons : cascade nucléaire et évaporation de la cible et du projectile (il ne faudra donc pas s'étonner si, en intégrant sur tout l'espace et toute la gamme d'énergie, la "section efficace" σ'' obtenue est supérieure à la section efficace géométrique de la collision).

Depuis les mesures faites au CERN par Tuyn et al.⁽³⁾, et plus récemment à GANIL, on sait que la production de ces neutrons secondaires est à peu près correctement prédite par le code HIC1 de Bertini et al.⁽⁴⁾. Un certain nombre de couples projectile-cible ont été détaillés à l'aide de ce code par F. Hubert⁽⁵⁾ dans la gamme de 60 à 100 MeV/nucléon ; de ces informations, nous avons dégagé deux cas : C sur C et Ne sur C à 95 MeV/nucléon, qu'il nous était par ailleurs facile de mettre en oeuvre expérimentalement. Par interpolation sur les énergies et les angles, on a tiré un réseau de $\sigma''(\theta, E)$ pour chacun de ces deux couples avec un pas en énergie $\delta E = 10$ MeV et un pas angulaire $\delta\theta = 10^\circ$ (figure 2). A partir de là, il est facile de calculer la distribution des neutrons par tranches d'énergie :

$$(1) \quad \frac{dn}{dE}(E) = \frac{N \cdot e}{A_c} \int \sigma''(\theta, E) d\Omega$$

où N est le nombre d'Avogadro, A_c le numéro atomique et e l'épaisseur de la cible, soit :

$$(2) \quad \frac{dn}{dE}(E_i) = \frac{N \cdot e}{A_c} \sum_j 2\pi (\cos \theta_{j-1} - \cos \theta_j) \sigma''(\theta_j, E_i)$$

L'intégration sur l'énergie donne le nombre moyen n_t de neutrons par ion :

$$(3) \quad n_t = \delta E \sum_i \frac{dn}{dE}(E_i)$$

et l'énergie moyenne des neutrons du spectre vaut :

$$(4) \quad \bar{E} = \sum_i \frac{E_{i-1} + E_i}{2} \frac{1}{n_t} \frac{dn}{dE}(E_i) \delta E$$

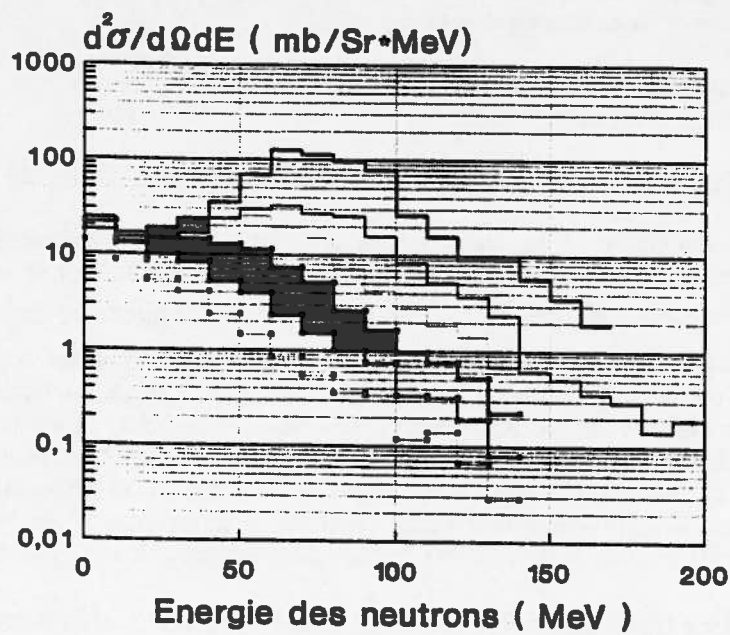


Figure 2a

Production de neutrons rapides
 Projectile C , cible C (mince)
 Energie : 95 MeV/nucléon

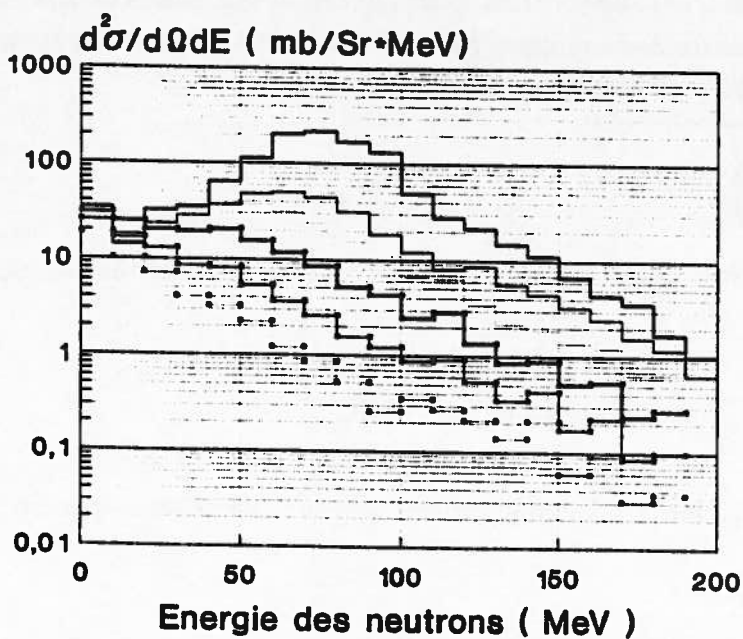


Figure 2b

Production de neutrons rapides
 Projectile Ne , cible C (mince)
 Energie : 95 MeV/nucléon

avec : $\delta E = E_i - E_{i-1}$

On en déduit la puissance totale du faisceau de neutrons :

$$(5) \quad P \text{ (watts)} = 1,6 \cdot 10^{-13} \cdot I(\text{p.p.s.}) \cdot \bar{E}(\text{MeV}) \cdot n_t$$

2.2. CAS DES CIBLES EPAISSES

Pour une cible d'épaisseur égale au parcours R des ions incidents, on calcule d'abord la section efficace moyenne en intégrant sur l'épaisseur x :

$$(6) \quad \bar{\sigma}''(\theta, E) = \frac{1}{R} \int_0^R \sigma''(\theta, E, W) dx$$

soit, en découpant l'énergie W du faisceau d'ions en intervalles égaux δW correspondant chacun à une tranche d'épaisseur δx_k :

$$(6') \quad \bar{\sigma}''(\theta_i, E_j) = \frac{1}{R} \sum_k \sigma''(\theta_i, E_j, W_k) \delta x_k$$

Pour la suite, on procède comme au paragraphe précédent, en remplaçant bien entendu l'épaisseur e par R dans (2). La figure 3 représente les variations de la section efficace différentielle pour ^{12}C et ^{20}Ne à 95 MeV/nucléon pour une cible de carbone dont l'épaisseur est égale au parcours.

Les quantités n_t , \bar{E} et P sont données dans les trois premières lignes du tableau 1 pour les interactions d'un faisceau de 10 kW de carbone ou de néon à 95 MeV/nucléon avec une cible de carbone épaisse ou mince (par convention, une cible est dite "mince" lorsqu'elle absorbe 10% de la puissance du faisceau incident, soit 1 kW dans notre cas). Au vu des chiffres de puissance totale du flux de neutrons émis (quelques dizaines à une centaine de watts), on voit qu'il est justifié de s'interroger sur la fraction de cette puissance qui risque d'être absorbée par les parties froides du système.

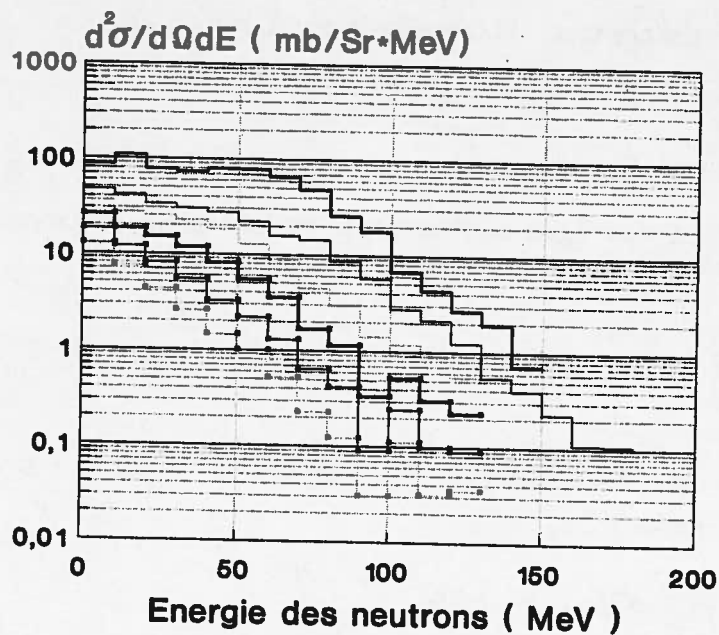
Remarque :

Aux énergies voisines de 100 MeV/nucléon, l'émission des neutrons se fait presque exclusivement vers l'avant, qu'il s'agisse d'une cible mince ou épaisse ; en conséquence, nous ne nous intéresserons dans ce qui suit qu'au solénoïde aval de SISSI.

2.3. ESTIMATION DE L'ABSORPTION PAR LE SOLENOÏDE

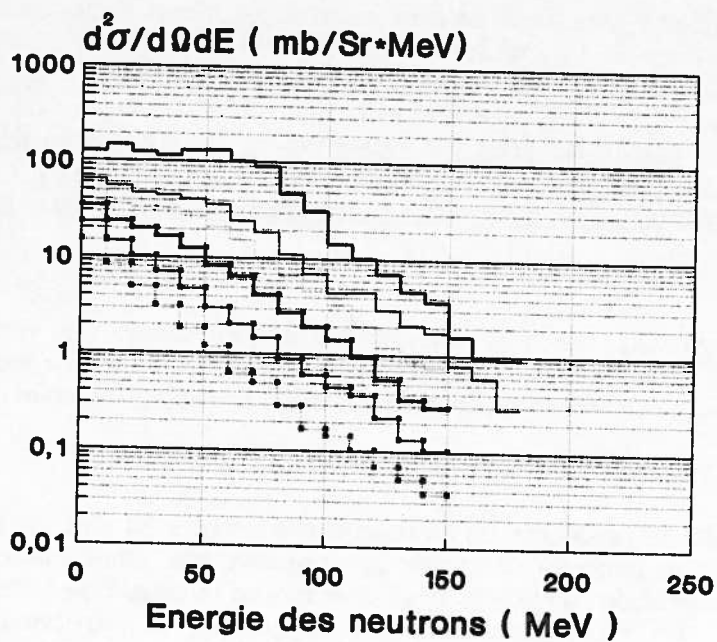
Nous avons traité le problème de l'absorption d'énergie du flux de neutrons par la méthode utilisée classiquement en radioprotection : pourvu que l'on connaisse la longueur d'atténuation $\lambda(E_i)$ des neutrons d'énergie E_i dans le matériau considéré (c'est-à-dire ici, les matériaux constituant les enroulements supraconducteurs et leur voisinage à basse température), il suffit de découper l'objet en secteurs angulaires (figure 4) ayant chacun une longueur apparente moyenne $L(\theta)$ et d'affecter au nombre élémentaire de neutrons $d^2n(\theta_j, E_i)/d\Omega dE$ émis dans la direction θ avec une énergie E un facteur d'atténuation :

$$\exp \{ - L(\theta_j) / \lambda(E_i) \}$$



Production de neutrons rapides
Projectile C , cible C (épaisse)
Energie : 95 MeV/nucléon

Figure 3a



Production de neutrons rapides
Projectile Ne , cible C (épaisse)
Energie : 95 MeV/nucléon

Figure 3b

	C--> C mince	C--> C épaisse	Ne--> C mince	Ne--> C épaisse	
nt/ion	0,095	0,505	0,087	0,429	} directement derrière la cible
\bar{E} (MeV)	43,0	29,8	48,3	34,1	
P(watts)	35,8	132,3	22,0	76,9	
n't/ion	0,045	0,222	0,040	0,180	} après absorption par solénoïde
\bar{E}' (MeV)	39,0	27,9	45,5	33,4	
P'(watts)	15,5	54,4	9,6	31,5	
δP (watts)	20,3	77,9	12,5	45,4	

N.B. L'épaisseur des cibles "minces" correspond à une puissance absorbée de 1 kW.

TABLEAU 1.

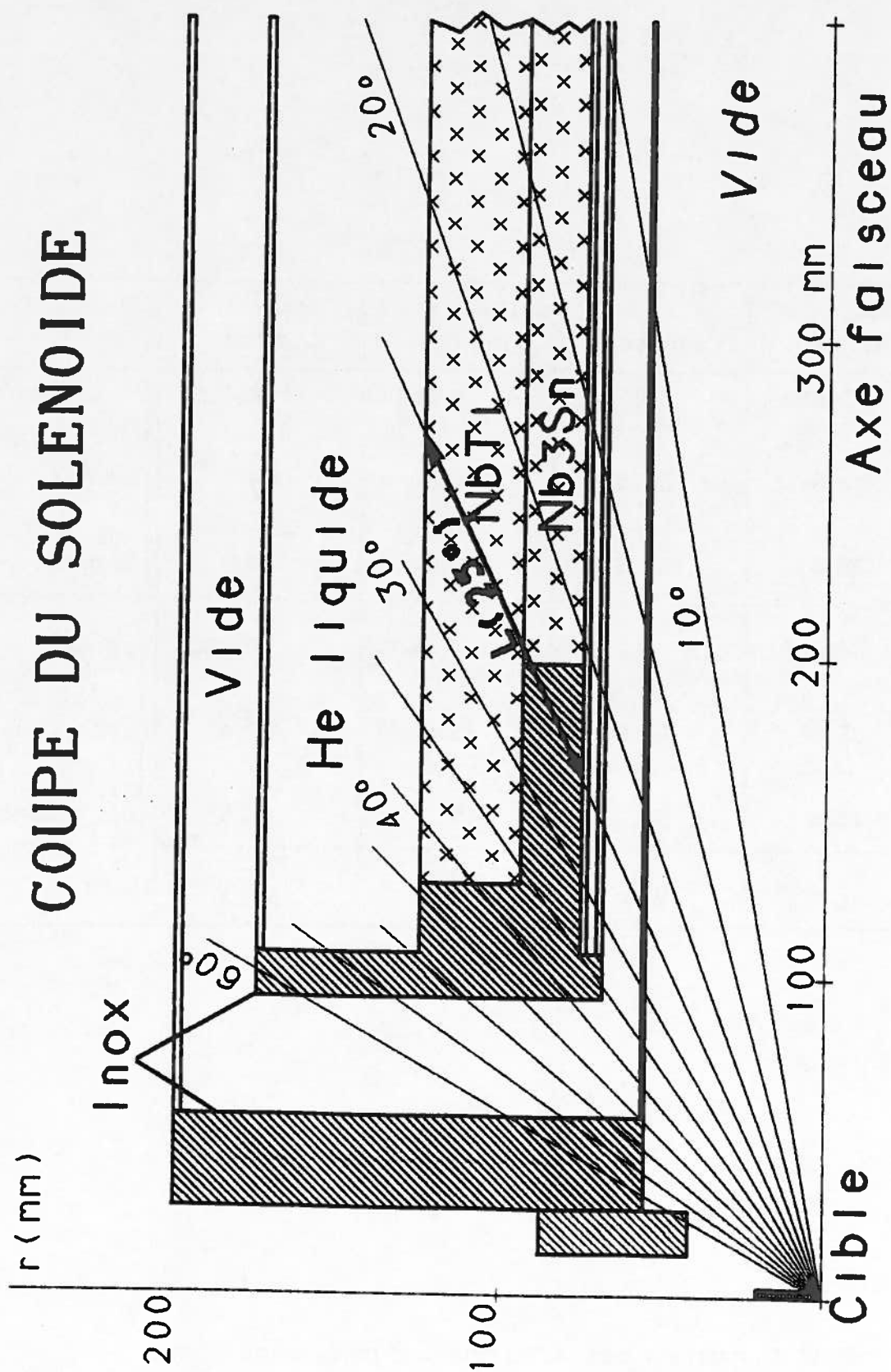


FIGURE 4

soit :

$$(7) \quad \frac{d^2 n'}{d\Omega dE}(\theta_j, E_i) = \frac{N \cdot e}{A_c} \cdot \frac{d^2 \sigma}{d\Omega dE}(\theta_j, E_i) \cdot \exp\left\{-\frac{L(\theta_j)}{\lambda(E_i)}\right\}$$

Les sommations (1) à (4) sont alors à nouveau effectuées pour trouver le nombre moyen de neutrons par ion incident n'_t *subsistant derrière l'absorbeur* ainsi que l'énergie moyenne \bar{E}' correspondante, puis par la formule (5) on calcule la puissance résiduelle P' , d'où la puissance absorbée : $\delta P = P - P'$.

Les longueurs d'atténuation des neutrons en fonction de leur énergie ne sont connues que dans des matériaux comme le béton, le fer ou l'aluminium, et encore de façon assez approchée. Nous avons considéré ici que le bobinage (cuivre, NbTi et Nb₃Sn) et son environnement immédiat (inox) sont équivalents à du fer, et nous avons retenu le calcul effectué par M. Langevin⁽⁶⁾ à partir des sections efficaces inélastiques⁽⁷⁾ ; la figure 5 illustre le résultat de ce calcul qui recoupe par ailleurs les rares données expérimentales.

2.4. RESULTATS

Nous avons écrit un programme qui prend en compte la loi de variation de la section efficace différentielle pour le couple projectile-cible considéré, l'épaisseur de la cible, la géométrie de l'absorbeur et la loi d'atténuation, et qui calcule les quantités n'_t , \bar{E}' et P' ainsi que δP ; les résultats sont consignés dans le tableau 1 : selon que la cible est mince ou épaisse, la puissance neutronique déposée serait d'une dizaine à plusieurs dizaines de watts pour un faisceau de 10 kW.

Les hypothèses qui sont à la base de ce calcul sont criticables à plusieurs égards :

- incertitude sur les résultats du code de Bertini,
- imprécision sur les longueurs d'atténuation,
- impasse faite sur les neutrons thermiques et épithermiques, sur les gammas et sur l'absorption par l'hélium liquide.

Néanmoins, ces chiffres sont suffisamment impressionnants pour justifier un contrôle expérimental.

3. MESURES D'ABSORPTION

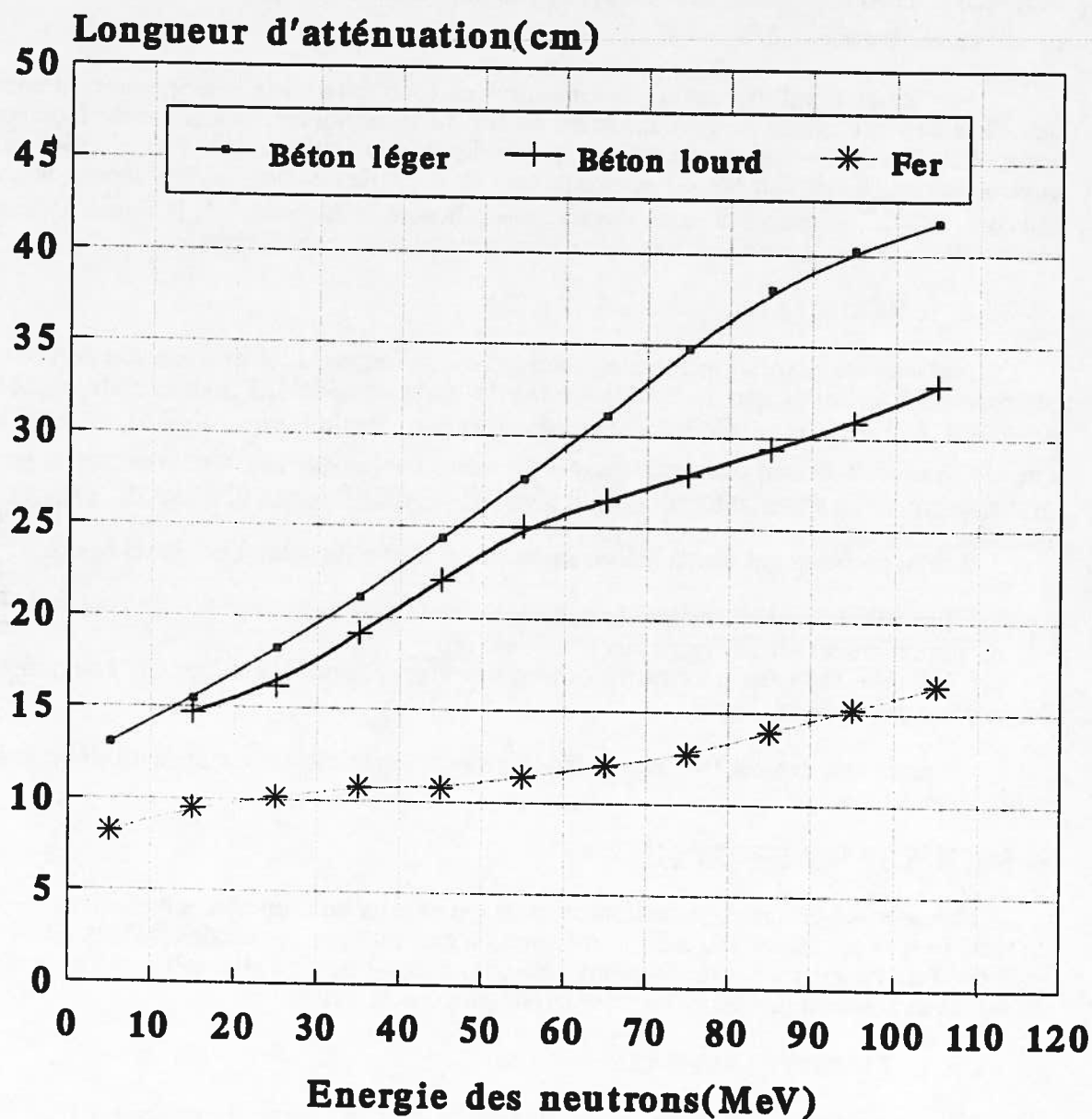
La quantité qui importe finalement pour garantir un bon fonctionnement des solénoïdes de SISSI est la puissance déposée sous forme de chaleur dans les parties froides ; il est donc logique d'envisager une mesure calorimétrique, à condition qu'elle soit praticable avec la puissance de faisceau de 400 W dont le GANIL dispose actuellement.

3.1. PRINCIPES DE BASE

En ramenant à 400 watts les valeurs de la dernière ligne du tableau 1 (établi pour 10 kW), on réalise qu'avec une maquette de solénoïde à l'échelle 1, il faudrait mesurer une puissance de l'ordre de 2 à 3 watts qui serait par ailleurs répartie dans un cylindre de 80 cm de long et de 30 cm de diamètre. Même en travaillant sous vide et à basse température, cette mesure serait difficile et coûteuse, du fait des dimensions et du poids du système.

Pour simplifier le problème et faciliter sa résolution, on a imaginé le procédé suivant :

Longueurs d'atténuation des neutrons dans divers matériaux en fonction de l'énergie(*).



(*) Valeurs recalculées par M. Langevin à partir des σ inélastiques (BNL 325, 1976)

Figure 5

- en se basant sur le fait établi qu'au-delà de l'aluminium, la longueur d'atténuation dépend assez peu du numéro atomique des métaux (pour les neutrons d'énergie supérieure à quelques MeV), on peut choisir un matériau unique quelconque entre $Z = 26$ et $Z = 50$ pour simuler les enroulements (Nb_3Sn , $NbTi$ avec 50% de Cu) et l'armature (acier inox) du solénoïde représenté sur la figure 2,

- la capacité calorifique du cuivre étant une fonction fortement décroissante de la température, c'est ce matériau que nous avons retenu : par exemple, à 13K, il faut environ 200 fois moins de chaleur pour élever de 1K la température d'un gramme de cuivre qu'à 300K (figure 6) ; un calcul simpliste, c'est à dire négligeant toutes les pertes thermiques, montre qu'à 13K, une masse de cuivre de 10 kg voit sa température s'élever à la vitesse de 3,2K/minute pour 1 watt déposé,

- avec une telle sensibilité, une maquette à l'échelle 1 (elle aurait un poids de l'ordre de 300 kg), n'est pas nécessaire et on se satisfait d'un modèle réduit d'une dizaine de kilos ; on calcule le facteur d'homothétie (qui n'est pas purement géométrique du fait du paramètre longueur d'atténuation $\lambda(E)$) à l'aide de la méthode théorique du paragraphe précédent appliquée successivement au solénoïde grandeur nature et à la maquette : même si cette méthode ne donne que des résultats approchés en valeur absolue, il est raisonnable de penser que l'erreur est atténuée en valeur relative.

3.2. DISPOSITIF EXPERIMENTAL

Sur ces bases, on a construit le système schématisé sur la figure 7 et constitué de deux éléments principaux :

- la cible, suffisamment épaisse pour arrêter complètement le faisceau primaire, est placée au fond d'un cylindre de Faraday en cuivre refroidi par circulation d'eau ; ce fond est lui-même suffisamment épais (26 mm) pour arrêter toutes les particules chargées secondaires, jusqu'aux protons de 150 MeV. Le cylindre de Faraday sert naturellement à mesurer de façon permanente le courant du faisceau d'ions qui doit rester constant pendant la durée de la mesure,

- la maquette du solénoïde, constituée d'un tore de cuivre placé dans un cryostat dont l'enveloppe extérieure est refroidie à environ 130K par contact avec de l'azote liquide et dont l'enveloppe intérieure canalise un flux réglable d'hélium gazeux ; on peut ainsi régler la température initiale du système dans une gamme qui va de 4K à 20 ou 30K. Un vide secondaire règne entre ces deux enveloppes. Dans le tore sont noyées :

. une résistance au carbone étalonnée de façon très précise pour mesurer la température du cuivre,

. une résistance chauffante NiCr de 160Ω servant soit à réguler la température du bloc à une valeur de consigne, soit à le chauffer avec une puissance ohmique constante.

Le tore repose au fond du cryostat par l'intermédiaire d'un berceau isolant thermique en forme de V afin de minimiser les échanges.

Entre cible et cryostat, on peut intercaler un écran escamotable de 2cm d'épaisseur constitué d'un matériau dont on veut estimer l'absorption vis-à-vis des neutrons, ou bien un écran très mince qui permet de réduire le rayonnement thermique minime du cylindre de Faraday qui risquerait de perturber la température de l'enveloppe extérieure du cryostat. Pour ce dernier point d'ailleurs, une mesure faite avec un thermocouple collé à l'enveloppe révèle qu'il n'y a pas d'élévation de température lorsqu'on envoie le faisceau.

Capacité calorifique du cuivre

(Hdbk of chemistry & physics, ed.86-87)

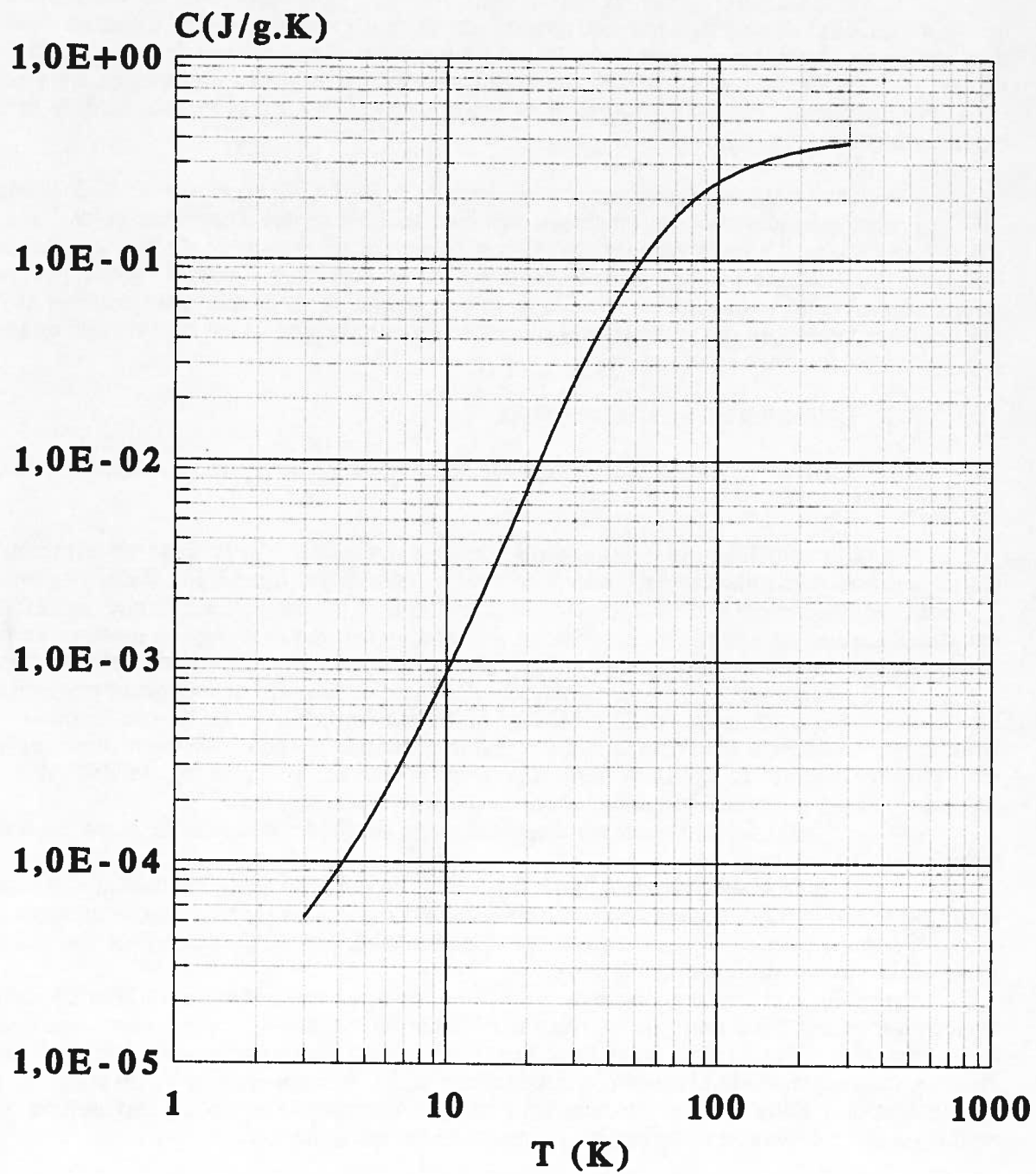
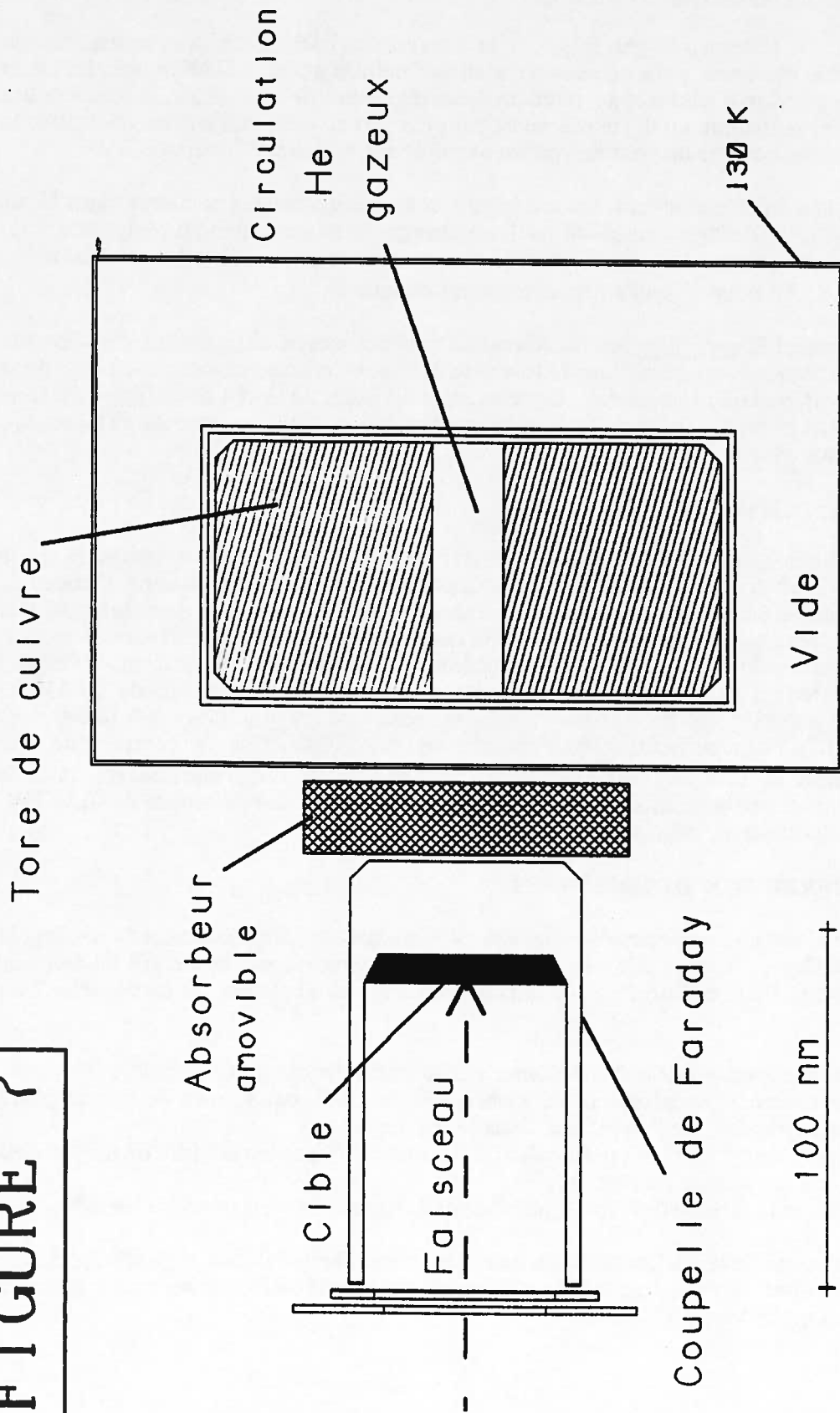


Figure 6

FIGURE 7



DISPOSITIF EXPERIMENTAL

3.3. PROCEDURE

Pour chaque mesure, nous avons utilisé deux méthodes différentes :

a) Méthode de la courbe de température

- d'abord, on enregistre sans faisceau la courbe d'évolution de la température du système en fonction du temps, avec ou sans circulation d'hélium gazeux. Dans le premier cas et après une courte période d'équilibrage, avec un débit de l'ordre de 50 à 60 l/h, la température reste pratiquement constante au 1/10ème de degré près ; avec un débit nul au contraire, la remontée est sensible, comme on peut en voir un exemple sur la figure 8 (courbe n°1).

- ensuite, et avec la même température initiale et un débit d'hélium inchangé (dans le cas illustré par la figure 8, il s'agit d'un débit nul), on enregistre la remontée en température du bloc de cuivre en envoyant un faisceau d'intensité connue et constante sur la cible (courbe n°2) : ici, faisceau de $1,9 \mu\text{Ae}$ d' Ar^{18+} totalement arrêté dans du tantale,

- enfin, on établit sans faisceau un réseau de courbes température-temps encadrant la courbe "avec faisceau" en injectant dans le tore une puissance connue constante à l'aide de la résistance de chauffage NiCr (en général, deux courbes suffisent : n°3 et 4 de la figure 8). Il ne reste plus alors qu'à interpoler (figure 9), à un instant arbitraire, entre les courbes d'étalonnage et la courbe obtenue avec le faisceau.

b) Méthode de régulation de température

Une méthode alternative consiste à utiliser la régulation par l'intermédiaire de la résistance NiCr (160Ω) : en imposant une température constante, on mesure d'abord la puissance Joule délivrée par cette résistance en l'absence de faisceau, puis avec faisceau. La figure 10 montre, pour une autre expérience que le cas précédent, un exemple d'enregistrement de l'évolution au cours du temps de la tension aux bornes et de l'intensité parcourant le circuit : après un certain temps d'oscillation pour atteindre une température stable de $19,6\text{K}$, la puissance Joule vaut $8\text{V} \times 0,05\text{A} = 0,400\text{W}$ sans faisceau et $4,8\text{V} \times 0,030\text{A} = 0,144\text{W}$ avec faisceau, soit une puissance neutronique absorbée de $0,256\text{W}$. Pour l'exemple cité, qui concerne un faisceau de $1,88 \mu\text{Ae}$ de C^{6+} à 95MeV/nuc l'éon totalement arrêté dans une cible de graphite, on a mesuré par la méthode de la courbe de température, une puissance de $0,247\text{W}$, donc en très bon accord avec cette seconde méthode.

3.4. CORRECTION DES MESURES

La figure 11 montre une coupe du système cible-maquette ; il est essentiel de corriger la puissance neutronique déposée dans la maquette de l'absorption par le cuivre du fond du cylindre de Faraday. Pour ce faire, nous avons appliqué le calcul exposé au paragraphe 2 en trois étapes :

- on calcule le spectre de neutrons atténué par le fond du cylindre de Faraday,
- avec ce spectre, on calcule la puissance $\delta P'$ absorbée par le tore de cuivre placé derrière (c'est cette quantité que l'on mesure dans l'expérience),
- on compare ce $\delta P'$ au résultat du calcul d'absorption δP par le seul tore de cuivre sans l'écran constitué par le cylindre de Faraday,
- le résultat de la mesure doit être multiplié par le facteur de correction $K = \delta P / \delta P'$.

Le calcul mené pour les interactions carbone sur carbone et néon sur carbone donne $K = 1,28$ et $1,25$ respectivement ; pour les autres couples projectile-cible, nous avons appliqué systématiquement un facteur $1,25$.

**Evolution de la température du bloc
de cuivre en fonction du temps
Ar 18+, 95 A.MeV 1,9 μ Ae sur Ta épais**

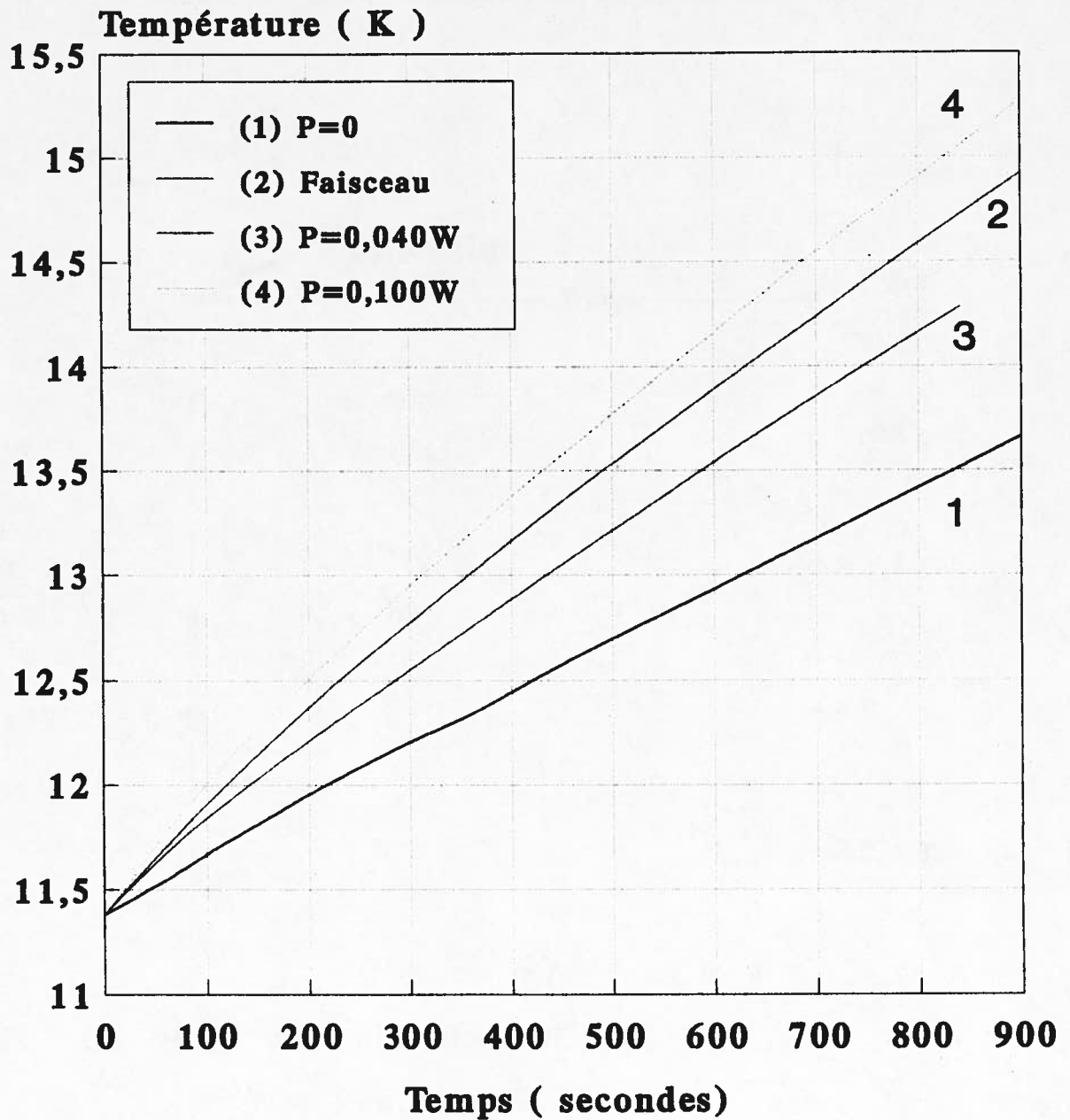


Figure 8

**Interpolation entre les courbes $T=f(P,t)$
de la figure 8 à $t = 840$ s**

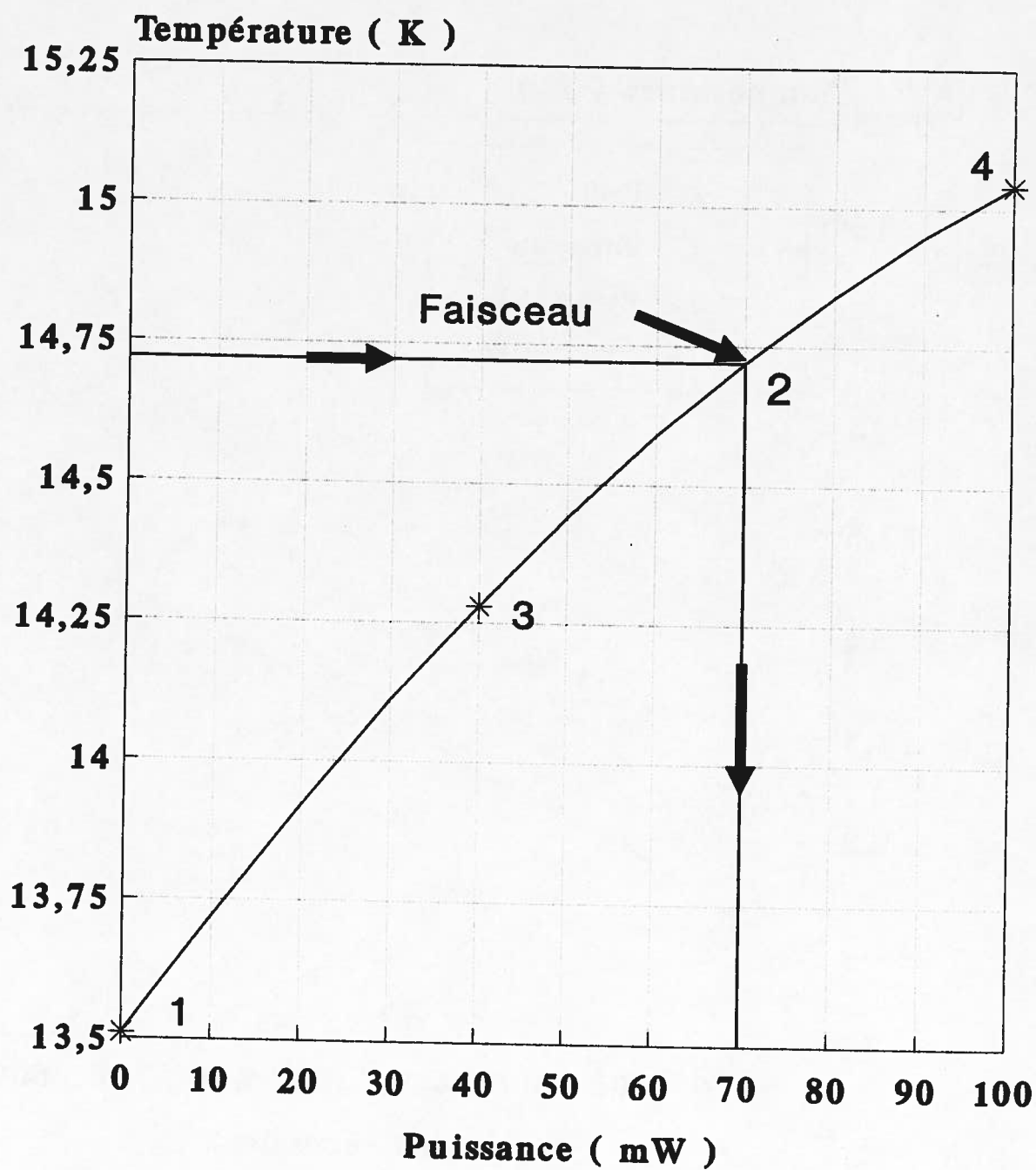


Figure 9

Méthode de régulation de température C 6+,95 A.MeV 1,88 μ Ae sur C épais

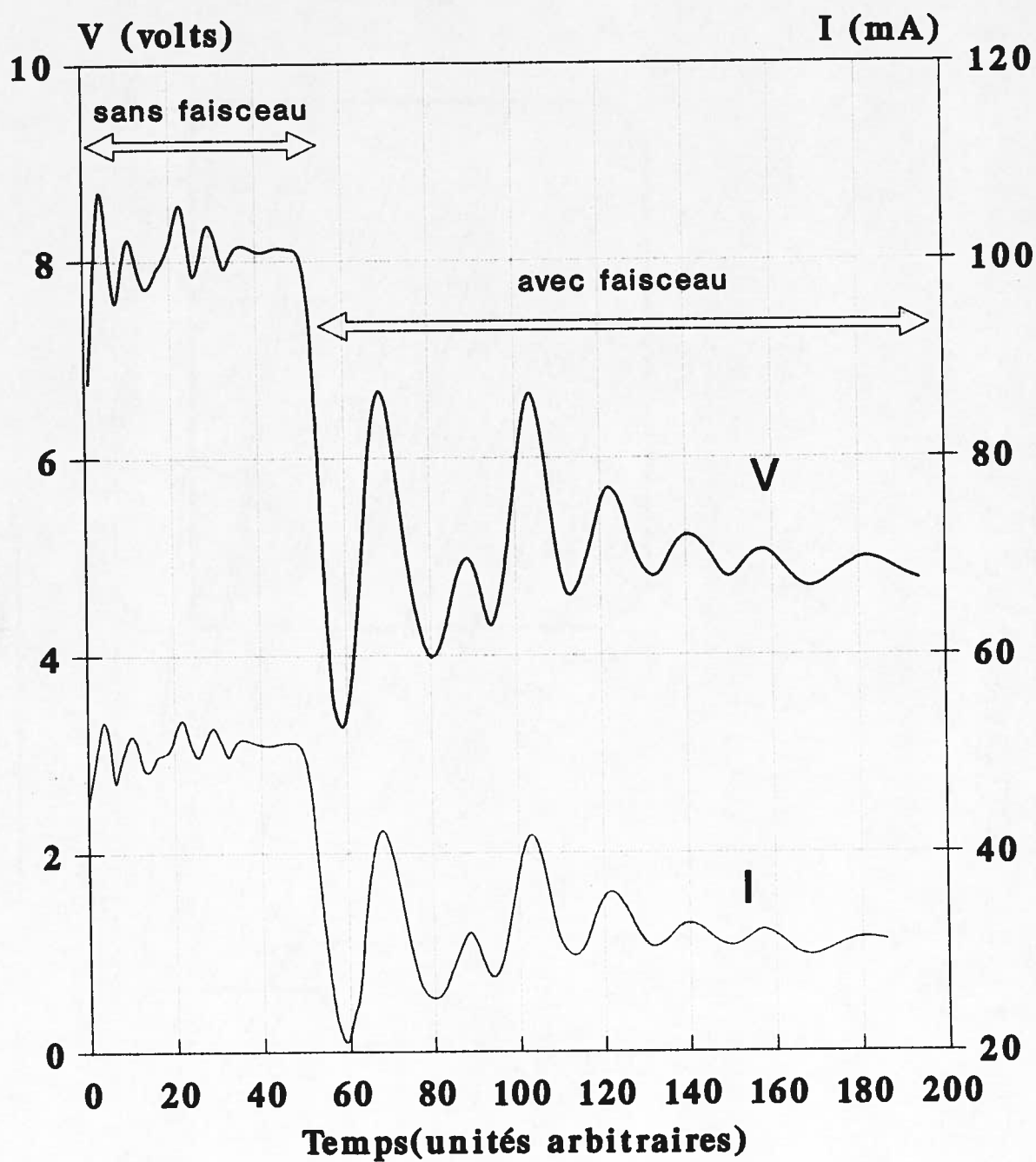


Figure 10

Découpage angulaire
de l'absorbeur et
du tore de cuivre.

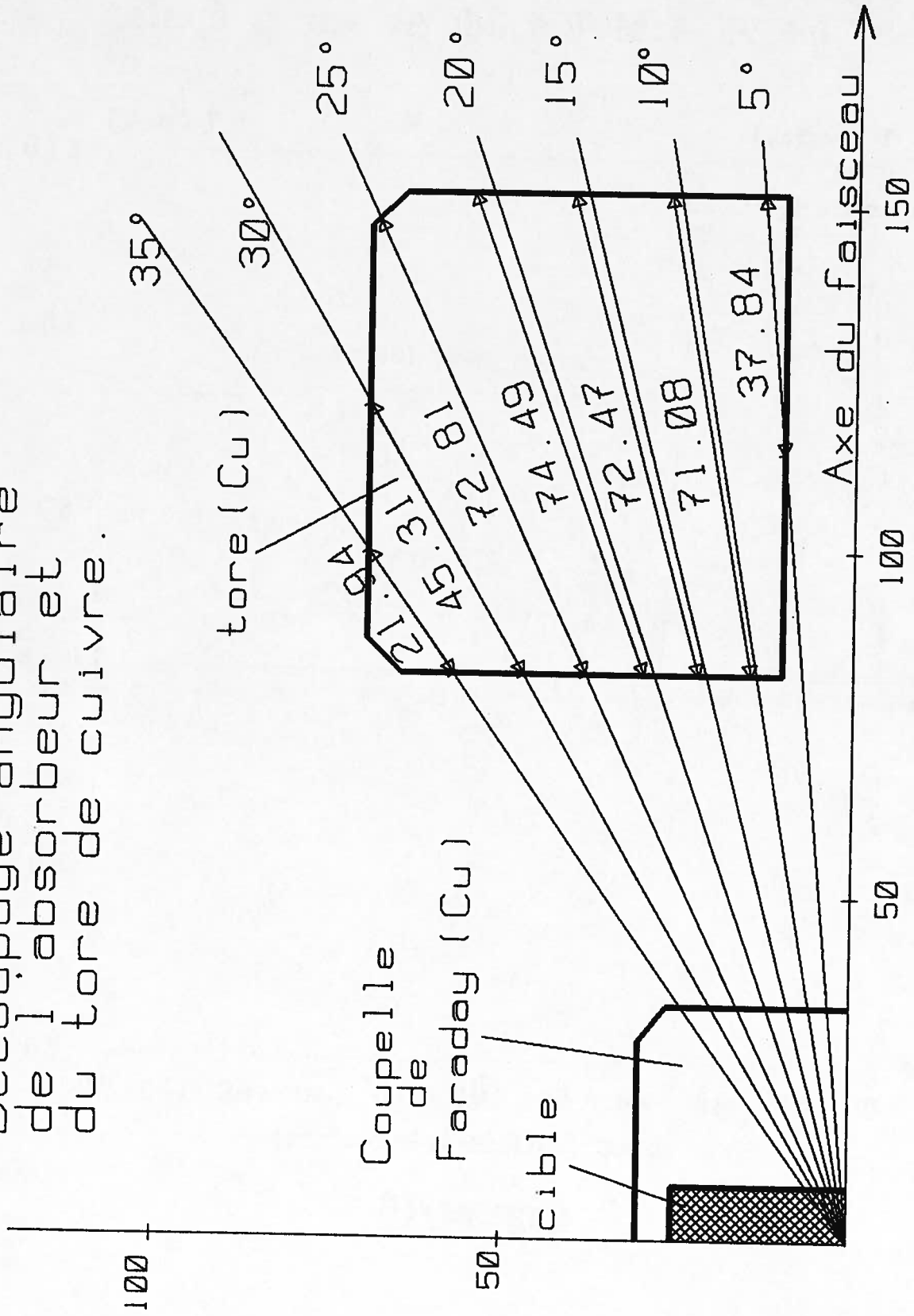


FIGURE 11

(cotes en mm)

3.5. MESURES D'ATTENUATION

Pour évaluer l'effet d'atténuation de puissance neutronique par différents matériaux, on fait une mesure avec un écran de 2 cm d'épaisseur (sauf dans le cas du Cd où 2 à 3 mm suffisent si l'on ne compte que sur la capture des neutrons thermiques) et une mesure sans écran.

4. RESULTATS DES MESURES ET APPLICATION AU SOLENOIDE REEL

4.1. RESULTATS SUR MAQUETTE ET COMPARAISON AVEC LES CALCULS

Les résultats de mesure de la puissance absorbée dans la maquette de cuivre sont exposés dans le tableau 2 et illustrés par la figure 12. Ils sont corrigés de l'absorption par le fond du cylindre de Faraday et normalisés à une puissance de faisceau de 400 W ; tous les faisceaux ont une énergie de 95 MeV/nucléon et sont complètement arrêtés dans la cible. Pour les cas ^{12}C et ^{20}Ne sur cible de carbone, on donne aussi le chiffre calculé par la méthode exposée au paragraphe 2, ainsi que le facteur d'erreur $\delta P_{\text{calculé}}/\delta P_{\text{mesuré}}$ qui dans les deux cas est bien supérieur à l'unité (respectivement 4,5 et 2,4) ; on peut donc être assuré que la puissance neutronique réellement absorbée est de toute façon inférieure à celle fournie par ce calcul, bien que ce dernier soit mené avec une loi d'absorption imprécise et uniquement avec ces neutrons rapides, sans tenir compte des neutrons thermiques et des gammas.

4.2. EXTRAPOLATION AU SOLENOIDE REEL

Pour adapter les résultats de nos mesures à la situation réelle, il faut :

- a) Normaliser à la puissance faisceau de 10 kW au lieu de 400 W (facteur $F_p = 25$).
- b) Déterminer le facteur d'homothétie entre la géométrie vraie et celle de la maquette.

Ce facteur a été tiré de la comparaison entre les calculs des puissances absorbées respectivement dans les deux géométries, qu'il s'agisse d'une cible mince ou d'une cible épaisse ; le tableau 3 indique la valeur des facteurs à appliquer :

- $F_{em} = 0,26$ à $0,27$ pour passer de la cible épaisse à la cible mince,
- $F_{ms} = 1,9$ pour transposer de la géométrie de la maquette à celle du solénoïde.

Pour estimer les puissances neutroniques réellement absorbées dans le solénoïde de SISSI, les résultats des mesures sur maquette (données précédemment dans le tableau 2) sont par conséquent à multiplier par :

- $F_p \times F_{ms} = 47,5$ pour une cible épaisse, et
- $F_p \times F_{ms} \times F_{em} = 12,5$ pour une cible mince,

ce qui est résumé dans le tableau 4.

La figure 13 illustre le cas des cibles minces : il apparait clairement que, même dans cette situation où on limite la puissance faisceau déposée dans la cible et par conséquent la puissance émise sous forme de neutrons, la fraction de cette dernière qui est arrêtée dans le solénoïde est 2 à 5 fois supérieure à la marge admissible de 1 watt dont nous avons parlé au paragraphe 1. Il est donc important de prévoir entre la cible et les parties froides du solénoïde un blindage d'une nature et d'une épaisseur qui restent à déterminer afin d'absorber une fraction de l'énergie du flux neutronique.

Pour des cibles épaisses, le tableau 4 indique que le problème est à peu près trois fois pire.

Interaction	P mesurée (watts)	P calculée (watts)	Facteur d'erreur Pcalc/ Pmes
C --> C	0,366	1,639	4,5
N --> Ta	0,215		
Ne --> C	0,394	0,949	2,4
Ar --> C	0,144		
Ar --> Ta	0,098		

N.B. Toutes les cibles ont une épaisseur égale
ou supérieure au parcours des ions.

TABLEAU 2.

**Puissance neutronique absorbée dans la
maquette de SISSI . Faisceau de 400 W,
95 A.MeV arrêté dans une cible épaisse.**

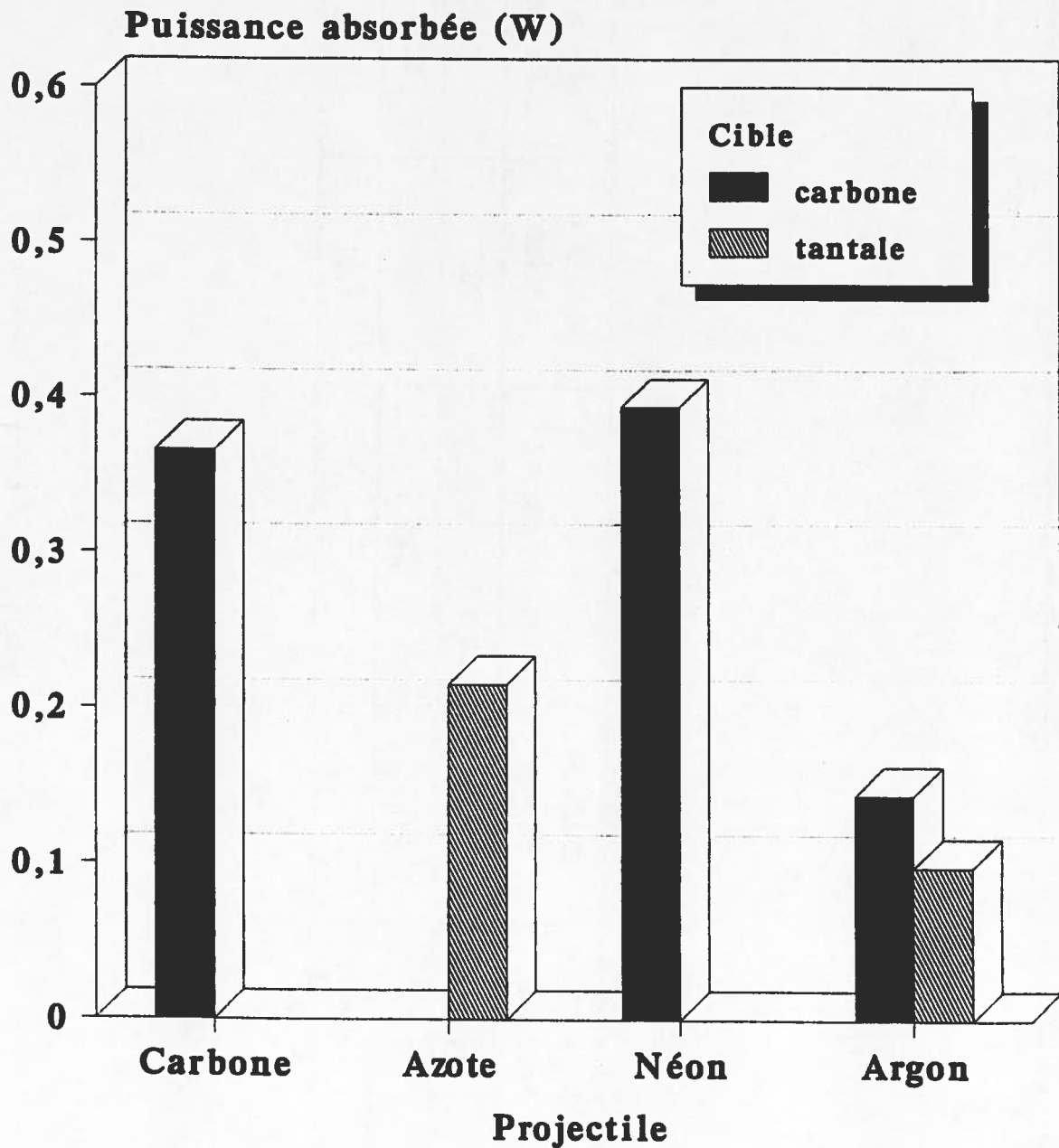


Figure 12

Calcul du facteur : cible mince/cible épaisse
 et du facteur d'homothétie maquette-solénoïde.

	C --> C épaisse	C --> C mince	F mince/épaisse	Ne --> C épaisse	Ne --> C mince	F mince/épaisse
P maquette(W)	41,0			23,7		
P solénoïde(W)	77,9	20,3	0,26	45,4	12,5	0,27
F maq/sol	1,90			1,91		

Projectile	Nature cible	P(W) épaisse	P(W) mince
C	C	17,3	5,2
N	Ta	10,3	2,9
Ne	C	18,8	5,2
Ar	C	6,1	2,0
Ar	Ta	4,2	1,4

Faisceaux de 10 kW à 95 MeV/nucléon.
(les cibles minces absorbent 1 kW de faisceau)

TABLEAU 4

Puissance neutronique absorbée dans le bobinage de SISSI. Faisceau de 10 kW, 95 A.MeV, cible mince arrêtant 1 kW.

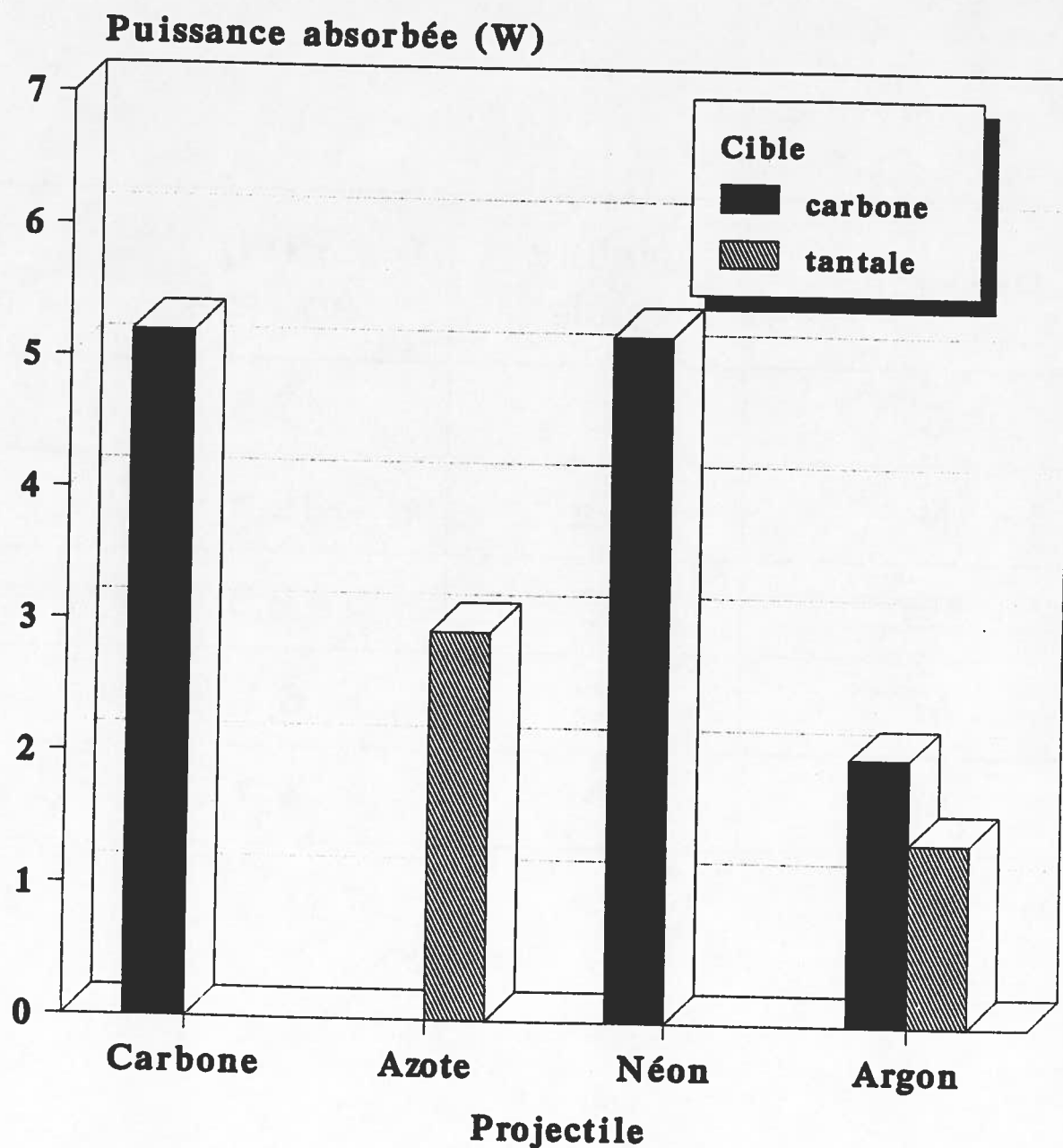


Figure 13

4.3. MESURES D'ATTENUATION PAR DIFFERENTS MATERIAUX

Le tableau 5 résume les résultats bruts des mesures d'atténuation par Pb, Cu, Al, Cd, Boron(*) et plexiglass ; l'épaisseur est de 20 mm dans tous les cas excepté pour le Cd (3 mm). Il n'est naturellement pas possible de tirer de ces résultats des valeurs de longueurs d'atténuation ; en effet, non seulement il s'agit de mesures intégrées sur un grand angle solide, mais de plus le spectre en énergie des neutrons est déjà dégradé par la traversée des 26 mm du fond du cylindre de Faraday avant d'entrer dans l'écran (bien qu'un calcul mené comme au paragraphe 2 montre que la valeur moyenne \bar{E} est assez peu affectée par ce premier écran). Néanmoins, ces mesures appellent plusieurs commentaires :

- les 18% de puissance absorbée par l'écran de 3 mm de Cd représentent la composante thermique du spectre (capture) : on peut donc appliquer directement un tel amortissement aux valeurs du tableau 4 si on chemise l'intérieur du solénoïde avec un feuillard de ce métal,
- il est vraisemblable que le chiffre de 24% obtenu aussi bien avec le boron qu'avec le plexiglass s'explique de la même façon par une forte absorption de la composante peu énergétique du spectre, augmentée peut-être d'une légère atténuation par l'épaisseur,
- il faut mentionner aussi que, dans l'expérience concernant le faisceau d'argon bombardant une cible de carbone, la précision pour Pb et Cu a été perturbée par un fonctionnement irrégulier de la pompe de circulation d'hélium : les résultats (20% et 27% respectivement) sont donnés seulement à titre indicatif,
- enfin l'absorption par l'aluminium (15%), inférieure à celle de Pb et Cu comme on peut raisonnablement s'y attendre pour les neutrons rapides, donne pourtant le même résultat que celui obtenu par un calcul mené avec la technique exposée au paragraphe 2.3. en assimilant l'absorbeur à du fer.

4.4. METHODE DE BLINDAGE DU SOLENOIDE

Ces mesures nous ont conforté dans l'idée qu'un calcul d'atténuation basé sur la technique exposée au paragraphe 2 peut donner un bon ordre de grandeur ; en conséquence, nous avons prévu un blindage en cuivre en forme de cône interne au solénoïde (le cuivre présentant l'avantage sur d'autres métaux de pouvoir être lui-même aisément refroidi par circulation d'eau) : pour une cible mince de carbone bombardée par des faisceaux de C, Ne et Ar, les facteurs d'atténuation trouvés (2,45 ; 2,25 et 2,4 respectivement) ont été appliqués aux valeurs du tableau 4. La figure 14 illustre les résultats comparés : bien que dans deux des trois cas étudiés, la puissance neutronique déposée dans les enroulements du solénoïde soit encore supérieure à 1 watt, on est proche de l'ordre de grandeur recherché. En rapportant comme il a été dit une couche mince de cadmium à la périphérie de ce cône, ces chiffres sont encore à minorer, et si la limite de puissance est encore dépassée dans certains cas d'espèce, il suffira de diminuer un peu l'intensité du faisceau, de baisser son énergie ou de réduire un peu l'épaisseur de la cible.

4.5. MESURES D'ABSORPTION PAR L'HELIUM LIQUIDE

Pour avoir la certitude que l'hélium liquide dans lequel baigne le bobinage du solénoïde n'absorbe pas lui-même une partie de l'énergie des neutrons, le dispositif expérimental a été modifié :

- le tore de cuivre a été retiré du cryostat,
- celui-ci a été rempli d'hélium liquide (1,5 litre).

Comme il n'était plus possible de mesurer une élévation de température, on a installé un compteur à gaz sur le circuit de sortie de l'hélium gazeux et on a cherché à déceler une

(*) Le Boron est un composé de bore, très dense, à l'aspect de céramique vitreuse ; nous n'avons pas encore pu déterminer précisément sa composition.

Ecran	Interaction	Fraction absorbée
Cd 3mm	N ---> Ta	18,6%
Al 20mm	" "	15%
Pb 20mm	Ar ---> C	≈20%
Cu 20mm	" "	≈27%
Boron 20mm	Ar ---> Ta	24%
Plexi 20mm	" "	24%

TABLEAU 5

Puissance neutronique absorbée dans le bobinage de SISSI. Faisceau de 10 kW, 95 A.MeV dans une cible mince de carbone

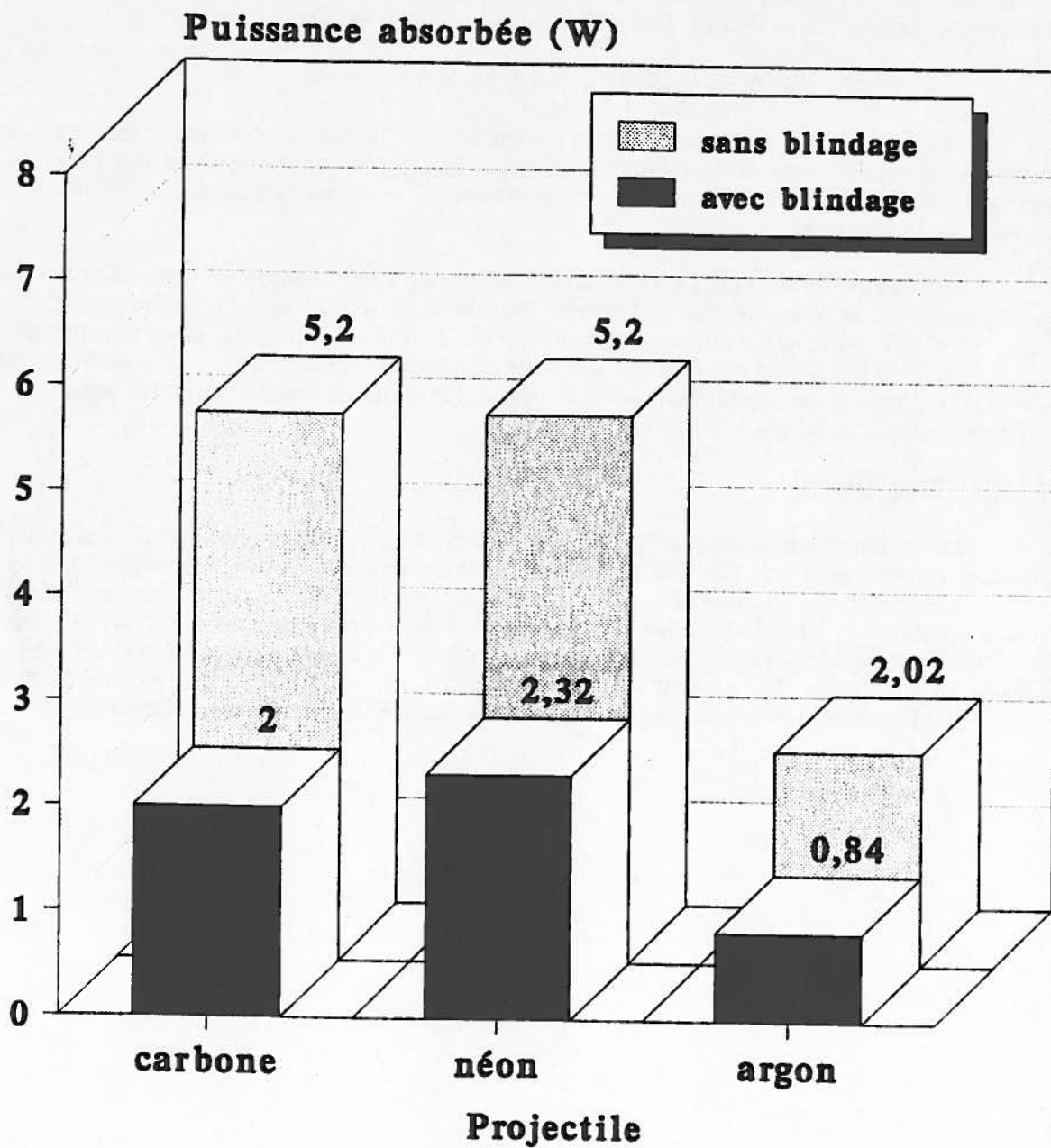


Figure 14

différence de débit sans et avec faisceau ; une sonde de niveau permettait de s'assurer que le volume de liquide n'était pas sensiblement modifié durant la durée de l'expérience. Chaque essai comprenait une mesure avec faisceau d'environ 30 minutes, et autant sans faisceau. Aucune différence entre les deux débits n'a pu être mise en évidence ; ceux-ci étaient de l'ordre de 100 l/h de gaz (ce qui correspond à une puissance de 90 mW), et la sensibilité de la mesure est estimée à 10% de ce chiffre : la différence doit donc être inférieure à 9 mW. Cette expérience a été faite avec les neutrons produits par un faisceau d'argon de 95 MeV/nucléon et d'une puissance de 400 watts, totalement arrêtés dans une cible de carbone. On conclut que, dans ces conditions, la limite supérieure de la puissance déposée par les neutrons est de 15 mW par litre d'hélium et par kW de faisceau.

4.6. REMARQUE RELATIVE AUX GAMMAS

Tout au long de cette étude, nous avons traité le problème comme si les gammas n'y intervenaient pas. Pour établir une certitude, il serait nécessaire de faire des mesures par activation simultanément devant et derrière la maquette, mesures longues et imprécises. Au lieu de cela, on notera que :

- le flux de gammas est probablement beaucoup plus isotrope que celui des neutrons ; par conséquent, la concentration de l'énergie dans le cône "avant" est fortement réduite,
- si l'on table sur une énergie moyenne de 2 MeV, la longueur d'atténuation dans le cuivre est environ 5 fois plus petite que celle correspondant aux neutrons : si ces gammas devaient contribuer de façon importante au dépôt d'énergie, ils seraient atténués beaucoup plus efficacement par le blindage de cuivre.

5. CONCLUSION

Les estimations théoriques de l'énergie neutronique absorbée par un métal donnent des résultats erronés par excès (facteur 2 à 5), l'erreur dépendant du couple projectile-cible.

Les mesures montrent que la puissance ainsi dissipée dans les enroulements supraconducteurs de SISSI peut être ramenée à peu près au niveau du seuil tolérable moyennant un blindage en deux couches : une feuille mince de cadmium entourant une pièce en cuivre plus massive. Cependant, il est établi qu'on ne pourra utiliser des cibles arrêtant totalement le faisceau primaire, sauf en agissant de façon drastique sur son intensité.

REFERENCES

- 1) C. GRUNBERG, D. LARSON, W. MITTIG et F. RIPOUTEAU - Rapport interne GANIL, R89/09.
- 2) A. JOUBERT, E. BARON, C. GRUNBERG, D. LARSON, W. MITTIG and F. RIPOUTEAU - The SISSI project : an intense secondary ion source using superconducting solenoid lenses. Particle accelerator conference, San Francisco (6-9 mai 1991).
- 3) J.W. TUYN et al - Rapports CERN HS-RP/TM/80-S, HS-RP/TM/80-68 et HS-RP/TM/80-70 (1980).
- 4) H.W. BERTINI - Rapport ORNL/TM-5161 (1976) et Phys. Rev. C14, 2, 590-595 (1976).
- 5) F. HUBERT - Communication privée.
- 6) M. LANGEVIN. Communication privée.
- 7) Publications CIPR n°15 et 21.