

COMMISSARIAT A L'ENERGIE ATOMIQUE

Division d'Etudes et de Développement des Réacteurs

Note Technique SEN/LPRE N° 77 - 41

MESURES DE LA DISTRIBUTION DE PUISSANCE
PAR SPECTROMETRIE GAMMA
SUR DES ASSEMBLAGES IRRADIES DE REACTEUR A EAU

M. DARROUZET - M. BERTUOL - A. SANTAMARINA

Les résultats concernant les combustibles irradiés du réacteur de CHOOZ sont publiés avec l'aimable autorisation de la Direction de la Centrale Nucléaire des Ardennes qui a bien voulu apporter son concours à ces expériences.

Mai 1977

87150001

INTRODUCTION

Depuis plusieurs années le CEA effectue des mesures par spectro gamma sur des assemblages de réacteurs eau légère, dans la piscine de désactivation. /1/

Les objectifs de ces mesures sont multiples mais les buts principaux sont de déterminer la distribution de puissance et le taux de combustion dans le réacteur en fin de cycle.

A partir de mesures de l'activité de produits de fission de courte période (^{140}La) on détermine la puissance ; à partir de l'activité de produits de fission à vie longue (^{137}Cs , ^{144}Ce), on peut en déduire le taux de combustion.

Les mesures réalisées dans le réacteur de CHOOZ ont été effectuées peu de temps après les arrêts annuels du réacteur et notre propos ne concernera que les mesures de distribution de puissance. Ces mesures ont pour objectif de qualifier les codes de calcul neutronique.

Les expériences critiques, en effet, permettent de contrôler d'une manière générale les méthodes de calcul, avec leurs principales approximations et certaines données nucléaires. Elles sont cependant limitées à des configurations simulant l'état initial des coeurs de réacteurs.

La qualification de l'évolution spatiale ne peut être contrôlée qu'à partir d'examen destructifs (analyses chimiques, mesures par spectrométrie de masse, par spectrométrie α) ou à partir du suivi du fonctionnement des réacteurs en interprétant les variations de réactivité ou les cartes de flux fournies par l'instrumentation interne.

La spectrométrie gamma, dont la mise en oeuvre est beaucoup moins complexe que les examens destructifs, apporte un complément d'informations intéressantes. C'est un moyen complémentaire à l'instrumentation interne. Celle-ci, en effet, n'apporte que des informations de la puissance au centre des assemblages instrumentés. La spectrométrie gamma, du fait de la transmission, permet d'avoir une mesure de la puissance des crayons les plus externes de l'assemblage, donc de pouvoir accéder à la puissance moyenne et au gradient de puissance. En outre elle peut être effectuée sur tous les assemblages.

Après un bref rappel sur le principe des mesures et l'appareillage utilisé, nous exposerons les différents facteurs intervenant pour passer des mesures des activités à la puissance. /2/

Les termes correctifs seront appliqués aux mesures réalisées à la fin du 4ème cycle, sur des assemblages de la CNA. Pour terminer, nous présenterons une comparaison de la puissance obtenue par spectrométrie gamma avec celle obtenue à partir des mesures par aeroballs, ainsi qu'une comparaison avec les calculs à 3 dimensions du réacteur réalisés à l'aide du système modulaire pour le calcul des réacteurs à eau "NEPTUNE" développé au CEA. /3/

I - PRINCIPE DE LA METHODE

I -1. Relation entre l'activité du lanthane 140 et la puissance

Pour mesurer la distribution de puissance on utilise le rayonnement γ de 1,6 MeV émis lors de la décroissance du ^{140}La .

Le lanthane 140 de 40h de période, apparaît par décroissance du ^{140}Ba formé directement par fission. La période du ^{140}Ba est de 12,7 jours.

On peut montrer que pour une irradiation à puissance constante en supposant que les rendements et les énergies de fission sont identiques pour tous les isotopes fissiles on a à un facteur près :

$$P = A_c \times \frac{E}{Y}$$

P étant la puissance
 A_c l'activité du lanthane,
E l'énergie de fission
Y le rendement.

Cette formule montre la relation directe existant entre la puissance et l'activité.

D'une manière plus générale, on peut écrire :

$$P = A_c \times \frac{E}{Y} \times \frac{Y}{\bar{Y}} \times \frac{\bar{E}}{E} \times R$$

A_c est l'activité du lanthane ramenée à la chute des barres
E et Y sont l'énergie et le rendement de fission de ^{235}U .

\bar{E} et \bar{Y} sont l'énergie moyenne et le rendement de fission moyen en fin d'irradiation

R est un facteur prenant en compte les variations de puissance.

I -2. Appareillage de mesure

Il comprend :

- Un détecteur germanium-lithium placé au centre d'un château de plomb qui le protège du rayonnement environnant et qui peut se déplacer verticalement,

- Un dispositif de collimation qui permet de ne "voir" avec le détecteur qu'une tranche d'assemblage d'une dizaine de centimètres de largeur et de quelques millimètres de hauteur,

- Un panier qui reçoit verticalement l'assemblage et qui peut tourner autour de son axe, ce qui permet d'effectuer des mesures sur chaque face et éventuellement sur chaque angle.

L'ensemble est immergé au fond de la piscine de stockage.

Les mesures sont effectuées sur les quatre faces d'un assemblage à la même cote. Pour des raisons d'étalonnage, les mesures sont effectuées en relatif.

I -3. Dépouillement des pics.

Les spectres gammas sont enregistrés sur bandes perforées, puis dépouillés sur ordinateur. L'aire des pics est calculée après déduction du bruit de fond par une méthode de trapèze. Les bornes d'intégration sont choisies pour chaque pic en fonction de sa situation et de l'allure générale du spectre. La détermination en étant assez subjective, on effectue des contrôles par variation de ces bornes ainsi que sur la cohérence des résultats. On tient compte de la décroissance radioactive et des dérives éventuelles dues à un défaut de positionnement de la diode.

II - INTERPRETATION DES RESULTATS

Pour passer des activités mesurées à la distribution de puissance, il est nécessaire :

- de faire une hypothèse sur la distribution relative de puissance dans l'assemblage de façon à connaître la répartition des sources,
- de connaître les facteurs de transmission entre les sources d'émission gamma et le détecteur
- de déterminer \bar{E} , \bar{Y} et R pour les différents éléments.

II -1. Calcul des coefficients de transmission

Du fait de la faible épaisseur de la fente, le détecteur ne reçoit les gammas émis que dans une tranche de l'assemblage.

En raison du fort pouvoir d'atténuation de l' UO_2 , le détecteur placé près de l'assemblage ne reçoit qu'une faible partie du rayonnement émis dans sa direction. A l'atténuation dans le crayon où est situé l'émetteur, s'ajoute l'atténuation dans les autres crayons traversés.

Le code TRAJET /4/ a été spécialement mis au point pour rendre compte de la transmission du rayonnement γ d'une énergie donnée émis dans le combustible d'un assemblage et atteignant le dispositif de collimation en prenant en compte l'atténuation dans les différents matériaux (UO_2 , gaines, eau, boîtier...) Dans ces calculs (à 2 dimensions X,Y) le crayon est découpé en 180 sources afin de tenir compte de l'autoabsorption du crayon émetteur lui-même.

Sur la figure 1 nous présentons la transmission du rayonnement de 1,6 MeV dans le crayon lui-même et sur les figures 2 et 2bis, nous présentons le schéma de l'appareillage de mesure et la contribution des divers crayons au comptage effectué sur une face d'un assemblage de la CNA.

On constate d'une part, que l'autoabsorption dans le crayon est importante pour cette énergie de 1,6 Mev, d'autre

part que dans l'assemblage, les trois premières rangées de crayons représentent 72% de la contribution de l'activité mesurée.

II -2. Passage de l'activité mesurée à la puissance

l'activité mesurée peut se mettre sous la forme :

$$A = k \sum_{ij} t_{ij} a_{ij}$$

où ij désigne le crayon de rang i et de colonne j

t le facteur de transmission

a_{ij} l'activité du crayon et s'écrit :

$$a_{ij} = \frac{\bar{Y}}{\bar{E}} \times \frac{\bar{Y}_{ij}}{\bar{Y}} \times \frac{E}{\bar{E}_{ij}} \times R_{ij} \times P_{ij}$$

P_{ij} étant la puissance dans le crayon

k est un facteur d'appareillage

La puissance dégagée dans un groupe de crayons $i, j \in G$ ou dans l'assemblage peut être déduit de la mesure de l'activité par la relation :

$$P = \sum_{ij \in G} P_{ij} = \frac{A}{K} \times F$$

où F est un facteur calculé

$$F = \frac{\sum_{ij \in G} P_{ij}}{\sum_{ij \in \text{Assemblage}} t_{ij} \times \left(\frac{a_{ij}}{P_{ij}} \right) R_{ij} \times P_{ij}}$$

Il est bien évident que l'activité mesurée est représentative de la puissance dégagée dans les crayons où le facteur de transmission t_{ij} est important. Pour avoir une bonne représentation de la puissance de l'ensemble de la tranche on effectue des mesures sur les quatre faces.

II -3. Calculs des rapports $\frac{Y}{Y}$, $\frac{E}{E}$ et du facteur R.

Ils sont déterminés par des calculs d'évolution de cellules. Les sections efficaces en fonction du taux de combustion sont obtenus à l'aide du code de cellule transport APOLLO-module de NEPTUNE (99 groupes d'énergie) qui tient compte des variations sées à un groupe et lissées sur des courbes du 3ème degré. Ils sont introduits ensuite dans un code d'évolution (EVOGENE) /5/ qui permet de calculer les rendements moyens, la répartition des fissions et les activités et de prendre en compte l'histoire détaillée du réacteur.

$\frac{Y}{Y_{ij}}$ rendement de fission du barium 140 pour le ^{235}U sur le rendement de fission moyen en fin de vie

varie peu avec le taux de combustion (cf. figure 3).

Il en est de même pour $\frac{E_{ij}}{E}$ rapport des énergies de fission moyenne en fin de vie sur l'énergie de la fission du ^{235}U (cf. figure)

Les études réalisées ont montré que le terme R était pratiquement identique pour tous les combustibles. Il est incorporé dans le terme K.

II -4. Méthodes de dépouillement des mesures

Deux méthodes sont utilisées :

On suppose que la distribution de puissance est le produit d'une distribution fine par une puissance macroscopique :

$$P_{ij} = p_m(i,j) \times p_M(i,j)$$

La distribution microscopique $p_m(i,j)$ provient de calculs hétérogènes à 2 dimensions.

La première méthode de dépouillement consiste à prendre la distribution macroscopique $p_M(i,j)$ égale à un plan :

$$p_M(i,j) = ai + bj + c$$

Nous déterminons les paramètres a, b et c par un moindre carré (minimisation de l'écart quadratique moyen entre la mesure réalisée, donc avec une répartition de puissance exacte et le signal que l'on obtiendrait avec une répartition macroscopique plane) soit :

$$A_n = \sum_{i,j} t_{ij} a_{ij}$$

$$\text{et } S_n = \sum_{i,j} t_{ij} \frac{Y}{E} \cdot \frac{Y_{ij}}{Y} \times \frac{E}{E_{ij}} \times p_M(i,j) \times (ai + bj + c)$$

l'indice n indique le N° de la face considérée pour la mesure

Nous avons donc :

$$M = \sum_n (A_n - S_n)^2$$

et nous déterminons a, b, c, en écrivant :

$$\frac{\partial M}{\partial a} = 0, \quad \frac{\partial M}{\partial b} = 0 \quad \text{et} \quad \frac{\partial M}{\partial c} = 0$$

Compte tenu des faibles variations de $\frac{Y}{E}$ et $\frac{E}{E_{ij}}$ on prend des valeurs identiques correspondant à un burn up moyen estimé par le calcul pour tous les crayons d'un même assemblage excepté pour le cas de ceux placés en périphérie ou les rapports $\frac{Y}{Y_{ij}}$ et $\frac{E}{E_{ij}}$

sont déterminés crayon par crayon après une première itération, en supposant que la distribution de puissance et du burn up dans ces crayons étaient similaires.

Dans la deuxième méthode on connaît la répartition macroscopique du flux dans les assemblages, qu'on peut mettre sous la forme d'une expression :

$$p_M(i,j) = a (\alpha + \beta_i \gamma_j + \delta_{ij} + \epsilon i^2 + \eta j^2) + bI + cJ$$

$\alpha, \beta, \gamma, \delta, \epsilon, \eta$, étant des paramètres ajustés sur une forme macroscopique calculée.

$bI + cJ$ prend en compte l'erreur de gradient entre l'expérience et le calcul.

On détermine les coefficients a, b et c par un procédé similaire à la première méthode.

Remarque : Une troisième méthode pourrait être appliquée si on connaît la distribution fine de la puissance crayon par crayon dans chaque assemblage. Les activités permettraient alors de contrôler que le niveau moyen de flux dans les assemblages et les gradients de flux sont corrects.

III - APPLICATION AUX MESURES EFFECTUEES SUR LE 4ème TIERS DE LA CNA.

III -1. Résultats expérimentaux

Nous avons appliqué les deux premières méthodes aux mesures effectuées à la CNA à la fin du 4ème cycle. 20 assemblages ont été mesurés sur les 4 faces à la cote 1230 ainsi que 3 répartitions axiales.

La structure fine provenait d'un calcul hétérogène à 2 dimensions pour un assemblage ayant atteint un taux de combustion moyen de 10 000 MWJ/T. Elle a été appliquée pour tous les assemblages. Nous verrons plus loin l'influence de ce paramètre.

La forme macroscopique dans le cas de la deuxième méthode a été déterminée par un code aux éléments finis à 3 dimensions (cf. paragraphe suivant).

La comparaison des deux méthodes pour la puissance moyenne dans les assemblages est excellente (cf. figure 5)

Par contre pour les gradients, on constate des légères différences qui peuvent être importantes près des réflecteurs. Dans ces assemblages l'approximation plane du flux est insuffisante. (cf. figure 6).

Pour obtenir la puissance moyenne par assemblage on multiplie la puissance de la tranche par la répartition axiale déterminée par un calcul à 3 dimensions.

III -2. Précisions des mesures

Les erreurs que l'on commet sur l'interprétation des résultats apparaissent au cours des différentes étapes du dépouillement :

- Tout d'abord il existe une erreur statistique sur la mesure de l'activité elle-même. Elle est liée au nombre de coups détectés par la diode, dans le pic d'absorption totale. Elle est de la forme \sqrt{N} où N est le nombre de coups. A cette erreur, s'ajoute l'erreur due à une plus ou moins bonne estimation du bruit de fond (BDF) sous le pic. Cette erreur a été déterminée sous la forme :

$$\sigma = \sqrt{N + 2BDF}$$

Cette erreur englobe donc l'erreur statistique et l'erreur liée au dépouillement. Elle est de l'ordre de 1%.

Il existe aussi un écart dû au recalage entre les mesures. En effet, la diode doit être refroidie à l'azote liquide et son réservoir est rempli tous les deux jours. Le système de détection est donc sorti de la piscine. Il existe un risque d'erreur au niveau du repositionnement de la diode mais il est minimal grâce aux mesures de recalage sur un assemblage de référence. Pour des mesures relatives, telles que nous les avons étudiées, nous estimons cette erreur à 0,5%. Il faut tenir compte aussi du positionnement de l'axe de la diode par rapport à l'axe de l'assemblage. Ce positionnement entraîne une erreur sur les coefficients de transmission. L'angle entre ces deux axes ne peut être qu'extrêmement petit (inférieur à 1°) et l'erreur maximum calculée à l'aide du code TRAJET est de 0,5%.

- Afin de déterminer les rendements effectifs de fission et les énergies moyennes par fission, il faut connaître le taux de combustion. Nous pouvons raisonnablement penser qu'il est connu à mieux de 500 MWJ/T ce qui nous introduit une erreur de 0,3% sur le rendement de fission et de 0,2% sur l'énergie moyenne par fission soit 0,5% sur les facteurs correctifs.

- S'imposer une répartition microscopique identique pour tous les assemblages entraîne une erreur qui est très faible. Nous avons effectué deux calculs afin de déterminer l'incidence qui en résulte sur le signal détecté par la diode. Ces calculs ont été effectués avec une répartition microscopique calculée pour un taux de combustion de 2 000 MWJ/T (donc en début de vie de l'assemblage) et une répartition pour un taux de combustion de 10 000 MWJ/T.

L'écart entre ces deux répartitions est très peu important (de l'ordre de 0,5%) que l'on répercute intégralement sur le calcul de transmission. Nous avons donc une erreur de 0,5% due au choix de la répartition microscopique.

- La répartition macroscopique plane de la puissance n'est pas très réaliste pour les assemblages périphériques. En effet, près du réflecteur, le flux et donc la puissance sont très perturbés. Un calcul aux éléments finis ne suffit pas pour donner une idée très précise des phénomènes. On estime que la répartition macroscopique associée au découplément des effets microscopiques et macroscopiques dans l'assemblage entraîne une erreur de 0,5% pour les assemblages centraux. Cette erreur est plus importante pour les assemblages périphériques mais elle est en partie compensée par les mesures sur les quatre faces. L'erreur sur la valeur moyenne de la puissance pour les assemblages périphériques est de l'ordre de 1%.

Toutes ces erreurs et leurs causes sont reportées sur le tableau 1. Ces erreurs n'étant pas couplées, l'erreur globale est la moyenne quadratique de tous les écarts constatés. Nous avons donc une erreur totale de 1,5 à 1,7% sur la répartition radiale à la cote 1230.

Lorsque l'on calcule la carte de répartition de la puissance moyenne, on introduit une erreur supplémentaire due à la répartition axiale calculée entre les différents assemblages.

Compte tenu des faibles variations, on a considéré que l'erreur maximale introduite était de 1%.

Nous avons une erreur globale sur la répartition de la puissance moyenne de 1 à 2%.

III -3. Calculs du réacteur de la CNA

Les calculs ont été effectués avec le schéma NEPTUNE.

Les calculs APOLLO d'évolution de chaque tiers sont réalisés en représentation multicellules de l'assemblage : 7 types de cellules permettent de différencier les 2 types de barreaux combustibles et les différentes structures.

Les calculs de diffusion-évolution TRIDENT (module de NEPTUNE) aux éléments finis sont réalisés avec 3x3 éléments radiaux, les assemblages étant représentés suivant l'axe z par 18 éléments dont 2 pour chaque réflecteur axial.

La représentation simplifiée du coeur (faible nombre d'éléments et des sections ($\Sigma=f(\text{burn-up})$) dans les calculs aux éléments finis a permis d'envisager une initialisation des burn-up et de démarrer le calcul de suivi au début du 3ème cycle. Les puissances moyennes d'initialisation par neuvième d'assemblage pour les 2 premiers cycles découlent des travaux effectués précédemment sur les deux premiers cycles /6/.

Une étude axiale réalisée avec TRIDENT, à 1 dimension, a permis d'optimiser les paramètres et le déroulement du calcul 3D. Une étude préliminaire à 1 dimension réalisée avec le code BUCHERIE II /7/ a montré que l'interprétation des mesures de spectro γ ne nécessitait pas la prise en compte des effets de puissance autres que la densité d'eau (on peut négliger l'effet Doppler et la variation des sections avec la densité du modérateur).

Le suivi du 3ème cycle a donc été réalisé sans effet de puissance alors que la variation de densité de l'eau a été prise en compte axialement dans TRIDENT au 4ème cycle afin d'obtenir des distributions de puissance correctes en fin de cycle.

III -4. Comparaison calcul-expérience

Les principaux résultats découlant de cette étude sont les suivants :

- On n'observe aucune dérive de la valeur propre dans les calculs d'évolution du réacteur menés aux 3ème et 4ème cycles.

- La comparaison sur ces deux cycles des distributions de puissances moyennes par assemblage calculées d'une part et déduites des activités des aeroballs d'autre part, sont satisfaisantes : l'écart est de l'ordre de 2%, c'est-à-dire dans la barre d'erreur expérimentale, sauf pour les assemblages présentant des faces communes avec le réflecteur (sous-estimation par le calcul de l'ordre de 5%)

A la fin du 4ème cycle, les puissances moyennes par assemblages déduites des mesures d'aeroball d'une part, et des mesures par spectro gamma d'autre part, sont cohérentes dans les limites d'incertitude expérimentales (la spectro γ confirme la sous-estimation de 5% par le calcul de la puissance moyenne sur les assemblages ayant deux faces communes avec le baffle). (cf. figure 7)

Nous présentons sur la figure 8, les écarts expérience-calcul sur la distribution de puissance (méthode spectro-gamma). Pour les gradients dans les assemblages déterminés par la 2ème méthode, ils sont en excellent accord avec les résultats calculés.

CONCLUSION

L'interprétation des mesures de spectrométrie gamma effectuées à la fin du 4ème cycle du réacteur de la CNA a permis de mettre au point une méthode fiable pour le dépouillement des mesures effectuées sur des assemblages entiers. Les résultats obtenus montrent que cette méthode est valable pour un contrôle à posteriori des distributions de puissance dans l'assemblage comme le montre la comparaison avec les mesures de l'instrumentation interne. En outre elle permet des mesures sur les assemblages non instrumentés et d'obtenir des informations sur les gradients.

Depuis ces premières mesures, deux nouvelles campagnes ont été réalisées, l'une en 1975 à la fin du 5ème cycle et l'autre en 1976. Dans cette dernière campagne, afin d'améliorer les résultats les mesures sur assemblages sont effectuées sur les 4 faces et sur les quatre angles. Ces mesures ont donc un rôle intéressant pour qualifier les codes de calcul. Elles sont complémentaires de l'instrumentation interne et l'intérêt de cette méthode apparaîtra de plus en plus pour le contrôle de la distribution de puissance, dans le cas où seront placés dans les réacteurs, des assemblages de démonstration (assemblages avec ilôts Pu, assemblages plutonium).

REFERENCES

- /1/ - J. BOUCHARD -G. FREJAVILLE - M. ROBIN
"Mesures de distribution de puissance et de taux de combustion par spectrométrie gamma sur les combustibles irradiés de réacteurs a eau".
Rapport CEA (à paraître)
- /2/ - M. BERTUOL
"Spectrométrie gamma dans les réacteurs de puissance à eau légère".
Thèse 3ème cycle (à paraître)
- /3/ - A. KAVENOKY
"NEPTUNE : Un système modulaire pour le calcul des réacteurs à eau".
BIST N°212 (1976)
- /4/ - M. BERTUOL
"Code TRAJET : Calcul d'atténuation du rayonnement gamma dans les assemblages combustibles".
Communication personnelle.
- /5/ - M. ROBIN - J. PINEL
" EVOGENE : Code d'évolution générale"
Communications personnelles.

/6/ Ch. ANDRIEUX

"Le suivi neutronique du réacteur SENA sur les 1 et 2.

Note CEA - N - 1868 (Mars 1976)

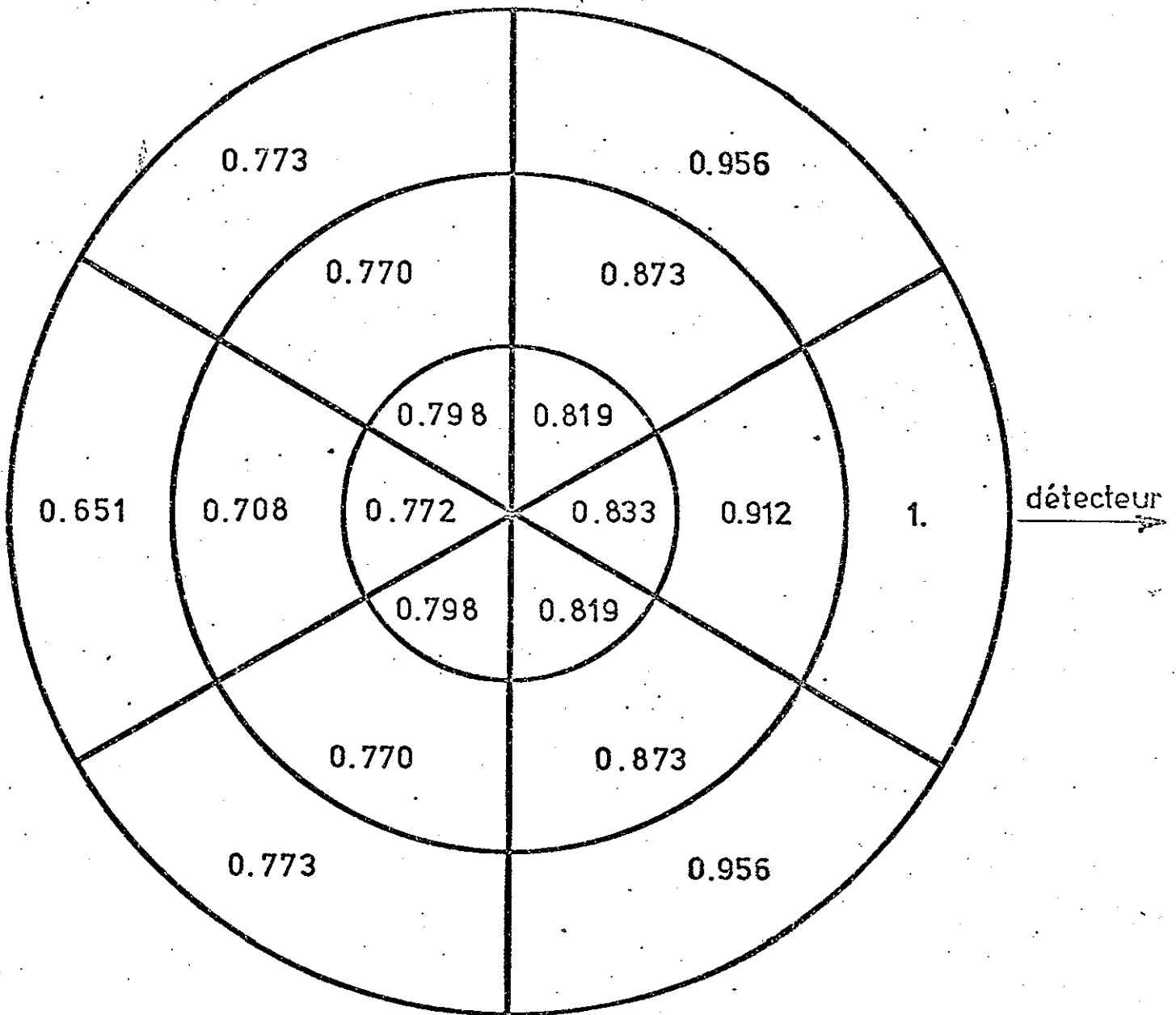
/7/ J. BERGERON

"EVOE BUCHERIE - Spécification des effets Doppler et de densité d'eau."

Communication personnelle.

| CAUSES DES ERREURS | ERREUR EN % |
|--|-------------|
| POSITIONNEMENT DE LA DIODE | 1 |
| DEPOUILLEMENT | 1 |
| COEFFICIENTS CORRECTIFS | 0,5 |
| REPARTITION MICROSCOPIQUE | 0,5 |
| REPARTITION MACROSCOPIQUE | 0,5 à 1 |
| ERREUR GLOBALE SUR LA REPARTITION RADIALE | 1,7 à 1,9 |
| REPARTITION AXIALE | 1,0 |
| ERREUR SUR LA REPARTITION DE PUISSANCE MOYENNE | 1,9 à 2,1 |

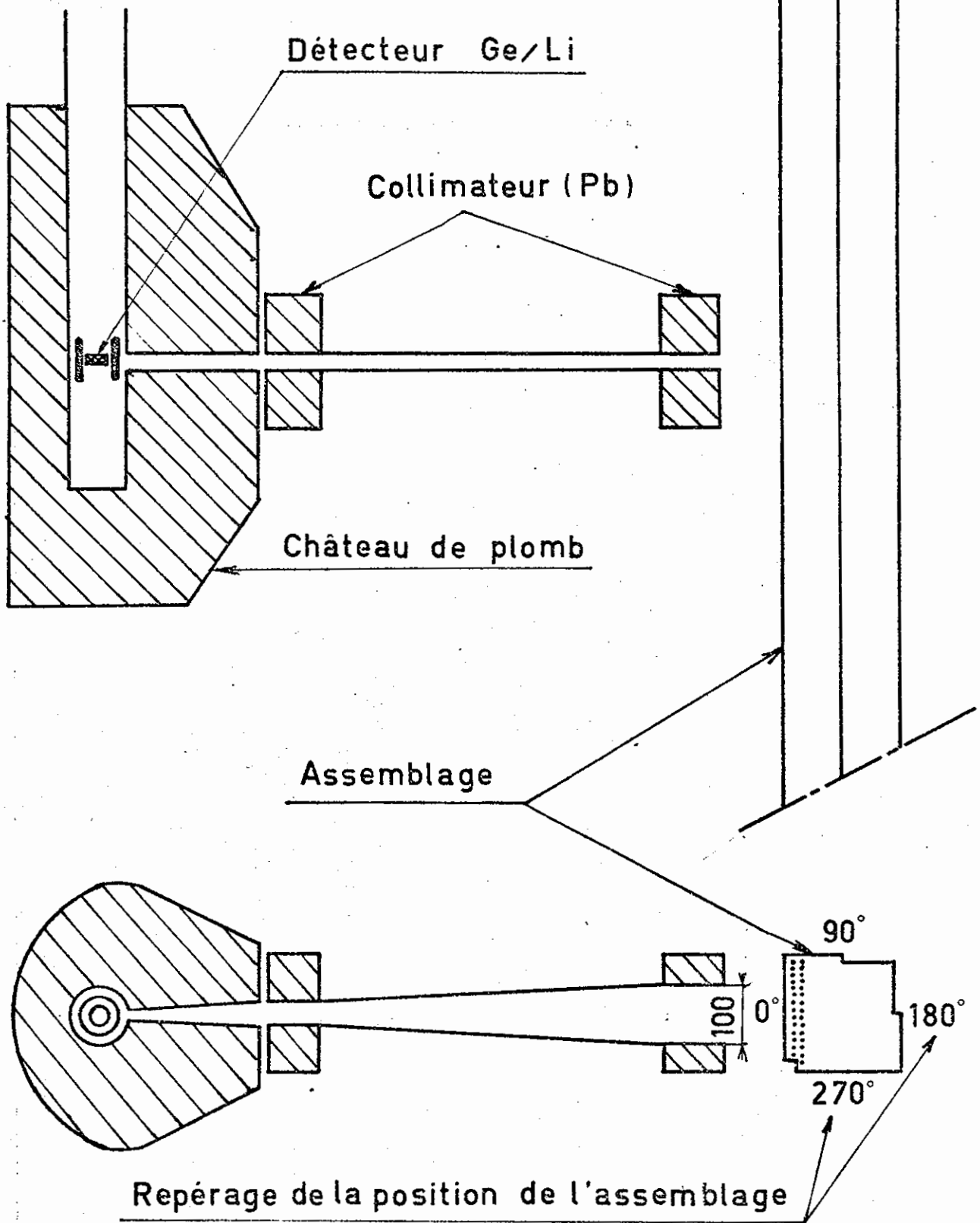
87150018



TRANSMISSION DU RAYONNEMENT A TRAVERS UN CRAYON
 A L'ENERGIE DE 1,6 MeV

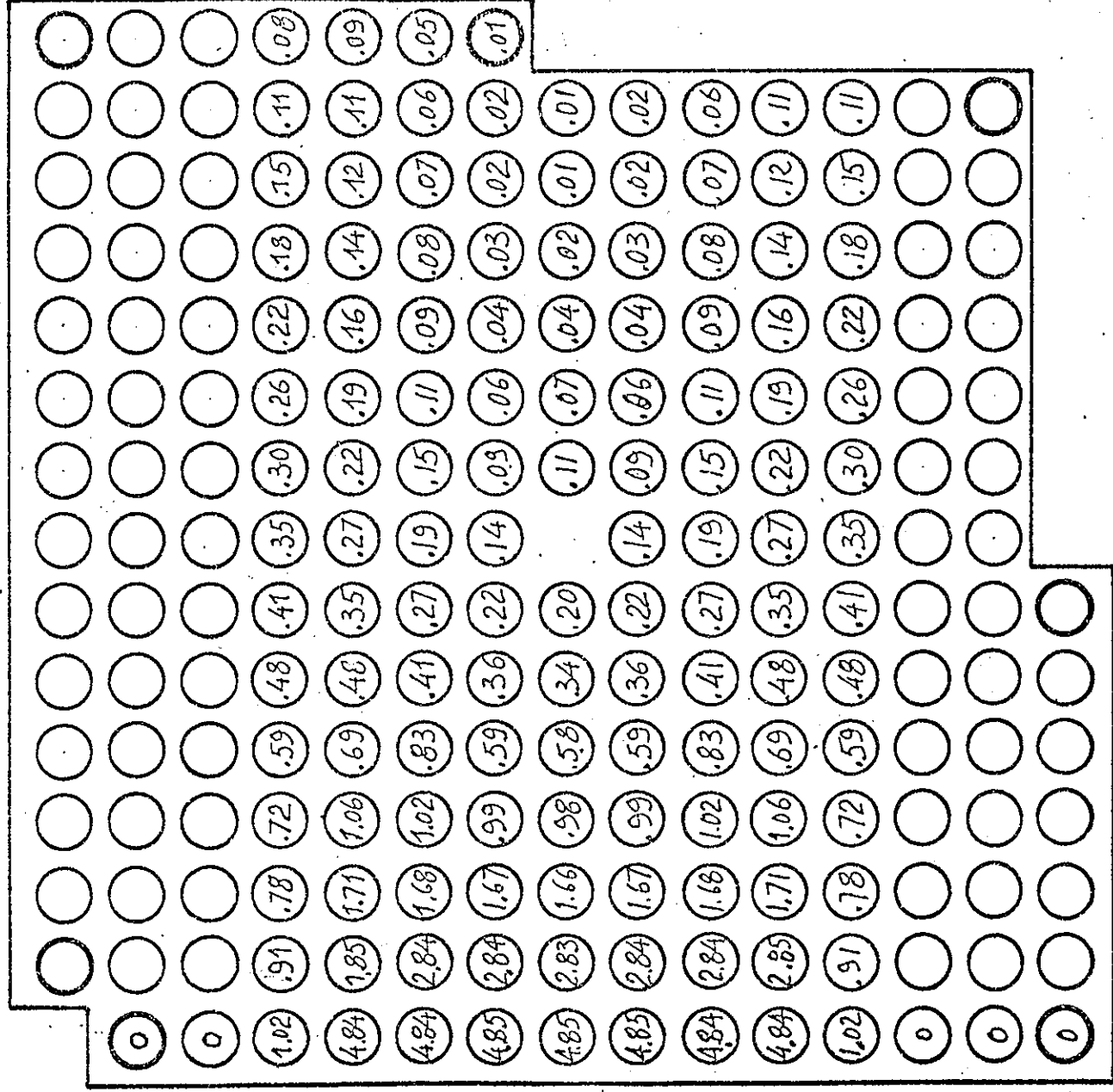
Figure 1

87150019



SCHEMA DE PRINCIPE DE L'INSTALLATION

Figure 2



Détecteur

CONTRIBUTION DES DIVERS CRAYONS AU COMPTAGE
 EFFECTUE SUR UNE FACE DE L'ASSEMBLAGE

CALCUL TRAJET

APPAREIL DE C.N.A Energie: 1,6 Mev

Figure 2 bis

87150021

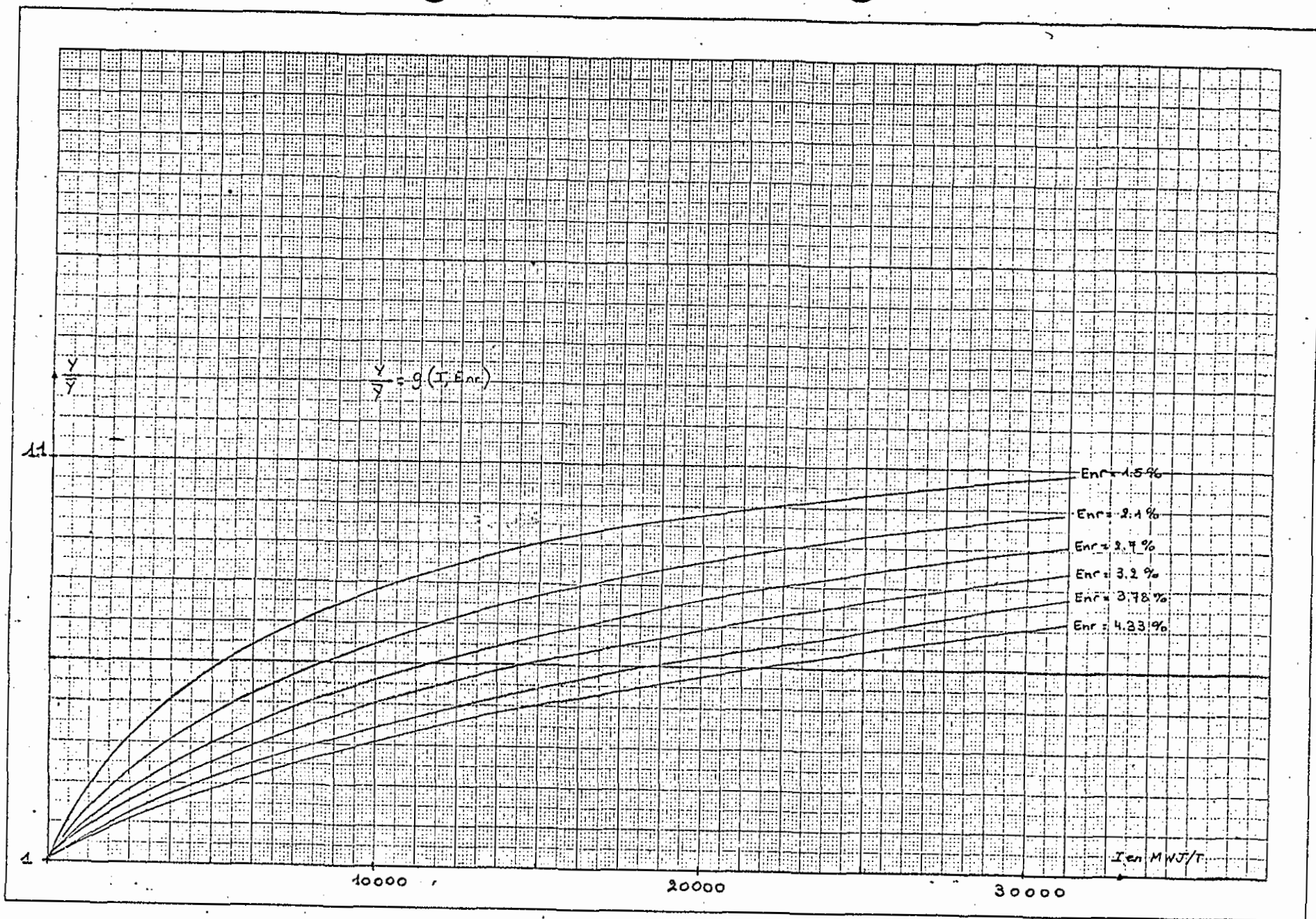


Figure 3

67150027

8/150025

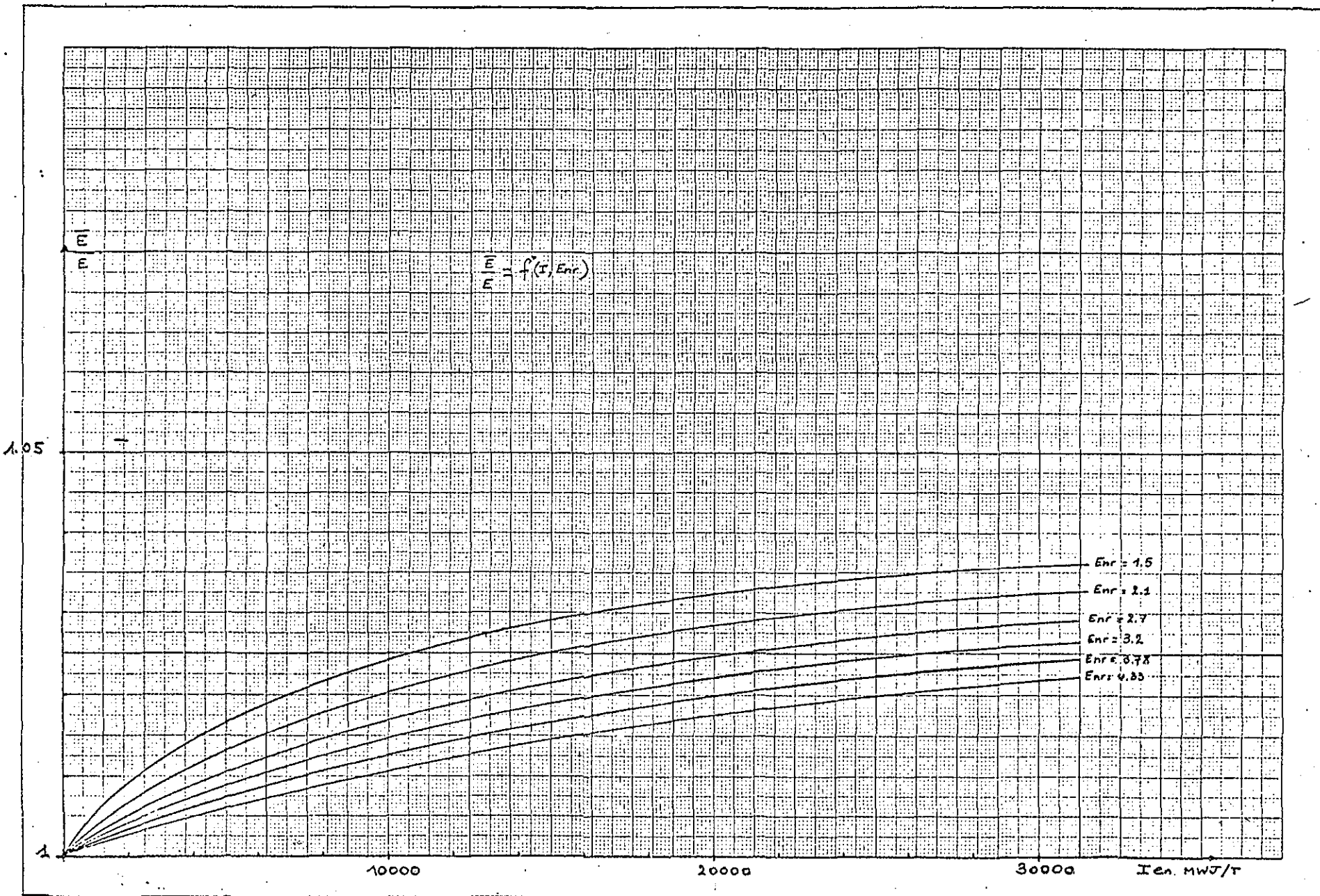


Figure 4

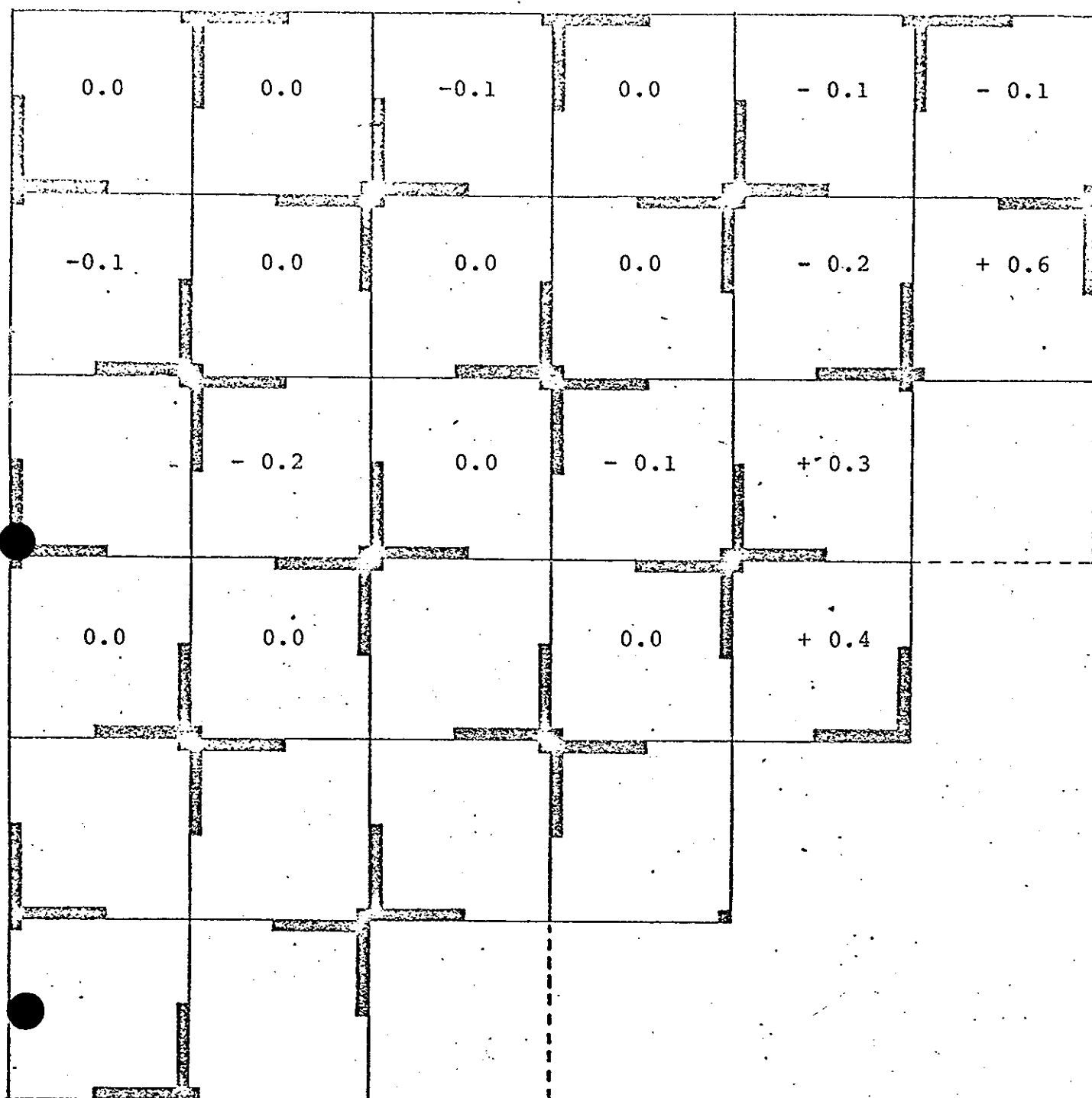


Figure 5

Ecarts en % sur la puissance moyenne
détournée par la méthode 1 et 2.

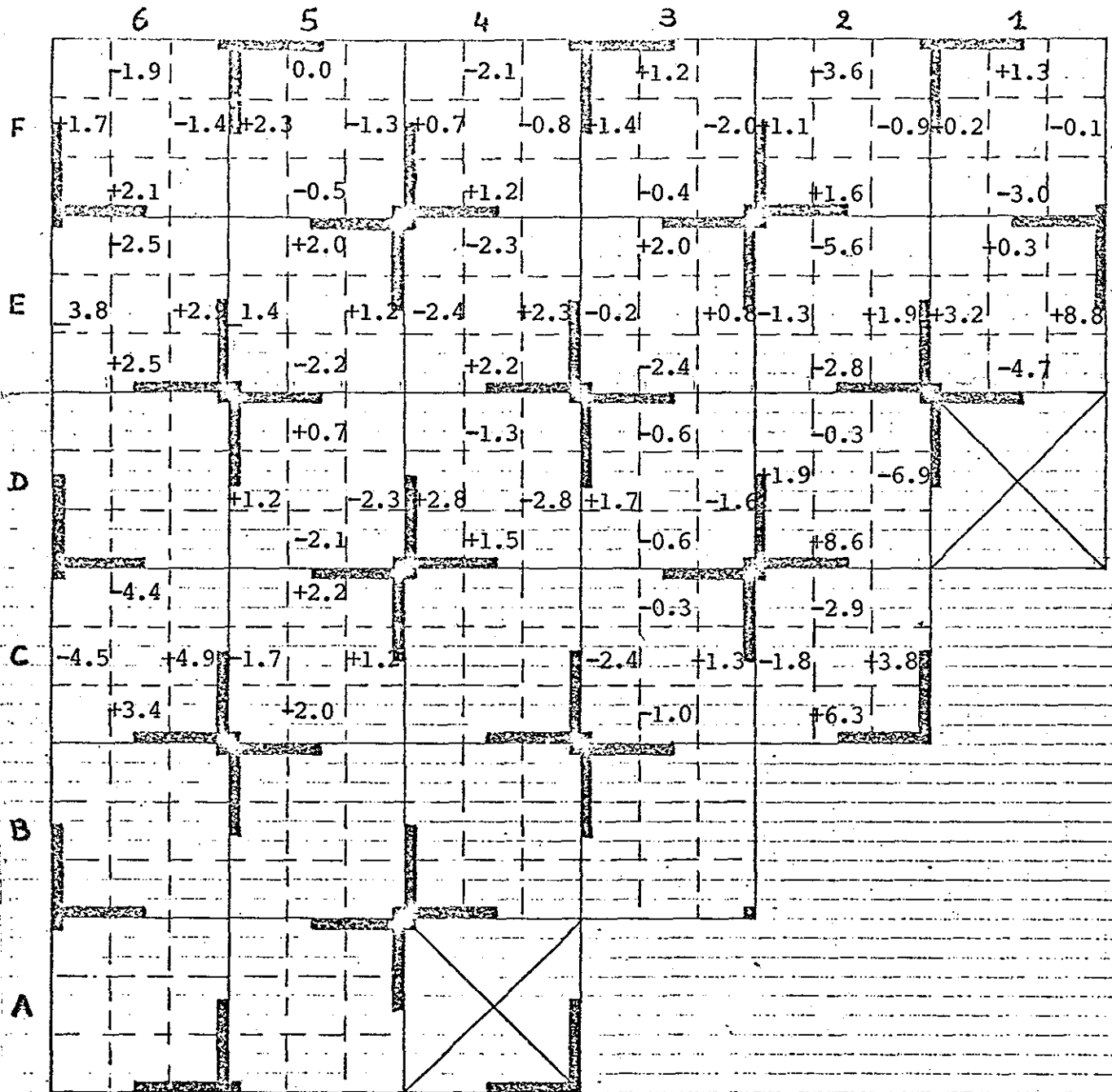


Figure 6

Ecart en % sur la puissance dégagée
 par 9ième d'assemblage déterminée
 par la méthode 1 et 2.

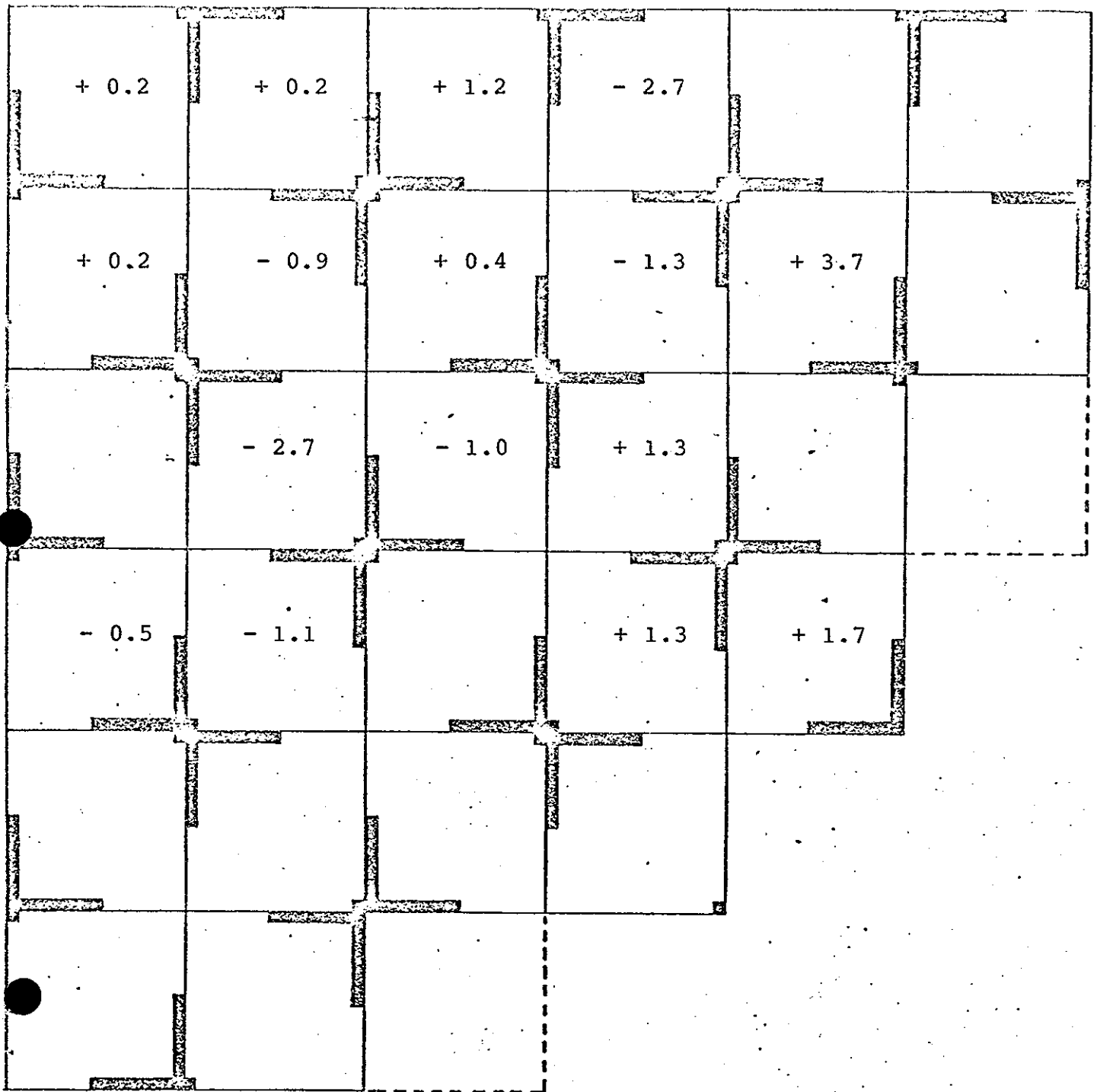


Figure 7

Ecarts en % sur la puissance mesurée
 par aeroballs et par spectrométrie gamma .

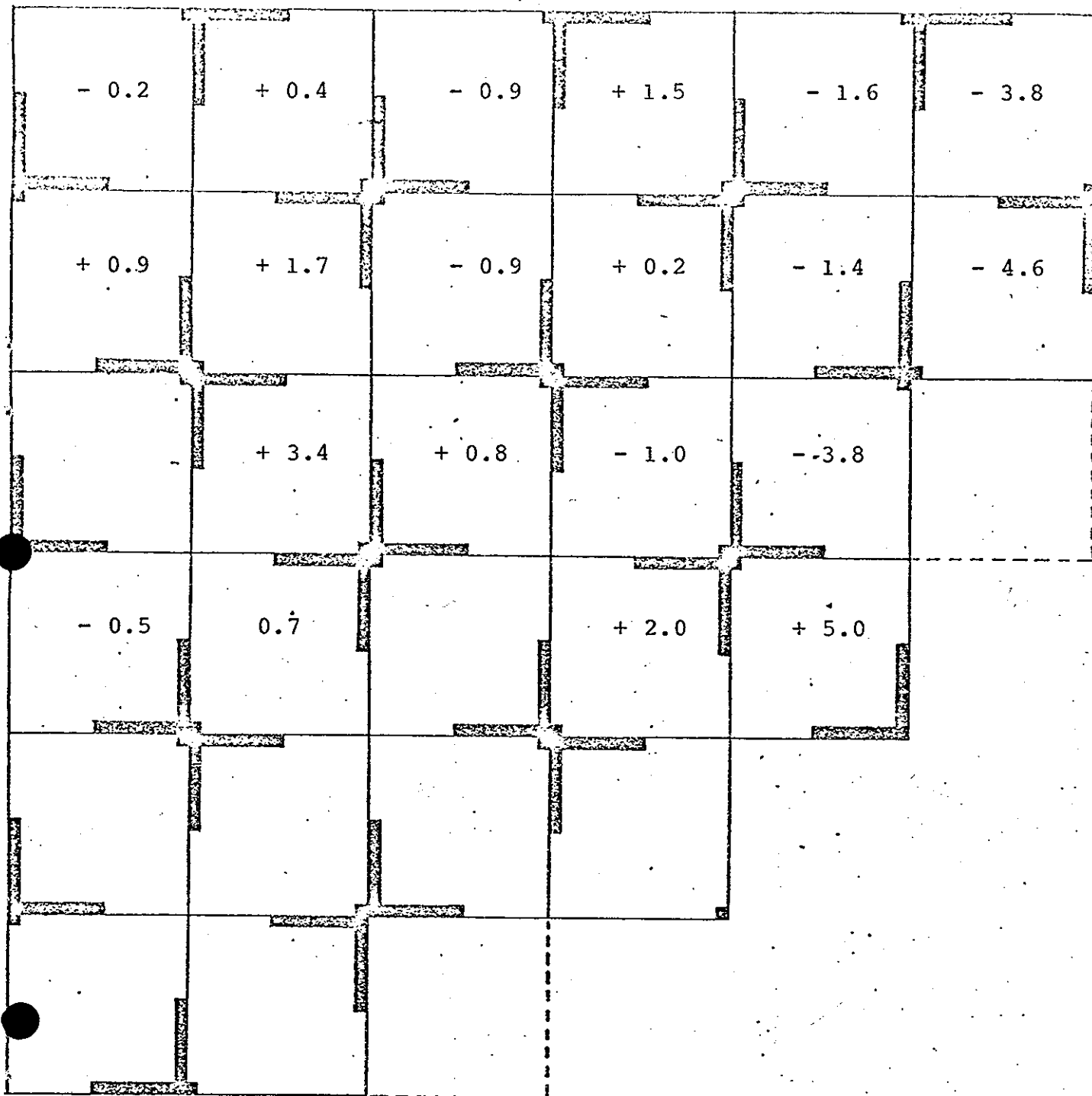


Figure 8

! Ecart en % sur la puissance mesurée
par spectrométrie gamma et calculée par TRIDENT.