

CONTRIBUTIONS A L'ETUDE D'UNE COLLISION  
NOYAU-NOYAU A HAUTE ENERGIE.

par

Marc-Aurèle Vincent, o.m.i.

Thèse présentée en vue de l'obtention du grade  
de Maître ès Sciences Physiques.

Département de Physique,  
Faculté des Sciences Pures et Appliquées,  
Université d'Ottawa,  
Ottawa, Canada.

1966

SOMMAIRE

L'étude d'une collision noyau-noyau exceptionnellement bien située dans une émulsion ionographique où elle est enregistrée avait déjà suscité le développement d'une platine rotative et inclinable. Le projet de recherches rapporté dans cette thèse consista pour une part dans la mise au point de cette platine et ensuite dans son utilisation pour l'étude de la distribution angulaire des particules émises par cette interaction. L'énergie et la charge de la particule incidente ayant été préalablement établies à  $13 \pm 2$  Gev/nucléon et  $Z = 25 \pm 2$  par la méthode des rayons delta énergiques, son énergie fut estimée pour fin de comparaison par trois autres méthodes faisant appel à la distribution angulaire des particules émises. Il s'agit des méthodes de la séparation des alpha, de l'angle médian et de Castagnoli. La méthode de l'angle médian fournit un estimé de l'énergie en meilleur accord avec la valeur obtenue par l'étude du rayonnement delta énergétique. Elle a également l'avantage pour l'expérimentateur d'être plus rapide et plus facile d'application. Par contre la méthode de Castagnoli suggère l'investigation de la distribution angulaire elle-même. Enfin le noyau-cible de l'interaction fut identifié comme étant un noyau de brome, grâce à l'utilisation d'une approche géométrique développée à cette fin.

## REMERCIEMENTS

Au cours de ce projet de recherches, j'ai accumulé une dette de reconnaissance envers plusieurs professeurs, étudiants et employés de l'Université d'Ottawa. Je voudrais maintenant m'en acquitter quelque peu.

En premier lieu, je tiens à remercier M. le professeur Jacques Hébert d'avoir bien voulu m'accueillir dans son laboratoire, de m'avoir proposé un problème de recherches si fascinant, et enfin de m'avoir appuyé de ses conseils et de son aide tout au long de mon stage d'étude et de recherches.

Parmi tous les autres qui à un moment ou l'autre m'ont apporté leur bienveillante collaboration, je m'en voudrais de ne pas accorder une mention spéciale à M. Robert Hart auquel je dois la fabrication des diverses modifications apportées à la platine rotative et inclinable, à M. Raymond Lavallée qui a préparé les graphiques pour cette thèse, à M. George Ben pour la photomicrographie et les photographies de l'appareil, et à Mlle Rose-Marie Ralph qui a entrepris avec dévouement de dactylographier cette thèse.

Cette note de gratitude serait certainement incomplète si le personnel du Centre de Calcul était oublié. Les résultats accumulés n'auraient jamais pu l'être sans leur coopération.

Enfin, il me fait plaisir de reconnaître l'assistance financière sous la forme d'une bourse du gouvernement d'Ontario dont j'ai joui durant mon stage d'étude.

Que tous et chacun, qui d'une manière ou d'une autre, m'ont permis de mener à terme ce projet de recherches, trouvent donc ici l'expression sincère de ma plus vive reconnaissance.

*Marc-Aurèle Vincent*  
Marc-Aurèle Vincent, o.m.i.

Ottawa, le 1<sup>er</sup> septembre 1966.

TABLE DES MATIERES

Sommaire .....	iii
Remerciements .....	iv
Table des matières .....	vi
Liste des illustrations .....	viii
Liste des tableaux .....	ix
Photomicrographie .....	x
INTRODUCTION .....	1
CHAPITRE 1: OBSERVATION DE L'ÉVENEMENT .....	3
A. Le problème expérimental .....	3
1. L'objectif: mesures angulaires .....	3
2. Fonctionnement de la platine rotative à inclinaison variable .....	8
3. Centrage et orientation de l'étoile ....	10
B. Mesures angulaires .....	10
1. Méthodes de l'écran .....	11
2. Méthode du réticule .....	12
3. Indications sur la précision des mesures..	14
a. Mesure des très petits angles .....	14
b. Précision des mesures obtenues par la méthode de l'écran .....	15
c. Conclusions .....	16
C. Compilation et réduction des mesures .....	16

CHAPITRE II: LE NOYAU INCIDENT .....	21
A. Etude de la trace du primaire lourd: la méthode des delta énergiques .....	22
B. Analyse de la gerbe .....	23
1. Bilan expérimental .....	23
2. Estimé de l'énergie du primaire .....	26
a. Séparation angulaire des alpha .....	26
b. Angle médian .....	27
c. Méthode de Castagnoli .....	30
i) Energie du primaire .....	32
ii) Etude des distributions angulaires .....	47
iii) Conclusion .....	50
3. Conclusion .....	50
CHAPITRE III: LE NOYAU-CIBLE .....	52
A. Le problème .....	52
B. La solution .....	52
1. Les noyaux légers .....	52
2. Les noyaux lourds .....	53
a. Approche géométrique .....	53
b. Données expérimentales .....	54
c. Conclusion .....	55
CONCLUSION .....	57
REFERENCES .....	60
APPENDICE 1: Liste complète des traces observées ....	61
APPENDICE 2: Volume découpé dans une sphère par un cylindre. [Article paru dans la Revue de l'Université d'Ottawa, 36, 121. (1966)]..	74

LISTE DES ILLUSTRATIONS

<u>Page</u>	
x	Photomicrographie d'une collision d'un noyau de Mn avec un noyau de Br.
5	Photographie 1: Vue d'ensemble du microscope.
7	Photographie 2: La platine rotative et inclinable.
9	Diagramme 1: Alignement d'une trace.
10	Diagramme 2: Définition des angles.
19	Graphique 1: Distribution spatiale des particules émises à l'intérieur d'un cône de $50^{\circ}$ .
20	Graphique 2: Distribution spatiale des particules à l'intérieur d'un cône de $6^{\circ}$ .
35	Histogramme 1: Distributions du Groupe A dans le système du laboratoire.
36	Histogramme 2: Distributions du Groupe A dans le système du centre de masse (C.M.).
37	Histogramme 3: Distributions du Groupe B dans le labo.
38	Histogramme 4: Distributions du Groupe B dans le C.M.
39	Histogramme 5: Distributions du Groupe C dans le labo.
40	Histogramme 6: Distributions du Groupe C dans le C.M.
41	Histogramme 7: Distributions du Groupe D dans le labo.
42	Histogramme 8: Distributions du Groupe D dans le C.M.
43	Histogramme 9: Distributions du Groupe E dans le labo.
44	Histogramme 10: Distributions du Groupe E dans le C.M.
45	Histogramme 11: Distributions du Groupe F dans le labo.
46	Histogramme 12: Distributions du Groupe F dans le C.M.

LISTE DES TABLEAUX

Page

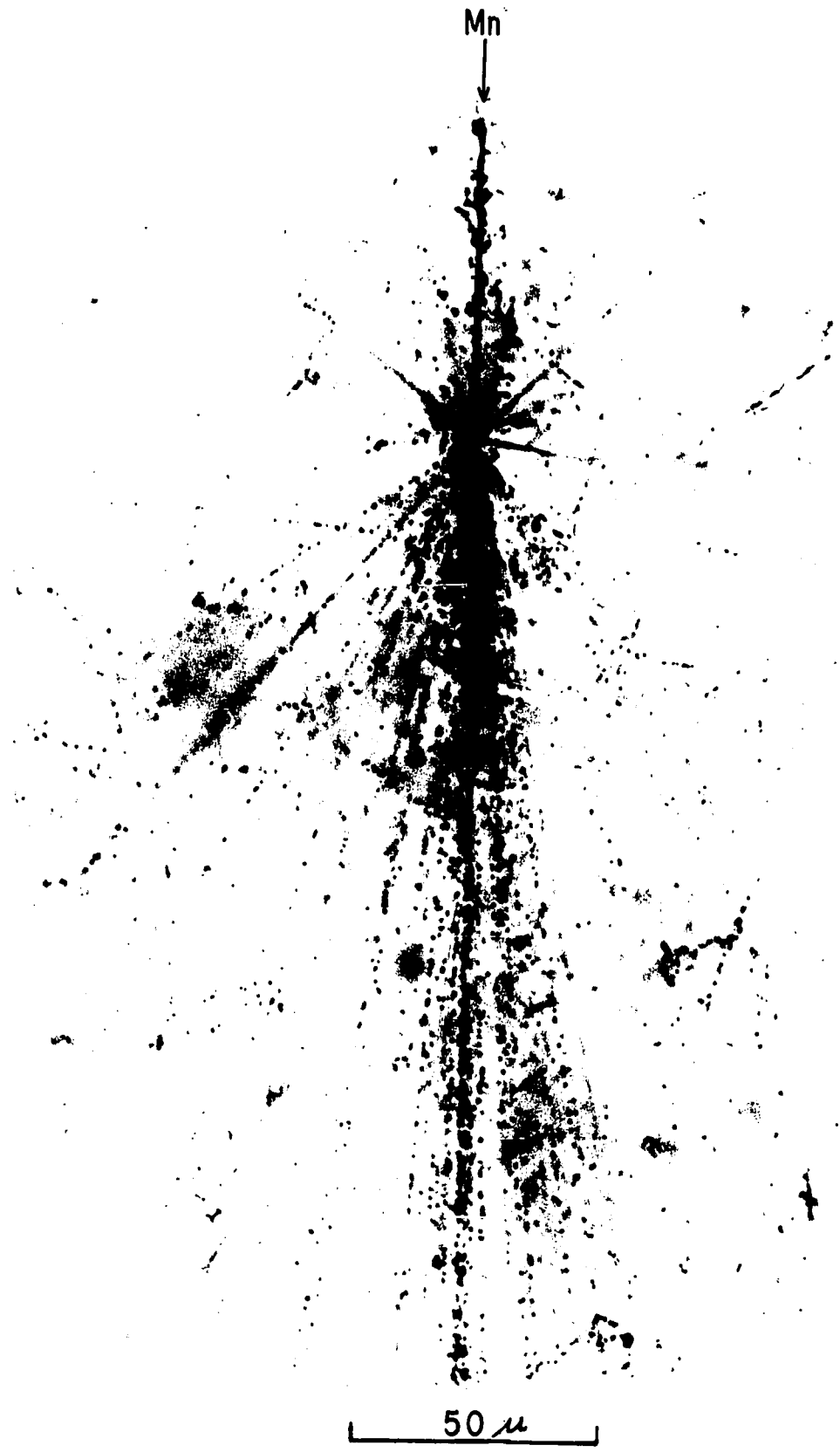
- 15      Tableau 1: Ecart angulaire entre les deux alpha.
- 15      Tableau 2: Reproductibilité des mesures angulaires.
- 30      Tableau 3: Energie du primaire d'après la méthode de l'angle médian.
- 34      Tableau 4: Energie du primaire d'après la méthode de Castagnoli.
- 49      Tableau 5: Bilan du test  $\chi^2$ .
- 56      Tableau 6: Nombre de charges non impliquées dans la collision.

Mn



50  $\mu$

Photomicrographie d'une collision d'un noyau de Br avec un noyau de Mn pénétrant par le haut dans une émulsion de type Ilford G.5.



Photomicrographie d'une collision d'un noyau de Fe avec un noyau de Mn pénétrant par le haut dans une émulsion de type Ilford G.5.

## INTRODUCTION

En 1954 avait lieu une irradiation d'émulsions nucléaires à très haute altitude près de l'équateur. Au cours de l'examen des plaques, une interaction nucléaire particulièrement intéressante fut repérée. Une trace de primaire lourd ayant pénétré pratiquement parallèle à l'émulsion y parcourt quelques 9.4 cm avant de se terminer en une magnifique gerbe de quelque 150 traces. Vu sa position exceptionnellement favorable presque à mi-chemin entre les deux surfaces de l'émulsion et à plus de 5 cm de la plus proche extrémité, cette étoile fascinante invitait à une analyse plus détaillée. La photomicrographie jointe à cette thèse et l'agrandissant environ 800 fois, donne, somme toute, une assez faible idée de sa complexité.

L'énergie ainsi que la charge de la particule incidente ayant été mesurée à l'aide du rayonnement delta énergétique<sup>(1)</sup>, une première analyse de la distribution angulaire des traces de la gerbe fut entreprise. Elle démontra la nécessité de construire une platine rotative et inclinable afin de faciliter les mesures et d'en améliorer la précision. La mise au point et surtout l'application de cette platine à l'étude d'une gerbe constituèrent une des phases importantes du projet de recherches dont traite cette thèse. Il comporta l'exploration de plusieurs autres aspects de l'étude d'une collision noyau-noyau, tous pouvant se rattacher au problème de l'identification des deux noyaux en cause.

D'où la division tripartite de cette thèse. Un premier chapitre décrira le problème expérimental que pose l'analyse d'une gerbe de traces très dense et la solution qui y fut apportée. Un deuxième chapitre groupera les diverses données concernant le noyau incident, l'insistance portant sur les diverses approches à la détermination de son énergie et quelques-unes de leurs implications. Enfin un dernier chapitre présentera une nouvelle méthode de type géométrique développée pour l'identification du noyau-cible.

La complexité de l'événement étudié a ainsi provoqué la création de nouvelles méthodes de travail et d'analyse. Cette thèse voudrait refléter ce fait et mettre en évidence plutôt cet aspect méthodologique que la description de l'événement lui-même à l'origine de ces recherches.

## CHAPITRE I: OBSERVATION DE L'EVENEMENT

### A. Le problème expérimental.

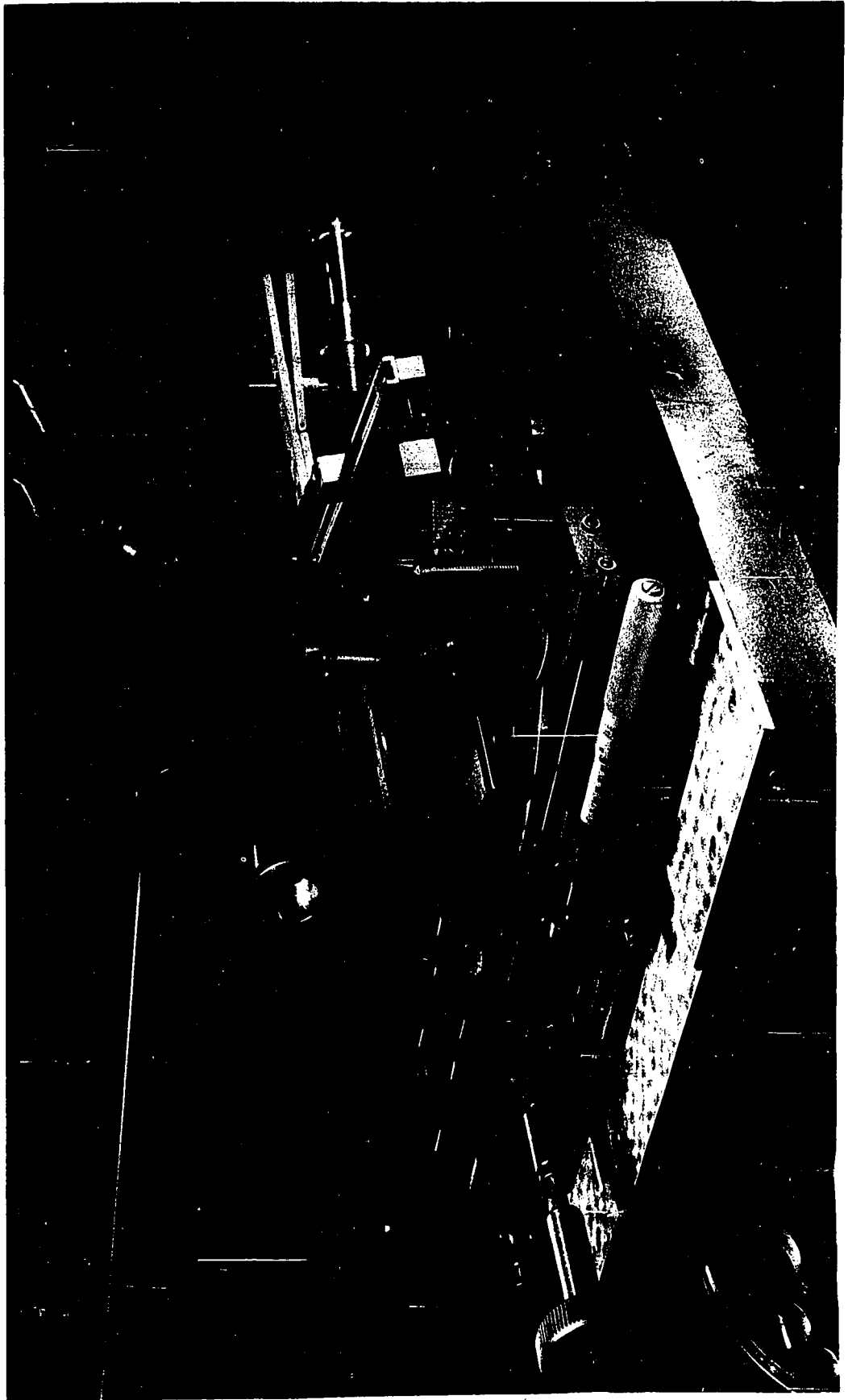
#### 1. L'objectif: mesures angulaires.

Il existe plusieurs façons de procéder à la mesure de la séparation angulaire entre deux traces dans une émulsion. Prenant le point où elles se rencontrent comme le centre de référence, on peut mesurer leurs projections sur trois plans mutuellement perpendiculaires et ayant le même centre de référence. Muni de cette information et des relations trigonométriques appropriées, on peut alors calculer l'angle séparant les deux traces en question. Telle est en principe la méthode communément utilisée. Fastidieuse, elle est d'ailleurs peu précise vu les erreurs assez considérables liées à toute mesure de profondeur dans l'émulsion. Il n'est pas rare que les angles ainsi déterminés accusent des incertitudes de  $1^{\circ}$ ,  $2^{\circ}$  et même plus. La recherche d'une méthode d'investigation à la fois plus simple et surtout plus précise suscita l'élaboration et la fabrication d'une platine rotative et à inclinaison variable, adaptée à une platine à suspension sur lames. Elle fut l'oeuvre conjointe de M. Jacques Hébert, directeur du laboratoire, et de M. Josef Roeslmair, alors technicien affecté aux travaux de haute précision au département. Son utilisation concrète entraîna naturellement quelques modifications en vue d'assurer soit un meilleur rendement à l'appareil, soit tout simplement la prise de lectures angulaires.

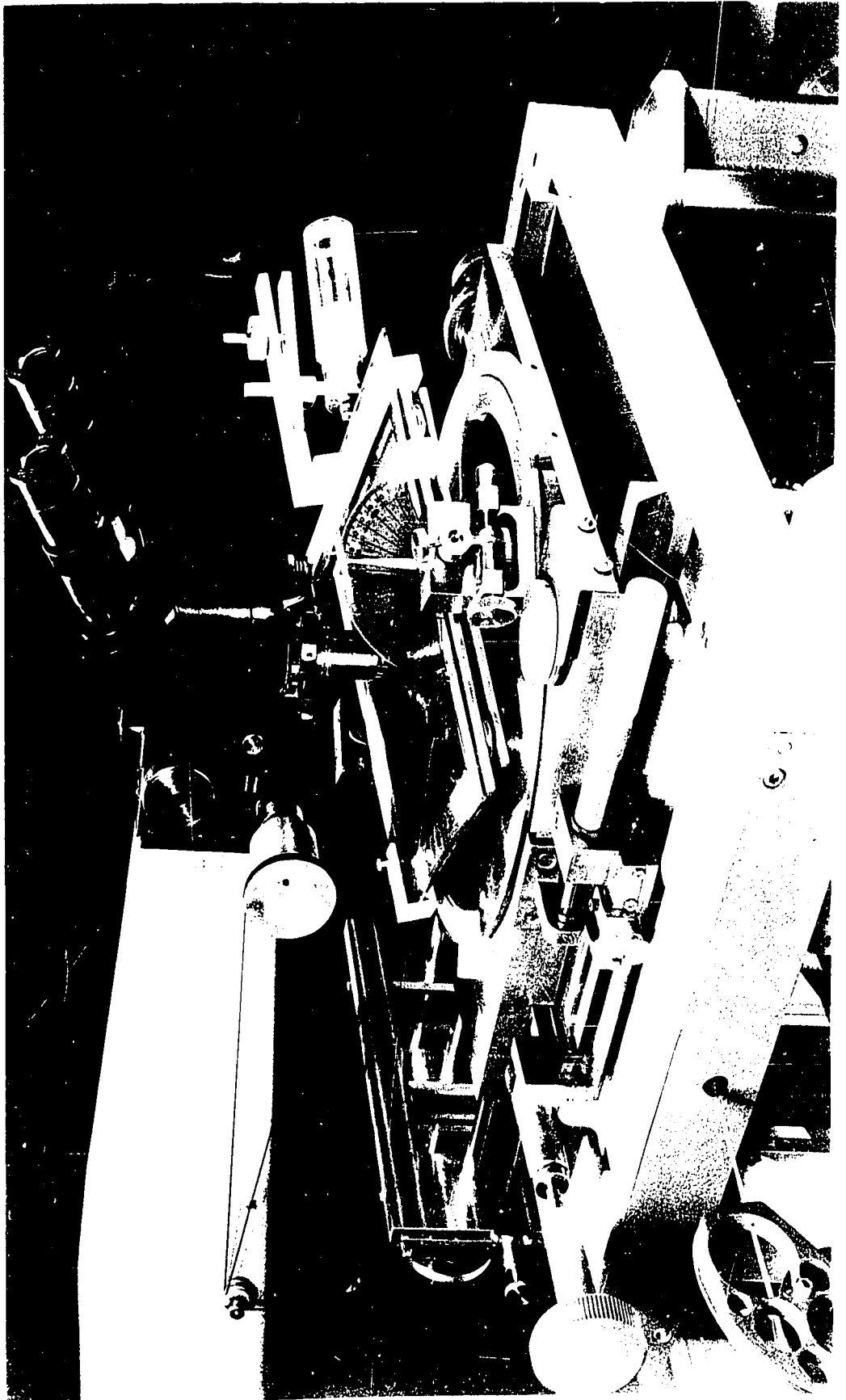
Dans le but de réduire le frottement et d'améliorer la rotation de la platine selon son axe vertical, trois billes également espacées furent ajoutées de telle sorte que le cercle extérieur de la platine rotative glisse uniquement sur celles-ci plutôt que sur toute la surface du cercle correspondant de la base. Fixées au bout de vis, la position de deux de ces billes est ajustable à volonté, un ressort poussant la troisième bille contre la paroi circulaire de la platine rotative. Cet arrangement rendait possible un dernier centrage de l'événement par rapport à l'axe vertical de rotation. Enfin chacune des billes est de plus munie d'un dispositif pour la fixer en place; ainsi l'ajustement final devient-il permanent.

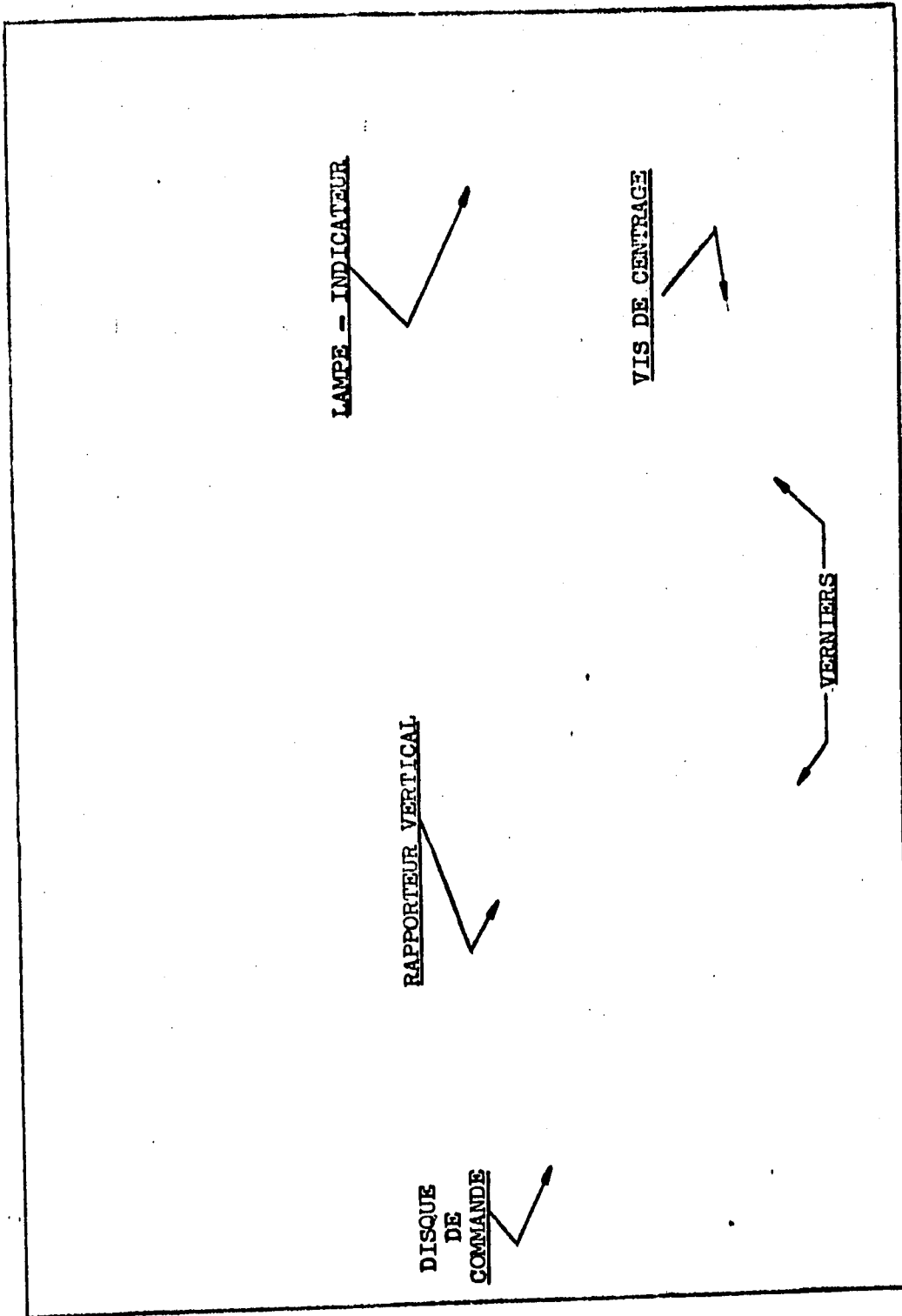
Toujours dans le même but d'obtenir une rotation azimutale plus régulière, un disque encerclé d'un anneau en caoutchouc fut installé pour commander cette rotation. Cet arrangement fut trouvé très satisfaisant.

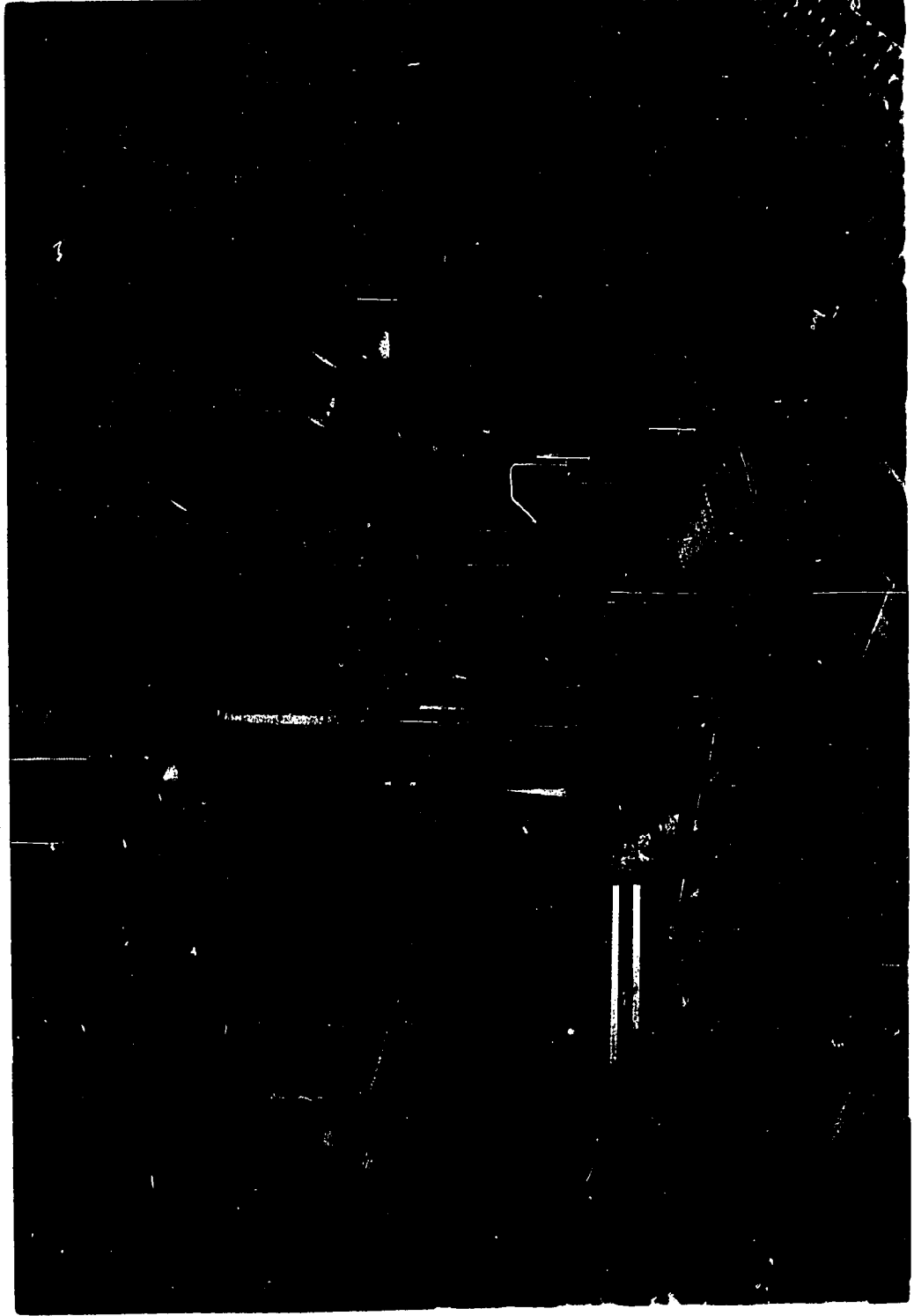
Un système de verniers fabriqué à l'atelier fut posé rendant ainsi possible la lecture au  $0.01^{\circ}$  des angles azimutaux inférieurs à  $60^{\circ}$  et au  $0.2^{\circ}$  des angles entre  $60^{\circ}$  et  $84.5^{\circ}$ . Une lecture rapide au  $0.5^{\circ}$  de l'inclinaison peut être obtenue à l'aide d'un rapporteur vertical fixé à l'axe d'inclinaison.



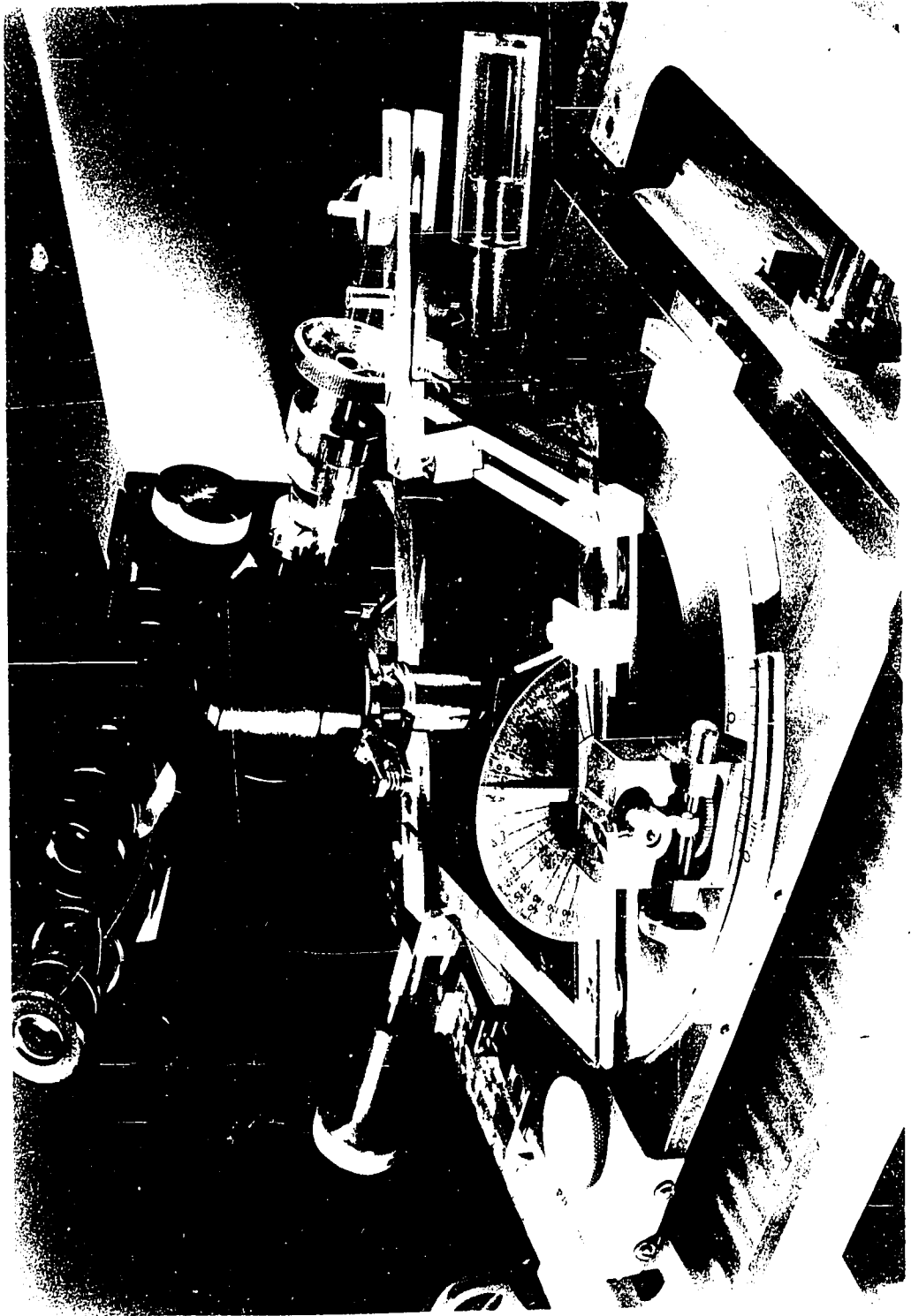
Photographie 1: Vue d'ensemble du Microscope.







Photographie 2: La platine rotative et inclinable.



La précision requise dans la détermination des petits angles amena le développement d'un autre système dont le fonctionnement sera décrit plus bas. Il s'agit d'une lampe-indicateur fixée à la platine inclinable et capable de projeter sur un écran l'image d'un réticule. Le pont de cette lampe fut conçu de telle sorte que la position verticale et horizontale de la lampe, ainsi que son inclinaison puissent être modifiées selon les besoins.

Toutes ces modifications apparaissent sur les photographies 1 et 2 de l'appareil jointes à cette thèse. Plutôt que de s'appesantir davantage sur la description technique de cet appareil, cette thèse préfère insister surtout sur son fonctionnement dans un effort de mettre en relief comment cette platine est en mesure d'offrir une meilleure détermination de la distribution angulaire d'une gerbe bien fournie.

## 2. Fonctionnement de la platine rotative à inclinaison variable.

Si c'était réalisable, il serait souhaitable de placer la plaque ionographique contenant l'étoile à analyser sur une platine permettant d'aligner successivement avec la direction de la trace incidente chacune des traces de la gerbe en opérant une rotation selon un axe vertical et une inclinaison selon un axe horizontal, l'étoile ayant été préalablement centrée

au point d'intersection des deux axes. Si de plus l'émulsion était posée avec soin sur la platine de telle sorte que la trace incidente et les axes de rotation et d'inclinaison soient tous trois mutuellement perpendiculaires, alors la lecture des angles de rotation et d'inclinaison suffirait à définir complètement et directement la position exacte de chacune des traces par rapport à la trace incidente. (Voir diagramme 1).

Une telle solution est sans aucun doute très élégante mais sa réalisation ne peut échapper aux limites que lui impose nécessairement l'ensemble du montage expérimental.

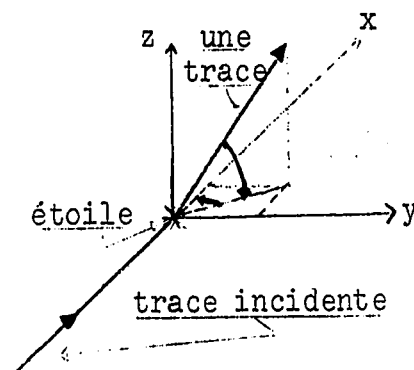


Diagramme 1

De soi, le montage admettait des rotations complètes de la platine selon son axe vertical et des inclinaisons allant jusqu'à une douzaine de degrés aussi bien vers le haut que vers le bas. En dernière analyse, la plus sérieuse restriction aux mouvements de la platine provenait de la lampe-indicateur qui y était fixée pour l'étude des traces peu déviées par rapport à la direction de la trace incidente. Cette lampe projetait sur un écran placé à quelques deux mètres de l'étoile l'image d'un réticule indiquant justement la direction de la trace incidente. Elle était donc utilisée pour la méthode dite de l'écran qui sera décrite plus bas.

### 3. Centrage et orientation de l'étoile.

A la lumière des considérations précédentes sur le fonctionnement de la platine, il est clair que revêt une importance capitale la mise en place de l'émulsion de telle sorte que l'étoile soit au point de rencontre des deux axes rotation de la platine et que sa trace incidente leur soit perpendiculaire. Ce centrage initial ne saurait être absolument parfait. Les légères imperfections inhérentes à tout appareil suffisent à expliquer le vagabondage de l'étoile qui accompagne toute rotation exécutée par la platine. Ce déplacement hors centre ne dépassant pas les 40 microns s'est avéré sans répercussion appréciable sur la qualité des mesures quoiqu'il rendit l'alignement des traces plus délicat et plus ardu. Les quelques indications rassemblées plus loin sur la précision des mesures en font foi.

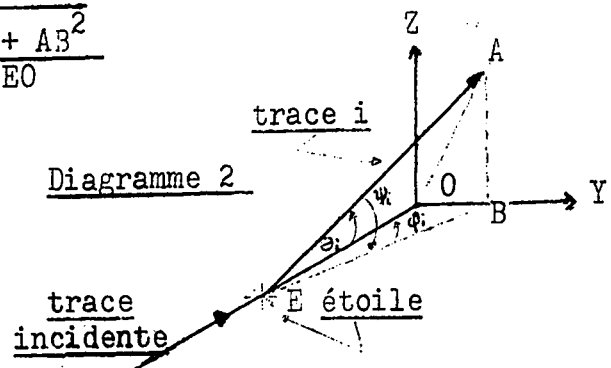
### 3. Mesures angulaires.

L'angle  $\theta_i$  entre chacune des traces  $i$  et la trace incidente est calculé à partir de l'angle de rotation  $\varphi_i$  et l'angle d'inclinaison  $\psi_i$  définis par les relations suivantes:

$$[1] \quad \tan \theta_i = \frac{OA}{EO} = \frac{\sqrt{OB^2 + AB^2}}{EO}$$

$$[2] \quad \tan \varphi_i = \frac{OB}{EO}$$

$$[3] \quad \tan \psi_i = \frac{AB}{EB}$$



Les dimensions concrètes de l'ensemble du montage exigèrent le développement et l'emploi de deux méthodes différentes pour l'évaluation des angles dont voici maintenant la description telle qu'annoncée.

#### 1. Méthode de l'écran.

L'application de cette méthode est restreinte aux traces dont l'angle  $\theta$  est inférieur à  $30^\circ$  compte tenu de la contraction de leur inclinaison dû à l'affaïssement de l'émulsion au cours de son développement.

La première étape consiste à tracer sur l'écran à l'aide de la lampe-indicateur deux droites se croisant au point précis où le prolongement de la trace incidente viendrait tomber perpendiculairement sur l'écran, l'étoile ayant été centrée et orientée tel qu'indiqué précédemment. La ligne horizontale s'obtient en opérant une rotation de la platine selon l'axe vertical, l'inclinaison étant maintenue constante (l'angle  $\psi = 0^\circ$ ); ramenant ensuite la platine à sa position initiale et fixant l'angle  $\varphi$  à  $0^\circ$ , la ligne verticale est tracée en variant l'inclinaison. Les deux lignes ainsi tracées seront droites et se couperont à angle droit pourvu que l'étoile ait été correctement placée au centre de rotation du système avec sa trace incidente initialement perpendiculaire aux deux axes eux-mêmes se croisant à angle droit. Cette première étape fut

répétée plusieurs fois au début de différentes sessions de mesure et chaque fois la vérification de l'angle entre les deux lignes tracées ainsi révéla qu'elles étaient perpendiculaires à au moins  $1/4$  de degré près.

La deuxième étape consiste à aligner à tour de rôle chacune des traces avec la direction initiale de la trace incidente en tournant et inclinant la platine amenant ainsi un déplacement du repère projeté par la lampe sur l'écran. La mesure de ce déplacement par rapport aux deux droites tracées sur l'écran permet de calculer les angles  $\varphi$ ,  $\psi$  et  $\theta$  en se servant des relations [1], [2], [3] définies plus haut. La distance EO est alors la distance entre l'étoile et l'écran. La distance verticale mesurée doit être multipliée par S, le facteur d'affaissement pour obtenir AB selon la formule

$$[4] \quad AB = S \times H$$

où H = la hauteur verticale telle que mesurée sur l'écran,

$$S = \frac{\text{épaisseur initiale de l'émulsion avant son développement}}{\text{épaisseur de l'émulsion au moment de l'observation}}$$

## 2. Méthode du réticule.

Il fallut avoir recours à une autre méthode pour les traces à l'extérieur du cône de  $30^{\circ}$ . Elle est caractérisée par l'utilisation d'un réticule oculaire, d'où son appellation. Quoiqu'en principe elle pourrait servir pour la mesure de toutes les traces, elle ne saurait atteindre la précision de la première méthode dans l'évaluation des petits angles.

L'étoile ayant été centrée et orientée comme pour la première méthode, l'inclinaison de la platine est maintenue fixe pour la durée des mesures. Pour évaluer l'angle de rotation ( $\varphi$ ) d'une trace, il suffit de faire subir une rotation à la platine selon son axe vertical jusqu'à ce que la trace en question se retrouve dans le plan vertical contenant au point de départ la trace incidente. L'angle de rotation est alors lu directement à même l'échelle fixée à la platine. L'angle d'inclinaison pour sa part est estimé en mesurant la différence de niveau entre l'étoile et un point de la trace éloigné de quelques 200 microns. La relation [3] définissant l'angle d'inclinaison  $\psi$  prend alors la forme suivante:

$$[5] \quad \tan \psi = \frac{AB}{EB} = \frac{Sh}{p}$$

où  $S$  = le facteur d'affaîssement,

$h$  = la différence de niveau entre l'étoile et le point de la trace en question. Un vernier attaché à la tête du microscope est utilisé à cette fin.

$p$  = la longueur de la projection dans le plan horizontal du segment de la trace en considération. Cette distance est estimée en se servant du réticule oculaire. Sa calibration à l'aide d'un micromètre objectif révéla qu'une division du réticule équivalait à  $1.93 \mu$ .

### 3. Indications sur la précision des mesures.

Avant de commencer le balayage méthodique des traces émanant de l'étoile, on procéda à un sondage rapide de la précision et de la reproductibilité dans l'alignement des traces et par suite dans la détermination des angles impliqués. Les résultats furent si satisfaisants que le projet de recherches envisagé n'exigea pas une étude systématique de l'appareil afin d'en définir les limites sous cet aspect. Cependant l'inspection après coup des mesures prises sans même ce souci offre de précieuses indications sur la précision que peut fournir l'appareil surtout en employant la méthode de l'écran.

#### a. Mesure des très petits angles.

Les traces laissées par les deux particules alpha émergeant du foyer de rayonnement fournissent une excellente illustration de la possibilité d'estimer l'écart entre deux traces très rapprochées. Ces deux traces furent indiquées sur l'écran au début de trois sessions successives. ( Voir Appendice 1 ). Le tableau suivant rapporte la moyenne des angles entre chacune des deux traces et la direction de la trace incidente ainsi que l'erreur maxima observée entre les trois déterminations:

Tableau 1: Ecart angulaire entre les 2 alpha

angles	$\alpha_1$	$\alpha_2$	erreur maxima
$\bar{\psi}$	$-0.07^\circ$	$0.09^\circ$	$0.07^\circ$
$\bar{\psi}$	$-0.02^\circ$	$0.17^\circ$	$0.24^\circ$

b. Précision des mesures obtenues par la méthode de l'écran.

Une douzaine de mesures ont été notées au moment même de l'observation comme étant des reprises de traces déjà alignées et enregistrées. Le tableau suivant fournit une indication de la reproductibilité des mesures; il rapporte la plus grande et la plus petite erreur observées entre deux mesures d'une même trace ainsi que l'erreur moyenne pour les douze traces considérées.

Tableau 2: Reproductibilité des mesures angulaires

angles	erreurs	erreur moyenne
$19.5^\circ >  \varphi  > 0.2^\circ$	$0.28^\circ > \Delta\varphi > 0.03^\circ$	$\overline{\Delta\varphi} = 0.11^\circ$
$21.5^\circ >  \psi  > 0.4^\circ$	$1.30^\circ > \Delta\psi > 0.007^\circ$	$\overline{\Delta\psi} = 0.36^\circ$

c. Conclusions.

Dans les mesures angulaires, on remarque que l'angle  $\psi$  accuse la plus grande erreur. Ceci s'explique du fait que sa valeur mesurée est multipliée par environ 2.6, le facteur d'affaîssement. De toute évidence ces quelques indications démontrent que l'appareil utilisé avec la méthode de l'écran apporte une amélioration incontestable aux techniques employées à date pour la détermination des angles entre les traces d'une étoile enregistrée dans une émulsion.

C. Compilation et réduction des mesures.

Un balayage systématique de la gerbe par quadrant et par agglomérats de traces livra un total de 218 mesures dont 137 par la méthode de l'écran et 81 par celle du réticule. Elles ne représentent cependant pas autant de traces indépendantes vu l'inévitabilité de la reprise de traces limitrophes à deux quadrants ou aux régions balayées par chacune des méthodes. La compilation et la réduction des données expérimentales prenaient ainsi une importance majeure dans l'étude du phénomène.

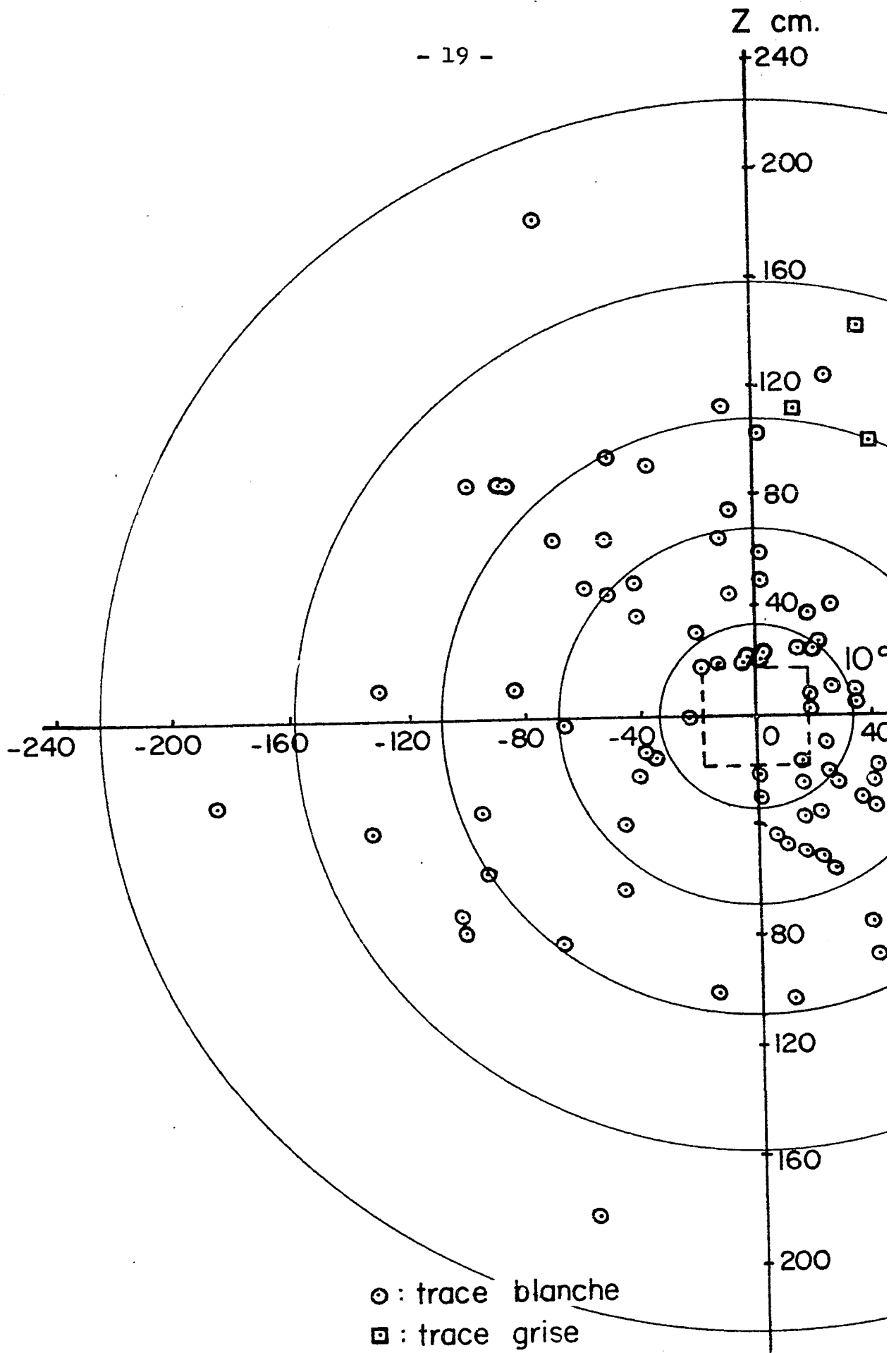
La compilation fut grandement facilitée grâce au concours d'une ordinateur de type IBM 1620-II à laquelle fut confié le calcul des angles  $\varphi$ ,  $\psi$  et  $\theta$  de chacune des traces observées ainsi que les coordonnées Y et Z de son intersection avec un plan perpendiculaire à la direction initiale de la trace incidente et située à 200 cm. de l'étoile, l'intersection de cette direction initiale de la trace incidente avec le plan

définissant le centre de ce système de coordonnées. Pour chacune des traces mesurées une carte portant ces renseignements fut poinçonnée. Il s'agit alors de reclassifier les cartes pour retrouver les multiples déterminations d'une même trace en vue d'en établir la moyenne pour les calculs ultérieurs. Evidemment il fallut alors se référer aux observations originales pour décider si deux traces numériquement rapprochées étaient en réalité physiquement distinctes dans la gerbe.

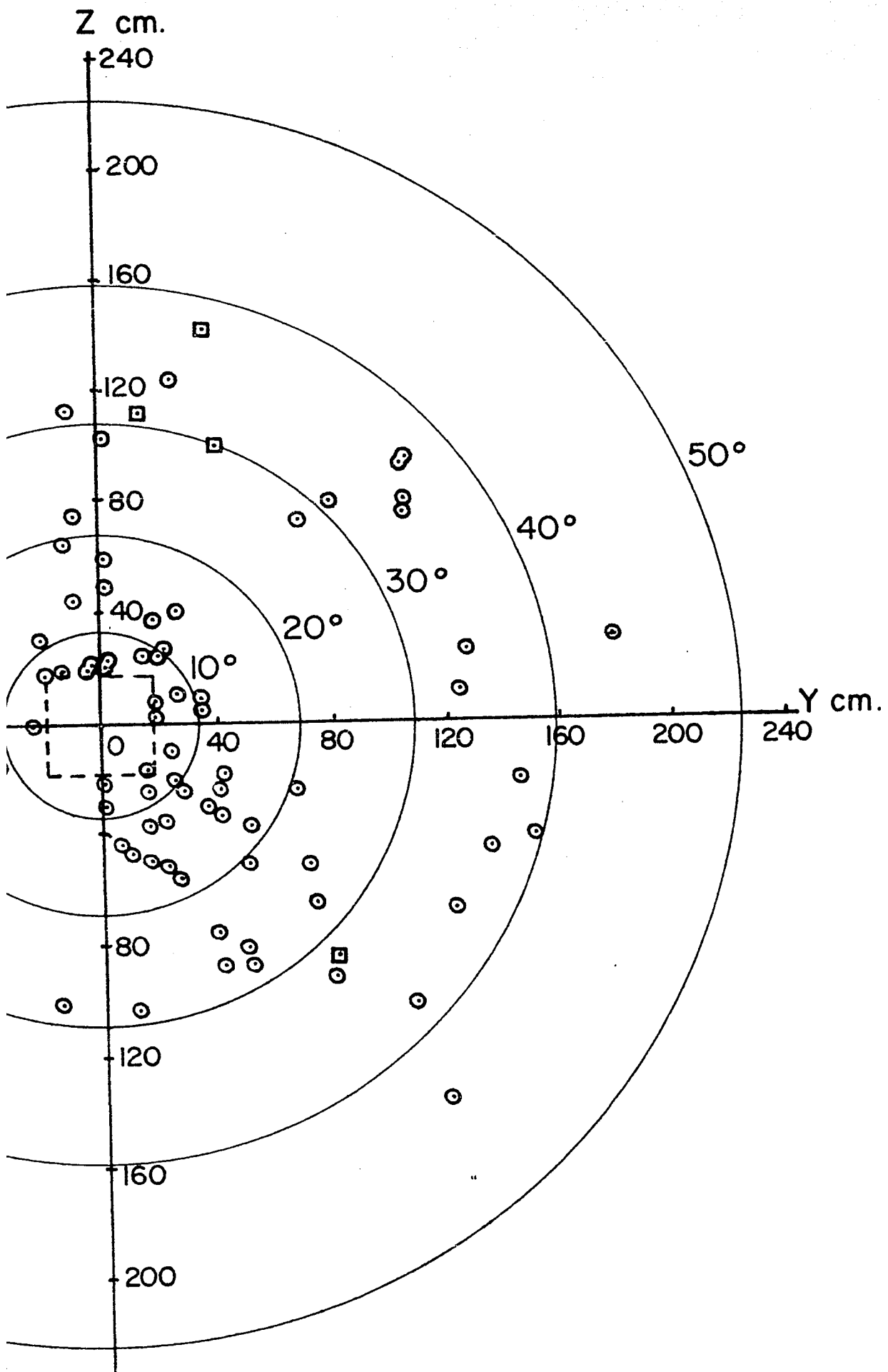
Il faut noter ici que l'expérience démontra que l'emploi d'un objectif à immersion de 53X et d'oculaires de 10X permettait non seulement un meilleur alignement de chacune des traces mais en même temps la possibilité d'en observer plusieurs autres dans un voisinage plus ou moins immédiat. Ceci fournissait à la fois l'assurance qu'une même trace n'était pas enregistrée plusieurs fois à l'insu de l'observateur et que deux ou trois traces très rapprochées étaient vraiment distinctes.

Ainsi des 137 traces observées par la méthode de l'écran, 103 furent jugées indépendantes tandis que 73 des 81 traces enregistrées par celle du réticule furent retenues comme distinctes. De plus, 18 traces furent analysées par les deux méthodes, ce qui réduit le nombre total de traces indépendantes à 158. Grâce à la transformation de toutes les mesures à un unique système de référence, il fut possible de dresser les graphiques 1 et 2 représentant l'intersection avec le plan défini

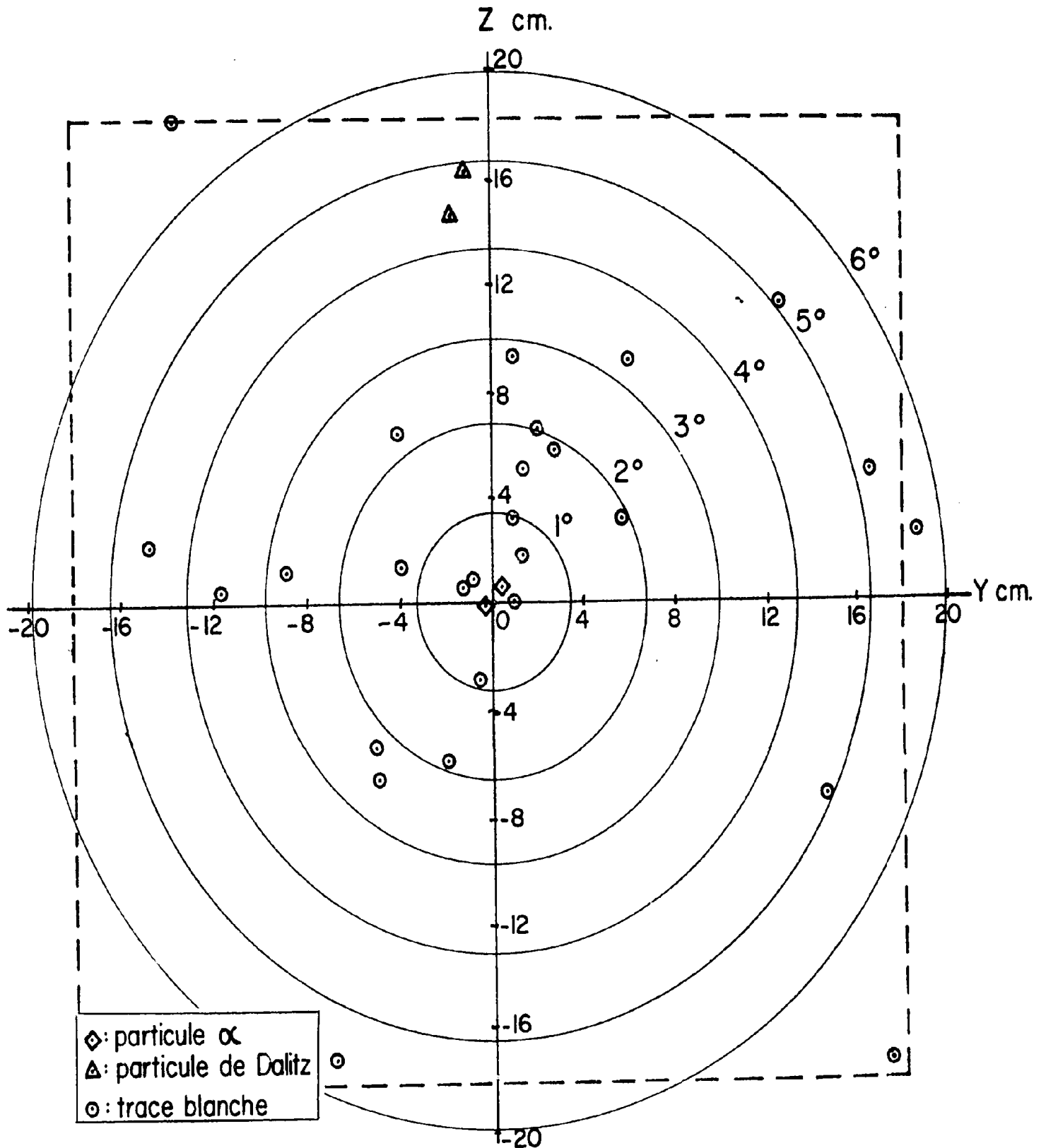
par ce système, de chacune des 127 traces indépendantes tombant à l'intérieur d'un cône de  $50^{\circ}$ . Cette distribution spatiale des traces qui tient compte du facteur d'affaïssement reproduit donc l'éventail des traces tel qu'il s'est déployé dans l'émulsion au moment de la collision.



Graphique I: Distribution spatiale des particules é  
l'intérieur d'un cône de 50°



des particules émises vers l'avant à  
de 50°



Graphique 2: Distribution spatiale des particule émises vers l'avant à l'intérieur d'un cône de 6°

## CHAPITRE II: LE NOYAU INCIDENT.

L'identification du noyau incident comporte la détermination de sa charge, de sa masse atomique et de son énergie. L'étude par la méthode des delta énergiques de la trace laissée dans l'émulsion par le primaire lourd livre des renseignements sur sa charge et son énergie et partant sur sa masse atomique. Par contre l'analyse des traces émanant du foyer de la collision donne lieu à l'utilisation de trois autres méthodes pour l'estimation de l'énergie du primaire.

Dès l'abord, il convient d'exposer brièvement la représentation de l'interaction qui servira de cadre de pensée aux deux prochains chapitres. Une collision noyau-noyau très énergétique est envisagée ici comme se déroulant en deux phases successives: 1) l'interpénétration des noyaux, et 2) la désintégration des sections non directement impliquées dans la collision.

1) La collision proprement dite comportant le découpage d'un tunnel à travers chacun des noyaux peut être envisagée comme une multitude de collisions nucléon-nucléon indépendantes entre les nucléons dans la zone d'interpénétration. Ceci suggère le recours à la méthode de Castagnoli pour le calcul de l'énergie du noyau incident.

2) Les deux sections extérieures à cette zone de compénétration se comporteraient comme des fragments excités, chacun se désintégrant de son côté, celui du noyau-cible absorbant le recul de la réaction et celui du noyau incident poursuivant sa course rectiligne presque sans déviation.

A. Etude de la trace du primaire lourd: méthode des delta énergiques.

Cette étude fut entreprise et menée à terme par Jacques Hébert qui à cette fin développa la méthode des delta énergiques pour les primaires lourds à haute énergie ( $> 10^9$  ev). L'exposé de cette méthode et de son application à l'étoile à l'étude ici firent l'objet d'une communication<sup>(1)</sup> présentée au Troisième Colloque de Photographie Corpusculaire tenu à Moscou en juillet 1960. De la distribution angulaire des delta énergiques qui accompagnent la trace du primaire lourd inscrite dans l'émulsion, cette méthode conclut à la charge du primaire. Les delta énergiques dont l'angle d'émission est inférieur à  $4^\circ$  ont servi à estimer l'énergie de la particule cosmique.

Selon les mesures récentes\* des delta énergiques émanant de la trace du primaire, sa charge s'établit à  $Z = 25 \pm 2$  et son énergie à  $13 \pm 2$  Gev/nucléon. De plus, puisqu'il est

\* J. Hébert, à publier.

généralement admis que les primaires lourds cosmiques de haute énergie nous parviennent totalement dépouillés de leurs électrons<sup>(2,3)</sup>, le noyau incident peut être vraisemblablement identifié comme un noyau de manganèse ( ${}_{25}^{\text{Mn}}{}^{55}$ ), le seul isotope stable ayant une charge de  $Z = 25$ .

## B. Analyse de la gerbe.

Avant d'aborder les trois méthodes d'estimer l'énergie du primaire lourd à partir de la distribution angulaire de toutes ou une partie des particules secondaires émises à la suite de sa collision avec un noyau de l'émulsion, il convient de dresser à cette fin un bilan de l'investigation expérimentale.

### 1. Bilan expérimental.

Parmi les 158 traces indépendantes de la gerbe, il faut distinguer une paire d'alpha très énergiques émis vers l'avant, 2 paires de Dalitz, 6 traces noires, 9 traces grises et enfin 2 traces blanches de faible parcours considérés comme probablement dues à des électrons. A celles-ci il faut joindre cinq autres traces ayant subi très peu de déviation par rapport à la direction de la trace incidente. Trois d'entre elles sont certainement dues à des protons en provenance de cette section du noyau incident qui n'a pas participé à la collision. Les deux autres pourraient aussi être des protons quoique leur

diffusion légèrement plus forte ne permet pas d'exclure la possibilité qu'elles sont dues à des mésons énergiques.

La paire d'alpha très énergiques vers l'avant servira à l'évaluation de l'énergie par la première méthode. L'emploi des deux autres méthodes exige au moins l'exclusion des alpha, des paires de Dalitz et de toutes les traces noires, ce qui laisse au plus 146 traces pour les calculs. Pour des raisons diverses, il est indiqué d'exclure également en partie ou en totalité les autres traces ayant reçu une mention spéciale plus haut. Ceci donne naissance à plusieurs groupes de traces qu'il est instructif de soumettre aux calculs commandés par les méthodes en question. En vue de clarifier la discussion qui va suivre et d'en simplifier la rédaction, il s'avère indispensable de cataloguer les divers groupes qui ont été retenus pour considération:

Groupe A: Il comprend 146 traces résultant de l'élimination des alpha, des paires de Dalitz et des traces noires, toutes des traces non-mésoniques.

Groupe B: Il est composé de 132 traces obtenues par l'élimination du groupe A de traces certainement ou presque certainement non-mésoniques soit les 9 traces grises, les deux traces de faible parcours, et les traces laissées par les trois protons émergeant de la section du noyau incident qui poursuit sa course avec pratiquement aucune déviation après la collision.

Groupe C: L'élimination du groupe B de deux autres traces dues probablement à deux autres protons, en provenance de cette portion du noyau incident ayant échappé à la collision proprement dite, porte à 130 le nombre de traces disponibles pour les calculs envisagés.

Groupe D: M. L. Shen et M. F. Kaplon<sup>(4)</sup> proposent l'élimination de toute trace dont l'angle d'émission  $\theta$  est inférieur à  $1.4^\circ$  ou supérieur à  $80^\circ$ . L'application de ce critère au groupe B réduit le nombre de traces à 125.

Groupe E: Un groupe de 114 traces est constitué en éliminant du groupe B ses 18 traces les moins déviées dans l'espoir de diminuer l'effet de la contamination de la distribution mésonique par les 25 charges du noyau incident dont la majorité subiront des déviations relativement faibles vu leur très haute énergie initiale.

Groupe F: Enfin un dernier groupe de 111 traces est formé en appliquant le critère du groupe D au groupe E. Ceci est d'autant plus indiqué qu'aucune trace n'est observée dans l'intervalle défini par  $(64^\circ \leq \theta \leq 80^\circ)$ .

2. Estimé de l'énergie du primaire.

a. Séparation angulaire des alpha.

L'interprétation communément admise des alpha émergeant du foyer d'interaction presque sans déviation relativement à la direction de la trace initiale veut qu'ils proviennent de cette partie du noyau incident qui n'ayant pas participé à la collision poursuit sa course rectiligne en se désintégrant au vol. Si une telle représentation est justifiée, l'ouverture angulaire des alpha devrait fournir une mesure de l'énergie du primaire. Dans l'hypothèse d'une émission isotrope des particules alpha dans le système de repos du noyau incident, l'énergie du primaire peut être estimée à l'aide de la formule suivante:

$$[6] \quad \langle \theta^2 \rangle = \frac{\langle T \rangle Mc^2}{3(pc)^2} = \frac{\langle T \rangle Mc^2}{3E^2} = \left( \frac{0.06}{E} \right)^2$$

où  $\langle \theta^2 \rangle$  = valeur quadratique moyenne des angles d'émission des particules alpha dans le système du laboratoire;

$\langle T \rangle$  = énergie cinétique moyenne des particules alpha dans le système d'inertie du noyau incident;  
= 12 Mev environ. [Selon Peters<sup>(2)</sup> et Kaplon<sup>(3)</sup> elle se situe entre 10 et 15 Mev];

M = masse au repos du nucléon;

c = vitesse de la lumière dans le vide;

p = quantité de mouvement par nucléon;

E = énergie du noyau incident en Gev par nucléon.

Quoiqu'il soit reconnu que cette approche risque de surestimer l'énergie du primaire surtout là où seulement un ou deux alpha sont disponibles pour les calculs, il est instructif, à la suite d'autres auteurs<sup>(5)</sup> de les tenter au moins pour fin de comparaison avec des méthodes plus sûres. Les deux alpha observés accusant des angles  $\theta$  de  $0.09^\circ$  et de  $0.20^\circ$ , l'énergie du primaire selon cette approche s'établit à environ 21 Gev/nucléon.

b. Angle médian.

Récemment, dans un article où ils proposent une nouvelle méthode pour évaluer l'énergie des primaires cosmiques, M. L. Shen et M. F. Kaplan<sup>(4)</sup> ont revu succinctement celle de l'angle médian et celle de Castagnoli ayant toutes deux en commun le point de départ et deux postulats. Il est inutile d'y revenir sinon pour rappeler quelques-unes des relations les plus fondamentales.

La transformation de Lorentz constitue le point de départ. Elle stipule que les angles  $\theta_i^*$  du système du centre de masse sont reliés aux angles correspondants  $\theta_i$  dans le système du laboratoire par la relation suivante:

$$[6] \quad \tan \theta_i = \frac{1}{\gamma} \frac{\sin \theta_i^*}{\cos \theta_i^* + (\beta/\beta_i^*)}$$

où 
$$\gamma = \frac{1}{\sqrt{1 - \beta^2}}$$

$\beta$  = la vitesse du centre de masse dans le système du laboratoire;

$\beta_i^*$  = la vitesse, dans le système du centre de masse, de la particule  $i$  se déplaçant à un angle  $\theta_i^*$  par rapport à la direction de la particule incidente.

L'énergie par nucléon de la particule incidente est donnée par:

[7] 
$$E = Mc^2 (2\gamma^2 - 1)$$

où  $E$  = l'énergie par nucléon du primaire;

$Mc^2$  = énergie au repos du nucléon;

$\gamma$  = facteur de conversion de Lorentz.

Les deux postulats de base auxquels on a recours pour simplifier [6] peuvent s'énoncer comme suit:

Postulat 1: L'indépendance spectrale des mésons. Chaque méson est émis indépendamment de tous les autres avec la même vitesse, celle du C.M. Ceci revient à postuler  $\beta/\beta_i^* = 1$ .

Postulat 2: Symétrie plane de la réaction dans le centre de masse. La gerbe des particules dans le système du centre de masse se déploie symétriquement par rapport à un plan perpendiculaire à la trace incidente et contenant le foyer du rayonnement.

L'avantage de ces deux postulats vient de la simplification qu'ils apportent à la relation [6] la rendant beaucoup plus accessible aux calculs numériques. Ainsi,

$$[8] \quad \gamma \tan \theta_1 = \frac{\sin \theta_1^*}{\cos \theta_1^* + 1} = \tan (\theta_1^*/2)$$

L'angle médian  $\theta_{\frac{1}{2}}$  dans le système du laboratoire correspond à l'angle  $(\theta_{\frac{1}{2}}^* = \pi/2)$  dans le C.M. de telle sorte que [8] devient maintenant:

$$[9] \quad \gamma = \cot (\theta_{\frac{1}{2}})$$

Pour fin de comparaison avec les estimés fournis par la méthode de Castagnoli, l'angle médian de chacun des groupes avec et sans ses traces émises vers l'arrière fut noté et l'énergie correspondante calculée. Ces résultats se trouvent consignés dans le tableau 3.

Tableau 3

Energie du primaire d'après la méthode de l'angle médian.

Groupe	sans les traces vers l'arrière		avec les traces vers l'arrière	
	angle médian	énergie Gev/nucléon	angle médian	énergie Gev/nucléon
A	18.5°	15.9	20.4°	12.7
B	18.0°	16.9	18.5°	15.9
C	18.2°	16.4	18.9°	15.1
D	18.2°	16.4	18.7°	15.4
E	21.5°	11.1	22.8°	9.7
F	20.9°	11.9	21.2°	11.5

c. Méthode de Castagnoli.

L'avantage incontestable de la méthode proposée en 1953 par Castagnoli et collaborateurs<sup>(6)</sup> sur celle de l'angle médian provient justement du fait qu'elle fait appel à une moyenne plutôt qu'à une médiane. Dans les cas où le nombre de traces est peu élevé, elle tend à réduire l'erreur due aux fluctuations statistiques. C'est pourquoi dès sa parution elle suscita immédiatement l'intérêt des chercheurs, intérêt qui se maintient toujours comme en fait foi la récente contribution de K. Imaeda et T. P. Shah<sup>(7)</sup>. Ils y rappellent comment les expériences des dernières années ont démontré la tendance de cette méthode à

surestimer l'énergie du primaire. Les premiers promoteurs eux-mêmes de cette méthode ont publié en 1961 les résultats d'une expérience cherchant à en délimiter l'applicabilité<sup>(8)</sup>. Telle est un peu la perspective de la présente section de cette thèse. En effet, cette partie du projet de recherches a consisté à explorer la possibilité d'étendre l'application de cette méthode au cas d'une collision entre un noyau lourd d'une émulsion nucléaire et un noyau cosmique d'une énergie d'environ 13 Gev/nucléon.

Cette méthode ne s'applique rigoureusement qu'à la production mésonique provoquée par des collisions nucléon-nucléon. Ainsi, seulement dans la mesure où une collision noyau-noyau peut être assimilée à un ensemble de collisions nucléon-nucléon indépendantes et simultanées est-il justifié de s'en servir pour l'évaluation de l'énergie du primaire responsable de l'interaction. L'impossibilité pratique d'éliminer systématiquement et entièrement de la gerbe mésonique sa contamination par une quarantaine de protons en provenance de la région d'interpénétration des deux noyaux en cause, constitue la difficulté majeure que pose ici l'application de cette approche. Le souci d'épuration, au moins partielle, de la gerbe, a donné naissance à la considération de six groupements différents des traces dans le but d'étudier l'influence de l'élimination de certaines catégories de traces sur les résultats.

C'est ainsi que l'effet de la retention et de l'exclusion des traces émises vers l'arrière dans le laboratoire sur les distributions et sur l'estimé de l'énergie du primaire fut étudié pour chacun des groupes. Les calculs impliqués furent réalisables grâce à l'utilisation de l'ordinateur IBM 1620-II.

i) Energie du primaire.

Ces calculs consistent à appliquer à l'ensemble des traces d'un groupe donné l'équation [8] réduit à la forme suivante par le postulat 2 [voir référence (6)]:

$$[10] \quad \ln \gamma = \frac{1}{n} \sum_i^n \ln |\cot \theta_i| \pm \frac{\sigma}{\sqrt{n}}$$

$$[11] \quad \text{où} \quad \sigma = \sqrt{\frac{\sum_i^n (\ln \gamma - \ln |\cot \theta_i|)^2}{(n - 1)}}$$

$n$  = le nombre de particules appartenant au groupe en question.

Cette relation définit ce qu'on nomme la première approximation de  $\gamma$ . Strictement parlant, la relation [8] et à fortiori l'équation [10], excluent toute considération de trace mésonique vers l'arrière, car dans le C.M., l'angle  $\theta^*$  maximum est égal à  $\pi$ , ce qui dans le système du laboratoire correspond à un angle  $\theta$  de  $\pi/2$ . De fait, quelques traces blanches vers l'arrière ont été enregistrées. Elles sont généralement interprétées comme dues à des mésons qui après leur production

auraient subi une collision secondaire avec un nucléon. Ils auraient ainsi été ralentis et déviés vers l'arrière. L'étude de Barbaro Galtieri et al. (8) a révélé que dans certains cas l'inclusion de ces traces dans les calculs avait l'avantage d'apporter une correction à la valeur trop élevée de l'énergie du primaire calculée par la méthode de Castagnoli.

Le tableau 4 récapitule le résultat des calculs de l'énergie du primaire par cette méthode. Les valeurs obtenues sans les traces vers l'arrière sont désignées par  $\gamma_1$  et  $E_1$  tandis que  $\gamma_2$  et  $E_2$  dénotent ces mêmes quantités "corrigées" par la prise en considération de ces traces. Les erreurs citées ont été évaluées par les relations suivantes:

$$[12] \quad \Delta\gamma = \left( e^{\ln\gamma} \right) \left( e^{\frac{\sigma}{\sqrt{n}}} - 1 \right)$$

où  $\Delta\gamma$  = erreur de  $\gamma$ ,

$\sigma$  = déviation standard,

$n$  = nombre de traces considérées.

$$[13] \quad \Delta E \leq 2 \Delta\gamma (2\gamma + \Delta\gamma)$$

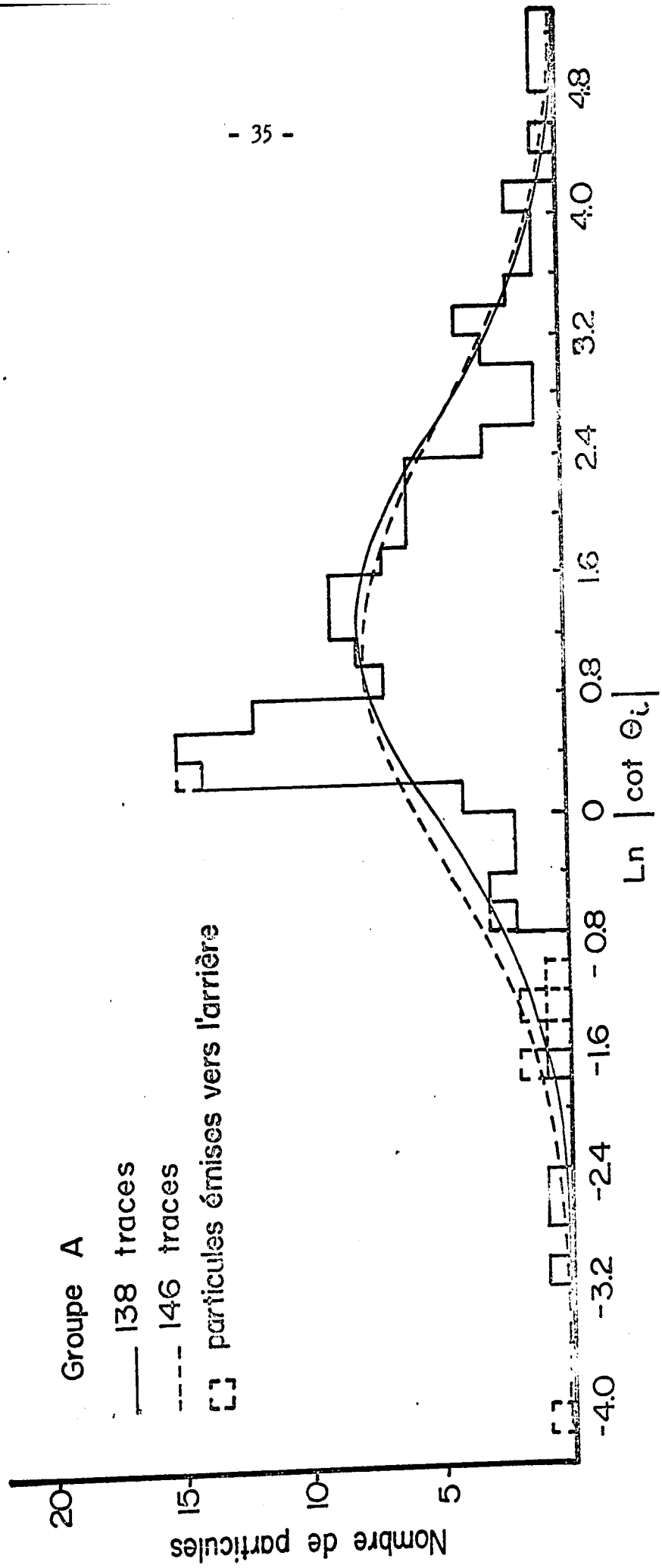
où  $\Delta E$  = erreur de l'énergie du primaire.

Tableau 4

Energie du primaire d'après la méthode de Castagnoli.

Groupe	$\gamma_1$	$E_1$ Gev/nucléon	$\gamma_2$	$E_2$ Gev/nucléon
A	$3.53 \pm 0.44$	$22.4 \pm 6.5$	$3.05 \pm 0.40$	$16.4 \pm 5.2$
B	$3.61 \pm 0.40$	$23.5 \pm 6.1$	$3.29 \pm 0.40$	$19.4 \pm 5.6$
C	$3.42 \pm 0.36$	$21.0 \pm 5.1$	$3.12 \pm 0.36$	$17.4 \pm 4.7$
D	$3.45 \pm 0.32$	$21.4 \pm 4.6$	$3.27 \pm 0.32$	$19.3 \pm 4.4$
E	$2.56 \pm 0.22$	$11.4 \pm 2.3$	$2.33 \pm 0.23$	$9.3 \pm 2.3$
F	$2.71 \pm 0.20$	$12.9 \pm 2.3$	$2.58 \pm 0.21$	$11.5 \pm 2.2$

L'inspection du tableau 4 indique assez clairement que la première approximation de la méthode de Castagnoli appliquée à une collision d'un noyau cosmique (dont l'énergie selon la méthode des delta énergiques s'établit à  $13 \pm 2$  Gev/nucléon) avec un noyau lourd d'une émulsion ionographique conserve sa tendance à surestimer l'énergie du primaire cosmique. L'inclusion des traces vers l'arrière diminue avantageusement cet estimé. Enfin la comparaison des groupes invite à penser que la contamination de la gerbe par des protons est responsable de la surestimation de l'énergie du primaire.



Histogramme I : Distributions du groupe A dans l'ho.

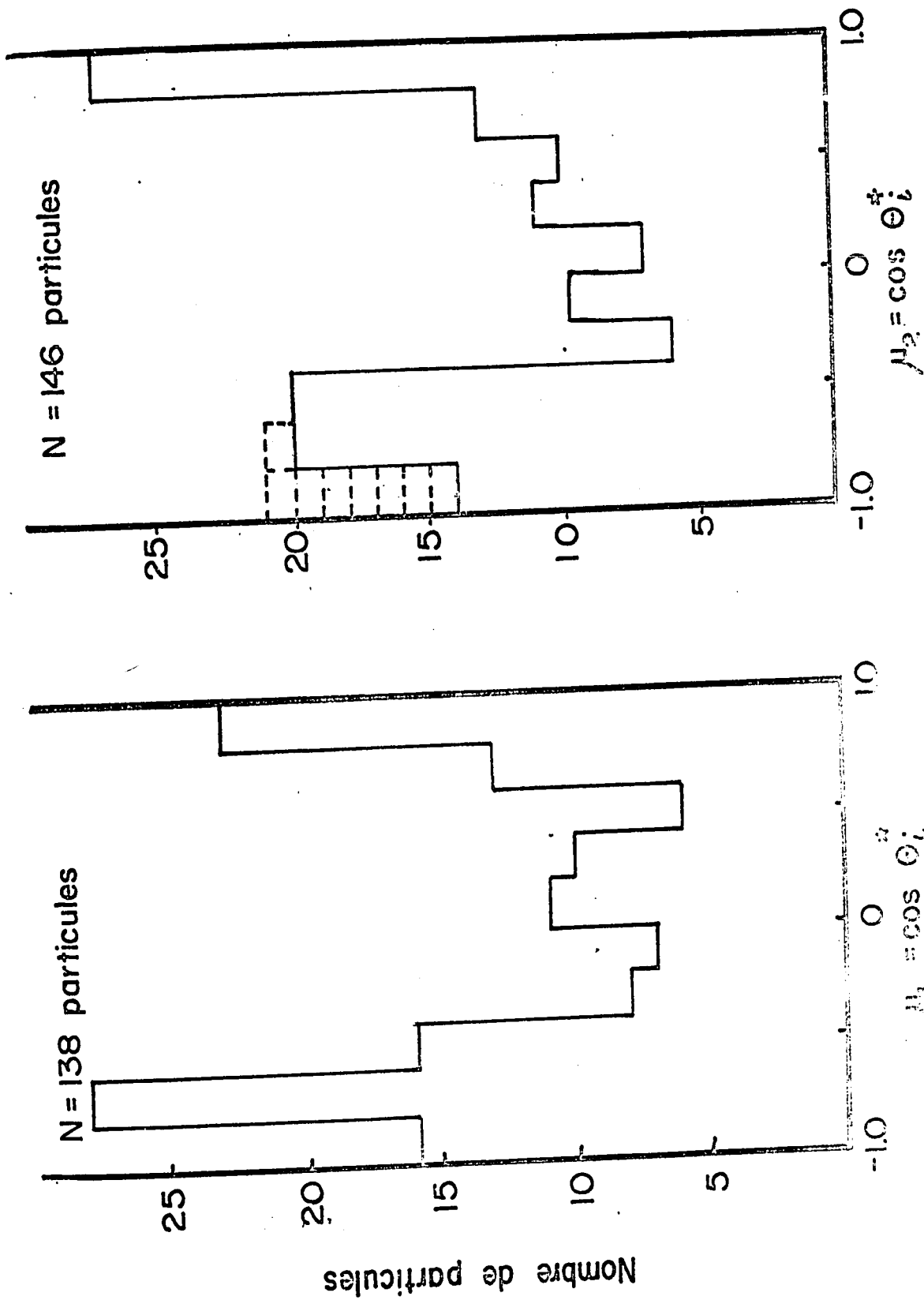
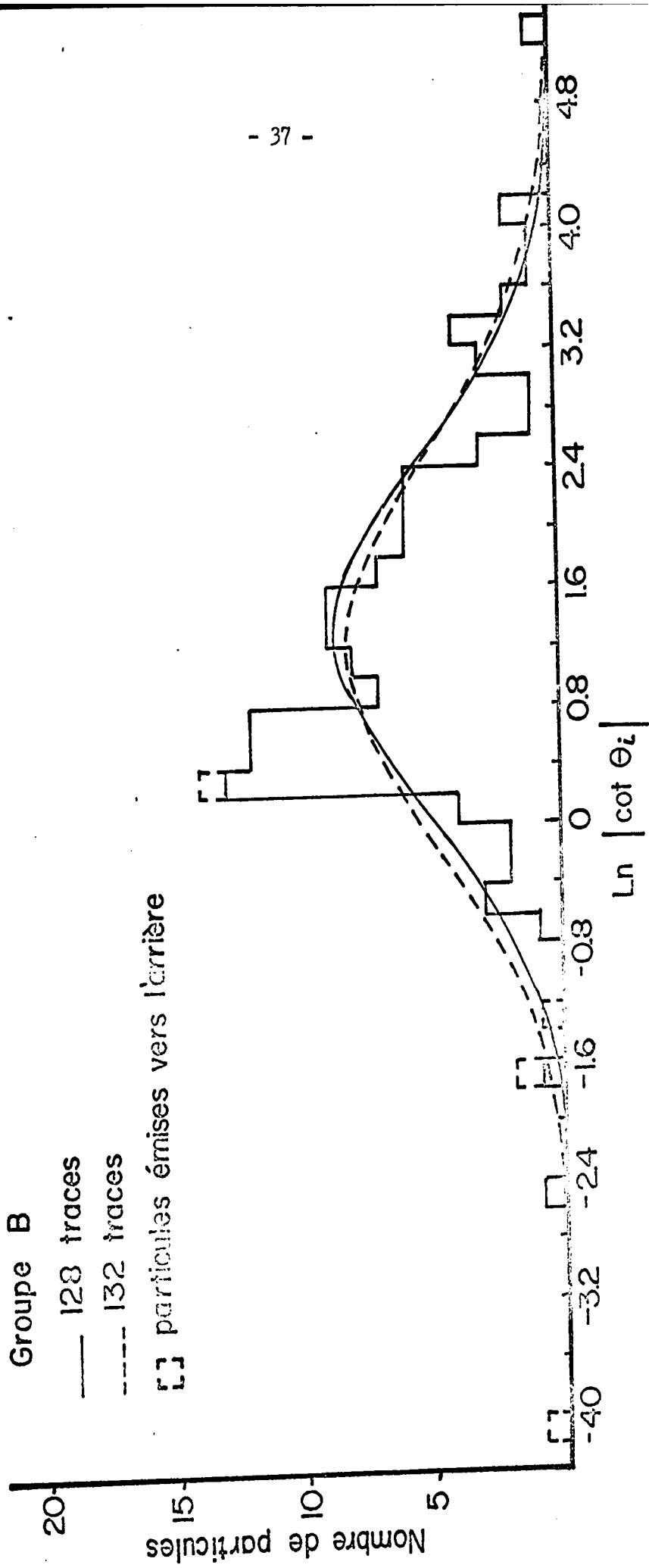
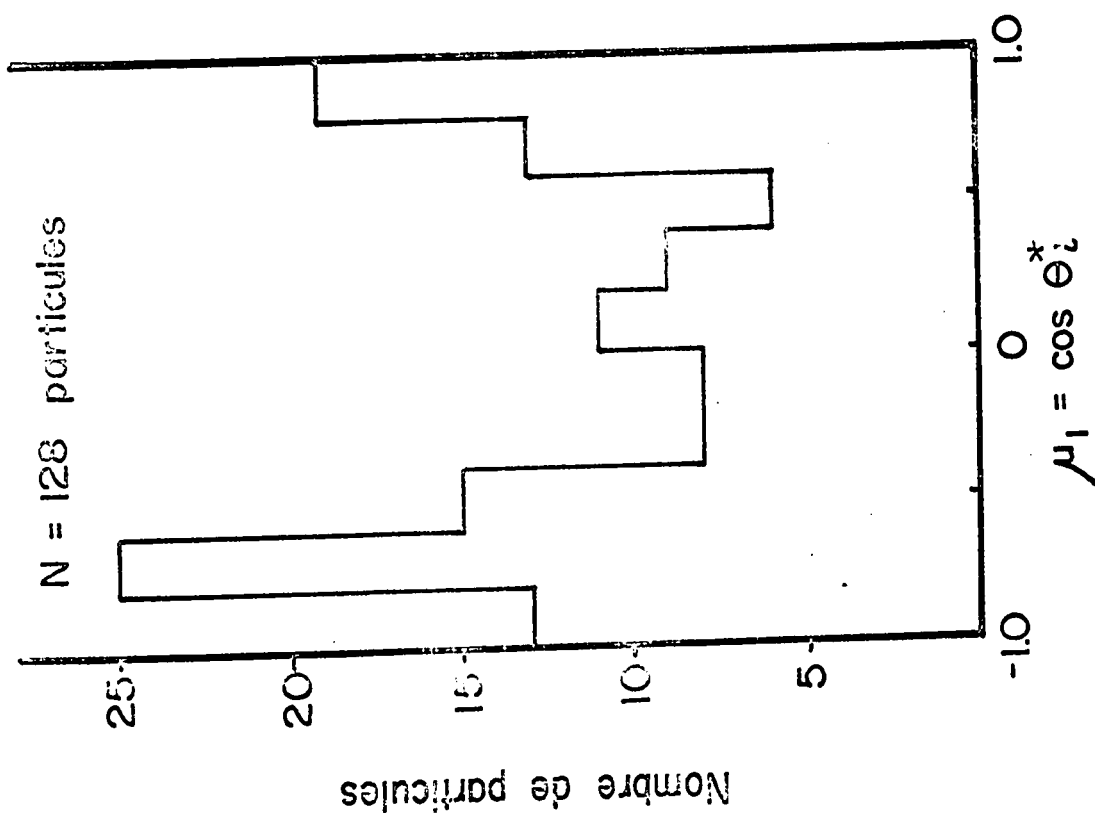
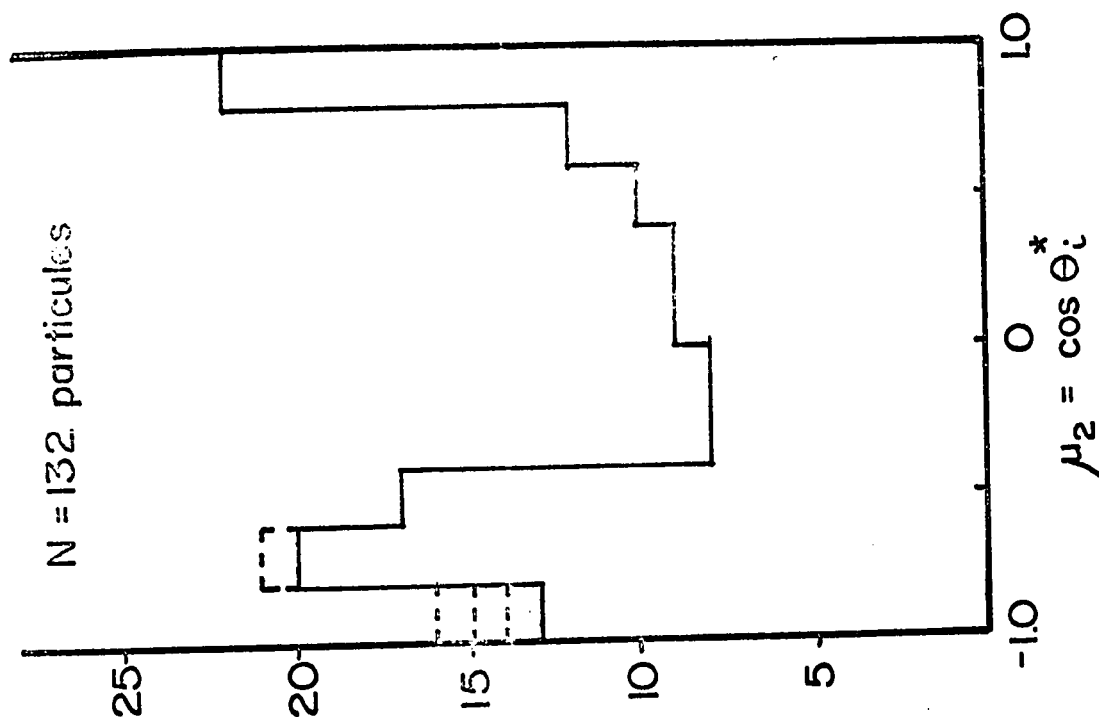


Figure 2 : Distributions du groupe A dans C.M.

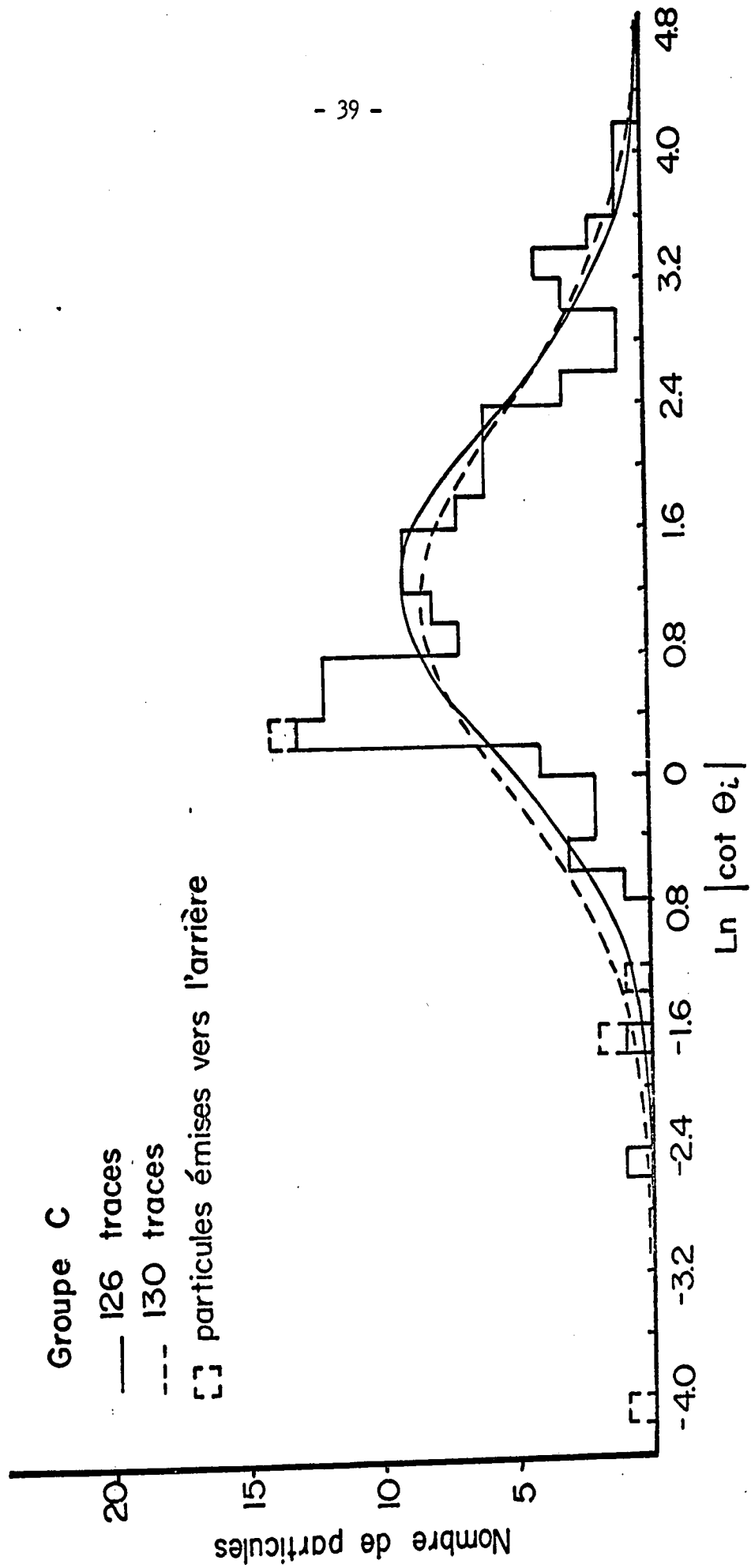


Histogramme 3 : Distributions du groupe B dans labo.

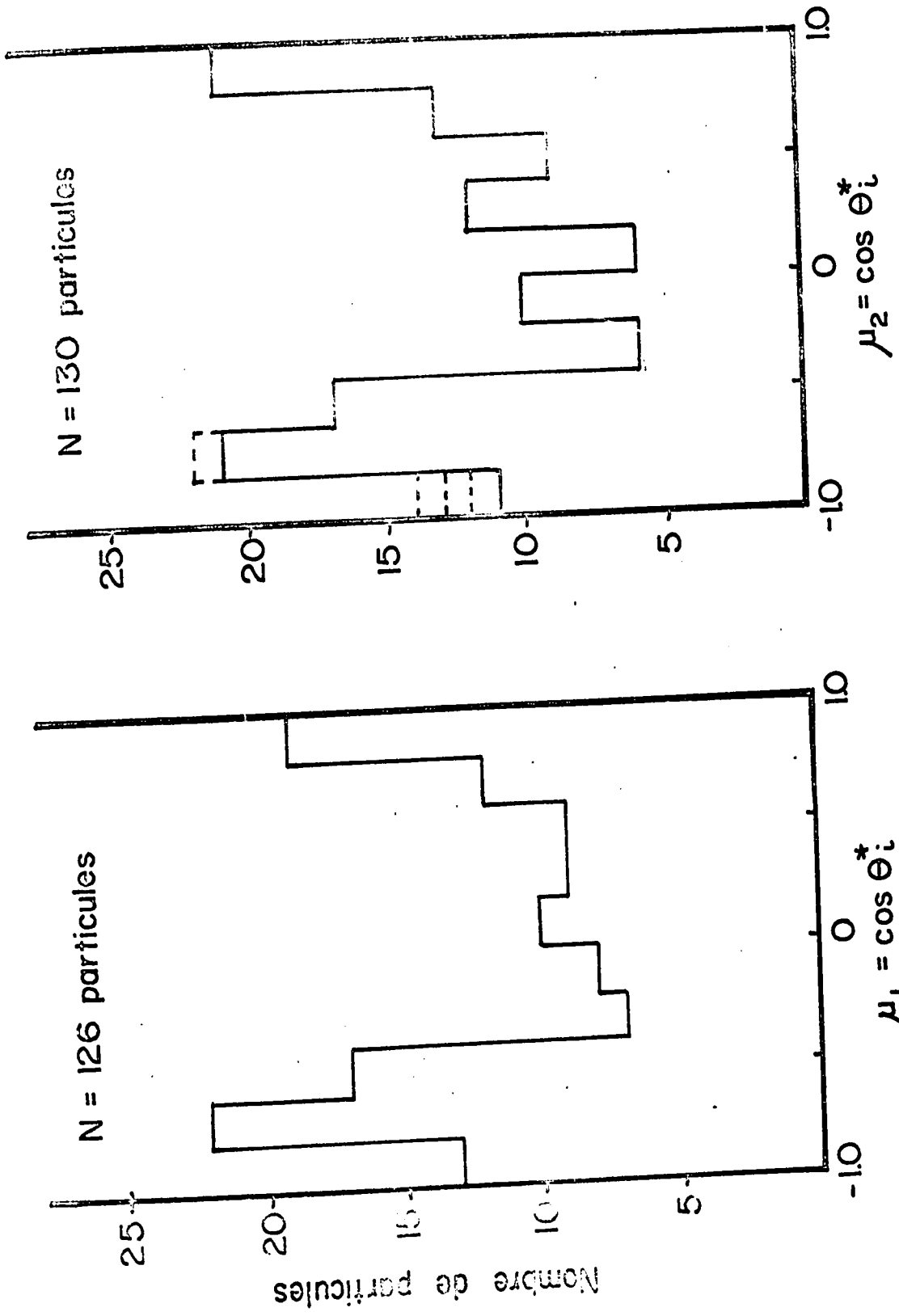


Histogramme 4 : Distributions du groupe B dans C. M.

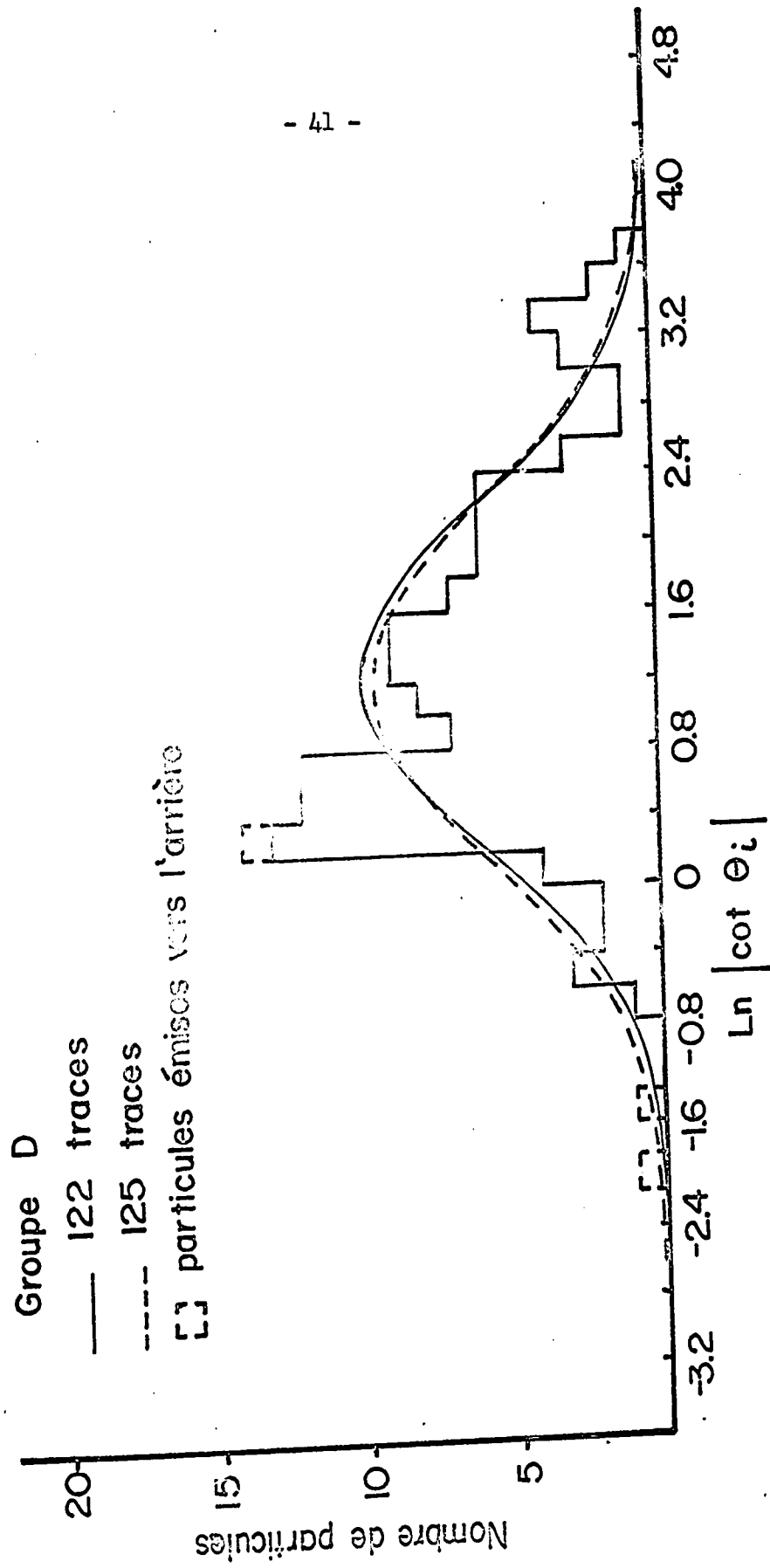
Nombre de particules



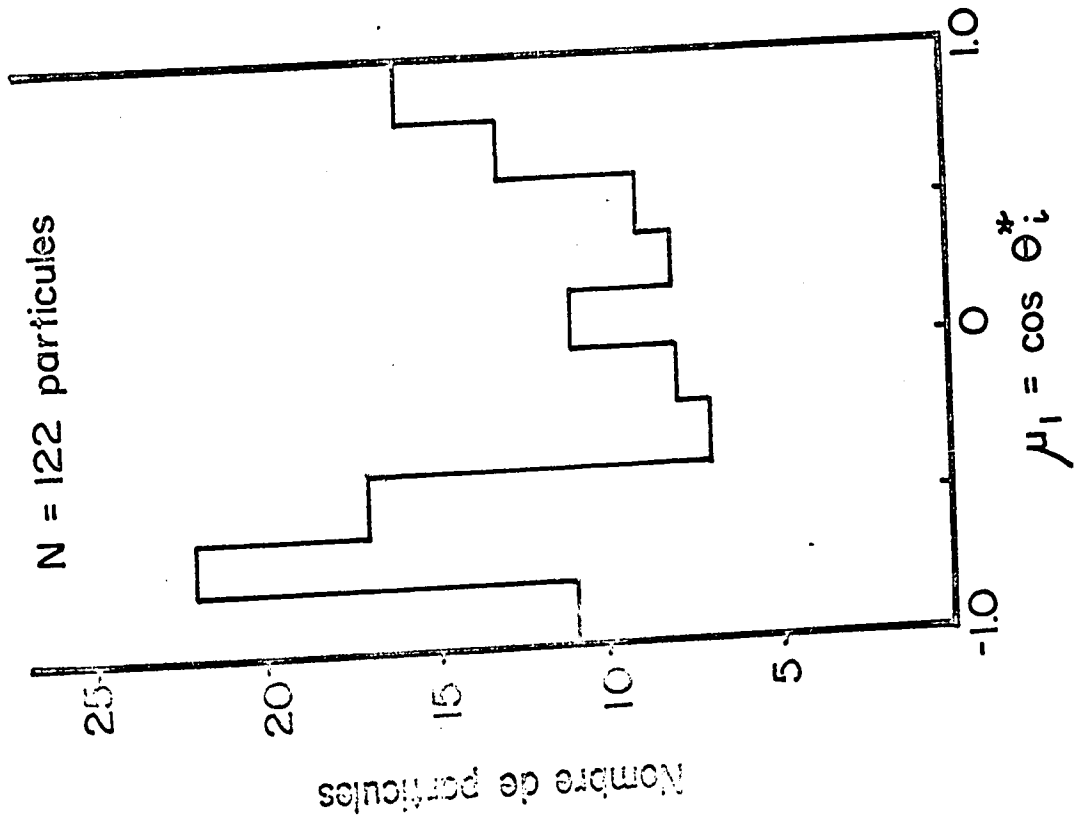
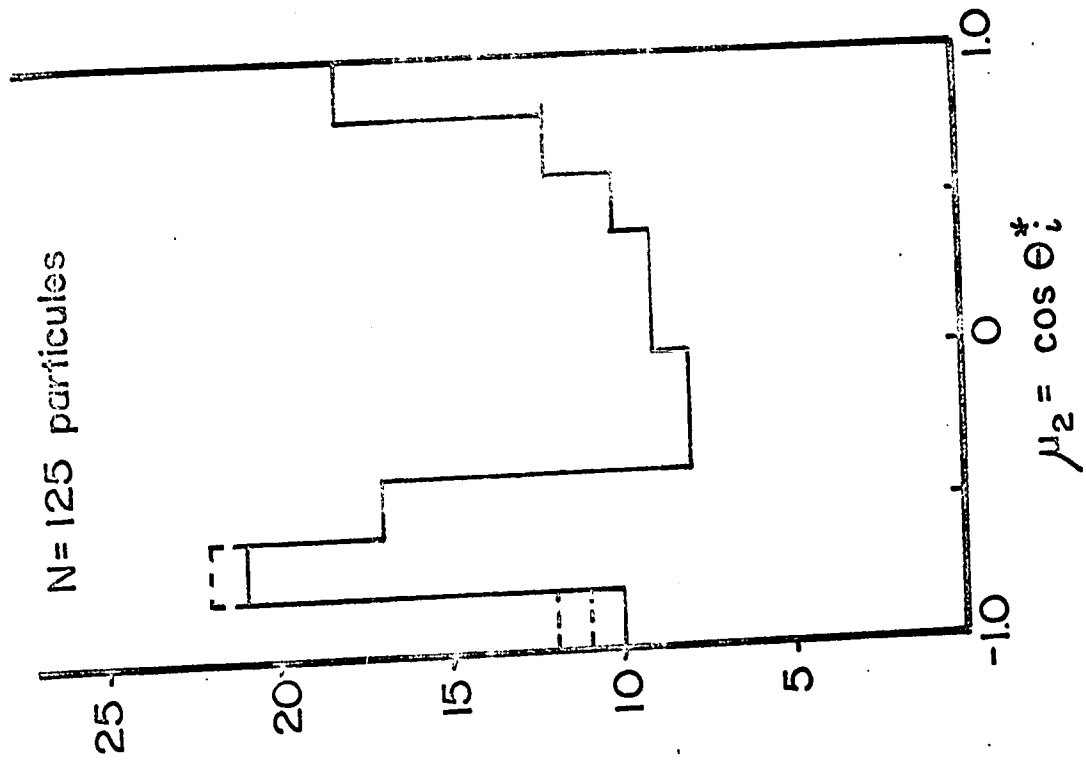
Histogramme 5 : Distributions du groupe C dans labo.



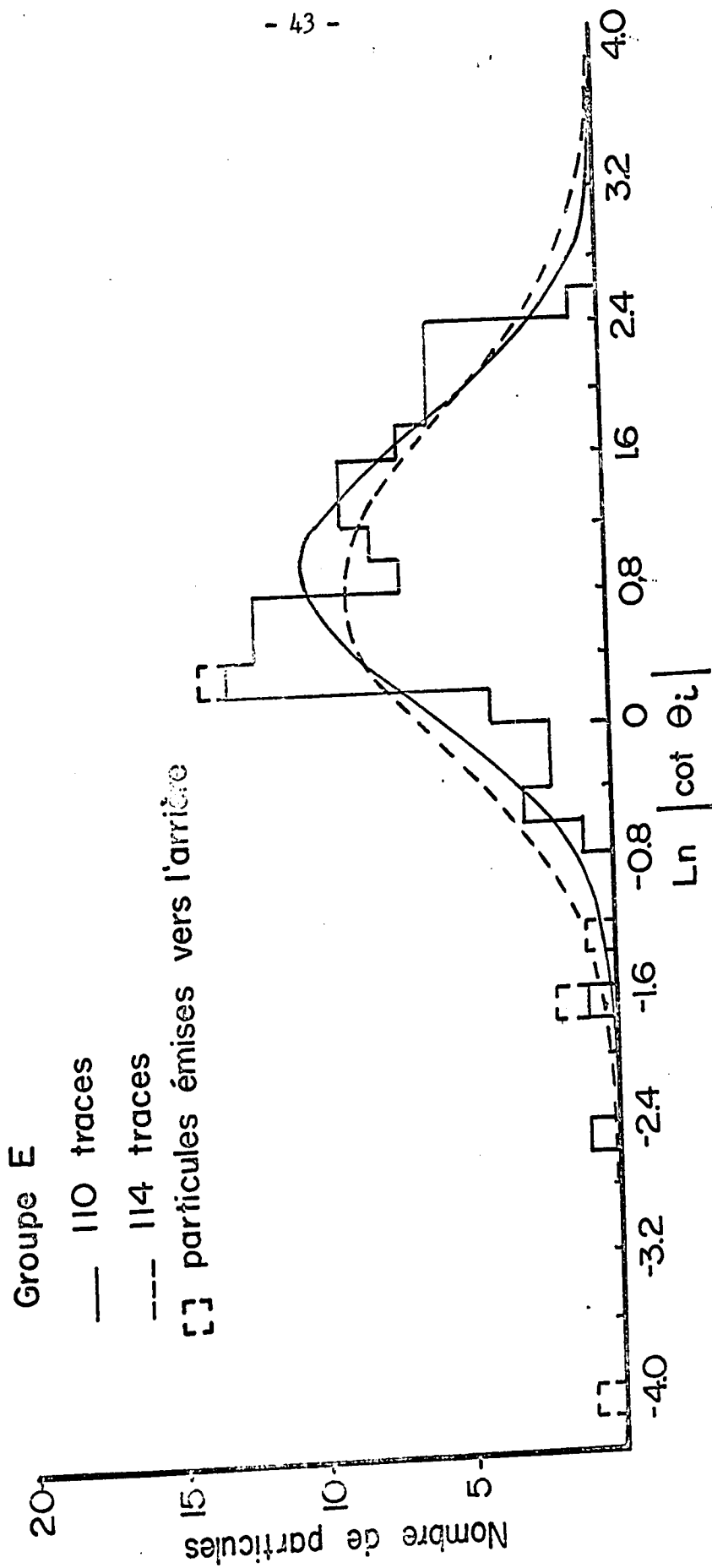
Histogramme 6 : Distributions du groupe C dans C. M.



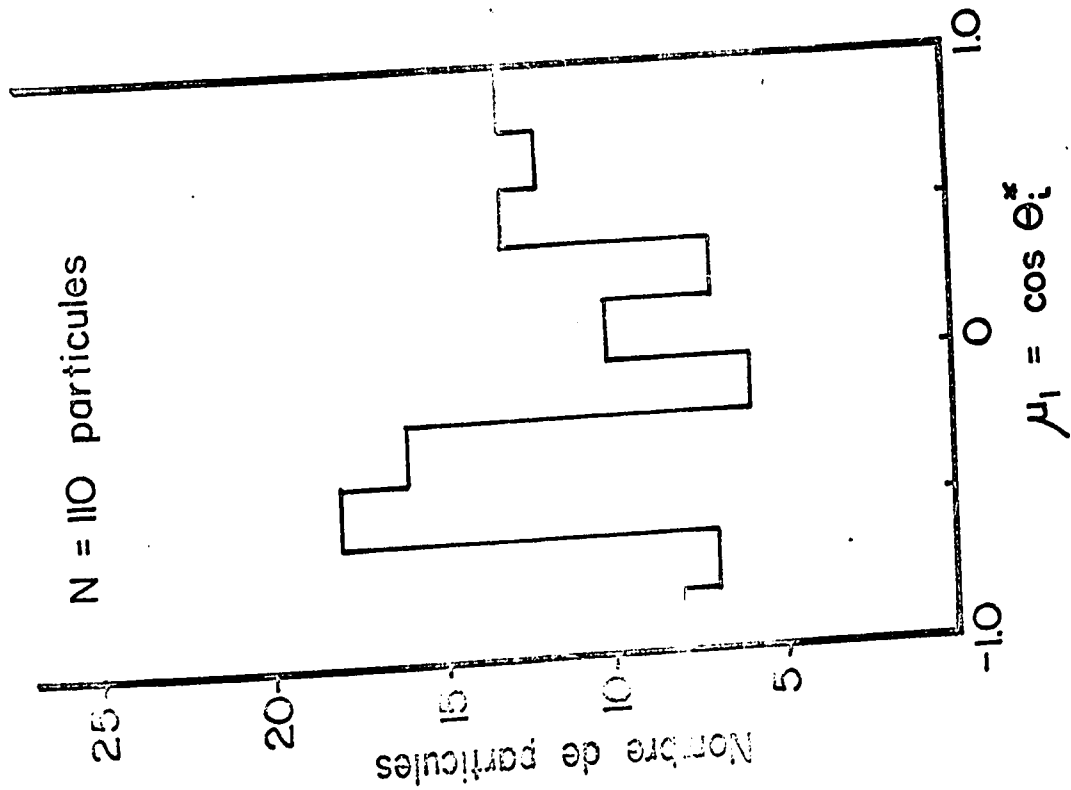
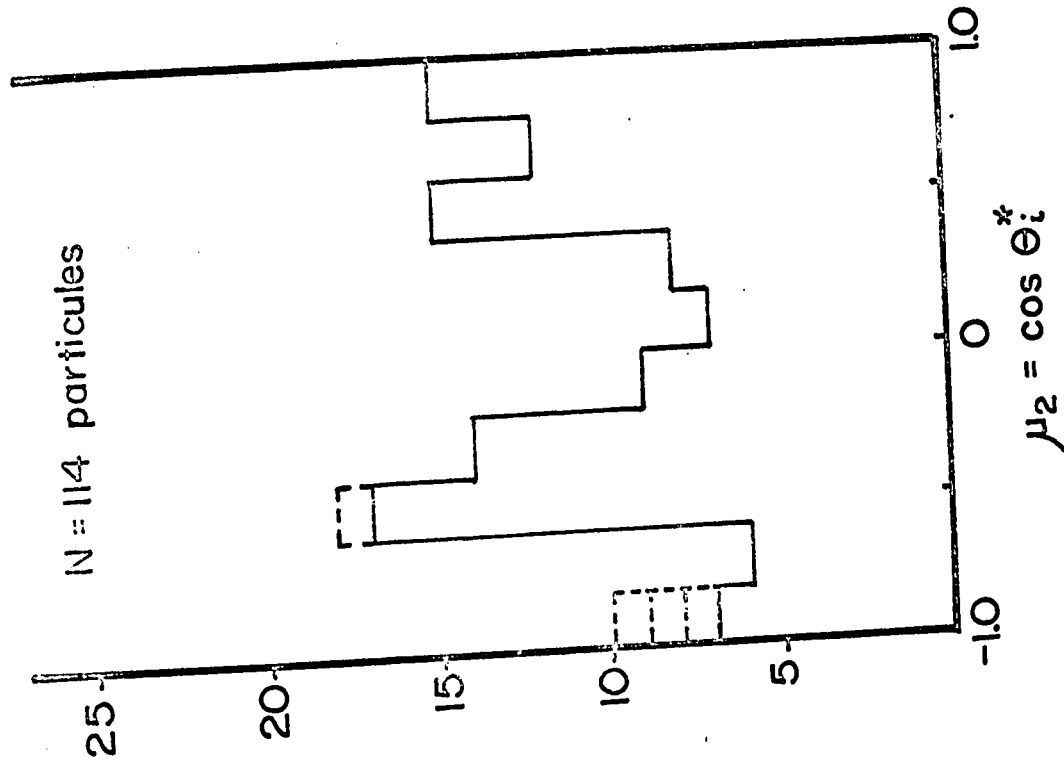
Histogramme 7 : Distributions du groupe D dans labo.



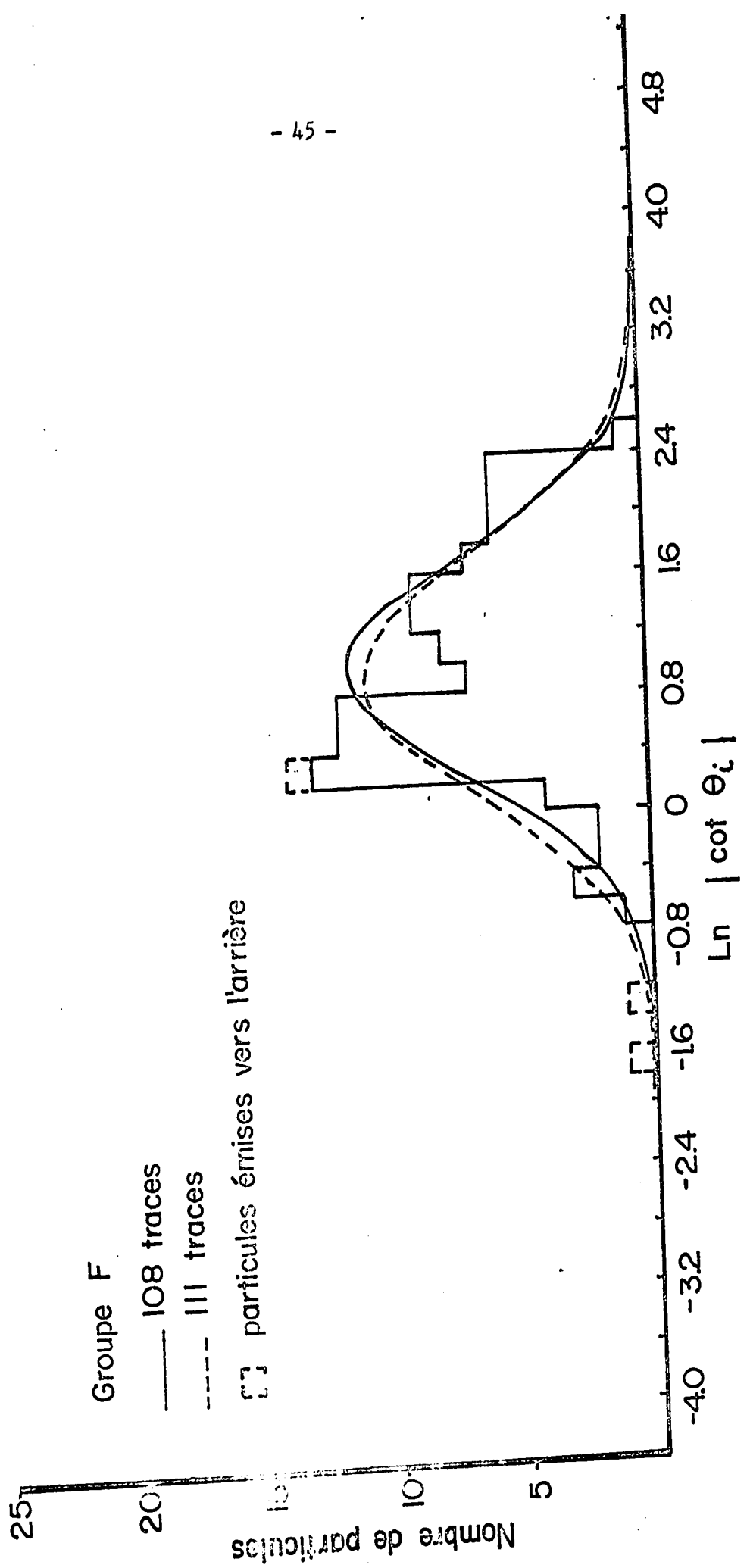
Histogramme 8 : Distributions du groupe D dans C. M.



Histogramme 9 : Distributions du groupe E dans labo.



Histogramme 10 : Distributions du groupe E dans C.M.



Histogramme II : Distributions du groupe F dans labo.

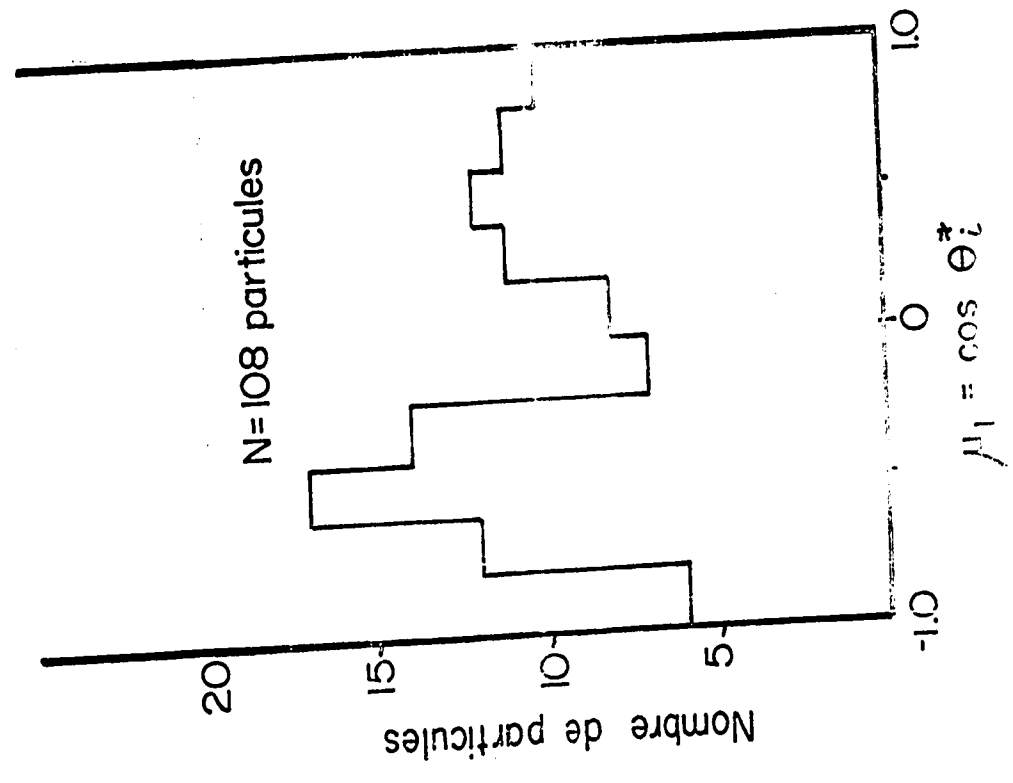
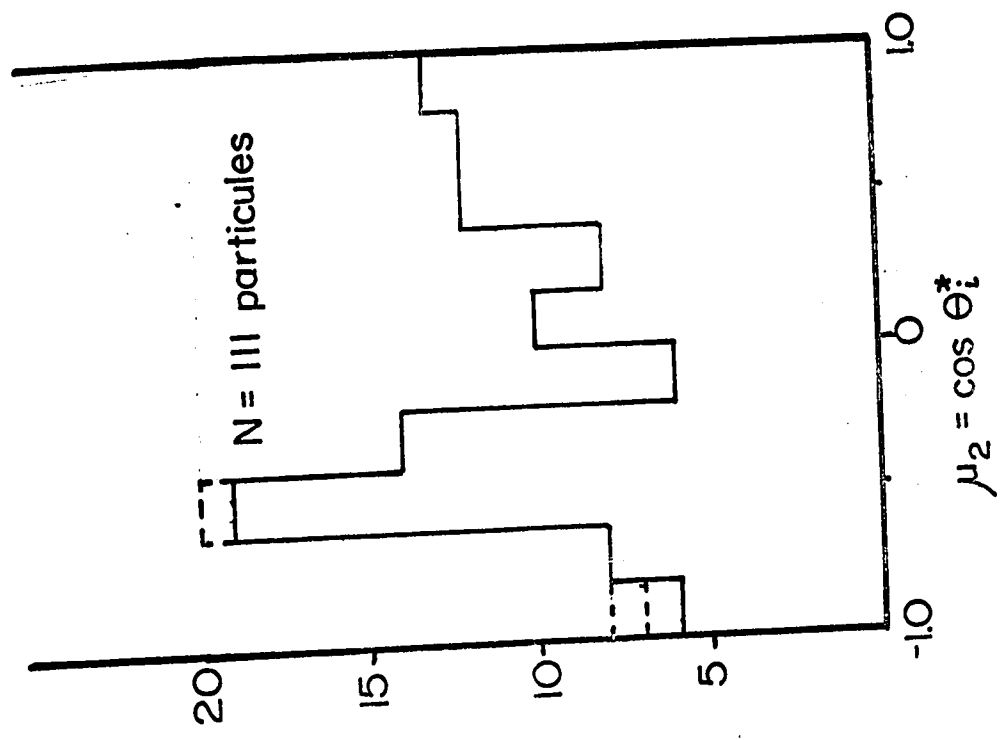


Figure 10: Distribution of groups F dans G. M.

ii) Etude des distributions angulaires.

Les deux postulats de la méthode de Castagnoli joints à l'équation [10] impliquent que la distribution des particules selon le logarithme de la cotangente de leur angle  $\theta_i$  mesuré dans le laboratoire devrait être gaussienne. Pour les mêmes raisons, leur distribution selon le cosinus de  $\theta_i^*$ , leur angle d'émission dans le C.M., devrait donner une droite horizontale. Dans le but de vérifier visuellement ces implications, les histogrammes numérotés de 1 à 12 furent construits. Ils représentent la distribution des particules dans le laboratoire et dans le C.M. pour chacun des groupes définis. Les courbes théoriques de leur distribution gaussienne calculées à partir de leur moyenne ( $\ln \gamma$ ) et de leur déviation standard ( $\sigma$ ) furent tracées sur leur graphique respectif de leur distribution dans le laboratoire. Les courbes à trait continu représentent les distributions théoriques sans les traces vers l'arrière, tandis que les courbes à trait brisé donnent les distributions théoriques lorsque que ces traces sont incluses. L'inspection de ces courbes montre que l'addition de ces traces émises vers l'arrière dans le laboratoire a tendance à aplatir légèrement les distributions théoriques.

L'accord entre les courbes théoriques et les distributions expérimentales étant difficiles à apprécier visuellement, il fut décidé d'appliquer le test  $\chi^2$  à chacune d'elles afin d'en juger le caractère gaussien ou non. Le tableau 5 livre le bilan de cette investigation. Le même principe de notation qu'au tableau 4 y est adopté. Ainsi les symboles  $F_1$ ,  $\chi_1^2$  et  $P_1$  se réfèrent aux distributions sans les traces vers l'arrière, tandis que  $F_2$ ,  $\chi_2^2$  et  $P_2$  s'appliquent aux distributions incluant ces traces.  $F$  désigne le nombre de degrés de liberté.  $P$  représente la probabilité qu'un autre échantillon expérimental du même type n'offre pas un meilleur accord avec sa distribution théorique. La valeur de  $\chi^2$  est calculée à partir de la relation suivante:

$$\chi^2 = \sum \frac{[\text{valeur observée} - \text{valeur théorique}]^2}{\text{valeur théorique}}$$

Tableau 5: Bilan du test  $\chi^2$

Groupe	F <sub>1</sub>	$\chi_1^2$	P <sub>1</sub>	F <sub>2</sub>	$\chi_2^2$	P <sub>2</sub>
A	12	29.5	0.003	12	29.4	0.003
B	12	22.1	0.02	12	19.4	0.06
C	12	16.5	0.13	12	19.5	0.06
D	12	15.8	0.20	12	15.7	0.20
E	11	10.1	0.50	11	16.3	0.12
F	11	10.2	0.48	11	10.7	0.48

Si, comme c'est communément admis, une probabilité P entre 0.1 et 0.9 signifie un accord acceptable entre une distribution expérimentale et sa courbe théorique, tandis qu'une probabilité P inférieure à 0.02 ou supérieure à 0.98 indique un désaccord, alors seuls les groupes C (sans les traces vers l'arrière), D, E et F présentent des distributions gaussiennes acceptables. D'où l'on constate une fois de plus l'influence de la contamination protonique de la gerbe de mésons.

iii) Conclusion:-

Au terme de cette étude des estimés de l'énergie du primaire par la méthode de Castagnoli et de la confrontation des distributions expérimentales avec les courbes théoriques correspondantes, il semble raisonnable de conclure qu'une collision noyau-noyau du type étudié ici pourrait légitimement se prêter à une analyse du genre suggéré par la méthode de Castagnoli, pourvu bien entendu qu'il y ait moyen d'éliminer, au moins dans une certaine mesure, les traces non-mesoniques de la distribution.

3. Conclusion.

Les valeurs de l'énergie du primaire fournies par les trois méthodes utilisées sont toutes de l'ordre de grandeur de celle déterminée par l'étude des rayons delta énergiques. Cependant, elles ont toutes tendance à majorer leur estimé. La confrontation des tableaux 3 et 4 révèle de plus que la contamination de la gerbe mesonique par d'autres particules influence cet estimé. Cependant cette influence paraît un peu moins importante dans le cas de la méthode de l'angle médian que dans celui de la méthode de Castagnoli. Ceci n'est pas trop étonnant lorsqu'on songe que l'angle médian d'une gerbe est assez bien défini dès lors que le nombre de particules est suffisamment élevé. La superposition de plusieurs autres particules qui vraisemblablement se distribueront également vers

l'arrière et vers l'avant dans le système du C.M. ne devrait pas altérer fortement la valeur de l'angle médian.

Tel n'est pas le cas pour la méthode de Castagnoli dont on peut dire qu'elle a les défauts de ses qualités. Accordant la même importance à l'angle d'émission de chacune des traces, elle englobe plus de données que celle de l'angle médian, ce qui est sans doute très avantageux lorsque le nombre de traces est restreint. Cependant ceci explique qu'elle soit plus sensible à la contamination de la gerbe par des traces non-mésoniques.

Ainsi, pour la détermination de l'énergie du primaire à partir de la distribution angulaire des particules émises, la méthode de l'angle médian semble plus indiquée si la gerbe est très dense. L'expérimentateur appréciera de plus la facilité et la rapidité de son application. De toute façon, dans notre cas du moins, les estimés de l'énergie du primaire fournis par la méthode de l'angle médian offrent un meilleur accord avec celui obtenu à partir du rayonnement delta énergétique que ceux livrés par la méthode de Castagnoli.

### CHAPITRE III: LE NOYAU-CIBLE

#### A. Le problème.

Il ne fait pas de doute qu'une des questions les plus épineuses qui se pose lorsqu'il s'agit de décrire une réaction nucléaire enregistrée dans une émulsion concerne l'identification du noyau-cible. Une approche géométrique à ce problème a été développée qu'il s'agit maintenant d'exposer. Mais auparavant, voici un bref rappel des possibilités à envisager.

L'événement à l'étude ici se trouve inscrit dans une émulsion de type G5 normale dont la composition atomique est bien connue. En plus des sels de bromure d'argent dispersés dans la gélatine, elle contient de légères traces de soufre et d'iode. On peut grouper en deux classes les candidats possibles comme noyau-cible: 1) les noyaux légers, soit H, C, N et O, et 2) les noyaux lourds, soit S, Br, Ag et I.

#### B. La solution.

##### 1. Les noyaux légers.

Le nombre élevé de traces denses ou grises en provenance de la portion du noyau-cible non-atteinte par la collision selon l'interprétation reçue, permet d'éliminer sans difficulté les noyaux légers. En effet, 15 à 20 charges sont associées aux 15 traces en question. Même l'oxygène, le noyau léger disposant du plus grand nombre de charges i.e. 8, n'est évidemment pas en mesure de fournir autant de charges. Il faudra donc s'adresser aux noyaux lourds pour rendre compte du phénomène tel qu'observé.

## 2. Les noyaux lourds.

Les candidats les plus sérieux ici sont sans conteste le brome et l'argent, le soufre et l'iode ne se trouvant présents qu'en infime quantité. Cependant pour être complet, il faut considérer toutes les possibilités si peu probables soient-elles. De toute façon la méthode développée s'applique indistinctement à tout noyau de l'émulsion susceptible d'avoir subi une collision avec un noyau cosmique selon la représentation décrite au début du chapitre II. En se basant sur cette représentation, il est possible d'apporter une solution géométrique au problème de l'identification du noyau-cible.

### a. Approche géométrique.

En effet le nombre de charges projetées vers l'avant presque sans déviation définit en somme la fraction du noyau incident non touché dans la collision et par le fait même sa pénétration ou son chevauchement dans le noyau-cible. Connaissant cette pénétration, on peut procéder à l'évaluation de la fraction du noyau-cible impliquée dans la collision et par conséquent prédire le nombre de charges dues à la désintégration du reste du noyau. Ainsi le problème se réduit à une question d'intégration de volumes d'intersection. Cette méthode d'identification du noyau-cible a fait l'objet d'une publication<sup>(9)</sup> dont on voudra bien trouver un tiré-à-part en appendice. Qu'il suffise ici d'énoncer les données expérimentales du cas à l'étude et le résultat obtenu.

b. Données expérimentales.

L'événement analysé comporte 7 traces vers l'avant très peu déviées par rapport à la direction de la trace incidente. Elles se situent toutes à l'intérieur d'un cône de  $1^{\circ}$ . Parmi celles-ci, deux ont été positivement identifiées comme des traces de particules alpha. Une inspection rapide des cinq autres traces permet de conclure qu'au moins trois sinon toutes les cinq sont dues à des protons très rapides. Ainsi ces 7 traces représenteraient 7 à 9 charges en provenance de la section du noyau incident qui n'ayant pas été impliqué dans la collision aurait poursuivi sa course rectiligne en se désintégrant.

De la même façon les 15 traces auxquelles sont associées 15 à 20 charges proviendraient de la section du noyau-cible non-atteinte dans la collision.

De plus, aucun noyau de recul n'ayant été observé, il fut décidé de tenter les calculs en acceptant l'hypothèse que cette fraction du noyau-cible s'est désintégrée complètement sans laisser de noyau résiduel.

c. Conclusion.

Les calculs entrepris et menés à terme permettent de retenir le brome à l'exclusion de tous les autres éléments présents dans l'émulsion comme candidat pour le noyau-cible. Le tableau 6 représente le bilan de cette étude où nous avons calculé le nombre de charges qui seraient émises par la désintégration de la fraction du noyau-cible laissée intacte par la collision si 7 à 9 charges du noyau incident avaient échappées à la collision.

La charge du noyau incident étant de  $Z = 25 \pm 2$ , il fut décidé de calculer les cas de deux autres éléments plus légers que le  $^{55}_{25}\text{Mn}$ , soit les trois isotopes du chrome,  $^{54}_{24}\text{Cr}$ ,  $^{53}_{24}\text{Cr}$  et  $^{52}_{24}\text{Cr}$ , et enfin le  $^{51}_{23}\text{V}$ . Ces calculs donnent une bonne indication des possibilités de discernement de cette approche géométrique. Les cas des deux éléments plus lourds que le manganèse ne furent pas envisagés tout simplement parce que la charge du primaire tend à diminuer le long de son parcours. Ainsi, au moment de la collision la charge du primaire était tout probablement égale ou inférieure à 25.

Tableau 6: Nombre de charges non impliquées dans la collision.

		Noyau-cible				
		$^{16}\text{S}^{32}$	$^{35}\text{Br}^{80}$	$^{47}\text{Ag}^{108}$	$^{53}\text{I}^{127}$	
Noyau incident	$^{25}\text{Mn}^{55}$	7 à 9	1 ou 2	15 à 17	26 à 28	32 à 34
	$^{24}\text{Cr}^{54}$	7 à 9	1 ou 2	16 à 18	26 à 29	32 à 35
	$^{24}\text{Cr}^{53}$	7 à 9	1 ou 2	16 à 18	27 à 29	32 à 35
	$^{24}\text{Cr}^{52}$	7 à 9	1 à 3	16 à 19	27 à 29	33 à 36
	$^{23}\text{V}^{51}$	7 à 9	1 à 3	17 à 19	27 à 30	33 à 36

Ce tableau permet de constater que l'élimination de l'argent entraîne par le fait même celle de tout autre noyau plus massif, comme celle du soufre implique également le rejet de tous les noyaux plus légers, en l'occurrence l'oxygène, l'azote, le carbone et l'hydrogène. Ainsi seul le brome est-il en mesure de répondre aux exigences du noyau-cible telles que définies par les données expérimentales.

## CONCLUSION

En guise de conclusion à l'ensemble de ce travail, il paraît utile de tenter de dégager le chemin parcouru et les contributions apportées à l'étude des collisions noyau-noyau.

Une magnifique étoile de plus de 150 traces enregistrée dans une émulsion ionographique y avait une position exceptionnellement favorable à l'analyse. Elle suscita donc l'élaboration et la fabrication d'une platine rotative et inclinable pour déterminer la distribution angulaire de sa gerbe.

La charge et l'énergie de la particule cosmique incidente ayant été préalablement déterminées, le projet de recherches proposé consista premièrement à tenter d'identifier le noyau-cible et deuxièmement à étudier la distribution angulaire des traces de la gerbe dans le but d'explorer la possibilité d'en déduire l'énergie du primaire, en particulier par la méthode de Castagnoli.

Pour ce faire il fallut d'abord achever la platine rotative et inclinable afin de la rendre apte aux mesures angulaires. Cet appareil s'avéra des plus utiles et sa précision des plus satisfaisantes pour la détermination de la distribution angulaire d'une gerbe si imposante par son nombre de traces.

Ensuite la découverte et la mise au point des méthodes d'investigation les plus sûres et les plus efficaces s'imposèrent. Deux méthodes d'observation furent développées, celle de l'écran pour les particules peu déviées, et celle du réticule pour les autres. Ceci amena inévitablement une détermination multiple de plusieurs traces et exigea par conséquent la compilation des mesures et leur rédaction au nombre de traces réellement indépendantes. A cette fin, le concours d'une ordinatrice IBM 1620-II fut précieux et même pratiquement indispensable. Il permit également la construction des graphiques 1 et 2 donnant la projection de la gerbe sur un plan transversal situé à 200 cm. du foyer de rayonnement.

Les calculs exigés par la méthode de Castagnoli lui furent également confiés, ce qui permit la prise en considération de plusieurs regroupements des traces dans le but d'explorer l'influence sur les résultats de la contamination de la gerbe par des traces non-mésoniques. Ainsi cette approche se montra très utile pour l'étude de la distribution angulaire des traces de la gerbe et partant pour l'investigation de l'interaction elle-même.

Cependant la méthode de l'angle médian est apparue plus apte à fournir une détermination de l'énergie du primaire. Ses estimés se comparent plus favorablement à la valeur obtenue par la méthode du rayonnement delta énergétique. De plus ils sont plus facilement et plus rapidement accessibles que ceux de la méthode de Castagnoli.

Toujours dans le but de mieux saisir et décrire l'interaction, une approche géométrique fut développée pour résoudre le problème de l'identification du noyau-cible. Cette phase du projet de recherches ayant déjà fait l'objet d'une publication (reproduite ici en appendice), il fut décidé de se contenter de la présenter succinctement et de rapporter le résultat de calculs ultérieurs.

En terminant, qu'il soit permis de souligner une dernière fois que l'apport original de ce projet de recherches consiste moins dans la description d'un événement nucléaire unique que dans les méthodes d'investigation que son étude a suscitées.

REFERENCES

- (1) J. Hébert, Photographie Corpusculaire III, P.U.M., 441 (1964).
- (2) B. Peters, Prog. Cosmic Ray Phys., 1, 191 (1952).
- (3) M. F. Kaplon, B. Peters, H. L. Reynolds et D. M. Ritson, Phys. Rev., 85, 295 (1952).
- (4) M. L. Shen et M. F. Kaplon, Ann. Phys., 32, 452 (1965).
- (5) G. Alexander, J. Avidan, A. Avni et G. Yekutieli, Nuovo Cimento, X, 20, 648 (1961).
- (6) C. Castagnoli, G. Cortini, C. Franzinetti, A. Manfredini et D. Moreno, Nuovo Cimento, 10, 1539 (1953).
- (7) K. Imaeda et T. P. Shah, Nuovo Cimento, X, 41A, 405 (1966).
- (8) A. Barbaro Galtieri, G. Baroni, A. Manfredini, C. Castagnoli, C. Lamborizio et I. Ortalli, Nuovo Cimento, X, 20, 487 (1961).
- (9) M.-A. Vincent, Revue de l'Université d'Ottawa, 36, 121 (1966).

APPENDICE 1

Liste complète des traces observées.

(N = numéro d'observation)

LISTE COMPLETE DE 218 MESURES

ALPHA 1 ET 2

Y CMS	Z CMS	THETA DEGRES	PSI DEG.	PHI DEG.	N
-0.2646	0.0000	0.075	0.000	-0.075	43
-0.2011	-0.2745	0.097	-0.078	-0.097	77
-0.2964	0.1085	0.090	0.031	-0.084	101
0.4975	1.0705	0.338	0.306	0.142	44
0.2329	0.2196	0.091	0.062	0.050	75
0.2540	0.5157	0.164	0.147	0.072	102

$\alpha_1$

$\alpha_2$

PAIRES DE QUALITE

Y CMS	Z CMS	THETA DEGRES	PSI DEG.	PHI DEG.	N
-2.1491	14.7959	4.275	4.250	-0.612	28
-1.5033	15.6410	4.492	4.471	-0.430	127
-1.3127	17.2391	4.940	4.926	-0.376	29
-1.1222	16.4613	4.716	4.705	-0.321	128
-234.3364	-50.8474	50.169	9.371	130.479	214
-237.5086	-53.4298	50.595	9.763	130.099	216
-237.5086	-41.6018	50.326	7.631	130.099	215

TRACES NOIRES

Y CMS.	Z CMS	THETA DEGRES	PSI DEG.	PHI DEG.	N
1578.7150	-852.9567	83.640	-28.191	82.779	143
0.0000	-718.8026	74.451	-74.451	0.000	158
-238.8592	260.2150	60.480	-39.870	129.939	203
-6.9846	1450.2312	82.148	-82.143	177.999	206
301.0254	240.6310	62.572	-33.656	-123.599	207
505.1448	-848.5125	78.550	57.368	-111.599	209

TRACES GRISES

Y CMS	Z CMS	THETA DEGRES	PSI DEG.	PHI DEG.	N
44.1924	107.0414	30.071	27.591	12.459	142
42.8762	102.8981	29.133	26.705	12.099	194
15.5998	120.1601	31.209	30.920	4.459	139
14.1256	124.9532	32.159	31.931	4.039	192
-89.3321	66.9991	32.056	21.840	-24.068	120
-90.0933	68.9791	32.339	22.079	-24.249	147
39.4559	149.4218	37.693	36.240	11.159	141
-117.5739	371.1999	62.813	57.994	-30.449	150
-2599.1865	872.6817	65.827	18.508	-85.599	157
-68.8660	63.2083	25.050	-16.637	160.999	218
300.4562	-276.0564	65.917	57.450	-123.049	200
-468.6957	-459.0369	75.049	42.002	115.099	204
-425.7949	-420.0045	71.002	42.559	115.159	215

TRACES BLANCHES

Y. CMS	Z CMS	THETA DEGRES	PSI DEG.	PHI DEG.	N
1.0163	0.0000	.291	0.000	.291	20
-.9422	.6039	.320	.173	-.269	79
-.7940	1.3029	.437	.373	-.227	103
-1.3762	.7218	.445	.206	-.394	80
-1.3551	.2714	.395	.077	-.388	104
1.4609	1.5646	.613	.448	.416	1
1.2492	2.1137	.703	.605	.357	21
-.6140	-2.9706	.668	-.850	-.175	81
1.0057	3.3215	.994	.951	.286	22
-4.2135	1.4115	1.272	.404	-1.206	105
1.4715	5.2430	1.559	1.501	.421	2
1.4186	5.1058	1.517	1.462	.406	23
-2.0644	-6.1633	1.861	-1.765	-.591	82
2.9008	5.9018	1.883	1.690	.830	25
6.0451	2.9645	1.928	.848	1.731	6
5.9074	3.5684	1.976	1.021	1.691	45
1.9903	6.5450	2.068	1.988	.570	24
-2.3140	-5.7744	2.247	-1.653	-1.522	83
-4.3400	6.5698	2.259	1.886	-1.243	126

Y CMS	Z CMS	THETA DEGRES	PSI DEG.	PHI DEG.	N.
-5.2722	-6.9959	2.508	-2.002	-1.510	84
-9.3588	1.1381	2.698	.325	-2.679	86
-9.3482	1.3842	2.705	.396	-2.676	106
.8563	9.9097	2.846	2.836	.239	3
1.1433	9.4430	2.722	2.703	.327	26
6.5426	8.4818	3.065	2.427	1.875	7
6.1509	10.4307	3.464	2.984	1.761	27
-12.1852	-5.829	3.490	-.166	-3.486	87
-12.4290	1.4655	3.580	.419	-3.556	107
-15.5944	2.1847	4.201	.618	-4.458	88
-15.5419	2.4956	4.500	.713	-4.443	108
15.3403	-7.7112	4.906	-2.202	4.386	47
13.3077	11.7736	5.077	3.362	3.806	8
17.5954	5.1311	5.236	1.464	5.027	9
-7.3261	-18.0722	5.569	-5.160	-2.097	85
19.6916	2.6887	5.675	.766	5.623	12
-5.2722	20.4255	6.021	5.829	-1.510	130
19.5645	9.2736	6.179	2.643	5.587	10
1.1857	22.1253	6.321	6.312	.339	30
1.5880	-22.4547	6.421	-6.405	.454	46

University of Chicago

Y CMS	Z CMS	THETA DEGRES	PSI DEG.	PHI DEG.	N
-3.3983	22.3127	6.438	6.365	-0.973	129
-14.2817	18.9426	6.765	5.598	-4.084	109
3.1654	25.6387	7.360	7.304	.906	4
2.2444	25.8271	6.823	6.793	.642	31
-24.4027	1.2205	6.965	.347	-6.956	89
-24.0200	-1.2470	7.095	-0.354	-7.084	110
18.2729	-18.1918	7.547	-5.178	5.220	59
29.6414	-9.9285	7.828	-2.821	7.305	48
-19.9880	19.0218	7.857	5.409	-5.707	131
19.5192	20.6883	8.453	7.237	4.380	11
18.2508	20.1514	8.754	7.427	4.645	32
15.9352	29.3010	8.204	7.189	4.554	35
16.2517	-24.4203	8.669	-6.936	5.214	60
18.1310	-27.5587	9.366	-7.813	5.179	169
1.7453	-31.9337	9.085	-9.071	.499	168
30.1090	14.2025	9.452	4.021	8.561	16
29.8444	10.9948	9.037	3.115	6.487	17
21.5654	27.5789	9.888	7.755	6.154	33
21.6819	25.9248	9.294	7.347	6.187	36
26.7001	-21.7754	9.777	-6.165	7.604	49
26.6733	-21.7201	9.527	-6.168	7.681	50

Y CMS	Z CMS	THETA DEGRES	PSI DEG.	PHI DEG.	N
37.3081	5.4254	10.675	1.530	10.566	13 } 15 }
36.3024	6.1658	10.432	1.740	10.287	
36.3130	10.0571	10.670	2.837	10.290	14
23.9263	29.1306	10.678	8.235	6.821	34
-22.0313	31.7537	10.941	6.973	-6.286	132
30.5855	-24.8672	11.155	-7.015	8.694	61
7.1779	-40.0754	11.507	-11.324	2.055	68 } 172 }
7.3356	-52.8165	14.928	-14.783	2.099	
-37.5622	-16.1282	11.554	-4.239	-10.630	90
-40.2725	-14.7664	12.107	-4.148	-11.354	91
17.5107	-39.2660	12.136	-11.070	5.003	69
19.9456	39.8100	12.356	11.209	5.695	37
23.4499	-39.5003	12.942	-11.106	6.687	70
-8.5755	46.7133	13.359	13.136	-2.455	123
-42.6016	-25.3988	13.936	-7.096	-12.024	92 } 99 }
-43.3215	-20.8271	13.520	-5.825	-12.221	
11.1374	-46.9880	13.576	-13.203	5.187	67 } 171 }
11.6720	-52.6065	15.079	-14.712	3.339	
45.1848	-19.1104	13.767	-2.336	12.750	21

Y CMS	Z CMS	THETA DEGRES	PSI DEG.	PHI DEG.	N
3.9489	50.0144	14.082	14.037	1.131	5
.5399	53.7216	15.035	15.035	.154	124
-.4188	51.8906	14.545	14.544	-.119	189
43.7661	-24.6996	14.113	-6.895	12.343	52
38.5574	-32.3841	14.142	-9.051	10.912	63
29.6975	43.1841	14.725	12.068	8.502	38
18.1310	-52.4675	15.512	-14.642	5.179	170
17.0384	-52.1911	15.400	-14.571	5.039	174
43.7344	-54.3112	15.546	-9.537	12.334	53
-42.4534	40.0282	16.281	11.102	-11.984	115
-42.5380	38.5202	16.026	10.693	-12.007	133
23.3758	-54.6698	16.566	-15.200	6.666	64
23.3758	-50.3431	16.971	-15.643	6.666	65
24.9112	-55.1889	16.365	-14.783	7.099	175
1.7997	61.6751	17.145	17.137	.515	125
2.1992	61.1078	17.000	16.989	.629	138
1.2566	67.0760	18.543	18.540	.359	190
30.7231	-57.4106	18.050	-15.858	8.733	92
30.2996	-55.4110	17.539	-15.336	8.614	71
30.7114	-60.7071	18.786	-16.700	8.729	176
-49.0276	-41.7105	17.862	-11.464	-15.775	100
53.0755	-36.5191	18.270	-10.521	15.022	73

Y CMS	Z CMS	THETA DEGRES	PSI DEG.	PHI DEG.	N
-44.1473	52.1247	18.882	14.312	-12.447	116
-43.3215	51.2287	18.568	14.087	-12.221	134
-13.3162	68.2629	19.179	18.811	-3.809	135
-70.1698	-2.5942	19.545	-7.705	-19.333	94
-69.7887	-3.9940	19.265	-1.086	-19.236	111
-55.0506	48.0618	20.102	13.098	-15.384	114
53.1567	-55.2532	21.010	-15.000	14.884	65
53.3279	-50.8014	20.216	-13.789	14.929	178
-41.2041	-62.1074	20.667	-16.952	-11.641	93
-36.1520	-70.5444	21.957	-19.210	-10.799	160
70.5498	-25.5770	20.267	-7.027	19.379	72
70.7627	-26.1397	20.679	-7.066	19.484	74
-62.6531	49.7612	21.841	13.418	-17.394	113
-9.6552	79.8359	21.906	21.740	-2.763	136
-54.9565	68.2023	23.699	18.266	-15.364	117
-88.8451	11.4609	24.131	3.024	-23.952	112
42.1357	-60.0000	24.366	-21.420	11.897	57
42.4957	-79.9970	24.405	-21.413	11.995	76
76.2043	-53.2166	24.975	-14.055	20.857	24
-74.0023	51.2093	20.833	17.613	-20.303	122

Y CMS	Z CMS	THETA DEGRES	PSI DEG.	PHI DEG.	N.
52.8073	-84.9897	26.637	-22.407	14.790	56
44.2290	-91.8958	27.018	-24.162	12.469	177
74.9763	69.9422	27.215	13.245	20.550	19
72.2345	65.5278	29.298	21.995	19.858	39
72.9916	75.0565	27.631	19.419	20.049	195
77.2537	-68.7469	27.341	-17.778	21.119	180
-38.5463	90.4796	27.489	25.388	-10.909	118
-72.6260	-75.5357	27.729	-19.659	-19.957	95
-71.4134	-90.1685	30.913	-24.562	-19.649	162
11.4444	-105.9416	28.052	-27.876	3.275	58
12.5829	-112.6460	29.541	-29.341	3.599	173
54.1139	-92.1341	28.113	-23.973	15.139	179
-100.8081	-36.0970	28.163	-9.155	-26.749	164
-15.4593	-106.5451	28.293	-27.974	-4.419	159
1.9903	109.2407	28.647	28.642	.570	137
2.0944	108.2761	28.434	28.428	.599	191
-53.7707	100.2363	29.698	25.908	-15.048	119
82.6835	90.2263	31.573	22.793	22.461	40
85.3071	77.8020	29.997	19.688	23.099	196
-98.6432	-60.0135	30.072	-13.217	-26.254	96
-98.1954	-60.7698	30.001	-15.256	-26.149	163

Y CMS	Z CMS	THETA DEGRES	PSI DEG.	PHI DEG.	N
-10.9366	118.7937	30.815	30.671	-3.129	146
86.0925	-88.8414	31.852	-22.366	23.290	55
84.6478	-96.7171	32.726	-24.005	22.939	181
-94.4540	89.1186	32.995	21.945	-25.279	148
107.0088	74.4688	33.314	18.362	28.295	18
116.6364	84.6738	33.779	20.089	30.249	198
-110.0506	-74.8570	33.747	-18.367	-28.621	98
-108.5910	-74.5453	33.368	-18.136	-28.499	165
151.3792	12.3220	33.413	2.947	35.299	199
26.8204	130.3109	33.732	32.027	8.199	140
30.2114	130.5970	33.831	32.848	6.589	193
-108.0709	-81.1158	34.163	-19.862	-26.384	97
-136.6864	11.5677	34.445	2.733	-34.349	152
134.9015	26.4380	34.502	6.254	33.999	200
-104.6513	68.2691	34.524	21.586	-27.621	121
112.2805	85.8873	35.022	20.089	29.309	197
127.6594	-72.6335	36.293	-17.020	32.549	102
128.8910	-70.9352	36.340	-16.605	32.799	104
-171.3450	-43.1939	36.450	-10.130	-35.249	106

Y CMS	Z CMS	THETA DEGRES	PSI DEG.	PHI DEG.	N
111.6916	97.7654	36.737	23.361	29.181	41
142.2900	-46.5820	36.934	-11.195	35.429	185
113.4384	99.4142	37.163	23.660	29.561	42
153.7982	-27.6318	36.000	-6.250	37.559	186
114.5555	-102.0274	30.067	-24.924	29.756	75
158.5170	-43.7769	39.429	-9.753	36.399	107
179.4495	32.2858	42.354	6.891	41.899	201
125.9405	-144.1990	43.744	-31.379	32.199	183
-195.7858	-31.7764	44.762	-6.477	-44.389	167
-61.9867	-191.2760	45.152	-42.412	-17.219	161
-79.7918	191.2754	45.020	41.614	-21.749	149
-250.0873	29.5650	51.549	5.345	-51.349	154
268.8093	86.2659	54.084	14.436	53.349	202
-329.5890	36.5836	58.905	2.420	-58.749	156
-309.1523	184.4065	60.943	26.602	-57.099	155
-242.1880	270.6259	61.158	40.745	-50.449	153
-124.7511	324.2777	63.863	36.476	-51.549	151

Y CMS	Z CMS	THETA DEGRES	PSI DEG.	PHI DEG.	N
1100.5212	-482.6369	80.550	-23.339	79.699	188
-2309.1828	794.2501	85.317	18.915	-83.049	144
-3135.1822	3339.0718	87.499	46.745	-86.349	145

TRACES VERS L ARRIERE

Y CMS	Z CMS	THETA DEGRES	PSI DEG.	PHI DEG.	N
-140.1462	-33.6078	39.866	6.295	144.979	217
-658.2614	-269.4579	74.291	20.952	105.899	211
-680.8617	-313.2392	75.058	23.817	106.369	205
-940.9331	-609.6641	79.885	32.365	101.999	212
8487.2242	-9376.3333	89.094	47.841	-91.349	210

APPENDICE 2

Volume découpé dans une sphère par un cylindre.

[Article paru dans la Revue de l'Université d'Ottawa,  
36, 121 (1966)].

*Brome ou argent?  
ou volume découpé dans une sphère  
par un cylindre*

PRÉSENTATION.

La *Revue de l'Université d'Ottawa* se veut un reflet de la recherche en marche dans notre institution. On peut dire qu'elle remplit adéquatement cette fonction en ce qui regarde ce qu'on a coutume d'appeler les « Humanités ». Certes le monde des sciences n'y est pas totalement absent, mais il faut avouer qu'il y fait figure de parent pauvre, ce qui pourrait peut-être porter les lecteurs à croire que l'Université est singulièrement absente du domaine des enquêtes scientifiques. Tel n'est assurément pas le cas. Le facteur qui sans doute rend le plus compte de ce silence mystérieux de la part de nos chercheurs scientifiques, ne faut-il pas le trouver dans la spécialisation et la complexité de leurs projets de recherche qui exigent le maniement d'un jargon unique pour les décrire et les comprendre? Pourtant, l'honnête homme du XX<sup>e</sup> siècle, qui ne doit refuser son intérêt à aucune entreprise humaine, saurait-il se résigner à demeurer indéfiniment étranger à ce secteur de la connaissance?

Cet article se voudrait une contribution dans ce sens. Il s'efforcera de décrire le plus clairement et le plus simplement possible la solution apportée à un problème rencontré au cours d'un des projets de recherche dirigés par M. Jacques Hébert, directeur du Laboratoire de Physique nucléaire à Haute Énergie du Département de Physique de l'Université d'Ottawa. Le lecteur familier avec le calcul différentiel et intégral ne devrait éprouver aucune difficulté à saisir cet exposé dans son entier. Celui qui ne possède pas la maîtrise de cette mathématique sera du moins en mesure d'apprécier la façon dont le problème s'est posé, la méthode choisie pour l'attaquer et les conclusions qui en découlent.

Le titre intentionnellement plutôt provocateur est suivi d'un sous-titre plus révélateur, quoique plus terne. Le titre nous permettra d'introduire le problème décrit par le sous-titre.

ORIGINE DU PROBLÈME.

Parmi les multiples méthodes d'enregistrer et d'analyser les phénomènes étudiés en physique nucléaire à haute énergie, notre laboratoire a opté pour celle des émulsions photographiques. Voici brièvement en quoi elle consiste.

Il est un fait bien établi qu'une particule nucléaire traversant une émulsion photographique peut y laisser une trace. A partir de cette trace, il est possible de déduire la nature de cette particule, sa charge électrique, sa masse et son énergie. Parfois une telle trace se termine par une « étoile », c'est-à-dire un centre d'où rayonne dans toutes les directions un réseau de traces (voir l'illustration). Chaque étoile repérée dans l'émulsion est le résultat d'une collision entre la particule

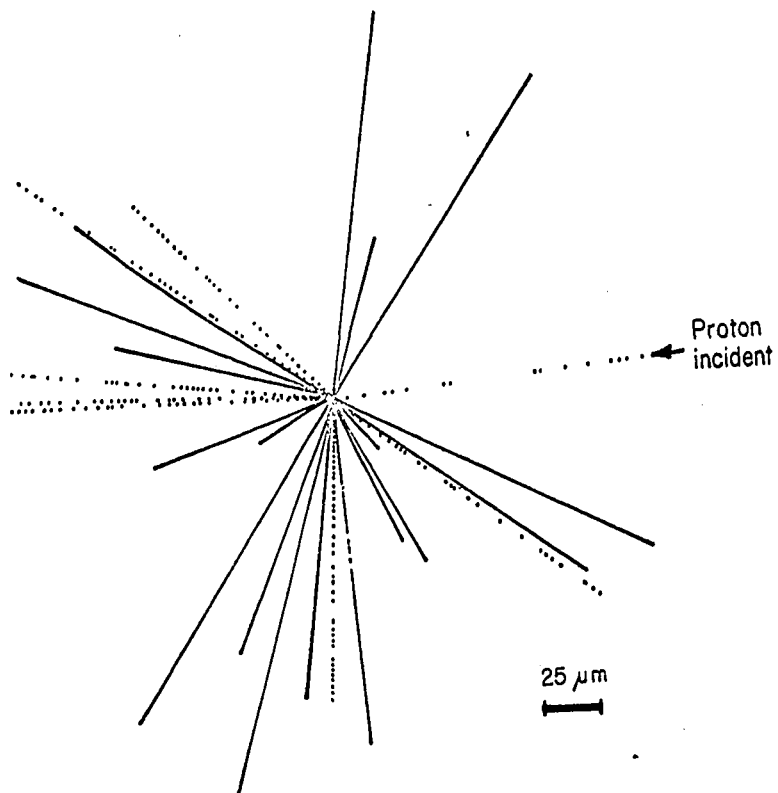


ILLUSTRATION. — Dessin d'une étoile typique produite par un proton pénétrant l'émulsion de la droite.

incidente et un des atomes de l'émulsion. De tels phénomènes nucléaires sont objet d'étude à notre laboratoire.

Au cours du balayage d'une plaque, on observa une étoile particulièrement fascinante par le nombre de traces émanant du foyer d'une collision. Une analyse sommaire<sup>1</sup> révéla qu'il s'agissait d'un noyau de manganèse [ ${}_{25}\text{Mn}^{55}$ ] très énergique entré en collision avec un des deux noyaux lourds présents dans l'émulsion, soit celui de l'atome de brome [ ${}_{35}\text{Br}^{80}$ ] ou celui de l'argent [ ${}_{47}\text{Ag}^{108}$ ].

De plus, cette analyse permet de conclure que quelque 72 % du manganèse avait été impliqué dans la collision. Enfin, toujours à partir de l'observation du phénomène enregistré dans la plaque photographique, on était en mesure d'affirmer que si le brome avait été le noyau-cible, alors 54 % à 66 % en aurait été découpé par le manganèse. Par contre, le volume d'intersection dans le cas de l'argent se serait établi entre 66 % et 75 %.

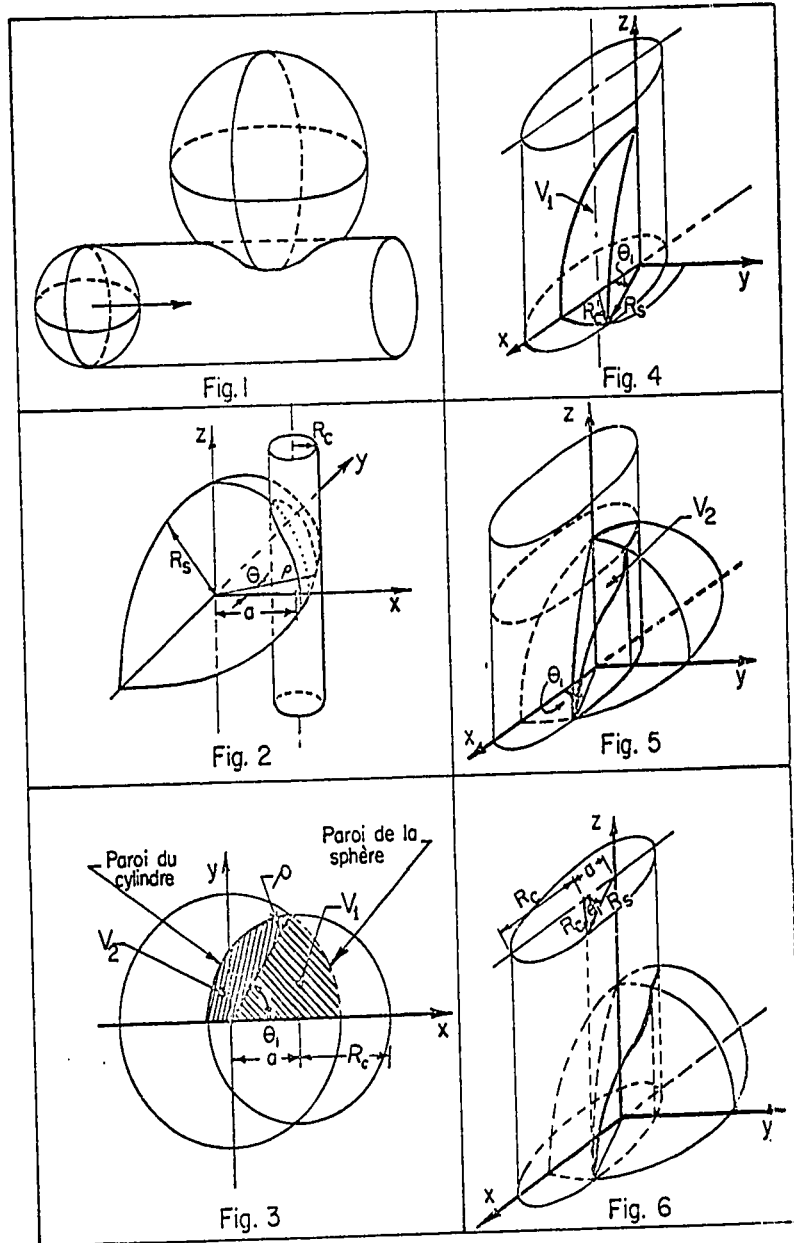
Des calculs d'ordre physique indiquaient assez clairement qu'en toute probabilité le noyau-cible impliqué dans la collision était celui du brome. Une confirmation de cette dernière conclusion, par une approche indépendante étant souhaitable, il fut décidé d'explorer la possibilité de distinguer, à partir de la seule considération des pourcentages des volumes des noyaux en question, lequel d'entre eux était concerné. Telle fut l'origine de l'analyse mathématique qu'il nous reste maintenant à exposer.

#### SOLUTION DU PROBLÈME.

Évaluer le volume du tunnel creusé dans un noyau-cible sphérique traversé par un noyau incident également sphérique, équivaut au point de vue géométrique à calculer le volume d'intersection d'une sphère avec un cylindre (voir fig. 1).

Ainsi énoncé, le problème paraît se réduire à formuler et à évaluer une triple intégrale représentant le volume désiré. A première vue donc, rien de plus simple ni de plus direct. Mais attention ! L'étude

<sup>1</sup> M. Jacques Hébert a communiqué à l'A.C.F.A.S. quelques résultats préliminaires de cette curieuse découverte (voir *Annales de l'A.C.F.A.S.*, 24 [1958], p. 118-119). L'analyse complète et un essai d'interprétation du phénomène en cause feront éventuellement l'objet d'une publication.



un peu plus poussée de la question ne tarde pas à révéler des difficultés qui ne peuvent être surmontées qu'en distinguant trois groupes de problèmes définis par le rapport entre les rayons de la sphère et du

cylindre. De plus, la solution complète du problème exige la subdivision de chaque groupe en quatre régions selon le degré de pénétration du cylindre à l'intérieur de la sphère. On trouvera en appendice un tableau récapitulatif définissant les limites de chaque région dans les trois groupes et incluant la forme de l'intégrale requise pour évaluer le volume d'intersection dans chaque région. On se contentera ici d'illustrer la façon d'arriver à la forme que prend l'intégrale dans chaque région. Pour cela, le cas typique qu'offre la troisième région du groupe II servira de modèle.

Optant pour un système de coordonnées cylindriques  $(z, \rho, \theta)$ , dont le centre coïncide avec celui de la sphère de rayon  $R_s$  (voir fig. 2), on peut écrire les équations suivantes :

Équation de la sphère :

$$(1) \quad \rho^2 + z^2 = R_s^2$$

d'où

$$z_+ = + \sqrt{R_s^2 - \rho^2}$$

$$z_- = - \sqrt{R_s^2 - \rho^2}$$

Équation d'un cylindre dont l'axe, parallèle à l'axe des « z », intersecte l'axe des « x » à une distance « a » du centre du système des coordonnées :

$$(2) \quad \rho^2 - 2a\rho \cos \theta + a^2 = R_c^2$$

d'où

$$\rho_+ = a \cos \theta + \sqrt{R_c^2 - a^2 \sin^2 \theta}$$

$$\rho_- = a \cos \theta - \sqrt{R_c^2 - a^2 \sin^2 \theta}$$

En général, l'intégrale permettant d'évaluer un volume  $V$  décrit dans un système de coordonnées cylindriques se présente sous la forme suivante :

$$(3) \quad V = \int_{\theta} \int_z \int_{\rho} \rho \, d\rho \, dz \, d\theta$$

Pour le cas choisi, le volume total d'intersection de la sphère par le cylindre peut être obtenu en multipliant par quatre leur volume d'intersection dans les premier et deuxième quadrants  $[y \geq 0]$  de l'hémisphère supérieur  $[z \geq 0]$ . De plus, une étude plus approfondie révèle que ce volume doit en plus être exprimé par la somme de deux

sections séparées par le plan vertical défini par l'angle  $\theta_1$  (voir fig. 3). La première  $[V_1]$  est délimitée par la paroi de la sphère pénétrant à l'intérieur du cylindre  $[0 \leq \rho \leq R_s]$ , tandis que la deuxième  $[V_2]$  l'est par celle du cylindre découpant la sphère  $[0 \leq \rho \leq \rho_+ \leq R_s]$  (voir fig. 4, 5 et 6).

Ainsi le volume total d'intersection est donné par :

$$(4) \quad V = 4 \{ V_1 + V_2 \}$$

$$= 4 \left\{ \int_0^{\theta_1} \int_0^{R_s} \int_0^{z_+} \rho \, dz \, d\rho \, d\theta + \int_{\theta_1}^{\pi} \int_0^{\rho_+} \int_0^{z_+} \rho \, dz \, d\rho \, d\theta \right\}$$

L'intégration successive par rapport à  $z$  et  $\rho$  réduit cette expression à :

$$(5) \quad V = \frac{4 R_s^3}{3} \left\{ \pi - \int_{\theta_1}^{\pi} [1 - q^2 f^2(\theta)]^{3/2} d\theta \right\}$$

où

$$\begin{cases} q = R_c/R_s \\ f(\theta) = k \cos \theta + \sqrt{1 - k^2 \sin^2 \theta} \\ k = a/R_c \end{cases}$$

En passant, il est intéressant de noter qu'on parvient exactement aux mêmes expressions si le problème est dès le début formulé en terme de coordonnées sphériques.

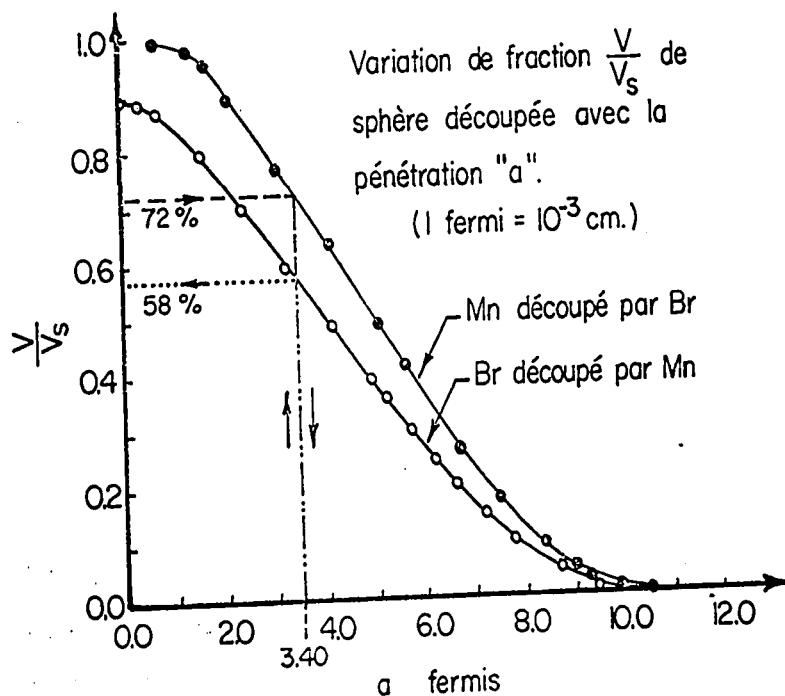
La fraction du volume découpé dans la sphère s'obtient en divisant le volume d'intersection par le volume total d'une sphère ( $V_s = 4\pi R_s^3/3$ ). Après simplification, on obtient donc :

$$(6) \quad \frac{V}{V_s} = 1 - \frac{1}{\pi} \int_{\theta_1}^{\pi} [1 - q^2 f^2(\theta)]^{3/2} d\theta$$

A moins de procéder, à l'aide du théorème du binôme, au développement en une série convergente de cette dernière expression afin de l'intégrer terme par terme, pour l'évaluer il faut avoir recours à une méthode d'intégration numérique, telle que celle des trapèzes ou celle de Simpson. La première méthode s'avérant longue, laborieuse et

fastidieuse, l'expérience démontra qu'il était amplement suffisant de se replier sur celle des trapèzes. A l'aide d'un servo-mécanisme de type I.B.M. 1620-II, il fut possible de calculer rapidement et efficacement la fraction du volume de la sphère découpée par le cylindre pour différentes pénétrations choisies à intervalles réguliers. Les résultats obtenus peuvent alors servir à la construction d'un graphique illustrant la variation de la fraction de la sphère découpée en fonction de la pénétration progressive du cylindre.

Un tel graphique permettant de lire quelle valeur de  $(V/V_s)$  correspond à telle pénétration (a) et vice-versa, fournit une méthode facile et très flexible de répondre à la question soulevée au début de cet article. En effet, si on trace sur le même graphique la courbe obtenue pour le cas du manganèse découpé par le brome et celle pour celui du brome creusé par le manganèse, il est possible de lire directement du graphique le pourcentage du brome découpé par le manganèse, le pourcentage correspondant de ce dernier étant connu (voir graphique). Car le graphique nous apprend que si 72 % du



manganèse était découpé, alors sa pénétration dans un noyau-cible de brome se chiffrerait à environ  $3.40 \times 10^{-13}$  cm. A cette pénétration, toujours selon le graphique, on voit que le pourcentage du brome impliqué dans la collision serait de 58 %. Si le même procédé est appliqué au cas de l'argent comme noyau-cible, on parvient à la conclusion que la pénétration correspondant à 72 % du manganèse impliqué dans la collision s'établirait à  $4.30 \times 10^{-13}$  cm, ce qui voudrait dire que 44 % seulement du noyau d'argent aurait été découpé.

#### CONCLUSION.

Ainsi sommes-nous en position de répondre à la question posée initialement par le titre. Dans le cas observé, la méthode qui vient d'être exposée permet d'éliminer l'argent et de retenir le brome comme noyau-cible.

Mais encore plus important, cette méthode d'approche dépasse les limites du problème isolé qui en a provoqué l'élaboration. Elle est susceptible d'application à tous les cas similaires. Publiée ici, elle pourra peut-être éventuellement servir à d'autres chercheurs saisis du même type de problèmes. Quant au lecteur de culture générale, nous osons espérer qu'il aura trouvé agréable cette brève sortie dans le monde si mystérieux et parfois passablement curieux de la recherche scientifique<sup>2</sup>.

Marc-A. VINCENT, o.m.i.,  
Laboratoire de Physique nucléaire à Haute Énergie  
de l'Université d'Ottawa.

5 novembre 1965.

<sup>2</sup> Un dépouillement sérieux mais non exhaustif de la littérature n'a réussi à déceler aucun endroit où le problème exposé ici aurait reçu un traitement un tant soit peu complet. Tout au plus trouve-t-on dans certains manuels de calcul, la solution à un ou l'autre cas particulier donnant naissance à une intégrale susceptible d'évaluation sans recours à une méthode numérique. Evidemment l'auteur serait des plus reconnaissants envers quiconque pourrait lui indiquer toute autre approche plus simple ou plus élégante à ce problème.

APPENDICE.

*Définition des symboles utilisés dans le tableau récapitulatif.*

$R_c$  = rayon du cylindre

$R_s$  = rayon de la sphère

$a$  = paramètre d'impact (mesure de la pénétration du cylindre dans la sphère)

$$S = (R_s + R_c + a)/2$$

$$\theta_1 = 2 \arctan \sqrt{\frac{(S - R_s)(S - a)}{S(S - R_c)}}$$

$$\theta_2 = \arctan \left\{ \frac{R_c}{\sqrt{a^2 - R_c^2}} \right\}$$

$$k = a/R_c$$

$$q = R_c/R_s$$

$$f(\theta) = k \cos \theta + \sqrt{1 - k^2 \sin^2 \theta}$$

$$g(\theta) = k \cos \theta - \sqrt{1 - k^2 \sin^2 \theta}$$

$$F(\theta) = [1 - q^2 f^2(\theta)]^{3/2}$$

$$G(\theta) = [1 - q^2 g^2(\theta)]^{3/2}$$

Appendice : Tableau récapitulatif

GRUPPE REGION	I) $R_S \leq R_C$	II) $R_C < R_S < 2R_C$	III) $R_S \geq 2R_C$
1	$\sqrt{R_S^2 + R_C^2} \leq a \leq (R_S + R_C) ; \frac{V}{V_S} = \frac{1}{\pi} \int_0^{\theta_1} G(\theta) d\theta$		
2	$R_C \leq a \leq \sqrt{R_S^2 + R_C^2}$ $\frac{V}{V_S} = \frac{1}{\pi} \left[ \int_0^{\theta_2} G(\theta) d\theta - \int_{\theta_1}^{\theta_2} F(\theta) d\theta \right]$		

3	$ R_S - R_C  \leq a \leq R_C$ $\frac{V}{V_S} = 1 - \frac{1}{\pi} \int_{\theta_1}^{\pi} F(\theta) d\theta$	$R_C \leq a \leq (R_S - R_C)$ $\frac{V}{V_S} = \frac{1}{\pi} \left[ \int_0^{\theta_2} G(\theta) d\theta - \int_0^{\theta_2} F(\theta) d\theta \right]$
4	$0 \leq a \leq  R_S - R_C $ $\frac{V}{V_S} = 1$	$0 \leq a \leq R_C$ $\frac{V}{V_S} = \left[ 1 - \frac{1}{\pi} \int_0^{\pi} F(\theta) d\theta \right]$

## CURRICULUM VITAE

Nom: Marc-Aurèle VINCENT

Né à Wrightville (Hull), Québec, Canada, le 6 avril 1934.

### Etudes

Primaires: Diplômé de l'Ecole Montfort, Eastview, 1947.

Secondaires: Immatriculation Junior, Ecole secondaire de l'Université d'Ottawa, 1951.

Collégiales: B.A. et B.Ph., Faculté de Philosophie de l'Université d'Ottawa, 1956.

Universitaires: Hon. B.A. et L.Ph., Faculté de Philosophie de l'Université d'Ottawa, 1957.

Hon. B.Sc. (Math.-Phys.), Faculté des Sciences Pures et Appliquées de l'Université d'Ottawa, 1961.

B.Th., Faculté de Théologie de l'Université d'Ottawa, 1963.

M.A. (Phil.), Faculté de Philosophie de l'Université d'Ottawa, 1965 (mai).

M.Th. et L.Th., Faculté de Théologie de l'Université d'Ottawa, 1965 (octobre).

M.Sc. (Phys.), Faculté des Sciences Pures et Appliquées de l'Université d'Ottawa, 1966 (octobre).

### Publications:-

1. Jalons de la réflexion newtonienne sur la démonstration de l'existence de Dieu, dans R.U.O., 35, 443 (1965).
2. Brome ou argent? ou volume découpé dans une sphère par un cylindre, dans R.U.O., 36, 121 (1966).