

**Zeitschrift:** Mémoires de la Société Vaudoise des Sciences Naturelles  
**Herausgeber:** Société Vaudoise des Sciences Naturelles  
**Band:** 11 (1955-1956)  
**Heft:** 4

**Artikel:** Neutrons cosmiques dans l'eau, à grandes profondeurs dans le Lac Léman  
**Autor:** Binggeli, Edmond  
**DOI:** <https://doi.org/10.5169/seals-257488>

#### **Nutzungsbedingungen**

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften auf E-Periodica. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen sowie auf Social Media-Kanälen oder Webseiten ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. [Mehr erfahren](#)

#### **Conditions d'utilisation**

L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. La reproduction d'images dans des publications imprimées ou en ligne ainsi que sur des canaux de médias sociaux ou des sites web n'est autorisée qu'avec l'accord préalable des détenteurs des droits. [En savoir plus](#)

#### **Terms of use**

The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. Publishing images in print and online publications, as well as on social media channels or websites, is only permitted with the prior consent of the rights holders. [Find out more](#)

**Download PDF:** 14.01.2026

**ETH-Bibliothek Zürich, E-Periodica, <https://www.e-periodica.ch>**

## Neutrons cosmiques <sup>(1)</sup> dans l'eau, à grandes profondeurs dans le lac Léman

PAR

*Edmond BINGGELI*

(Laboratoire de Recherches Nucléaires de l'Ecole Polytechnique de l'Université de Lausanne)

(Séance du 28 octobre 1953)

---

*Sommaire.* — Des émulsions nucléaires contenant des sels de bore ou de lithium, enrobées de paraffine et enfermées dans des cylindres étanches de laiton, ont été exposées dans les eaux du lac Léman, durant plus de 7 mois, simultanément aux profondeurs 12 m, 102 m, 202 m, 302 m; les dispositifs utilisés et les détails expérimentaux sont décrits.

La méthode de dépouillement des enregistrements et la technique de mesure sont exposées; le fading des émulsions a été limité et mesuré; les flux de neutrons thermiques produits par la radiation cosmique dans l'eau sont décrits par la relation  $\Phi_P = \Phi_0 \exp(-\gamma P)$ , avec  $P$  en mètres d'eau, valable dans l'intervalle de mesure;  $\Phi_0 = 38 \pm 13$  neutrons/cm<sup>2</sup> et  $\gamma = (5,4 \pm 0,4)$  %, correspondant à un « libre parcours moyen »  $\lambda = 185 \pm 15$  m d'eau.

### I. INTRODUCTION.

Le globe terrestre est bombardé sans cesse par des noyaux d'atomes légers, doués d'une grande énergie cinétique, provenant des espaces intersidéraux; ces particules, que l'on qualifie de primaires, pénètrent dans l'atmosphère, heurtent les noyaux des atomes qui composent l'air et les font exploser en de multiples fragments; ceux-ci produisent à leur tour la rupture d'autres noyaux, de telle sorte qu'il se forme rapidement un mélange très complexe de particules rapides: noyaux, protons, neutrons, mésons de divers types, électrons positifs et négatifs, photons, neutrini (2), etc. qui composent le rayonnement cosmique secondaire.

(1) Pour ce renvoi et ceux indiqués de cette manière, v. l'Appendice, p. 203.

Ce processus de multiplication se répète en cascades, à mesure que le rayonnement s'enfonce dans l'atmosphère; par contre, l'énergie cinétique moyenne par particule diminue, tandis que la densité de l'air augmente, si bien que le freinage et l'absorption des radiations par l'air deviennent importants et limitent le nombre des particules qui atteignent la basse atmosphère.

Depuis 1932, on sait que les neutrons sont, avec les protons, les constituants des noyaux atomiques (3); on pouvait donc s'attendre à les trouver également dans le rayonnement cosmique primaire ou secondaire. En effet, dès 1933, la présence des neutrons dans le rayonnement cosmique de la basse atmosphère est établie.

L'étude des neutrons est alors poursuivie au sol, dans les laboratoires des villes, puis dans ceux de la haute montagne; pour se libérer de l'influence du sol qui perturbe les mesures en produisant une rétrodiffusion des neutrons, des mesures sont réalisées dans «l'atmosphère libre» à l'aide de ballons stratosphériques montés par des physiciens-explorateurs, en utilisant des ballons-sondes emportant des appareils très légers (enregistrant les observations ou les télécommuniquant au sol), ou à l'aide d'avions stratosphériques emportant des appareils lourds. On constate que l'intensité du flux de neutrons cosmiques d'une énergie donnée, par exemple les neutrons thermiques (4), croît avec l'altitude (mesurée par la pression atmosphérique) suivant la loi exponentielle :

$$I_P = I_0 \exp (-\gamma P) \quad (1)$$

P pression atmosphérique exprimée en mwe (5)

$\gamma$  coefficient d'absorption massique (6)

$I_0$  constante, calculée pour  $P = 0$ ; valeur fictive

valable dans le domaine de mesure de 10 à 3 mwe.

Pour une latitude moyenne ( $45^\circ$  N),  $\gamma$  vaut  $0,61 \text{ cm}^2/\text{g}$ , ce qui correspond à un «libre parcours moyen» des neutrons de  $\lambda = 1/\gamma = 165 \text{ g/cm}^2$ ; remarquons que la pression atmosphérique est une mesure de la masse superficielle de l'écran d'air traversé par le rayonnement cosmique, depuis le sommet de l'atmosphère.

D'autre part, on découvre en laboratoire que le neutron libre ( $n^*$ ) est instable et qu'il se transforme spontanément (et irréversiblement) en proton, électron négatif et neutrino d'après le schéma :



avec une période (7) de l'ordre de 15 min.

Il s'ensuit que les neutrons ne peuvent pas être primaires (malgré la contraction du temps de Lorentz-Fitzgerald), à moins de provenir du système solaire, c'est-à-dire pratiquement du soleil lui-même; or l'influence du soleil sur les flux de neutrons observés (effet diurne), si elle existe, est inférieure aux 10 % de l'effet mesuré, à une pression de 6 mwe.

Par conséquent, il est certain que les neutrons cosmiques sont pour la plus grande part des secondaires qui prennent naissance dans l'atmosphère lors d'interactions du rayonnement cosmique avec les noyaux atomiques.

Il résulte de ces considérations qu'il doit exister dans l'atmosphère une altitude (une pression) où le flux de neutrons est maximum; celui-ci a été trouvé au voisinage de  $P = 1$  mwe.

Pour fixer les idées, la production de neutrons cosmiques est de l'ordre de  $10^{-3}$  neutrons/g-sec pour  $P = 5$  mwe (altitude 5 à 6 km).

Quelle est la radiation productrice de neutrons (RPN) dans l'atmosphère? La radiation primaire de très grande énergie (protons et noyaux de plus de 1000 Bev (8)), par interaction avec les noyaux de la haute atmosphère, produit les premiers neutrons, en même temps que des protons, des mésons et des photons; toutes ces radiations peuvent produire des neutrons, mais la RPN la plus importante dans l'atmosphère est de beaucoup la composante neutronique elle-même, chaque neutron donnant plusieurs neutrons. Les neutrons d'énergie modérée formés (par exemple 30 Mev) (8) sont ralentis par scattering inélastique (9) dans les noyaux  $^{14}\text{N}$  et  $^{16}\text{O}$ , au-dessous des niveaux inférieurs d'excitation de ces noyaux (4 Mev et 2,3 Mev), généralement par une seule interaction, puis par scattering élastique (10) qui en quelque 50 collisions les amènent dans le domaine lent (10 Kev), pour autant qu'ils n'aient pas été capturés par  $^{14}\text{N}$  suivant l'un des processus :  $^{14}\text{N}(n, \alpha)^{11}\text{B}$  ou  $^{14}\text{N}(n, p)^{14}\text{C}$ .

L'atmosphère, qui pour le rayonnement cosmique forme un écran d'air, se comporte à la fois comme producteur et comme absorbant de neutrons; la production est le processus le plus important au sommet de l'atmosphère; par contre le nombre des neutrons libres est de plus en plus limité par l'absorption, à mesure que le rayonnement s'enfonce dans l'atmosphère; il y a un équilibre de régime entre ces deux processus; les neutrons sont donc dans un équilibre de diffusion, dans lequel ils sont sans cesse produits, ralentis et capturés, le nombre de neutrons lents étant prépondérant.

Le parcours moyen des neutrons entre leur origine et leur capture est de l'ordre de 1 mwe dans l'atmosphère; ils

sont donc capturés relativement près (11) de leur lieu de production.

La variation du flux de neutrons étant bien déterminée pour les 10 premiers mwe de l'écran que forme l'atmosphère, le but de notre travail fut d'en prolonger l'étude, dans ses grandes lignes, pour les 300 mwe suivants.

Cet écran supplémentaire de 300 mwe fut obtenu par l'interposition de la profondeur de l'eau du lac Léman, sur le trajet du rayonnement cosmique; cet écran d'eau a l'avantage d'être homogène, formé d'un composé chimique pratiquement pur, de densité pratiquement constante, freinant énergiquement les neutrons rapides tout en les capturant peu; au contraire, le chlore contenu dans l'eau de mer a une assez grande section efficace de capture (12) pour les neutrons, qui doit modifier profondément leur distribution dans l'eau.

Lorsque nous avons abordé ce travail (printemps 1951), aucune mesure de flux de neutrons cosmiques en sous-sol n'avait été publiée; on savait que les neutrons cosmiques de l'atmosphère étaient totalement arrêtés par les 20 premiers cm d'eau; d'autres neutrons prenaient-ils naissance dans les profondeurs de l'eau? Certains travaux sur les étoiles cosmiques (13) produites en sous-sol nous incitaient à le penser; en tous cas, s'il y avait production de neutrons dans l'eau, celle-ci devait être faible. Quelle était la valeur numérique de cette production? Comment celle-ci variait-elle en fonction de la profondeur? Quelle était la RPN productrice? C'est dans le but de trouver les réponses à ces questions que nous avons conçu notre dispositif de mesure.

## II. DISPOSITIFS ET DÉTAILS EXPÉRIMENTAUX.

### 1. Type d'expérience.

Les mesures réalisées ont tout d'abord nécessité des enregistrements de longue durée, dans des conditions difficiles.

L'expérience avait le caractère d'une exploration, d'un sondage; quels que fussent les précautions prises et les soins apportés à sa préparation, une certaine part d'imprévisible, pouvant entraîner l'échec total, ne pouvait être éliminée. Une fois commencée, aucune amélioration ou modification des conditions d'expérience ne pouvait être introduite; il fallait du premier coup réussir ou échouer; nous sommes heureux que la «chance» ait résolu cette alternative d'une façon favorable.

## 2. *Localisation, époque et durée.*

Nos mesures ont été effectuées dans les eaux du lac Léman (lac de Genève), qui s'étend entre la Savoie (France) et le canton de Vaud (Suisse); sa profondeur atteint 310 m et l'altitude de sa surface est de 372 m au-dessus du niveau de la mer. C'est le plus grand lac de l'Europe occidentale et le quatrième des lacs alpins pour la profondeur.

Le lieu choisi pour notre expérience se trouve à plus de 5 km des côtes, à mi-chemin de Paudex/Lausanne (Suisse) et de Petite-Rive près d'Evian (France), au voisinage du point 539,3/144,8 (coordonnées militaires suisses), soit à environ  $46^{\circ} 27' 15''$  de latitude Nord et  $6^{\circ} 38' 40''$  de longitude Est.

A cet endroit, situé à l'écart des routes des grands bateaux, la mesure de la profondeur du lac nous a donné :  $310 \text{ m} \pm 0,5$  (allongement du câble négligé); nous y avons placé, d'une façon permanente, nos dispositifs d'enregistrement à quatre niveaux différents :

niveau K :	profondeur	302 m	distance du fond	8 m	altitude	70 m
» L :	»	202	»	»	108	» 170
» M :	»	102	»	»	208	» 270
» N :	»	12	»	»	298	» 360

Un cinquième groupe enregistreur (Z) a servi à la détermination de l'effet zéro (14).

L'époque des mesures et leur durée maximum sont imposées par les conditions de la pêche au filet, qui dure de juin à octobre; celle-ci se pratique avec des filets pics ayant 50 m de profondeur et plusieurs centaines de mètres de longueur, que les pêcheurs laissent pendre au large, et que le vent fait dériver parfois sur de grandes distances; pendant la saison de pêche, il est par conséquent exclu de laisser un dispositif permanent en plein lac.

L'immersion de notre appareillage s'est faite le 24 novembre 1951 (14 h 45 - 15 h 45) et le retrait le 28 juin 1952 (4 h - 10 h); la durée d'enregistrement sous l'eau ( $\tau$ ) fut donc de 216,5 jours environ.

## 3. *Dispositif enregistreur.*

L'effet à mesurer étant très faible, l'usage d'émulsions photographiques pour recherches nucléaires, qui intègrent au cours du temps, était spécialement indiqué.

Pour la détection des neutrons, nous avons employé des émulsions Ilford :

*type 1* : C 2, 100  $\mu$ , vierges, chargées au bore normal,  
utilisant la réaction  $^{10}\text{B}(\text{n}, \alpha)^7\text{Li}$

*type 2* : C 2, 100  $\mu$ , vierges, chargées au lithium normal,  
utilisant la réaction  $^6\text{Li}(\text{n}, \alpha)^3\text{H}$

Le fading (15) de ces émulsions a été mesuré à l'aide d'émulsions témoins (v. I/5 et 7) :

*type 3* : C 2, 100  $\mu$  au B, irradiées à une source de neutrons.

*type 4* : C 2, 100  $\mu$ , au Li, irradiées de même.

L'effet des protons de recul, ceux de la contamination radioactive, des phénomènes cosmiques divers, etc., ont été mesurés à l'aide d'émulsions non chargées :

*type 6* : C 2, 100  $\mu$ , vierges.

Enfin, pour profiter des conditions expérimentales, nous avons utilisé des émulsions non chargées, sensibles aux électrons :

*type 5* : G 5, 200  $\mu$ , vierges.

Toutes ces plaques mesurent  $1 \times 3$  inches.

Aux différents points d'enregistrement, nous avons exposé :

une plaque de chacun des types 1, 2, 5 et 6

plus 1/2 plaque du type 3 (points K et M)

ou 1/2 plaque du type 4 (points L et N)

Le groupement Z comprenait une plaque des types 1 et 2, et 1/2 plaque des types 3 et 4.

Les émulsions furent coulées à midi (à la fabrique) le 19 novembre 1951, puis séchées 20 heures environ.

#### 4. *Transport et conservation des plaques photographiques.*

Nous avons cherché à obtenir des émulsions fraîches dans les délais les plus courts après leur fabrication, ceci afin d'avoir un effet zéro minimum<sup>1</sup>.

Les émulsions employées, fabriquées à Londres, sont parvenues à Lausanne un jour après leur emballage, ayant voyagé par avion, dans un coffret de bois blindé par 0,8 mm de cad-

<sup>1</sup> Nous remercions M. C. Waller, chef chimiste chez Ilford, les fonctionnaires du Département Politique Fédéral, M. H. de Torrenté, ministre de Suisse à Londres et ses collaborateurs, ainsi que les fonctionnaires de la Douane de l'aérodrome de Cointrin, d'avoir permis, par leur aide et leur compréhension, l'acheminement rapide de ces émulsions photographiques.

mium (16); elles ont été aussitôt placées, avec leur coffret, dans une atmosphère d'humidité relative 40 %, à 5 C° (solution saturée de  $\text{Ca Cl}_2 \cdot 6 \text{ H}_2\text{O}$ ); ces conditions de conservation optima ont été maintenues jusqu'à ce que les émulsions soient prêtes à être emballées pour leur immersion, sauf durant les manipulations préparatoires indispensables.

### 5. *Préparation des plaques témoins du fading.*

Pour mesurer le fading (15) des plaques sensibles aux neutrons, il suffit d'exposer au rayonnement cosmique, à la fois des émulsions vierges et des émulsions ayant une densité de traces connue; celles-ci ont été obtenues par irradiation à notre source de neutrons, qui se présente de la façon suivante (réf. 1 et 2): au centre d'un ralentisseur de paraffine de 75.75.35 cm se trouve un cylindre de plomb de 10 cm de diamètre et 10 cm de hauteur, qui contient une source de neutrons rapides (Ra, Be) de 50 millicuries; un écran de plomb de 10.10.10 cm, tangent au cylindre, arrête la majeure partie des radiations gamma.

Deux plaques chargées au bore et deux chargées au lithium ont été exposées simultanément à la source, derrière l'écran de plomb; elles étaient groupées en deux paquets identiques formés d'une plaque de paraffine de 1 cm d'épaisseur placée en sandwich entre une plaque au bore et une plaque au lithium, le tout enveloppé d'une feuille de plomb; les deux paquets ont été placés côté à côté, de telle sorte que l'irradiation soit aussi homogène que possible; au milieu du temps de pose, les deux paquets ont été permutés et retournés le bas en haut. Les émulsions au bore ont été irradiées 14 heures et celles au lithium 48 heures.

### 6. *Caissons étanches.*

Pour la protection des plaques photographiques sous l'eau, nous avons employé des caissons étanches cylindriques, à fonds plats; ils ont été construits en laiton, pour résister à des pressions de 35 atmosphères; leurs caractéristiques, calculées<sup>2</sup> pour un diamètre intérieur de 50 mm étaient :

hauteur extérieure : 18 cm  
hauteur utile intérieure : 16 cm

<sup>2</sup> Ces calculs ont été conduits par M. J. Paschoud, prof. EPUL, chef de la Section des métaux du Laboratoire d'essai des matériaux de L'EPUL, que nous remercions vivement.

épaisseur du corps du cylindre : 2,7 mm  
 (résistance à la compression, facteur de sécurité : 4,5)  
 (résistance au flambage, facteur de sécurité : 2 )  
 épaisseur des fonds, non encastrés : 8,4 mm  
 (résistance à la flexion, facteur de sécurité : 3 )

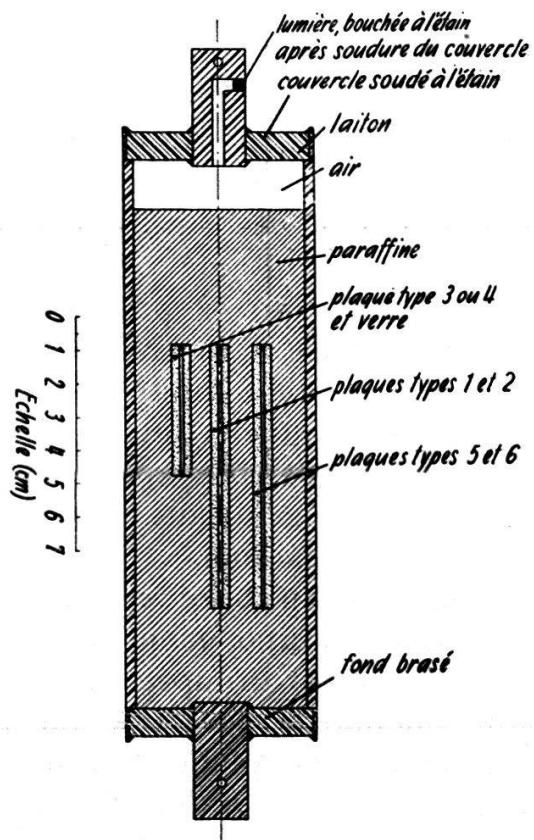


FIG. 1.

(Cliché obligatoirement prêté par la Rédaction des *Helvetica Physica Acta* et la maison Birkhäuser.)

Les fonds reposaient sur des épaulements circulaires larges de 2,2 mm; chacun était muni d'une tige centrale de 15 mm de diamètre, le traversant de part en part, brasée des deux côtés, sectionnée à l'intérieur à 1 mm de la plaque et à l'extérieur à 2-3 cm, percée (côté extérieur) d'un trou diamétral permettant d'y passer un câble auxiliaire. L'un des fonds était soigneusement brasé sur le corps du cylindre et l'autre (le couvercle) fut soudé à l'étain lors de la fermeture (fig. 1).

Pour permettre une soudure parfaite, la tige du couvercle était percée en outre d'une lumière axiale puis radiale, de 3 mm de diamètre, faisant communiquer l'atmosphère avec l'intérieur du cylindre, afin d'équilibrer les pressions lors de la soudure <sup>3</sup>.

<sup>3</sup> Dispositif préconisé par M. Casanova, mécanicien du laboratoire.

### 7. *Dispositions prises pour restreindre le fading.*

Le temps de pose maximum à disposition pour les enregistrements était de huit mois (v. II/2); cette durée était déjà considérable, vu l'importance du fading dans les conditions ordinaires de conservation des émulsions; nous avons donc été amené, d'une part à agir sur tous les facteurs pouvant restreindre le fading, afin de ne pas introduire si possible une erreur systématique importante, et d'autre part à mesurer le fading (v. II/5) pour pouvoir calculer la correction à apporter aux mesures (v. V/3).

Les principaux facteurs accroissant le fading sont la durée, la température, l'humidité et la présence d'oxygène.

Nous voulons expérimenter avec une très longue durée; la température du lac est basse, favorable à la conservation de l'image latente; nous pouvons donc fixer l'humidité et la présence d'oxygène.

Nous avons choisi une humidité relative de 30 à 40 % qui est optimum; dans une atmosphère plus sèche, les émulsions ont tendance à se craqueler et à se détacher de leur support de verre; nous avons renoncé à utiliser l'équilibre de deux hydrates pour stabiliser la tension de vapeur d'eau, afin d'éviter un « effet de cavité » qui pourrait perturber la distribution des neutrons.

Nous avons préféré noyer les émulsions, enveloppées de papier noir et préalablement stabilisées à une humidité relative de 40 % à 5 C°, directement dans de la paraffine fondante; par la même occasion, la disparition d'une atmosphère oxydante était assurée; des essais de cette méthode nous ont montré qu'elle n'altérait pas les émulsions et ne produisait pas de voile.

La paraffine présente encore l'avantage de maintenir les plaques à leur place, de les isoler thermiquement, et de prolonger le milieu ralentisseur de neutrons jusqu'à l'émulsion, en agissant sur les neutrons éventuellement formés dans les parois du cylindre de laiton. (Les sections efficaces de capture des neutrons thermiques de Cu, Zn, Sn sont négligeables).

### 8. *Emballage des émulsions.*

Les plaques photographiques, numérotées par deux procédés différents, ont été groupées deux par deux, les émulsions en regard, maintenues à une distance de 0,4 mm par

de petits morceaux de carton placés aux extrémités (comme dans les paquets d'origine); les groupes réalisés : A (types 1 et 2), B (types 5 et 6), C (types 3 ou 4 et lame de verre) furent enveloppés de papier noir et étiquetés.

D'autre part, des plaques de paraffine de même surface que les plaques photographiques et épaisses de 7 mm furent préparées; l'assemblage des plaques dans l'ordre : B-paraffine-A-paraffine-C réalisait ainsi un prisme à base carrée d'environ 28.28.80 mm.

### 9. *Fermeture des cylindres.*

Leur hauteur utile a été utilisée comme suit :

3 cm de paraffine sur le fond brasé

8 cm pour le prisme des plaques nucléaires noyé dans la paraffine

4 cm de paraffine

1 cm d'air pour permettre la soudure du couvercle.

Les 11 premiers cm de paraffine ont été coulés au préalable dans les cylindres, en laissant au centre un espace prismatique de 30.30.80 mm.

Quelques instants avant la fermeture de chaque cylindre, nous avons coulé 4 cm environ de paraffine fondante dans cette cavité; les plaques à enfermer dans ce cylindre ont été alors sorties de leur atmosphère conditionnée, assemblées en prisme et enfoncées dans leur logement; la paraffine fondante ainsi déplacée colmatait tous les intervalles et débordait au-dessus du logement; elle se solidifiait presque instantanément et les émulsions n'étaient pas exagérément chauffées.

La gélatine des émulsions absorbant très vite l'humidité, nous avons procédé rapidement, et les émulsions ne sont pas restées plus de 30 à 60 sec dans l'atmosphère de la salle.

Sitôt les plaques en place, les niveaux de paraffine ont été amenés à leur hauteur finale (15 cm); la coulée en plusieurs fois n'a donné ainsi qu'un «retrait» négligeable.

Les cylindres, plongés extérieurement dans l'eau au même niveau que la paraffine intérieure, ont été alors fermés avec leur couvercle qui fut soigneusement soudé à l'étain; enfin la lumière fut également bouchée à l'étain (fig. 1).

Jusqu'au moment de l'immersion dans le lac, quelques heures plus tard, les caissons ont été enveloppés dans une feuille de cadmium.

Le poids d'un caisson plein était d'environ 1230 g.

## 10. Caractéristiques du lac Léman <sup>4</sup>.

Le niveau de l'eau ne varie pas de plus de 1,2 m entre les extrêmes annuels; les plus hautes vagues observées ne dépassent pas 1,7 m entre le sommet et le creux; leur action ne se fait pas sentir au-dessous de 8 à 10 m de profondeur (disparition des rides de fond, sur le sable).

Les courants divers: affluents, courants thermiques, seiches, sont négligeables en profondeur; par contre l'action des vents peut produire des courants superficiels assez violents, qui déplacent les filets de pêche sur de grandes distances.

Les températures en profondeur sont probablement constantes toute l'année; pour les niveaux choisis, elles sont:

K : 5,2 C° ; L : 5,2 C° ; M : 5,5 C° ; N : 14-16 C° au maximum.

Par conséquent, au niveau N, l'humidité relative de l'émulsion a dû descendre à environ 20%<sup>5</sup>, contrariant ainsi l'action de la température sur le fading.

Le fond du lac est sablonneux et plat; l'eau du lac est relativement pure; ses constantes physico-chimiques varient naturellement suivant l'endroit et la profondeur des prélèvements; pour donner une idée de leur ordre de grandeur, voici quelques valeurs moyennes<sup>6</sup>:

résidu sec :	170 mg/l
Cl :	1 à 5 mg/l
conductivité à 20° :	2,5 . 10 <sup>4</sup> mho . cm/cm <sup>2</sup>
pH :	7,9
dureté :	13,5 degrés français

La transparence de l'eau permet de voir un disque blanc de 25 cm de diamètre, par temps calme et ensoleillé à midi, à 11 m de profondeur en octobre et à 5-6 m en juin (méthode du P. Secchi); ces variations dépendent des crues du lac.

## 11. Appareillage utilisé dans le lac.

Il a été conçu en fonction des caractéristiques du lac; son principe est le suivant: immersion au point choisi d'un corps-mort suspendu à un câble, jusqu'à ce qu'il touche le fond; assurer la tension verticale du câble en le fixant à une bouée, noyée 8 m sous la surface de l'eau, pour le soustraire à l'action des vagues. Le long du câble ainsi tendu,

<sup>4</sup> Renseignements tirés du « Guide de la navigation de plaisance sur le Léman », tome II, Georges Lefranc (1926), Libr. Pélissier, Thonon (Fr).

<sup>5</sup> Tensions de vapeur d'eau saturante : 6,5 mm Hg à 5 C°  
12,8 mm Hg à 15 C°

<sup>6</sup> Données aimablement fournies par le Laboratoire Cantonal Vaudois.

fixer aux niveaux choisis les caissons étanches contenant les détecteurs. Pour faciliter le repérage du dispositif, relier la bouée noyée à un flotteur, par un câble lâche, afin que l'action des vents ne fatigue pas le câble (fig. 2).

Le *corps-mort*, en béton, pesait environ 40 kg dans l'eau et portait un anneau scellé dans sa masse.

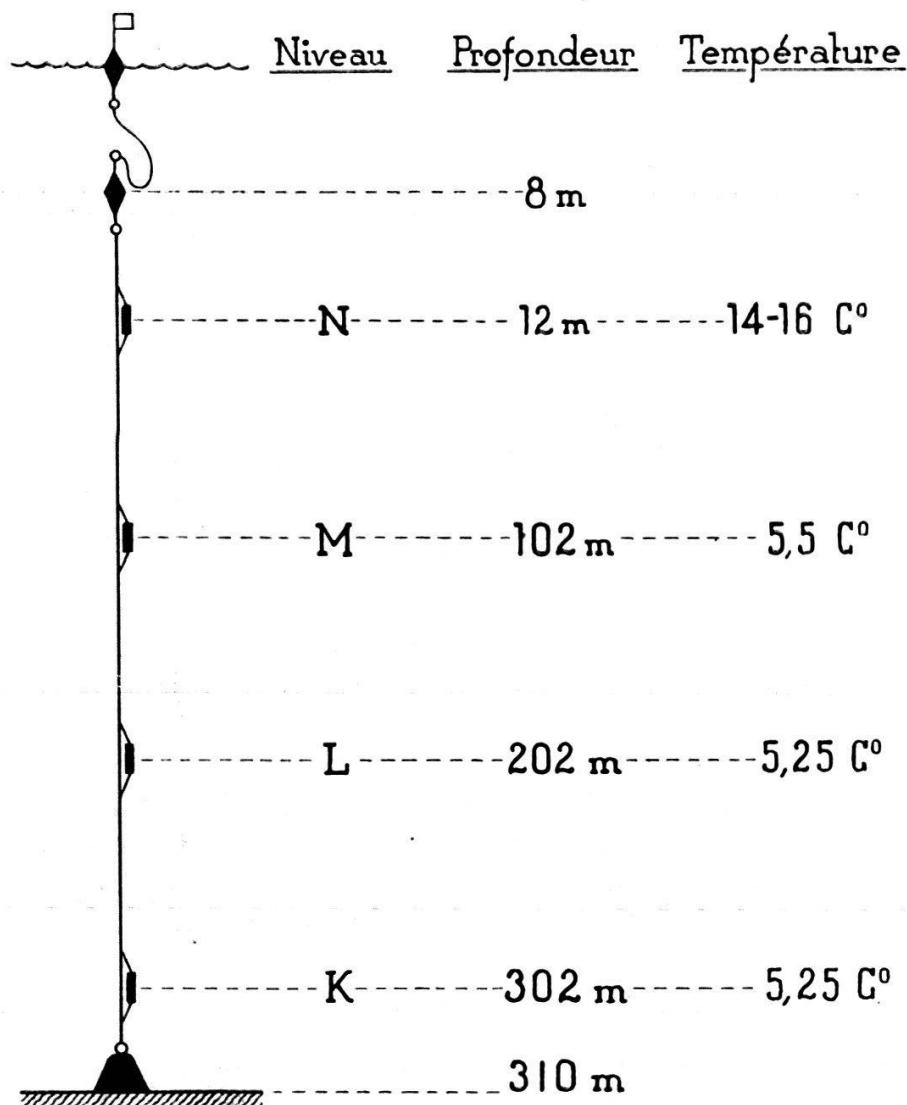


FIG. 2.

Le *câble*, en fil d'acier galvanisé, était formé de six torons à sept brins de 0,25 mm de diamètre chacun, avec âme de chanvre; d'un poids de 5,7 kg / 300 m, sa résistance à la rupture était de 235 kg et sa traction normale d'utilisation de 30 à 40 kg. Les extrémités étaient munies d'œillets avec cosse. Sa longueur était de 328 m.

La *bouée noyée*, en forme de double cône, de section méridienne en losange équilatéral, avait 34 cm de diamètre; construite en tôle de 1,25 mm d'épaisseur, traversée de part en part d'une tige

de 18 mm de diamètre et de 1 m de long munie de boucles aux extrémités; elle fut galvanisée au bain chaud après fabrication et soudée à l'autogène; d'un poids de 6,85 kg, elle déplaçait 18 litres. Compte tenu du poids du câble et des caissons, sa traction utile était de 2,3 kg. Elle fut peinte en blanc au pistolet, avec un vernis cellulosique, afin d'être visible sous l'eau et pour la protéger de la corrosion électrochimique.

Le *flotteur*, en forme de double cône, de section méridienne en losange équilatéral, avait 26 cm de diamètre; construit en tôle de 1,25 mm, il était traversé d'une tige de 18 mm de diamètre dépassant de 50 cm vers le bas et munie d'une boucle; vers le haut la tige dépassait de 15 cm et était prolongée d'une hampe creuse en duralumin, de 125 cm, ceci pour obtenir un équilibre stable; d'un poids de 6,8 kg et d'un déplacement de 8 litres, sa réserve de flottabilité était de 0,7 kg, compte tenu du poids du câble (26 m). Peint en blanc comme la bouée noyée, son cône supérieur fut ensuite recouvert d'un enduit luminescent, afin de le signaler de nuit aux navigateurs; enfin, la hampe était munie d'un drapeau blanc de 50-50 cm et d'une plaquette de métal indiquant la raison d'être du dispositif.

Par ailleurs, des avis furent publiés et placardés dans tous les villages riverains.

## 12. *Mise en place du dispositif.*

L'expédition<sup>7</sup> fut transportée à pied d'œuvre par notre yacht personnel « Captain Flint », sloop de 2 tonneaux équipé pour la circonstance; les cylindres à immerger et le cylindre de zéro firent le voyage ensemble, entourés d'une feuille de cadmium.

Le corps-mort fut relié à une extrémité du câble par une boucle allemande; deux torons du câble sur six furent sectionnés à ce niveau, afin qu'en cas d'enlisement du corps-mort, des tractions sur le câble le rompent à son extrémité, de préférence à tout autre endroit.

Le câble était roulé sur un treuil<sup>8</sup>, fixé au mât du bateau, et passait dans le clan d'une poulie frappée à l'extrémité de la bôme; celle-ci pesée par la balancine, servait ainsi de mât de charge.

Le corps-mort fut lentement immergé; les cylindres furent fixés verticalement aux endroits choisis et préalablement

<sup>7</sup> Nous remercions nos camarades Gailloud, Brody, Robert, Studer, Cornaz, Plattner et Daniloff d'avoir collaboré à la mise en place de notre appareillage.

<sup>8</sup> Nous remercions la maison Mauerhofer & Zuber S.A. Lausanne d'avoir bien voulu mettre gracieusement un de ses treuils à notre disposition, durant trois semaines.

marqués sur le câble principal; des câbles secondaires passaient par les trous préparés dans les tiges des fonds et étaient amarrés au câble principal par des serre-câbles.

Le corps-mort ayant touché le fond et indiqué ainsi la profondeur, le câble fut remonté de 8 m, et la bouée noyée fut fixée au câble principal par des câbles auxiliaires et des serre-câbles.

Par précaution, un trépied de laboratoire fut fixé sur le cône inférieur de la bouée noyée, les pieds en bas, pour le cas improbable où le flotteur disparaîtrait, et où la recherche du dispositif nécessiterait un draguage; le brin de drague pourrait ainsi se crocher plus facilement dans le dispositif.

Le lieu d'immersion fut ensuite repéré aussi soigneusement que possible, en prenant des relèvements par alignement de points sur la côte.

Le cylindre de zéro, contenant les plaques témoins de l'effet zéro à ce moment (14), fut ensuite ramené au laboratoire, toujours protégé par la feuille de cadmium, pour y être immédiatement développé.

### 13. Recherche du dispositif.

Un dernier contrôle effectué à l'aide d'une petite barque en février 1952, par gros temps et neige ! montra que le dispositif était toujours en place; mais au printemps, le laboratoire fut avisé qu'un pêcheur avait retrouvé notre flotteur errant à la dérive; l'examen microscopique de la portion de câble attaché au flotteur révéla qu'il avait été sectionné, au ras de l'eau, à l'aide de pinces coupantes ! La recherche<sup>9</sup> du dispositif sous-lacustre fut longue et difficile; il n'était même pas certain qu'il fût encore en place. Le lieu d'immersion ne put être localisé qu'à l'intérieur d'un rectangle de 100-200 m environ; plusieurs draguages systématiques, avec un câble d'acier de 215 m tendu entre deux bateaux et alourdi pour plonger à 30 m au moins, échouèrent; la traction sur le brin de drague était trop considérable pour déceler le contact avec le câble du dispositif, s'ils glissaient l'un contre l'autre.

La transparence de l'eau était insuffisante pour permettre la vision de la bouée noyée, même en employant la mé-

<sup>9</sup> Nous remercions M. R. Goldsmidt, prof. EPUL, de ses conseils et de son obligeance, M. N. Oulianoff, prof. EPUL et ses collaborateurs, ainsi que nos camarades Favre, Casanova, Raymond, Robert, Bucher et Weill, qui ont collaboré aux recherches.

thode du baquet vitré utilisé par les chasseurs d'éponges; des recherches par détecteurs magnétiques et par mesure de la conductibilité du lac, se révélèrent impossibles. L'emploi de l'avion, du radar et des ultrasons fut envisagé.

Cependant une méthode originale d'*electro-draguage* fut conçue, mise au point, essayée et trouvée satisfaisante; elle consistait à employer un brin de drague isolé électriquement, soumis à une différence de potentiel, et à mesurer la résistance opposée au courant de fuite à la terre (lac); l'isolant, électriquement excellent sous l'eau, devait être souple et plastique; dès que le brin de drague frottait contre un câble tendu, le métal était mis à nu et la résistance électrique diminuait fortement, indiquant le contact; l'isolant adéquat choisi fut la «masse isolante», type A, des électriciens, sorte de bitume.

Un brin de drague de 600 m fut commandé d'après nos indications; nous n'eûmes pas à l'employer, car notre dispositif fut retiré par une autre méthode, plus originale encore!

#### 14. *Retrait du dispositif.*

La recherche du dispositif introduisit une prolongation de la durée des enregistrements et le dépassement des délais prévus.

Le 28 juin 1952, un filet pic de 800 m de long, dérivant sous l'effet du vent, se prit dans notre appareillage par son milieu; continuant à dériver, il fit plonger la bouée noyée qui finalement s'écrasa sous l'effet de la pression et entraîna au fond le centre du filet; au matin, les pêcheurs halant sur les extrémités encore en surface, tendirent le câble à nouveau; le trépied de la bouée solidement croché dans le filet tint bon, non sans causer au filet des dégâts irréparables; les tractions énergiques et répétées de quatre pêcheurs français finirent par rompre le câble au ras du corps-mort, à l'endroit affaibli et le dispositif fut retiré par eux; il fut conservé au bord du lac durant 6,5 j. environ.

Avertis par l'entremise des gendarmeries savoyarde et vaudoise<sup>10</sup>, nous avons pu récupérer notre appareillage le 4 juillet, à 17 h.

Les cylindres, dès lors protégés par une feuille de cadmium, furent ramenés au laboratoire, et les plaques photographiques développées le lendemain.

<sup>10</sup> Nous les remercions de leur aide, tout particulièrement le Sgt. F. Masson, garde-pêche.

### III. DÉPOUILLEMENT DES ENREGISTREMENTS.

#### 1. Ouverture des caissons étanches.

Les couvercles ont été chauffés au chalumeau et dessoudés, les cylindres étant plongés dans l'eau, verticalement, jusqu'à 3 cm environ des soudures; puis les corps des cylindres ont été légèrement chauffés et les âmes de paraffine se sont détachées sans difficulté; elles ont été fracturées prudemment et les plaques photographiques ont pu être isolées sans dégâts.

#### 2. Développement des émulsions photographiques.

Le développement a été effectué «en température» (réf. 3) comme le précise le tableau suivant, le 26 novembre 1951 pour les plaques de zéro (Z) et le 5 juillet 1952 pour les plaques de mesure (K, L, M et N).

bain $H_2O$ , 2 $C^0$	30-35 min
bain de révélateur, 2 $C^0$	32 min
bain de rinçage	quelques sec
étuve, 25-26 $C^0$	28 min (émulsions G 5 : 40 min)
bain de stoppage, 2 $C^0$	15 min (émulsions G 5 : 18 min)
lavage eau courante	1-2 h
bain de fixage, de 2 à 18 $C^0$	quelques heures
lavage eau courante	1/2 j
séchage	1-2 j

#### Remarques :

- a) Il n'y a pas eu de presoak (17).
- b) Les révélateurs utilisés furent  $1/3$  ID 19 (Ilford) +  $2/3 H_2O$  pour les émulsions des types 1, 2, 3, 4 et 6 et  $(1/3 ID 19 + 2/3 H_2O) x + 0,3 x \cdot CH_3COOH 2\%$  pour le type 5 (réf. 4).
- c) Le bain de rinçage était formé de  $(1/2$  révélateur +  $1/2 H_2O)$ .
- d) Pendant tout le séjour à l'étuve, un film de solution de rinçage fut entretenu sur les émulsions.
- e) L'atmosphère de l'étuve était saturée de vapeur d'eau.
- f) Le bain de stoppage,  $CH_3COOH 1\%$  fut supprimé pour les émulsions des types 1, 2, 3 et 4.
- g) Le lavage, après stoppage, facilite le fixage.
- h) Le bain de fixage,  $Na_2S_2O_3$  à  $20\%$ , est initialement à  $2 C^0$  et remonte lentement à la température de la salle; le bain fut renouvelé après une heure; le fixage s'effectue sous agitation lente et permanente.
- i) Le séchage se fait à l'air de la salle.

### 3. *Observation des plaques photographiques.*

Notre instrument d'observation était un microscope Leitz binoculaire; nous avons employé des oculaires  $6\times$  et  $12\times$  périplans, et un objectif  $1/100$  à immersion. Les déplacements de la platine dans son plan (malheureusement non micrométriques), étaient repérés par deux échelles munies de vernier, permettant de noter les coordonnées des champs de la plaque et de les retrouver. Les déplacements de la platine parallèlement à l'axe optique, commandés par une vis micrométrique, permettaient l'observation successive de tous les niveaux de la plaque; la profondeur de champ était de l'ordre de  $0,2\ \mu$ .

Les plaques, d'une teinte grise ou orangée, n'avaient pas de voile superficiel; le voile de profondeur était très faible pour les plaques Z et normal pour les autres, même pour celles irradiées à la source de neutrons. Les traces étaient nettes et aucun gradient de développement ne fut observé.

### 4. *Principe des mesures.*

Nos mesures consistaient à *compter* le nombre de traces provenant d'une réaction nucléaire donnée, pour un certain volume d'émulsion; pratiquement, cela revient à déterminer le nombre de traces par champ, à observer un grand nombre de champs et à dresser des *statistiques*; du fait que les traces cherchées ne sont pas les seules que l'on puisse voir (v. III/8), il faut toujours s'assurer par une mesure individuelle que la trace observée a bien la longueur voulue, c'est-à-dire comprise entre deux limites fixées d'avance.

### 5. *Mesure d'une trace.*

Les traces des réactions  $(B, n)$  et  $(Li, n)$  sont théoriquement rectilignes, des distorsions de l'émulsion pouvant leur donner une légère courbure. Seule leur projection dans le plan-image est visible, rarement sans modifier la profondeur d'observation; cette projection suffit souvent à apprécier, à l'œil, si la trace a la longueur voulue.

S'il y a le moindre doute, la longueur  $P$  de cette projection est mesurée à l'aide d'un micromètre oculaire, étalonné au moyen d'un réseau ligné de  $2\ \mu$  d'écartement; les divisions de ce micromètre valaient :

$$0,585\ \mu \pm 0,005 \text{ dans l'oculaire de } 12\times$$

$$0,785\ \mu \pm 0,005 \text{ dans l'oculaire de } 6\times$$

La précision de la mesure de  $P$  était de  $\pm 1$  division.

Cette longueur mesurée, jointe à la connaissance approximative de la différence de cote  $H$  entre les deux extrémités de la trace, permet d'estimer la vraie longueur de la trace.

Lorsque cette estimation donne une longueur voisine des limites admises, la différence de cote  $H$  est mesurée exactement, par deux pointages à l'aide d'un comparateur monté sur le microscope; la mise au point permet la mesure de  $H$  à  $\pm 0,5 \mu$ .

La vraie longueur de la trace est ensuite calculée par la formule de Pythagore, en tenant compte du facteur de contraction ( $f$ ).

Ces considérations s'appliquent aux traces entièrement comprises dans l'émulsion; le cas des traces sortantes introduit des difficultés supplémentaires, qui seront examinées plus loin (v. III/11).

## 6. *Détermination du facteur de contraction.*

En fixant une plaque nucléaire, son épaisseur diminue fortement, du fait de la dissolution du bromure d'argent qui la constitue pour plus de 80 % en poids. Cette contraction modifie la longueur des traces inclinées, et il est nécessaire de la déterminer pour pouvoir corriger la mesure des traces; pour des émulsions convenablement développées, la contraction doit être uniforme; elle varie par contre au cours du temps, suivant l'humidité de l'atmosphère.

La mesure précise (à quelques %) de la contraction est très difficile et a déjà suscité de nombreux travaux (réf. 5), mettant en œuvre des techniques très fines; celles-ci ne pouvaient pas être appliquées dans notre cas et nous avons dû nous contenter de mesures plus grossières.

Tout d'abord l'épaisseur de l'émulsion vierge, indiquée par la fabrique, est admise comme exacte et constante; elle n'a pu être vérifiée. L'épaisseur de l'émulsion développée est mesurée au microscope, le facteur de contraction étant donné par le rapport des deux épaisseurs.

Cette mesure s'effectue en pointant au comparateur deux petits grains d'argent situés au centre du champ, l'un paraissant le plus haut et l'autre le plus bas; le résultat est donné par un nombre entier ou demi-entier de  $\mu$ ; la mesure est bien réproductible, pour autant que l'on reprenne toujours les mêmes grains; elle est plus précise que la mesure de  $H$ , l'erreur devant être de l'ordre de  $\pm 1/4$  de  $\mu$ , la mise au point étant plus facile.

En répétant cette mesure pour 10 à 50 points différents de la plaque, on obtient une distribution des épaisseurs généralement dissymétrique; il n'y a pas de raison pour que la contraction soit calculée à partir de l'épaisseur moyenne.

L'interprétation de cette distribution peut prêter à controverses; nous avons *admis* que les petites épaisseurs étaient données par des mesures portant sur des grains ne se trouvant pas en surface et nous avons, pour chaque distribution, *estimé* l'épaisseur réelle de la plaque en la *choisisant* au voisinage de l'épaisseur maximum, ou de l'épaisseur la plus fréquente, celles-ci étant généralement voisines.

L'erreur systématique  $df$  commise sur  $f$  a été de même *estimée* d'après la dispersion de la distribution; sauf quelques rares exceptions, elle ne dépasse pas 4%; pour tenir compte de l'erreur sur l'épaisseur de l'émulsion vierge, il faudrait ajouter 2%.

Enfin, pour les mesures exigeant plusieurs jours, le facteur de contraction a été périodiquement contrôlé, afin de tenir compte des variations de l'humidité de la plaque.

#### 7. *Précision dans la mesure de la longueur d'une trace.*

Le calcul de la longueur d'une trace dépend de trois facteurs, chacun d'eux pouvant être affecté d'une « erreur maximum », c'est-à-dire d'une erreur qui n'est généralement pas dépassée, pour des mesures effectuées avec soin dans de bonnes conditions.

Suivant l'orientation spatiale des traces, ces facteurs ont une influence différente et le poids de leur erreur se fait plus ou moins sentir; la précision de la mesure d'une trace varie donc suivant sa longueur et son inclinaison.

Soient :

$P$  la longueur de la projection de la trace dans le plan-image;  
 $H$  la différence de côte des extrémités de la trace;  
 $f$  le facteur de contraction de l'émulsion;  
 $L$  la longueur de la trace avant contraction de l'émulsion;  
nous avons :

$$L^2 = P^2 + H^2 f^2 \quad (3)$$

Soient :

- ±  $dP$  l'erreur maximum sur  $P$ , soit 1 division de l'oculaire  
 $12 \times = 0,6 \mu$
- ±  $dH$  » » »  $H$ , soit  $0,5 \mu$
- ±  $df$  » » »  $f$ , erreur systématique inférieure  
à 4%
- ±  $dL$  » » »  $L$

L'erreur maximum sur  $L$  sera donnée par la différentielle totale de (3) :

$$dL = 1/L (P dP + Hf^2 dH + H^2 f df) \quad (4)$$

$dL$  est donc fonction de 6 paramètres indépendants, dont deux ( $dP, dH$ ) sont constants pour l'ensemble des plaques examinées, et deux ( $f, df$ ) sont fixés pour la plaque étudiée;  $dL$  ne peut donc pas être représenté graphiquement dans le plan, sauf si l'on se donne  $L$ ; mais  $L$  pouvant fluctuer, l'intérêt de cette représentation serait mince.

Les exemples suivants illustrent l'influence des divers facteurs sur la précision relative de la mesure d'une trace :

1. Pour des traces  $Li - \alpha$  d'une longueur  $L = 7 \mu$ , situées dans une émulsion dont le facteur de contraction  $f = 2,5 \mu \pm 4 \%$ , nous observerons pour  $H = 0$  :  $P = 7 \mu \pm 0,59$  soit une erreur relative  $dL/L = \pm 8,4 \%$  et pour  $H = 2,5 \mu$  :  $P = 3,2 \mu \pm 1,75$  soit  $dL/L = \pm 23 \%$ .

2. Pour des traces  $^3H - \alpha$  d'une longueur  $L = 49 \mu$ , avec  $f = 4,0 \pm 4 \%$ , à  $H = 0$  correspond  $P = 49 \mu \pm 0,59$  soit  $dL/L = \pm 1,2 \%$  et à  $H = 12 \mu$  correspond  $P = 10 \mu \pm 4,0$  soit  $dL/L = \pm 8,1 \%$ .

En pratique, nous avons déterminé l'erreur pour chaque trace individuellement, en calculant  $L = \varphi(P, H, f)$ , puis  $L + \Delta L = \varphi(P + \Delta P, H + \Delta H, f + \Delta f)$  et en faisant la différence; les trois paramètres  $P, H, f$  variant d'une façon discrète, il est possible de dresser des tables (tableaux tridimensionnels) donnant  $L = \varphi(P, H, f)$  et d'y lire directement les erreurs absolues sur  $L$ .

### 8. Traces pouvant exister dans nos plaques.

Dans les émulsions nucléaires que nous avons employées, on peut s'attendre à trouver plusieurs types de traces, connaissant l'histoire de ces émulsions depuis leur fabrication jusqu'à leur développement.

Il est possible de classer ces traces suivant plusieurs systèmes; dans le tableau I, nous établissons une correspondance entre eux, en admettant que la situation des traces dans l'émulsion n'est jamais ambiguë; nous préciserons ultérieurement les restrictions que l'on doit faire sur ces classements.

### 9. Caractéristiques des traces de réaction neutron-noyau.

Les réactions de transmutation dues aux neutrons thermiques ont été étudiées par Mme FARAGGI (réf. 6), dans des

CLASSEMENT DES TRACES POSSIBLES

<i>Situation de la trace</i>	<i>Domaine de production</i>	<i>Origine</i>	<i>Phénomène observé</i>
I. Entièrement dans l'émulsion	Intérieur	1. Contamination radioactive à la fabrication	a) traces isolées b) étoiles
		2. Cosmique	c) réaction neutron - Li d) réaction neutron - B e) réaction neutron - N f) étoile avec centre dans l'émulsion g) proton de recul
II. Sortant de l'émulsion	Intérieur	3. Source de neutrons	h) réaction neutron - Li i) réaction neutron - B j) réaction neutron - N k) proton de recul
III. Entrant dans l'émulsion	Extérieur	1. Contamination radioactive après fabrication	l) traces isolées m) faisceau de traces
		2. Cosmique	n) réaction neutron - N o) étoile extérieure (gerbe) p) méson en fin de parcours q) proton en fin de parcours
		3. Source de neutrons	r) proton de recul s) réaction neutron - N
IV. Traversant l'émulsion	Extérieur	1. Cosmique	t) méson rapide u) proton rapide
		2. Source de neutrons	v) proton de recul

émulsions Ilford de même type que les nôtres<sup>11</sup>. Cet auteur a mesuré les longueurs de traces (pour  $H = O$ ) avec une grande précision (18) ; nous nous sommes basé sur ses résultats pour identifier nos traces, les mesures étant en accord satisfaisant avec les valeurs calculées (6).

La réaction  $^6Li(n, \alpha) ^3H$  correspond à un parcours moyen de  $43 \mu$  qui peut fluctuer entre  $37 \mu$  et  $49 \mu$ .

La réaction  $^{10}B(n, \alpha) ^7Li$  correspond à un parcours moyen de  $7,2 \mu$  si  $^7Li$  est dans un état excité (478 Kev) et de  $8,7 \mu$  pour  $^7Li$  dans l'état fondamental (7 % des cas) ; les parcours extrêmes sont de  $5,2 \mu$  et  $10,1 \mu$ , d'après les histogrammes de Mme FARAGGI.

La réaction  $^{14}N(n, p) ^{14}C$ , de faible section efficace, correspond à un parcours moyen de  $6,4 \mu$ , pouvant fluctuer entre  $4,5 \mu$  et  $7,9 \mu$ .

Les «lacunes» (19) entre les traces des deux fragments, pour ces différentes réactions, n'étaient visibles qu'exceptionnellement dans nos plaques, plus fortement développées que celles de Mme FARAGGI.

#### 10. Généralités sur les comptages. (Champs à forte densité de traces).

Il faut s'efforcer de choisir un grossissement permettant un comptage aisément (environ 5 traces/champ) ; si la densité de traces est trop forte, le comptage devient ardu et les risques d'oubli augmentent ; si elle est trop faible, le comptage exige l'examen d'un très grand nombre de champs, si l'on ne veut pas que la précision sur la densité moyenne laisse à désirer.

Ces considérations sur la densité doivent néanmoins être subordonnées à la condition de parfaite visibilité des traces individuelles, afin qu'aucune ne puisse échapper à l'observation, si inclinée qu'elle soit par rapport au plan-image ; afin de respecter cette condition, nous nous sommes astreint à effectuer de très longs comptages, malgré les fatigues de ce travail, de précision certes, mais éminemment fastidieux ; les comptages ont duré une année.

Les traces entièrement comprises dans l'émulsion, peuvent être entièrement ou partiellement visibles dans un champ pris au hasard sur la plaque ; il faut fixer une *convention de comptage*.

<sup>11</sup> Nous remercions Mme Faraggi, qui a bien voulu nous faire parvenir des copies détaillées de ses histogrammes originaux.

Il y a deux possibilités :

1. Compter les seules traces entièrement visibles dans le champ; cette convention supprime toutes les traces appartenant à deux champs contigus qui ne seront comptées ni dans l'un, ni dans l'autre; elle revient donc à travailler avec une densité réduite et fausse les comptages absolus en introduisant une erreur systématique; pour les comptages relatifs (différentiels), elle n'utilise pas pleinement la durée d'irradiation.

2. Compter les traces ayant au moins une fraction donnée de leur longueur dans le champ; il semble intuitivement évident et l'on démontre rigoureusement par le calcul des probabilités (pour une symétrie sphérique), que cette fraction doit être  $1/2$ , pour que le comptage soit exact; il est à noter que les traces coupant deux fois les bords du champ (à la corde), doivent aussi être comptées comme intérieures, si la moitié de leur longueur est visible dans le champ. Nous avons toujours employé la convention de comptage n° 2.

Pour savoir si une trace, partiellement visible dans un champ, a au moins la moitié de sa longueur dans ce champ, il est nécessaire d'observer la totalité de la trace, donc d'examiner le champ contigu par déplacement de la platine; il est difficile de localiser sur la trace son intersection avec le bord du champ primitif, permettant de replacer exactement ce champ; comme cette manœuvre peut être nécessaire pour 3 ou 4 traces du champ, on conçoit le temps qu'elle exige et les erreurs qu'elle introduit.

Pour pallier ces inconvénients, nous avons fait construire un micromètre oculaire spécial, formé d'un cercle centré sur le champ, et de diamètre tel que la différence des rayons du champ et du cercle micrométrique soit plus grande que la moitié d'une trace neutron-Li (les plus longues); le cercle est partagé en quatre par deux diamètres croisés, prolongés jusqu'au bord du champ microscopique; l'emploi de ce micromètre permet d'estimer directement, sans déplacer la platine, si les traces ont la moitié de leur longueur dans le champ micrométrique, d'où un gain de temps et de sécurité; par contre le nombre de champs à observer est naturellement accru, pour une surface donnée à explorer sur la plaque.

Les champs utilisés avaient les dimensions suivantes, mesurées à l'aide d'un réseau ligné de  $2 \mu$  d'écartement :

Oculaires	Champs	Diamètres	Surfaces
6 ×	complet	$134 \mu \pm 1$	$1,41 \cdot 10^{-4} \text{ cm}^2 \pm 1,5 \%$
6 ×	micrométrique	$92 \mu \pm 1$	$6,64 \cdot 10^{-5} \text{ cm}^2 \pm 2,2 \%$
12 ×	complet	$94 \mu \pm 1$	$6,93 \cdot 10^{-5} \text{ cm}^2 \pm 2,2 \%$
12 ×	micrométrique	$71 \mu \pm 1$	$3,95 \cdot 10^{-5} \text{ cm}^2 \pm 2,8 \%$

Afin d'éviter d'observer deux fois le même champ, l'exploration des plaques a été poursuivie systématiquement :

1. Observation des champs de même abscisse, sur toute la largeur de la plaque, deux champs étant séparés par un intervalle de 1/2 à 1 diamètre, l'ensemble de ces champs formant une *plage*.

2. Observation des champs de la plage contiguë, distante de la première de 1/2 à 1 diamètre, et ainsi de suite; les abscisses de la première et de la dernière plage observées sur chaque plaque ont été notées.

### 11. Identification des traces de la réaction neutron-Li.

Le problème consiste à répartir les traces visibles en deux ensembles :

A) celui des traces de la réaction neutron-Li, que nous voulons compter, et dont la vraie longueur fluctue entre 37 et  $49 \mu$  ;

B) celui des autres traces, qui ne nous intéressent pas ici, qu'elles soient cosmiques ou de contamination radioactive.

Le risque est de se tromper dans la répartition des traces, ce qui fausserait le compte. Nous devons donc trouver un *critère d'identification* qui soit à la fois simple, rapide et sûr.

Dans le tableau des traces possibles (tableau I), les quatre groupes initiaux sont ceux que l'on peut théoriquement prévoir ; en fait, le classement d'une trace dans l'un de ces groupes n'est pas toujours possible avec certitude, et l'on peut faire les restrictions suivantes :

a) les traces du type I, ayant une extrémité très voisine de l'une des deux surfaces limitant l'émulsion, peuvent être classées par erreur dans les groupes II ou III et inversement;

b) les traces du type II ou III sont rarement discernables entre elles; certainement du type II, si la lacune (19) entre la partie triton et la partie alpha est visible; certainement du type III, si elles sont accompagnées d'autres traces analogues formant un faisceau (étoiles extérieures).

Les traces de la réaction neutron-Li appartiennent uniquement au domaine de production intérieure, groupes I et II. Ceci suggère deux genres de critères d'identification :

1. En comptant dans le groupe I uniquement les traces comprises entre  $37 \mu$  et  $49 \mu$ , on prendra toutes les traces A de ce groupe, et celles-là seulement (v. III/12).

Une cause d'erreur de cette méthode proviendra du fait qu'une trace de la réaction neutron-Li peut avoir une longueur comprise entre  $L_1$  ( $37 \mu$ ) et  $L_2$  ( $49 \mu$ ); une trace L, dont une extrémité est voisine d'une surface limitant l'émulsion, ne pourra pas toujours être classée avec certitude dans le groupe I (traces de parcours L entièrement dans l'émulsion), ou dans le groupe II (traces de parcours  $L + \epsilon$  ayant seulement la longueur L dans l'émulsion) : *restriction a*).

Ce critère donnera un défaut de traces, si dans le doute l'on s'abstient.

2. En comptant les traces du groupe I d'après le critère 1, et en plus les traces du groupe II, ayant au moins une longueur  $\psi \leq L_1 < L_2$ , on sera certain de compter toutes les traces entièrement dans l'émulsion (que cela soit patent ou douteux), et en plus quelques traces fractionnaires (sortantes), une trace fractionnaire étant forcément reconnue, dès que sa vraie longueur dans l'émulsion est plus petite que  $\psi \leq L_1$ .

Une cause d'erreur de cette méthode proviendra du fait que certaines traces du groupe III seront classées dans le groupe II, si le hasard fait qu'elles présentent précisément une longueur comprise entre  $\psi$  et  $L_2$  : *restriction b*).

Ce critère donnera un excès de traces.

Aucun des deux critères d'identification n'est pleinement satisfaisant; suivant les cas, nous avons choisi l'un ou l'autre, nous réservant de justifier à postériori leur emploi, à l'aide des résultats expérimentaux; le calcul de la correction à apporter pour les traces négligées a été donné ailleurs (réf. 7, 8 et 9).

## 12. *Traces de contamination radioactive semblables à ( $^3\text{H}, \alpha$ ).*

Les traces de contamination du groupe I peuvent-elles être confondues avec celles de la réaction neutron-Li ?

En prenant  $37 \mu$  pour longueur de cette dernière, et avec l'erreur maximum possible sur sa mesure (10 %), cela nous donnera  $37 \mu \pm 4$ .

Les seules traces radioactives de longueur supérieure à  $30 \mu$  sont :

Ra C'	39,0 $\mu$	Th A	32,1 $\mu$
Th C'	47,5	An	32,4
Ac C	31,0	Ac A	36,4
Ac C'	36,9		

Les quatre premiers éléments donnent bien une trace unique, mais leurs périodes sont si petites qu'il est pratiquement impossible qu'ils existent dans l'émulsion sans leur élément-mère (Ra, Th, Ac), lesquels auraient donné d'autres traces alpha et par conséquent des étoiles.

Les trois derniers éléments ont des périodes très petites et donneraient des éléments-fils avec formation d'autres traces alpha, donc d'étoiles.

Par conséquent, les traces de contamination que l'on pourrait confondre avec celles de la réaction neutron-Li n'existent jamais isolément, mais seulement sous forme d'étoiles.

### 13. *Identification des traces de la réaction neutron-B.*

Il existe, comme pour les traces de la réaction neutron-Li, deux critères d'identification possibles, aucun d'eux n'étant pleinement satisfaisant (v. III/11).

D'autre part, la petite taille des traces  $^7\text{Li-}\alpha$ , ainsi que la présence de nombreuses « traces parasites » (« bactéries »), dues à des associations spontanées de grains de l'émulsion (?) (réf. 10), rendent l'identification de celle-là plus difficile et moins sûre que celle des traces  $^3\text{H-}\alpha$ . La densité des « bactéries » est de l'ordre de  $10^4/\text{cm}^3$  d'émulsion C 2 (réf. 10).

### 14. *Traces de contamination radioactive, semblables à $^7\text{Li-}\alpha$ .*

Aucun élément des familles radioactives ne donne des particules ayant un parcours inférieur à  $16 \mu$  dans l'émulsion; nulle confusion n'est donc possible entre les traces  $\text{Li-}\alpha$  et les traces de contamination des éléments des familles.

Par contre, le samarium 152 donne des  $\alpha$  ayant un parcours de  $7,2 \mu$  dans l'émulsion (réf. 11); sa présence est cependant hautement improbable, en tant qu'impureté de contamination.

#### IV. RÉSULTATS EXPÉRIMENTAUX

Les plaques pour la mesure du fading ont été explorées champ après champ et des statistiques du nombre de traces par champ ont été dressées (réf. 7, 8).

L'étude des distributions statistiques des fréquences des champs présentant  $x_i$  traces a montré, entre autres, que le deuxième moment (20) de la variable  $x_i$  autour de la moyenne  $\bar{x}$ , ne différait pas d'une façon significative de la moyenne, ce qui est normal si les distributions sont de Poisson; or on sait que lorsque la probabilité d'un événement est très petite, mais que l'on considère un nombre de cas suffisamment grand pour avoir quelques événements, ceux-ci sont distribués suivant une série de Poisson; c'est précisément notre cas et nos statistiques devaient donc, en principe, être de Poisson.

Si notre méthode de mesure microscopique est correcte, c'est-à-dire si aucune erreur systématique n'a perturbé les résultats des comptages d'une façon sensible, tel qu'un choix conscient ou non par l'observateur des phénomènes à compter, si l'on peut donc admettre que le hasard seul a présidé au comptage des faits observés, alors nos distributions statistiques doivent être des distributions de Poisson.

Nous avons contrôlé que c'était bien le cas, en appliquant le test de *khi carré* (réf. 7 et 8).

Les plaques de mesure du fading, développées immédiatement après l'irradiation, présentaient en moyenne : 2,418 traces/champ, pour les émulsions au Li.

Les plaques développées après séjour sous l'eau présentaient en moyenne :

2,088 traces/champ microscopique	6 $\times$	au niveau	L
2,002	»	»	N

soit une perte par fading, au niveau L de  $(13,6 \pm 2,7)\%$  et au niveau N de  $(17,2 \pm 2,7)\%$ , ces valeurs étant de beaucoup supérieures aux fluctuations statistiques admissibles.

Pour les plaques au bore, par contre, aucun fading sensible n'a pu être mis en évidence.

Les comptages des traces dues au rayonnement cosmique sous l'eau nous ont donné les résultats suivants, pour les plaques au Li.

Plaques de zéro	:	1 trace /30000 champs	6	×
Plaque niveau K	:	4 traces /20000	»	»
L	:	9 » /20000	»	»
M	:	8 » /20000	»	»
N	:	14 » /18000	»	»

Les plaques au bore nous ont donné des résultats analogues, d'une interprétation plus difficile cependant et offrant une moins grande sécurité. Nos résultats finals sont calculés uniquement à partir des valeurs obtenues des plaques au Li, qui sont sûres; les valeurs tirées des plaques au B sont en accord.

## V. CALCULS ET RÉSULTATS.

### 1. Section efficace de capture de nos détecteurs.

Soit un faisceau monocinétique de neutrons d'énergie  $w$ ; considérons une surface de  $1 \text{ cm}^2$  normale à la direction des neutrons et soit un unique noyau  $N$  placé sur cette surface unité.

On appelle *section efficace du noyau  $N$*  (pour les neutrons considérés), la fraction de la surface unité qui est utilisée pour *intercepter* les neutrons, mesurée par le rapport du nombre de neutrons interceptés au nombre de neutrons total; cette section efficace est dite *microscopique* et se désigne par  $\sigma$ ; on l'exprime en unité de surface par noyau, l'unité habituelle étant le barn qui vaut  $10^{-24} \text{ cm}^2$  par noyau.

Si l'on spécifie que l'interception veut dire la capture, on aura défini la section efficace de capture; s'il s'agit de n'importe quelle interaction, on parlera de section efficace totale.

Par extension, on appelle section efficace *macroscopique* et on désigne par  $\Sigma$ , la valeur de  $\sigma$  relative à l'ensemble  $N$  des noyaux de l'unité de volume d'un matériau :

$$\Sigma = \sigma N \left[ \frac{\text{cm}^2}{\text{noyau}} \cdot \frac{\text{noyaux}}{\text{cm}^3} \right] \quad (5)$$

La dimension de  $\Sigma$  est l'inverse d'une longueur; elle est équivalente à un coefficient d'absorption linéaire, tandis que  $1/\Sigma$  peut être identifié à un libre parcours moyen.

La section efficace est une fonction de l'énergie des neutrons; pour le bore comme pour le lithium, cette fonction est :  $\sigma = Q(1/v)$ , où  $v$  est la vitesse des neutrons; le domaine

de validité de cette loi est le domaine thermique et jusqu'à 1 Kev au moins pour le B (probablement jusqu'à 10 Kev), thermique et jusqu'à 5 ev au moins pour le Li (réf. 12).

Les valeurs de  $Q$  peuvent être calculées à partir des données expérimentales, relatives aux neutrons thermiques.

L'énergie par particule est donnée par  $w = kT$  où  $k$  est la constante de Boltzmann :  $(1,3708 \pm 0,014) 10^{-16}$  erg/ degré Kelvin·particule,  $T$  : la température absolue en degré K.

Pour  $19^{\circ}\text{C}$ ,  $T = 298\text{ K}$  ;  $w = 4 \cdot 10^{-14}$  erg = 0,025 ev ; c'est la valeur thermique moyenne, pour laquelle les données numériques des tables sont calculées.

Pour chaque température, on peut calculer la vitesse moyenne des particules d'après  $w = m v^2/2$ ,  $m$  étant la masse du neutron égale à  $1,6747 \cdot 10^{-24}$  g ; on trouve qu'au voisinage de  $19^{\circ}\text{C}$ ,  $\sigma$  diminue de 0,17 % lorsque la température augmente de  $1^{\circ}$  et inversement.

Les valeurs utilisées pour les sections efficaces de capture du B et du Li pour les neutrons thermiques sont :

$\sigma_{\text{c th}} = 65$  barns (réf. 13) et  $\sigma_{\text{c th}} = 67$  barns (réf. 14) pour le lithium ;  $\sigma_{\text{c th}} = 718$  barns (réf. 14) et  $\sigma_{\text{c th}} = 710$  barns (réf. 15) pour le bore. Nous avons pris les valeurs  $\sigma_{\text{c th}} = 66 \pm 1$  pour le Li (à 1,5 %) et  $\sigma_{\text{c th}} = 714 \pm 1$  % pour le B.

Calculons la valeur  $\Sigma$  de nos émulsions, pour l'énergie 0,025 ev. Soient

$c$  la concentration du mélange isotopique neutrophage ( $\text{g/cm}^3$ )  
 $a$  le poids atomique moyen du mélange isotopique

$A$  le nombre d'Avogadro (réf. 16) =  $6,023 \cdot 10^{23}$

Le nombre d'atomes du mélange isotopique neutrophage, par  $\text{cm}^3$  d'émulsion, vaut :  $N = c A/a$ .

Les valeurs de  $c$  données par la fabrique Ilford sont :

$c_B = 0,023 \text{ g/cm}^3$  ;  $c_{\text{Li}} = 0,016 \text{ g/cm}^3$  connues à 2 % près (réf. 17).

Les erreurs sur  $a_B = 10,82$  et sur  $a_{\text{Li}} = 6,938$  sont négligeables, d'où :

$$N_B = 1,280 \cdot 10^{21} \text{ et } N_{\text{Li}} = 1,389 \cdot 10^{21}$$

$$\Sigma_B = 9,14 \cdot 10^{-1} \text{ cm}^{-1} \pm 3 \% \text{ et } \Sigma_{\text{Li}} = 9,17 \cdot 10^{-2} \text{ cm}^{-1} \pm 3,5 \%$$

On voit que pour les émulsions Ilford, le rapport  $\Sigma_B/\Sigma_{\text{Li}}$  est très voisin de 10.

## 2. Flux moyen.

A partir de  $\Sigma$  on peut calculer le flux moyen  $\Phi$  de neutrons thermiques par  $\text{cm}^2$  (neutrons traversant une sphère de  $1 \text{ cm}^2$  de section méridienne).

$\Phi$  neutrons/cm<sup>2</sup> donneront  $\Phi \Sigma$  désintégrations par cm<sup>3</sup> d'émulsion, d'où, en tenant compte de la correction de  $\Sigma$  due à la température, on trouve qu'à chaque trace par cm<sup>3</sup> d'émulsion correspondent les « flux unitaires »  $\bar{\Phi}$  suivants (pour la durée totale des enregistrements) :

$$\begin{aligned}\bar{\Phi}_{Li} \text{ (niveau K, L et M)} &= 10,66 \pm 3,5 \% \text{ neutrons/cm}^2 \cdot 216,5 \text{ j} \\ \bar{\Phi}_{Li} \text{ (niveau N)} &= 10,84 \pm 3,5 \% \quad \text{»} \\ \bar{\Phi}_B \text{ (niveau K, L et M)} &= 1,069 \pm 3 \% \quad \text{»} \\ \bar{\Phi}_B \text{ (niveau N)} &= 1,087 \pm 3 \% \quad \text{»}\end{aligned}$$

*Remarque.* — La distribution des vitesses des neutrons thermiques est maxwellienne; les valeurs indiquées sont relatives à la vitesse la plus probable (voisine de la vitesse moyenne). L'effet des neutrons rapides est négligé; on a admis que tous les neutrons étaient monokinétiques, avec une énergie de 0,025 ev.

### 3. Correction du fading.

Le calcul de la correction à apporter aux résultats des comptages pour tenir compte du fading (15), est basé sur les faits suivants :

a) Nous savons que des émulsions photographiques possédant une densité de traces connue au début de l'expérience, présentent une densité plus faible à la fin de celle-ci; la valeur de la mesure du fading qui affecte des traces latentes durant le temps d'exposition  $\tau = 216,5 \text{ j}$  est donc connue (v. IV).

b) Nous savons que le rayonnement cosmique n'a pas modifié la densité initiale de traces dans les plaques de mesure du fading, d'une façon sensible (v. IV).

c) Nous admettons que les traces dues aux neutrons cosmiques se sont inscrites dans les émulsions en nombre directement proportionnel au temps d'exposition; ainsi des traces inscrites au début de l'expérience ont subi un fading identique à celui qui affecte les traces des plaques témoins du fading, tandis que les traces inscrites à la fin de l'expérience n'ont pas subi de fading.

d) La connaissance de la variation du fading au cours du temps est nécessaire pour pouvoir calculer le *fading moyen*, c'est-à-dire un fading fictif affectant d'une façon uniforme les traces indépendamment de leur âge. (De même que l'on remplace la vitesse variable d'un véhicule au cours du temps

par une vitesse moyenne fictive, uniforme pour un laps de temps donné).

e) Le calcul de la fonction représentant la variation du fading au cours du temps a été conduit<sup>12</sup> à partir de considérations (réf. 18) théoriques (réf. 8, 7) s'appuyant sur une base expérimentale.

f) Nous avons trouvé que le nombre relatif de traces disparues en fonction du temps pouvait être représenté par :

$$F(t) = 1 - \exp(-bt^2/2) \quad (6)$$

$b$  étant une constante que l'on peut calculer, connaissant une valeur du fading pour un temps donné.

g) Le fading moyen sera évidemment donné par :

$$F_m = \frac{1}{\tau} \int_0^{\tau} F(t) dt \quad (7)$$

Le résultat mathématique de ce calcul a été donné ailleurs (réf. 8, 7). Relevons les résultats numériques auxquels il conduit: Pour les plaques au Li, niveau L :  $F_m = (4,7 \pm 1) \%$

$$\Rightarrow N : F_m = (6,0 \pm 1) \%$$

h) Si nous désignons par  $\rho$  le facteur correctif du fading, le nombre  $n_0$  de traces par  $\text{cm}^3$  d'émulsion en l'absence du phénomène du fading se déduit du nombre de traces mesuré  $n$ , par les relations :

$$n = n_0 - n_0 F_m \quad \text{d'où} \quad n_0 = \frac{n}{1 - F_m} = \rho n \quad (8)$$

i) Les valeurs de  $\rho$  sont alors :  $\rho_L = 1,050 \pm 0,011$   
 $\rho_N = 1,064 \pm 0,012$

Nous admettons que  $\rho_K = \rho_L = \rho_M$ , les conditions de température étant identiques pour ces niveaux.

#### 4. Flux de neutrons thermiques dans les eaux du Léman.

Calculons-le pour les émulsions au Li. Soient :

$N_i$  le nombre total de champs observés, pour la plaque au Li du niveau  $i$

$n_i$  le nombre total de traces observées pour  $N_i$  champs

V le volume d'émulsion limité par un champ

$\varphi$  le facteur correctif pour les traces sortantes

<sup>18</sup> Cette théorie a été établie en collaboration avec notre ami, M. Alfred Roch, mathématicien et ingénieur, auquel va toute notre gratitude.

- $\rho_i$  le facteur correctif du fading  
 $D_i$  la densité de traces par  $\text{cm}^3$  d'émulsion  
 $\tau$  la durée de l'enregistrement sous l'eau  
 $\bar{\Phi}_i$  le flux unitaire  
 $\Phi_i$  le flux de neutrons par  $\text{cm}^2/\text{j}$ , au niveau  $i$

Nous avons : 
$$D_i = \frac{\varphi}{V} \left( \frac{n \rho}{N} \right)_i \quad (9)$$

et 
$$\Phi_i = \frac{D_i - D_z}{\tau} \bar{\Phi}_i \quad (10)$$

Ces formules nous conduisent aux valeurs numériques suivantes<sup>13</sup> :

$D_z = 30,2 \pm 33,5$	traces/ $\text{cm}^3$	
$D_K = 190 \pm 120$	»	$\Phi_K = 7,9 \pm 7,9$ neutrons/ $\text{cm}^2 \cdot \text{j}$
$D_L = 427 \pm 200$	»	$\Phi_L = 19,5 \pm 12,2$ »
$D_M = 380 \pm 185$	»	$\Phi_M = 17,2 \pm 11,3$ »
$D_N = 750 \pm 300$	»	$\Phi_N = 36,1 \pm 18,0$ »

Nous avons cherché à relier nos valeurs expérimentales par une loi simple. Celle qui décrit le mieux les variations observées est exponentielle, de même que pour la variation du nombre de neutrons thermiques dans l'atmosphère libre (fig. 3):

$$\Phi_P = \Phi_0 \exp(-\gamma P) \quad (11)$$

les valeurs des paramètres  $\gamma$  et  $\Phi_0$ , lorsque  $P$  est en mwe, pouvant se lire sur la figure 3.

Il est encore nécessaire de corriger ces résultats d'une erreur systématique; nous avons vu (v. II/14) que les plaques détectrices furent sorties de l'eau par des pêcheurs et abandonnées au bord du lac durant 6,5 j; de ce fait, les plaques furent exposées au rayonnement cosmique de l'atmosphère qui est beaucoup plus intense que le rayonnement sous l'eau. Du fait de cette surexposition, les valeurs trouvées pour les flux totaux sont trop élevées. Nous avons calculé la valeur de cet effet perturbateur en admettant que le flux de neutrons thermiques dans l'atmosphère, au voisinage du sol, vaut 230 neutrons/ $\text{cm}^2 \cdot \text{j}$  pour une pression atmosphérique de 753 mm Hg; naturellement, seule une petite fraction de ce

<sup>13</sup> Le calcul d'erreur détaillé est donné dans la réf. 7. L'erreur statistique est prépondérante. (réf. 8).

nombre de neutrons atteint les plaques photographiques (réf. 8). Les résultats corrigés peuvent se lire dans la figure 3, sur la droite épaisse et traitillée.

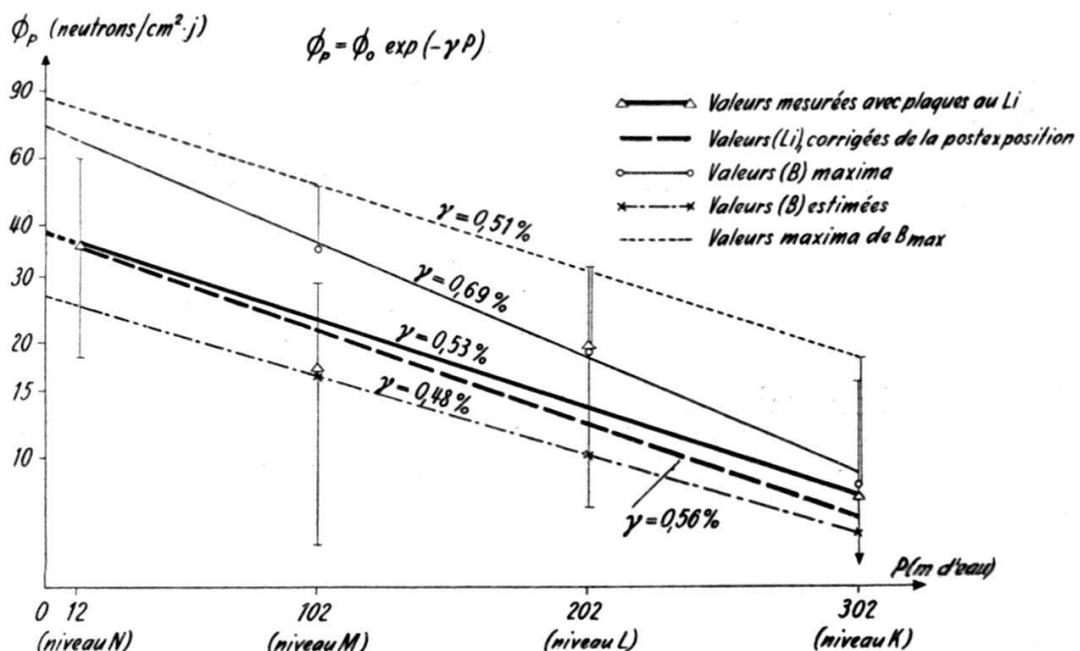


FIG. 3.

(Cliché obligamment prêté par la Rédaction des *Helvetica Physica Acta* et la maison Birkhäuser.)

## VI. CONCLUSIONS.

1. Ce travail est l'un des premiers<sup>14</sup> qui donne des valeurs absolues de l'intensité des neutrons de la radiation cosmique en sous-sol; nos mesures, réalisées à grandes profondeurs dans l'eau douce, sont exemptes d'effets secondaires parasites, au contraire de celles effectuées sous terre ou dans la mer.

2. Il est possible d'utiliser des émulsions chargées au Li pour des expositions de 12 à 15 mois, si l'on prend soin de réunir les conditions physiques favorables à la conservation des images latentes et si l'on mesure le fading dans les conditions mêmes de l'expérience. Les émulsions chargées au B peuvent être utilisées pour des expositions bien plus longues; cependant, elles ne peuvent pratiquement pas donner de résultats sûrs pour des mesures de très faibles flux de neutrons, à cause des \$10^4\$ traces parasites qu'elles contiennent par cm\$^3\$ d'émulsion (réf. 10). A notre connaissance, nos

<sup>14</sup> Un travail récent a paru sur ce sujet (réf. 19): nous estimons que les neutrons comptés ne peuvent être uniquement dus à la radiation cosmique.

mesures représentent la première tentative couronnée de succès pour une exposition aussi longue. La méthode de calcul du facteur correctif du fading semble être originale.

3. Les flux de neutrons mesurés sont extrêmement faibles, ce qui entraîne une erreur statistique assez considérable; nos résultats sont bien reliés par la loi :  $\Phi_P = \Phi_0 \exp(-\gamma P)$ , valable entre 12 et 302 m de profondeur dans l'eau, avec  $\gamma = (5,4 \pm 0,4) \text{ \%}$  et  $\Phi_0 = 38 \pm 13 \text{ neutrons/cm}^2 \cdot \text{j}$  (erreur probable),  $P$  étant donné en mwe. Nous considérons en tous cas que la valeur extrapolée,  $\Phi_0$  (fictive) est certainement inférieure à 90 et très probablement supérieure à 15 neutrons/cm<sup>2</sup>·j.

4. Le libre parcours moyen de la radiation productrice des neutrons,  $\lambda = 1/\gamma$  vaut 18500 g/cm<sup>2</sup>, soit 185 mwe  $\pm$  15, alors que l'on sait qu'il vaut 160 g/cm<sup>2</sup> dans l'atmosphère libre et pour les 10 premiers mètres de profondeur dans l'eau (réf. 20). Ceci indique que le processus principal de production des neutrons, pour des écrans de masse superficielle supérieure à 20 mwe, n'est plus essentiellement lié à la composante nucléonique, alors que c'est le cas dans l'atmosphère; nous pensons que les neutrons cosmiques sont produits en sous-sol, directement ou indirectement, par les mésons  $\mu$ , comme on admet que c'est le cas pour les autres phénomènes cosmiques en sous-sol.

5. Les mesures présentées ici apportent enfin la première possibilité de vérification de considérations théoriques, réclamées par les théoriciens (réf. 21) pour ces profondeurs.

---

## VII. APPENDICE.

1. Par « neutrons cosmiques », nous entendons « neutrons produits par l'interaction du rayonnement cosmique avec la matière ».

2. Le neutrino est une particule nucléaire légère, électriquement neutre, fondamentale, qui prend naissance, entre autres, lors de l'émission de rayons bêta; nous la désignerons par ( $\nu$ ).

3. En fait, le proton et le neutron sont deux aspects complémentaires d'une seule particule : le nucléon; à l'intérieur du noyau, ils se transforment l'un dans l'autre d'une façon réversible.

4. Les neutrons thermiques sont ceux qui possèdent une énergie cinétique de l'ordre de celle des molécules d'un gaz, aux températures ordinaires; pour une température de 19°C, cette énergie correspond en moyenne à 0,025 électron-volt (ev), soit une vitesse de 2200 m/sec.

5. mwe : *meter water equivalent* = mètre d'équivalent d'eau ; unité de pression valant 100 g/cm<sup>2</sup>; unité de masse superficielle, utilisée pour mesurer l'opacité d'un écran à une radiation, lorsque celle-ci est indépendante de la nature chimique de l'écran.

6. Dans l'étude de l'absorption des flux de neutrons, de même que dans celle des gamma, on fait un usage systématique du coefficient d'absorption massique  $\gamma$ , quotient du coefficient d'absorption linéaire par le poids spécifique de la substance, exprimé en cm<sup>2</sup>/g; son inverse  $\lambda$  mesure le «parcours» des particules, qui réduit un faisceau incident au 1/e de sa valeur initiale ( $e = 2,71828\dots$ ); la mesure des parcours en unités de masse superficielle est courante en physique nucléaire (ex. : rayons bêta).

7. La période est l'intervalle de temps pendant lequel la moitié des noyaux radioactifs, présents initialement, se désintègrent.

8. Les neutrons ont des propriétés très différentes suivant leur énergie  $w$ ; il est commode de les classer en quelques groupes :

neutrons «thermiques» :	$0 \leq w \leq 0,4 \text{ ev}$ ; moyenne $0,025 \text{ ev}$
neutrons «lents» :	$1 \text{ ev} \leq w \leq 10 \text{ Kev}$
neutrons «modérés» :	$1 \text{ Mev} \leq w \leq 20 \text{ Mev}$
neutrons «rapides» :	$50 \text{ Mev} \leq w \leq 1 \text{ Bev}$ ,

les frontières séparant ces groupes étant imprécises.

$1 \text{ ev} = 1 \text{ électron-volt}$ ;  $1 \text{ Kev} = 1000 \text{ ev}$ ;  $1 \text{ Mev} = 1000 \text{ Kev}$ ;

$1 \text{ Bev} (\text{ou Gev}) = 10^9 \text{ ev}$ .

9. Capture du neutron, puis ré-émission par le noyau.

10. Diffusion des neutrons par «choc» élastique.

11. Le mot «près» ne s'applique pas à une distance linéaire (cm) mais à un parcours ( $g/cm^2$ ); voir note 6.

12. La section efficace de capture d'un noyau, pour les neutrons d'une énergie donnée, est une mesure de la probabilité de capture d'un neutron par le noyau considéré (v. V/1).

13. Une étoile cosmique est la figure tracée, dans une émulsion photographique sensible, par les divers fragments résultant de l'explosion d'un noyau de l'émulsion, induite par la capture d'une particule cosmique par ce noyau.

14. L'effet zéro est la mesure du déplacement du zéro, dû au fait que les plaques vierges ont enregistré des neutrons entre le moment de leur fabrication et celui de leur utilisation.

15. Le fading d'une émulsion est le phénomène de l'effacement spontané des traces latentes enregistrées par elle, sous l'influence de l'humidité, de l'oxygène, de la température et du temps (v. II/7 et V/3).

16. Le cadmium est opaque aux neutrons thermiques; il possède une grande section efficace de capture.

17. Bain préalable alcalin, renforçant l'action du révélateur.

18. Remarquons avec M. ALFRED ROCH, mathématicien, qu'en ne comptant que les traces strictement au point sur toute leur longueur à la fois, on favorise les traces courtes, la probabilité de compter une trace étant inversement proportionnelle à sa longueur; il s'ensuit une erreur systématique dans l'histogramme des longueurs; on peut la corriger en multipliant chaque fréquence par la longueur des traces de la classe et en ramenant la somme des fréquences à la valeur qu'elle avait avant la correction; pour l'histogramme au bore de Mme FARAGGI, cette correction accroît la longueur moyenne  $Li-\alpha$  de  $0,3 \mu$  soit 4 % de la longueur primitive. Mme FARAGGI considérait sans doute cette correction comme évidente, car elle n'en fait pas mention, tout en donnant des valeurs numériques provenant d'un histogramme corrigé.

19. La trace de la réaction  $^{10}B(n, \alpha) ^7Li$  par exemple, est formée de deux traces dans le prolongement l'une de l'autre; celle de la particule alpha et celle du lithon  $^7Li$ ; pour un faible développement, ces deux traces partielles sont séparées par une lacune; un développement plus poussé comble celle-ci. Ce phénomène se produit pour toutes les réactions nucléaires du même type que la réaction citée.

20. Le deuxième moment de  $x_i$  autour de  $\bar{x}$  est donné par :

$$\mu_2 = \frac{1}{N} \sum n_i (x_i - \bar{x})^2$$

$n_i$  nombre de champs présentant  $x_i$  traces  
 $N$  nombre de champs examinés au total

Le deuxième moment est une estimation de la variance de la distribution, carré de l'écart quadratique moyen.

---

*Remerciements.*

Nous sommes profondément reconnaissant à M. le professeur Ch. Haenry, directeur du laboratoire de Recherches nucléaires de l'EPUL, qui nous a guidé et soutenu dans nos recherches et nous lui exprimons toute notre gratitude, ainsi qu'à nos collègues et amis et plus particulièrement à MM. M. Gailloud, O. Rochat et A. Roch. Nous remercions le chef du Département de l'Instruction publique du canton de Vaud, ainsi que la Commission du Fonds national de la Recherche scientifique qui ont bien voulu nous accorder leur appui. Nos remerciements vont également à la Direction de la Station scientifique du Jungfraujoch, où nous avons effectué quelques mesures, et plus spécialement à M. H. Wiederkehr, attaché à cet Institut, pour l'aide qu'il nous a apportée.

Enfin, nous remercions le Fonds Louis Agassiz, pour la contribution qu'il a apportée à la publication du présent mémoire.

## VIII. BIBLIOGRAPHIE

1. CH. HAENNY et O. KLÉMENT. — *Bull. Soc. vaud. Sc. nat.* 64, 297 (1949).
2. O. ROCHAT. — (Thèse). *Mém. Soc. vaud. Sc. nat.* 9, 195 (1949).
3. C.-C. DILWORTH, G.-P.-S. OCCHIALINI et R.-M. PAYNE. — *Nature* 162, 102 (1948).
4. M. GAILLOUD et CH. HAENNY et leurs références. — *Mém. Soc. vaud. Sc. nat.* 10, 271 (1952).
5. L. VIGNERON. — Thèse et J. *Phys. Radium* 11, 305 (1949).  
JENNY et HÜRLIMANN *Helv. Phys. Act.* 24, 235 (1951).  
ROTBLATT et TAÏ, ROADS « Photographic sensitivity », Michell, Lond. (1951).
- M. GAILLOUD, CH. HAENNY et R. WEILL  
*Helv. Phys. Act.* 27, 337 (1954).
6. HENRIETTE FARAGGI. — Thèse, Paris (1950).
7. E. BINGGELI. — Thèse (1954), Université de Lausanne (non publié).
8. E. BINGGELI. — (Résumé de Thèse). *Helv. Phys. Act.* 28, 3 (1955).
9. E. BINGGELI. — Séminaire présenté au laboratoire de recherches nucléaires EPUL (non publié).
10. N. KAPLAN et H. YAGODA. — *Rev. Sc. Instr.* 23, 160 (1952).
11. CH. HAENNY, M. NAJAR et M. GAILLOUD. — *Helv. Phys. Act.* 22, 611 (1949).
12. « The Science and Engineering of Nuclear Power ». Edit. Clark Goodman, Cambridge, Massachusetts (USA), tome I, pp. 400 et 404 (1949).
13. E. FERMI et L. MARSHALL. — « Nuclear data, National Bureau of Standards, Circular 499 (1950) ». 44 F 13 (1944).
14. H. POMERANCE, référence (13). 49 P 3 (1949).
15. Valeur ayant été utilisée pour calibrer les sélecteurs de vitesse d'Argonne.
16. Référence (12), p. 290.
17. Référence (2), p. 12.
18. R. COPPENS. — *C. R.* 227, 61 (1948).
19. J. EUGSTER. — *Rev. Sc. Instr.* 25, 5 (1954).
20. G. COCCONI et V. TONGIORGI. — *Bull. Am. Phys. Soc.* 26, 48 (1951).  
*Phys. Rev.* 82, 335 (1951).  
84, 29 (1951).
21. D.-C. PEASLEE. — *Nuovo Cim.* 9, 61 (1952).

## TABLE DES MATIERES

I. INTRODUCTION . . . . .	169
II. DISPOSITIFS ET DÉTAILS EXPÉRIMENTAUX . . . . .	172
1. Type d'expérience . . . . .	172
2. Localisation, époque et durée . . . . .	173
3. Dispositif enregistreur . . . . .	173
4. Transport et conservation des plaques photographiques	174
5. Préparation des plaques témoins du fading . . . . .	175
6. Caissons étanches . . . . .	176
7. Dispositions prises pour restreindre le fading . . . . .	177
8. Emballage des émulsions . . . . .	177
9. Fermeture des cylindres . . . . .	178
10. Caractéristiques du lac Léman . . . . .	179
11. Appareillage utilisé dans le lac . . . . .	179
12. Mise en place du dispositif . . . . .	181
13. Recherche du dispositif . . . . .	182
14. Retrait du dispositif . . . . .	183
III. DÉPOUILLEMENT DES ENREGISTREMENTS . . . . .	184
1. Ouverture des caissons étanches . . . . .	184
2. Développement des émulsions photographiques . . . . .	184
3. Observation des plaques photographiques . . . . .	185
4. Principe des mesures . . . . .	185
5. Mesure d'une trace . . . . .	185
6. Détermination du facteur de contraction . . . . .	186
7. Précision dans la mesure de la longueur d'une trace .	187
8. Traces pouvant exister dans nos plaques . . . . .	188
9. Caractéristiques des traces de réaction neutron-noyau .	188
10. Généralités sur les comptages . . . . .	190
11. Identification des traces de la réaction neutron-Li . .	192
12. Traces de contamination radioactive, semblables à ( <sup>3</sup> H- $\alpha$ )	193
13. Identification des traces de la réaction neutron-B . .	194
14. Traces de contamination radioactive, semblables à ( <sup>7</sup> Li- $\alpha$ )	194
IV. RÉSULTATS EXPÉRIMENTAUX . . . . .	195
V. CALCULS ET RÉSULTATS . . . . .	196
1. Section efficace de capture de nos détecteurs . . . .	196
2. Flux moyen . . . . .	197
3. Correction du fading . . . . .	198
4. Flux de neutrons thermiques dans les eaux du Léman	199
VI. CONCLUSIONS . . . . .	201
VII. APPENDICE . . . . .	203
VIII. BIBLIOGRAPHIE . . . . .	206

---

Rédaction Mlle Suzanne Meylan, professeur, Treyblanc 6, Lausanne.  
Publicité : M. P.-A. Mercier, Dr ès sc., géologue, Palais de Rumine, Lausanne  
Imprimerie Baud, av. de l'Université 5, Lausanne.