

PREMIER MINISTRE
COMMISSARIAT A
L'ÉNERGIE ATOMIQUE

COLLECTION

**LA PROTECTION CONTRE LES RADIATIONS
A L'EMPILEMENT EXPERIMENTAL "MARIUS"**

par

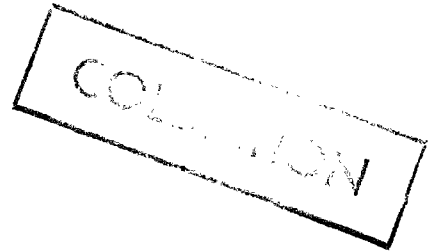
G. COHENDY

Rapport C.E.A. N° 2200

1962

CENTRE DE PRODUCTION
DE PLUTONIUM DE MARCOULE

- Rapport C.E.A. n° 2200 -



CENTRE DE MARCOULE
Service de Protection contre les Radiations

LA PROTECTION CONTRE LES RADIATIONS
A L'EMPILEMENT EXPERIMENTAL "MARIUS"

par

G. COHENDY

- 1961 -

INTRODUCTION

L'implantation de l'empilement expérimental "MARIUS" à MARCOULE a permis au Service de Protection contre les Radiations d'effectuer des mesures et de conduire une étude dans des conditions beaucoup plus favorables que celles qui sont rencontrées auprès des réacteurs de puissance.

En effet, ces réacteurs ont été soumis, dès leur origine, à des impératifs de production qui n'ont guère permis aux physiciens de toutes disciplines d'effectuer toutes les manipulations qu'ils auraient souhaitées. Dans cet ordre d'idées, les raisons qui ont motivé la création de "MARIUS" et qui sont exposées dans le rapport n° 10 du Département des Etudes de Piles (Août 1960), peuvent s'appliquer, en partie tout au moins, à la Protection contre les Radiations.

Mais surtout, il est extrêmement intéressant d'avoir affaire à un réacteur dont la puissance très faible correspond à un flux de neutrons peu élevé ; le flux γ est donc peu important et les protections biologiques réduites en conséquence. Ceci permet d'effectuer en toute sécurité des mesures à proximité immédiate de l'empilement lui-même, voire même sur le graphite.

Nous exposerons et commenterons les résultats des mesures que nous avons effectuées. Auparavant, toutefois, nous rappellerons les caractéristiques essentielles de l'empilement - tout au moins celles qui permettent d'en évaluer les risques au point de vue radioactif - et nous décrirons rapidement l'appareillage de détection des rayonnements.

CARACTERISTIQUES DE L'EMPILEMENT ET EVALUATION DE LA PROTECTION

"MARIUS" est un empilement expérimental dont le modérateur est du graphite et le combustible de l'uranium naturel (en principe tout au moins). Il était initialement prévu pour fonctionner à une puissance de 30 watts, ce qui correspond sensiblement à un flux au centre de 10^7 neutrons/cm²/s.

Le cylindre actif, traversé par 532 canaux (au pas de référence de 192 mm) est long de 480 cm ; son rayon est peu différent de 250 cm.

L'épaisseur du réflecteur de graphite est de 57,6 cm, sa section efficace de capture est de 3,93 millibarn (4,13 azote compris).

La protection biologique était constituée par 60 cm de béton sur le toit pile et les faces latérales.

Primitivement, les faces chargement et déchargement n'étaient pas protégées et le graphite du réflecteur constituait la seule protection. Comme nous le verrons, nous avons été amenés à recommander la couverture des fosses chargement et déchargement par des dalles mobiles en béton, qui doivent être fermées avant toute divergence.

Il est pratiquement impossible d'effectuer un calcul complet sur la protection, et il faut se résigner à adopter des hypothèses simplificatrices, au risque d'obtenir des résultats ne donnant qu'un ordre de grandeur.

Dès que les caractéristiques de "MARIUS" nous furent connues, nous vérifiâmes la protection en adoptant les données suivantes.

Le cylindre actif est assimilé à une source homogène, dans laquelle la puissance de 30 watts correspond à :

$$\frac{30}{1,6 \cdot 10^{-13}} \cdot \frac{1}{200} \approx 9,4 \cdot 10^{11} \text{ fissions par seconde.}$$

en admettant qu'une fission dégage une énergie de 200 MeV.

Le volume de ce cylindre actif est égal à :

$$(250)^2 \cdot \pi \cdot 480 \approx 9,4 \cdot 10^7 \text{ cm}^3.$$

Il s'y produit donc très sensiblement 10^4 fissions par cm³ et par seconde.

Nous avons admis que chaque fission produisait 2,5 neutrons rapides et aboutissait à la libération d'une énergie de 20 MeV sous forme de photons γ .

a) - Atténuation des neutrons rapides

L'intensité de la source cylindrique est donc de $2,5 \cdot 10^4$ neutrons par cm^3 et par seconde.

Un calcul classique permet de passer de cette source cylindrique à la source de surface, constituée par les parois du cylindre. Il suffit de multiplier le chiffre précédent par la longueur de relaxation des neutrons rapides dans le graphite, soit 9 cm, pour obtenir le flux sortant du graphite ; ce dernier est ainsi égal à $2,25 \cdot 10^5$ neutrons/ cm^2/s .

Ces neutrons traversent le réflecteur, dont il sort un flux égal à :

$$\frac{2,25 \cdot 10^5}{2} \cdot e^{-\frac{57,6}{9}} \approx 200 \text{ neutrons}/\text{cm}^2/\text{s},$$

ce qui correspond à 37,5 mrems/heure.

Les 60 cm de béton du toit-pile ramènent ce chiffre à :

$$200 \cdot e^{-\frac{60}{11}} \approx 0,87 \text{ neutron}/\text{cm}^2/\text{s},$$

puisque la longueur de relaxation des neutrons rapides dans le béton ordinaire est égale à 11 cm.

b) - Atténuation des γ

En admettant que les 20 MeV d'énergie γ sont libérés sous forme de 5 photons de 4 MeV, il y a production de $5 \cdot 10^4$ photons/ cm^3/s . En adoptant 1,70 comme densité du graphite et 0,032 cm^2/g de coefficient d'absorption massique du coeur, la longueur de relaxation est égale à :

$$\frac{1}{1,70 \cdot 0,032} \approx 18 \text{ cm}.$$

Le flux γ sortant du coeur s'établit donc à :

$$5 \cdot 10^4 \cdot 18 = 9 \cdot 10^5 \text{ photons}/\text{cm}^2/\text{s}.$$

Ce flux s'atténue dans les 57,6 cm du réflecteur, dont la longueur de relaxation est de 18 cm également. Le flux sortant du réflecteur s'écrit donc :

$$\frac{9 \cdot 10^5}{2} \cdot e^{-\frac{57,6}{18}} \approx 1,84 \cdot 10^4 \text{ photons}/\text{cm}^2/\text{s}.$$

Etant donné qu'un photon de 4 MeV délivre une dose de $5,3 \cdot 10^{-6}$ r/h, ce flux correspond donc à un débit d'irradiation de :

$$5,3 \cdot 10^{-3} \cdot 1,84 \cdot 10^4 \approx 97,5 \text{ mr/h}.$$

Les 60 cm de béton du toit de pile ramènent ce chiffre à :

$$1,84 \cdot 10^4 \cdot e^{-\frac{60}{15}} \approx 3,55 \cdot 10^2 \text{ photons}/\text{cm}^2/\text{s},$$

soit moins de 2 mr/h (compte non tenu, toutefois du "build up factor"). En ce qui concerne les γ secondaires, nous avons admis que les 200 neutrons quittant chaque cm^2 du réflecteur chaque se-

conde, créaient chacun un photon de 4 MeV à 30 cm à l'intérieur du béton ; ce flux est atténué par les 30 cm restant, si bien que le flux sortant est égal à :

$$200 \cdot e^{-\frac{30}{15}} \approx 27 \text{ photons/cm}^2/\text{s},$$

soit moins du dixième du flux γ primaire.

Sans même tenir compte des neutrons thermiques, ce calcul sommaire suffisait à montrer que, dans les conditions de fonctionnement prévues, c'est-à-dire à 30 watts :

- la protection assurée par le béton était suffisante,
- mais qu'il existait des sujets d'inquiétude sérieux en ce qui concerne les faces chargement et déchargement.

DESCRIPTION ET IMPLANTATION DE L'APPAREILLAGE DE DETECTION

Sur le vu des caractéristiques de l'empilement, il fut initialement décidé d'implanter 3 détecteurs (γ + neutrons thermiques) fixes, 1 détecteur (γ + neutrons thermiques) et un détecteur neutrons rapides mobiles.

Les détecteurs (γ + n_{th}) sont constitués par des chambres SACM de 24 litres à paroi de carton bakérisé de 1,5 mm d'épaisseur ; en recouvrant cette chambre d'une bande de cadmium de 0,4 mm d'épaisseur, sur une hauteur égale à 13/19 de celle de la chambre, on détecte, de plus des γ , les neutrons thermiques qui créent des γ de capture dans le cadmium, et ceci avec la même sensibilité (1).

Ces chambres sont associés à des amplificateurs de courant continu du type ACC 5 L, couvrant la gamme 10^{-13} à 10^{-7} A.

Les neutrons rapides sont détectés par un compteur à BF 3 du type 5 NE 12, placé dans l'axe d'un bloc de paraffine de 30 cm de diamètre et 30 cm de hauteur, destiné à ralentir les neutrons et blindé, extérieurement, de 0,7 mm de cadmium destiné, lui, à absorber les neutrons thermiques incidents.

Ce compteur est associé à un intégrateur à échelle logarithmique, couvrant la gamme 10^{-1} à 10^5 impulsions par seconde.

Enfin, un enregistreur d'aérosols radioactifs du type EAR 600, mobile, était prévu pour surveiller l'activité poussières.

Les trois chambres (γ + n_{th}) fixes ont été implantées :

- l'une au-dessus du centre du toit-pile, à environ 4 mètres au-dessus du sol ; de par sa position, cette chambre "intègre" au mieux le flux provenant des différentes régions de l'empilement, quelle que soit la géométrie de celui-ci ;
- la seconde au-dessus de la porte de l'atelier, qui se révéla très vite être le point où le personnel était le plus exposé ;
- la dernière à 2,50 mètres au-dessus du sol, dans l'axe de la pile, contre la verrière Nord ; ce point prit très vite une importance primordiale, en raison du fait que, se trouvant très

1) Cf. Note de MM. JOFFRE et FITOUSSI du S. C. R. G. R. , en date du 13 janvier 1955.

près de la face chargement, le débit d'irradiation devait y être pris en considération, même pour des puissances relativement basses ; ce même débit se retrouvait, en effet, de l'autre côté de la verrière, c'est-à-dire à l'extérieur.

Par la suite, ce point joua fréquemment le rôle de référence ; c'est ainsi, notamment, que les modifications de la protection biologique furent réalisées en fonction des mesures qui y furent effectuées.

L'électronique de l'appareillage que nous venons de décrire occupe tout un côté du pupitre de commande. L'intérêt des amplificateurs logarithmiques est évident, puisque la pile fonctionne essentiellement en divergence ; mais leur précision est assez médiocre, et, surtout, le fait que la plupart des détecteurs sont fixes limite par trop le nombre de points de mesure ; d'autant plus que les détecteurs mobiles sont encombrants et ne peuvent être positionnés en n'importe quel point.

C'est pourquoi les appareils portatifs jouèrent un rôle prépondérant dans toutes les séries de mesures.

MESURES D'IRRADIATION

L'utilisation intensive des appareils portatifs permit d'effectuer des mesures pratiquement en n'importe quel point - tout au moins en ce qui concerne le rayonnement γ .

Les premières de ces mesures mirent en évidence que l'absence de toute protection biologique au-dessus des fosses avait pour conséquence l'existence, dans le plan horizontal, de deux zones d'irradiation débordant de plus en plus largement ces fosses lorsque la puissance augmentait.

En particulier, le débit d'irradiation de 7,5 mr/h (en γ seulement, indépendamment de l'irradiation due aux neutrons thermiques et rapides) était atteint sur la verrière Nord pour une puissance de l'ordre de 20 watts seulement.

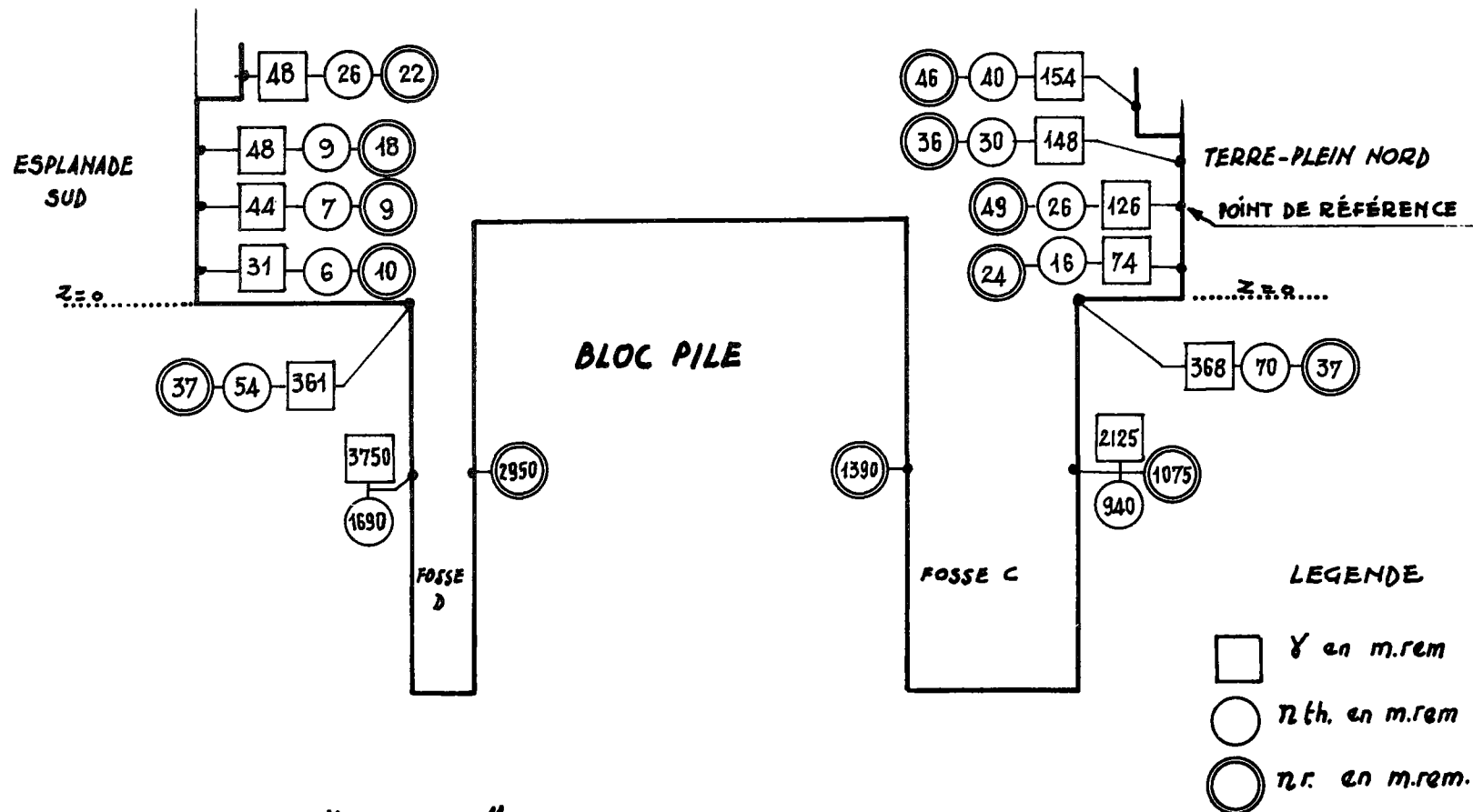
De façon à obtenir des renseignements sur ce qui se passait à l'intérieur des fosses, des films et des plaques nucléaires y furent positionnés, et la pile stabilisée à une puissance relativement importante (100 watts environ), de façon à réduire la durée de la manipulation, tout en obtenant un noircissement des films suffisant pour en permettre une interprétation valable.

Une partie des résultats est reportée sur la coupe schématique reproduite ci-après et met en évidence l'existence de faisceaux s'échappant des fosses dans le plan vertical, tant en neutrons (rapides ou thermiques) qu'en γ .

Ces premiers résultats permirent d'apprécier l'importance relative de l'irradiation due aux neutrons (rapides et thermiques), par rapport à l'irradiation due au rayonnement γ . Dans l'attente de résultats plus précis, il fut admis que les deux dangers étaient du même ordre ; autrement dit, le débit d'irradiation total était considéré comme égal au débit d'irradiation γ multiplié par 2.

IRRADIATION DES FILMS ET PLAQUES NUCLEAIRES

NEF PILE



COUPE DE "MARIUS" SUIVANT L'AXE N-S DE LA PILE

Les mesures suivantes portèrent surtout sur le rayonnement γ , en raison des facilités offertes par le matériel portatif. C'est pourquoi nous en exposerons tout d'abord les résultats et les conclusions. Nous reviendrons ensuite sur l'étude du rapport:

$$\frac{\text{Danger total}}{\text{Danger } \gamma}$$

A - Mesures en γ

Au cours d'une manipulation ultérieure, nous avons tracé les différentes courbes isodoses autour des fosses en fonction de la puissance. Les cartes n° 1 et 2 reproduisent les résultats de cette manipulation pour deux niveaux de puissance particulièrement intéressants (20 watts et 120 watts).

Le premier correspond en effet à peu près à la puissance initialement prévue (30 watts) ; la carte montre que l'isodose 7,5 mr/h déborde largement les deux fosses atteignant même le point de référence sur la verrière Nord ; l'isodose 25 mr/h les recouvre presque totalement, et l'isodose 75 mr/h apparaît nettement sur la fosse chargement.

La puissance de 130 watts correspond à un fonctionnement exceptionnel, car elle nécessite de court-circuiter une sécurité. L'isodose 7,5 mr/h ceinture entièrement le bloc-pile et déborde largement au Nord, et même au Sud, et l'isodose 75 mr/h atteint la verrière Nord ; en salle de contrôle, toutefois, l'ambiance ne dépasse pas 1,2 mr/h.

Au cours de cette même manipulation, une excursion volontaire de puissance aux alentours de 1 500 watts montra que l'on atteignait 40 mr/h environ en salle de contrôle, et 7,5 mr/h sur la route située environ à 30 mètres au Nord.

La conclusion de cette manipulation fut que l'empilement présentait des dangers d'irradiation dès que la puissance dépassait 20 watts, puisque, à cette puissance, l'isodose 7,5 mr/h atteint le point de référence. Encore faut-il, pour tenir compte des neutrons, rapides et thermiques, diviser ce chiffre sensiblement par 2.

En conséquence, il fut décidé de recouvrir les fosses par une protection appropriée ; le système adopté devait être suffisamment souple pour ne pas contrarier l'exploitation et, notamment, permettre un accès facile aux fosses, lorsque la pile était arrêtée. Le choix se fixa sur un ensemble de deux demi-dalles mobiles pour chaque fosse, pouvant les dégager entièrement, et de même, les obturer complètement. Du fait même que ces dalles devaient être mobiles, leur poids, donc leur épaisseur, revêtait une grande importance. A priori, il eut été logique de choisir 60 cm, épaisseur du toit-pile ; mais les manipulations effectuées jusqu'alors permettaient d'espérer que ce chiffre pouvait être largement réduit.

Au cours d'un essai en vraie grandeur, la fosse chargement fut recouverte par un, puis deux lits de briques de béton baryté de 20 cm d'épaisseur, reposant sur des fers IPN jointifs prenant eux-mêmes appui sur les bords de la fosse.

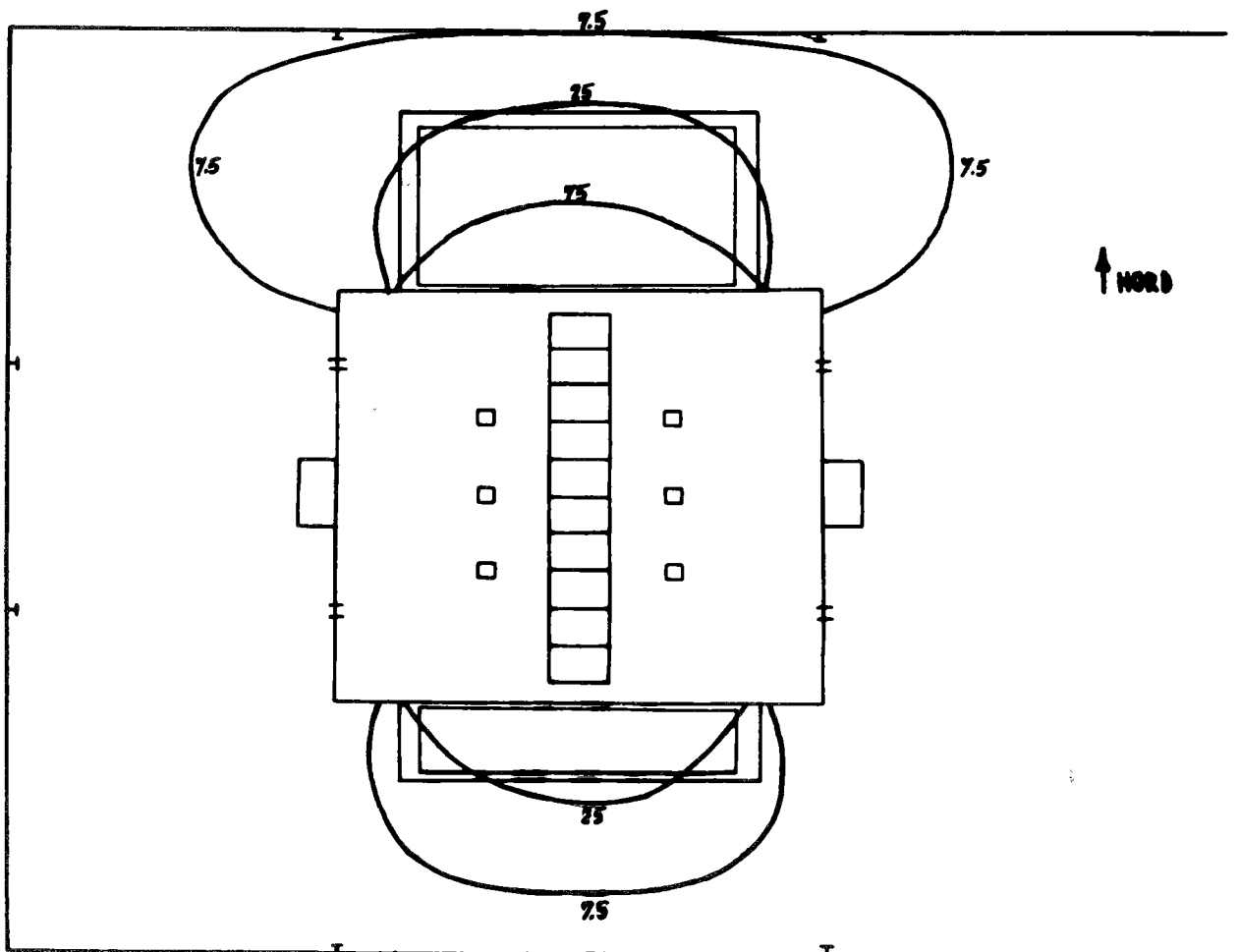
Les seuls IPN provoquèrent une atténuation notable du rayonnement γ issu de la fosse et l'indication de la chambre de 24 litres placée au-dessus du toit-pile, qui nous avait servi jusque là de référence de puissance, fut perturbée par cette atténuation, ainsi que par la diffusion d'ue

CARTE D'IRRADIATION de MARIUS
(EN Y FEULEMENT)

N° 1

MANIPULATION DU 20.4.68

348 CANAUX A 15 CARTOUCHES
MURANCE CORRESPONDANT A UN
COURANT D'IONISATION DE 6.10^{-12} A
DANS LA CHAMBRE D'IONISATION Y
PLACÉE SUR LE TONT PLE.
(SOIT DE L'ORDRE DE 20 WATTS)



ECHELLE. 1/100

CARTE D'IRRADIATION de MARIUS
(EN Y JOUEMENT)

.55

MANIPULATION DU 20.4.50

318 CANAUX A 46 CARTOUCHES

SUMMANCE CORRESPONDANT A UN

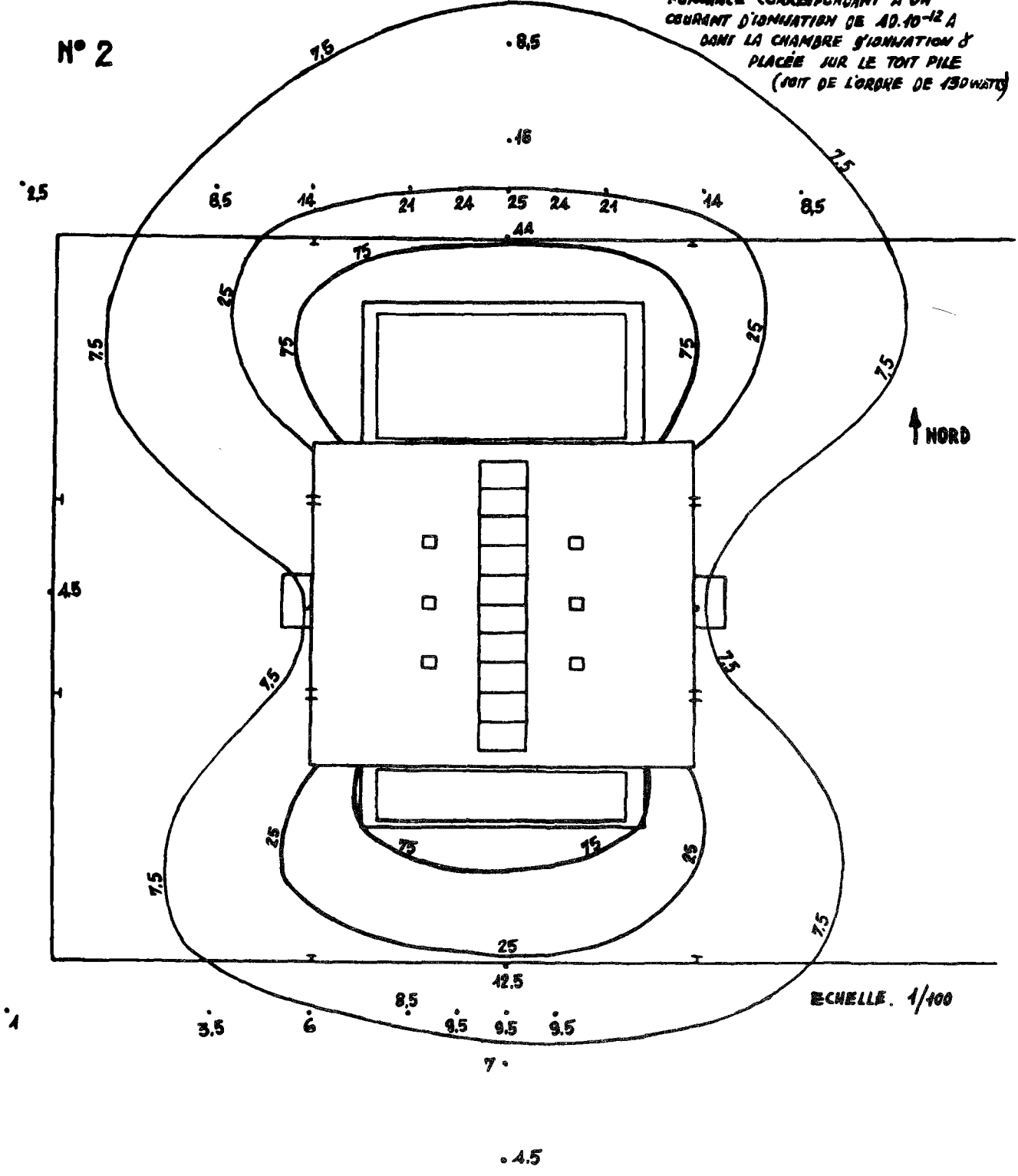
COURANT D'IONISATION DE 10-12 A

DANS LA CHAMBRE D'IONISATION &

PLACÉE SUR LE TOIT PILE

(SOIT DE L'ORDRE DE 130 WATS)

N° 2



ECHELLE. 1/100

aux fers.

A 156 watts, le premier lit de briques apporta un facteur 9 d'atténuation au bord de la fosse, de 5 au point de référence à la verrière Nord, et de 1,8 seulement au-dessus du toit-pile, ce qui confirma l'influence du rayonnement diffusé. L'adjonction du second lit de briques, de même épaisseur, n'apporta plus qu'un facteur d'atténuation de 4,5 au bord de la fosse, de 2,5 à la verrière Nord, et de 1,25 au-dessus du toit-pile. Nous voyons donc que, à puissance constante, l'atténuation totale diminue, au fur et à mesure que l'on s'éloigne de la source fictive constituée par la face chargement :

- 40 au bord de la fosse ;
- 12,5 à la verrière Nord ;
- 2,5 au-dessus du toit-pile.

A 700 watts, nous avons constaté que l'indication de la chambre placée au-dessus du toit pile était indépendante de l'épaisseur de l'écran de briques de béton baryté (20 ou 40 cm). Ceci prouve que, en ce point, à puissance suffisamment élevée, le rayonnement diffusé à partir de la fosse chargement est négligeable vis-à-vis du rayonnement traversant le toit-pile. Par contre, aux bords de la fosse, le débit d'irradiation s'est trouvé sensiblement multiplié par un facteur 10 (alors que la puissance n'avait varié que d'un facteur $\frac{700}{156} \approx 4,5$) et par un facteur 20 sur la verrière Nord. Tout ceci a confirmé une nouvelle fois l'importance du rayonnement diffusé.

Ces résultats nous ont conduit à fixer à 30 cm l'épaisseur des dalles de béton baryté, compte-tenu du fait que l'exploitant estimait ne jamais devoir dépasser, en pratique, la puissance de 250 watts (au lieu des 30 watts initiaux), même au cours d'oscillations.

Les dalles ont été réalisées au cours d'un arrêt prolongé de "MARIUS", durant le premier trimestre 1961. Les mesures qui ont été effectuées à la suite ont montré que l'homogénéité de la protection est maintenant telle qu'il est impossible de tracer des courbes isodoses analogues à celles qui avaient été relevées avant la couverture des fosses. Les seules zones qui échappent à cette règle sont les bords de deux dalles côté graphite, où il est possible de relever une certaine activité, due au fait que les plans verticaux contenant ces bords de dalles ne sont pas confondus avec ceux des deux faces graphite ; encore faut-il que la puissance atteigne un niveau assez élevé (de l'ordre de 50 watts). Il en est alors de même pour les fosses Est et Ouest.

D'autre part, au cours d'une dernière série de mesures, le débit d'irradiation en γ au point de référence sur la verrière Nord atteignait 25 mr/h seulement, lorsque les barres ont chuté par intervention de la sécurité de l'amplificateur logarithmique de puissance ; celle-ci atteignait alors plusieurs kilowatts. Ceci montre que la puissance est limitée par la conception même de la pile bien plutôt que par les nécessités de la protection contre les radiations.

B - Appréciation du danger total

Nous n'avons parlé jusqu'à maintenant que des débits d'irradiation en γ , alors que les flux de neutrons ne sont nullement négligeables à MARIUS. L'appréciation du danger total doit donc en tenir compte.

Or, les chambres de 24 litres permettent de mesurer les flux ($\gamma + n_{th}$) ; mais, pour discriminer la part des neutrons thermiques, il faut retirer l'enveloppe de cadmium, et les chambres ne sont pas toujours facilement accessibles.

En ce qui concerne la chambre mobile, son emploi n'est pas très commode, et elle ne peut en aucun cas passer pour un appareil portatif.

Il en est de même pour l'appareillage détecteur de neutrons rapides.

En fait, il n'existe guère de détecteurs de flux neutrons, que ce soit thermiques ou rapides, réellement portatifs ; alors que l'on n'a que l'embaras du choix pour détecter de façon très commode des flux γ .

Dans ces conditions, il est apparu très vite qu'il serait très intéressant de connaître le facteur : $\frac{\text{Danger total}}{\text{Danger } \gamma}$, en fonction des divers paramètres pouvant intervenir, et, singulièrement, l'emplacement du point de mesure et la puissance de la pile.

Au cours de la plupart des manipulations qui se sont déroulées à MARIUS, nous nous sommes attachés à effectuer des mesures en neutrons thermiques et rapides dans tous les points caractéristiques.

Les irradiations de films et plaques nucléaires avaient déjà montré que le rapport $\frac{\text{Danger total}}{\text{Danger } \gamma}$ était voisin de 2.

Lors des premières manipulations, nous avons d'abord remarqué qu'il n'y avait pratiquement plus de neutrons rapides, dès que l'on n'est plus en vue directe du graphite des faces chargement et déchargement ; ceci ressort du tableau suivant, où les résultats sont donnés en valeur relative, en prenant comme référence le plus élevé d'entre eux (irradiation γ au bord de la fosse chargement).

POINT	γ	N. th	Rapport $\frac{\gamma + N_{th}}{\gamma}$	N. Rap.
Au bord de la fosse C dans l'axe	1	1	2	0,32
1 m au NE du coin de la fosse C	0,70	0,70	2	0,10
6 m à l'W de l'Atelier	0,14	0,10	1,71	0,02
Pupitre de commande	0,05	0,03	1,60	ξ
Au bord de la fosse D, dans l'axe	0,50	0,30	1,60	ξ
Au milieu de l'esplanade S	0,0016	0,0011	1,69	ξ
Sur le trottoir de la route N	0,0015	0,0010	1,66	ξ

Il est ainsi apparu que le rapport $\frac{\text{Danger total}}{\text{Danger } \gamma}$ était toujours supérieur à 1,6 bien qu'il dépassât 2 lorsqu'on se trouvait en face du graphite ; ce fût cette valeur commode qui constitua le critère de base jusqu'à couverture des fosses, et permit de chiffrer à 10 watts la puissance pour laquelle le débit d'irradiation au point de référence à la verrière Nord, à 1,50 mètre du sol, atteignit 7,5 millirems/heure.

Lorsque les dalles de couverture des fosses eurent été réalisées, le rapport $\frac{\text{Danger total}}{\text{Danger } \gamma}$ fut étudié simplement au bord de la fosse chargement, où l'influence des neutrons rapides risquait de se faire sentir. La géométrie de la pile ayant considérablement changé, notamment en raison du changement de pas dans la zone substituée et du diamètre différent du combustible, nous avons pris, à ce moment, comme référence de puissance le débit d'irradiation en γ au point situé sur la verrière Nord, à 1,50 m du sol.

Les résultats sont reproduits dans le tableau ci-dessous :

Débit d'irradiation en γ au point de référence (mr/h)		Mesures au bord de la fosse, dalles fermées				Rapport $\frac{\text{Danger T.}}{\text{Danger } \gamma}$
Dalles ouvertes	Dalles fermées	$\gamma + N_{th}$ (mrems/h)	γ (mrems/h)	N_{th} (mrems/h)	N_r (mrems/h)	
2	ξ	non	signi-	fica-	tifs	-
7,5	$\approx 0,15$	0,83	0,75	0,08	0,10	1,24
20	0,5	2,08	1,75	0,33	0,30	1,36
40	1	3,75	3,12	0,63	0,40	1,33
-	5	19,2	16,3	2,9	2	1,30
-	25	Mesures non effectuées				-

En conséquence, nous avons dès lors admis que le débit total, en tout point de la nef-pile, était égal au débit en γ multiplié par 1,5.

PROTECTION DU PERSONNEL

Nul ne devant intégrer plus de 5 rems par an et plus de 3 rems en 13 semaines, il s'ensuit que le débit d'irradiation à ne pas dépasser au cours du travail s'établit à 7,5 millirems par heure, sauf cas exceptionnel.

Une réglementation étant d'autant plus efficace que les exceptions qu'elle doit consentir sont moins nombreuses, il convient donc de limiter au maximum les expositions à des débits supérieurs à 7,5 millirems/heure. Lorsque c'est possible, le mieux est évidemment de réduire voire d'éliminer, les zones où se rencontrent de tels débit d'irradiation.

C'est en application de ce principe que les fosses ont été recouvertes, puisque le débit d'irradiation dépassait la valeur réglementaire pour une puissance relativement faible, et, en

tout état de cause, insuffisante pour permettre à l'exploitant de procéder aux manipulations prévues.

Du fait que, la plupart du temps, ces manipulations sont des divergences, le danger ne peut provenir de la dose intégrée.

En effet, en admettant que le débit d'irradiation suive la même loi exponentielle que la montée en puissance, ce qui a été vérifié par l'expérience, il obéit à la loi :

$$I = I_0 \cdot e^{-0,7 \frac{t}{T}},$$

où T est le temps de doublement de la pile.

La dose intégrée s'écrit :

$$\begin{aligned} D &= \int_{t=0}^{t_{\max}} I dt, \\ &= I_0 \int_{t=0}^{t_{\max}} e^{-0,7 \frac{t}{T}} dt, \end{aligned}$$

où t_{\max} est l'instant de la fin de la divergence, c'est-à-dire de la puissance (donc de l'irradiation) maximum. Nous avons donc :

$$D = I_0 \cdot \frac{T}{0,7} \left[e^{-\frac{t_{\max}}{T}} - 1 \right].$$

Comme la valeur de t_{\max} , qui est celle de la durée de la divergence est toujours beaucoup plus grande que T, nous pouvons écrire :

$$D \approx I_0 \cdot \frac{T}{0,7} \cdot e^{-\frac{t_{\max}}{T}}.$$

Or, la quantité $I_0 \cdot e^{-\frac{t_{\max}}{T}}$ représente le débit d'irradiation maximum, obtenu en fin de divergence. Il en résulte que la dose intégrée est proportionnelle au produit du débit d'irradiation maximum par le temps de doublement:

$$D = \frac{1}{0,7} \cdot I_{\max} \cdot T.$$

C'est ainsi que, en un point où le débit maximum est de 75 mr/h (soit $2,083 \cdot 10^{-2}$ mr/s), la dose intégrée au cours d'une divergence dont le temps de doublement est de 180 s (chiffre plutôt élevé) est seulement de 5,3 mr.

Le calcul montre donc le peu d'importance de la dose intégrée ; ceci a été vérifié, notamment en positionnant des stylos dosimètres en 3 points caractéristiques. Les résultats de ces mesures sont reportés dans le tableau ci-après.

Date	Nombre des divergences	Puissance maximum (watts)	Temps de doublement compris entre	Dose intégrée verrière Nord	Dose intégrée verrière Sud	Dose intégrée face chargement
8.3.60	Stabilisation de 8 h	0,5	"	8	5	-
10.3.60	8	70	38 et 422 s	7	3	-
16.3.60	8	70	36 et 274 s	15	7	300
29.3.60	2	70	196 et 198 s	15	13	120
6.4.60	1	1500	93 s	7	10	20

Les doses intégrées ne sont donc pas très importantes ; encore faut-il remarquer qu'elles correspondent à des points où l'intensité d'irradiation en fin de divergence était telle, avant la couverture des fosses, que l'accès en était normalement interdit (quand il ne l'était pas complètement, comme pour la face chargement).

La théorie et l'expérience montrent donc que, au point de vue protection contre les radiations, la limitation ne peut venir à "MARIUS" de la dose intégrée. En effet, en salle de contrôle, le débit d'irradiation "maximum maximorum" (en γ) a atteint très exceptionnellement 40 mr/h. Si l'exploitant avait effectué dans sa journée 10 divergences, de temps de doublement moyen égal à 180 secondes et de puissance maximum correspondant à ce débit d'irradiation de 40 mr/h, il aurait intégré dans sa journée 20 milliroentgen seulement ; ce chiffre est nettement inférieur aux 60 millirems autorisés par la circulaire ministérielle du 3 juin 1957.

En conséquence, la limitation doit venir du débit d'irradiation maximum admissible, et non pas de la dose intégrée ; en période normale, ce débit d'irradiation peut atteindre 7,5 millirems par heure pour la personne la plus exposée (et 75 millirems par heure en cas de manipulation exceptionnelle). C'est pour tenir compte des neutrons (rapides et thermiques) que ces chiffres ont été respectivement ramenés à 5 et 50 mr/h en γ pour la personne la plus exposée, c'est-à-dire, en pratique, sur le pupitre de commande.

Tous les agents travaillant à "MARIUS" reçoivent chaque mois un film ($\gamma + n_{th}$) et une plaque nucléaire ; ils détiennent en outre, à titre de prêt, un stylo dosimètre, dont les indications sont lues au minimum une fois chaque semaine ; les films sont développés et interprétés tous les mois. Les visiteurs bénéficient des mêmes dosimètres individuels, et leur protection est assurée de façon identique. Depuis le 1er janvier 1960, il y a eu seulement 4 cas de dépassement de la dose "A" (correspondant au 1/10ème de la dose admissible) ; ces 4 cas se sont d'ailleurs produits au mois de décembre 1960, au moment où la manipulation "CRESUS" exigeait de nombreuses manutentions de combustible légèrement irradié.

Les indications des stylos, obligatoirement lus à la suite de toute manipulation exceptionnelle, c'est-à-dire soumettant un agent, quel qu'il soit, à un débit d'irradiation supérieur à 7,5 mrem/heure, ont permis de connaître la dose maximum intégrée au cours d'une journée : il s'agit de 8 milliroentgen seulement, sauf au moment de la manipulation "CRESUS", toutefois, où un agent a intégré 11 milliroentgen dans une journée. Ce chiffre maximum de 8 mr pour une

journée de travail correspond à 24 mr/jour et à 720 mr/mois; il est à rapprocher des indications des films essais, qui sont positionnés chaque mois sur la vitre séparant la salle de contrôle de la nef-pile. Les doses mensuelles intégrées par ces films figurent sur l'histogramme reproduit ci-après (période du 1er janvier 1960 au 31 juillet 1961).

Elles sont relatives au seul rayonnement γ , les résultats concernant les neutrons thermiques (partie sous cadmium du film) n'ayant jamais été mis en évidence. Il en a été de même pour les plaques nucléaires positionnées en même temps que les films et qui n'ont pratiquement pas décelé de neutrons rapides.

Si ce dernier résultat est bien en accord avec les chiffres obtenus lors de l'étude du rapport $\frac{\text{Danger total}}{\text{Danger } \gamma}$, il semble qu'il n'en soit pas de même pour ce qui est des neutrons thermiques. Cette contradiction n'est qu'apparente, et l'irradiation sur la verrière est loin d'être le fait exclusif du fonctionnement de la pile. En réalité, elle résulte pour la plus grande part du stockage d'uranium, et l'examen de l'histogramme le montre bien; les premiers mois, où le stockage était très faible et où la pile fonctionnait pourtant constamment, le noircissement du film correspondait à son voile de fond, c'est-à-dire sensiblement à 50 mr. Au moment du stockage du combustible de "CRESUS" (décembre 1960), le film a intégré 215 mr. Le stockage est allé croissant jusqu'en mai, et surtout juin 1961 (675 mr); depuis cette date, l'extension de MARIUS est entrée en service, le stockage a été déplacé, et les doses intégrées par le film-essai ont baissé en conséquence.

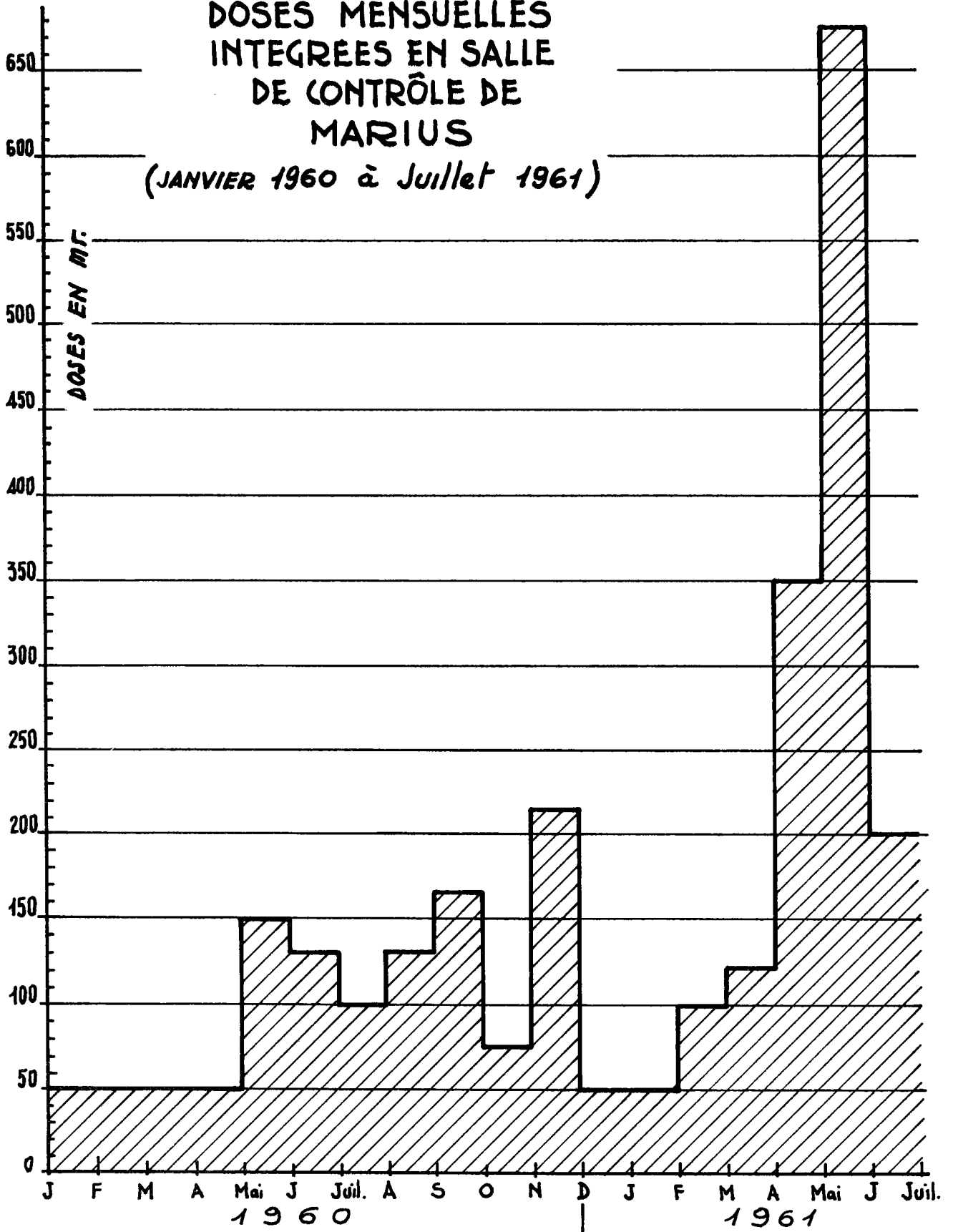
Quoiqu'il en soit, si l'on adopte durant ces 18 mois une valeur moyenne de 150 mr, ceci correspond à 5 mr/24 heures, soit sensiblement 2 mr par journée de travail, et moins de 50 mr/mois, ce qui corrobore bien les résultats d'ensemble des films portés.

Un dernier point est à signaler, en ce qui concerne la protection du personnel. Il est hors de doute que l'empilement du graphite subit une activation progressive, due, essentiellement au gadolinium et à l'euporium existant à l'état d'impuretés dans le graphite. Cette activation est évidemment très faible et les mesures effectuées sur des frottis faits dans un canal central n'ont pas permis de la mettre en évidence.

De même, l'enregistreur d'aérosols radioactifs n'a jamais accusé la moindre montée anormale.

DOSES MENSUELLES INTEGRES EN SALLE DE CONTRÔLE DE MARIUS

(JANVIER 1960 à Juillet 1961)



CONCLUSION

Depuis la première divergence de MARIUS, il n'y a pas eu à déplorer le moindre incident d'irradiation, ni de contamination.

La couverture des fosses par les dalles mobiles a rendu homogène la protection de la pile et lui a permis de fonctionner à une puissance beaucoup plus élevée que celle qui était initialement prévue, tout en diminuant les risques d'irradiation.

La réglementation sur les manipulations à caractère exceptionnel n'a pas retardé l'exploitation, la puissance correspondant au seuil de 7,5 millirems/heure au point de référence étant telle que les manipulations nécessitant un dépassement de cette puissance ont vraiment conservé un caractère exceptionnel (de l'ordre de 2 par mois seulement).

Manuscrit reçu le 5 septembre 1962