

PROBLÈMES DE DOSIMÉTRIE LORS DE L'ACCIDENT DE CRITICITÉ SURVENU AU RÉACTEUR VENUS À MOL, EN DATE DU 30 DÉCEMBRE 1965

N. C. PARMENTIER

Commissariat à l'Énergie Atomique, Département de la
Protection Sanitaire

R. BOULENGER

Centre d'Études Nucléaires de Mol, Département "Mesure
et Contrôle des Radiations"

et

G. PORTAL

Commissariat à l'Énergie Atomique, Service Technique
d'Études de Protection

Résumé—Les mesures de dosimétrie externe qui ont pu être faites dans les heures qui ont suivi l'accident survenu à une personne à Mol, le 30 décembre 1965, sont décrites ainsi que leur résultat.

Les circonstances de cet accident sont analysées dans le papier de G. Penelle au même Congrès.

Vu les doses importantes, 550 R de rayonnement gamma au film-dosimètre porté à hauteur de poitrine par l'irradié, celui-ci a été confié le jour même au Dr. Jammet à Paris.

À la demande du Dr Jammet et avec l'aide de l'équipe de dosimétrie de son département au CEA diverses irradiations de mannequins RANDO et REMAB, munis de dosimètres externes et internes, ont été faites tant pour guider les soins à donner à l'irradié que pour permettre la comparaison des effets biologiques.

Les méthodes de dosimétrie gamma et neutrons utilisées sont indiquées ainsi que leur résultat.

L'irradiation présentait deux particularités:

- (1) inhomogénéité, vu la proximité de la source, ce qui imposait la connaissance des doses aux différentes régions du corps;
- (2) instantanéité, ce qui rendait possible une reconstitution relativement précise avec fantômes.

I. HISTORIQUE

M. G. Penelle vient de nous décrire l'accident survenu à Mol le 30 décembre 1965. Nous allons vous montrer les problèmes de dosimétrie qui se sont posés et nos essais pour les résoudre. Il nous a semblé plus vivant de vous présenter les événements dosimétriques tels qu'ils se sont succédés dans le temps. C'est pourquoi, nous vous indiquerons en premier, les aspects "contrôle des radiations" qui ont eu lieu immédiatement après l'accident.

Vers 13 h le "contrôle radiations" est appelé.

Un opérateur (F. J.) se trouvant dans la casemate et devant exécuter des opérations manuelles de barres de contrôle a observé une divergence (lumière de l'effet de Cerenkov) et est sorti précipitamment de la casemate.

Les détecteurs de flux de neutrons ont déclenché:

- les alarmes,
- le largage des barres de sécurité—ce largage n'a pu avoir lieu les barres étant déjà en position basse,
- la vidange du modérateur.

Cette vidange est malheureusement lente vis-à-vis de la descente des barres de sécurité.

Deux personnes se trouvaient au pupitre de contrôle à l'extérieur de la casemate.

Après vidange du modérateur, nous nous sommes assurés que plus aucune divergence n'est possible. La casemate est fermée.

Parallèlement aux mesures à faire sur les trois personnes et leurs dosimètres, la non-contamination de l'installation et de son environnement est vérifiée (mesure de frottis et des poussières de l'air prélevées sur filtres).

Ultérieurement un échantillon du modérateur sera contrôlé par spectrométrie gamma; des mesures de frottis sont faites à l'intérieur de la casemate y compris sur le gainage des éléments de combustible. Aucune contamination n'a pu être détectée. Les trois personnes sont conduites immédiatement au bâtiment "Médical Contrôle des Radiations". Chacune portait un film-dosimètre (voir annexe No. 1) muni de détecteurs par activation et un stylo-dosimètre pour faibles doses gamma ou X (0 à 200 mR). Le film-dosimètre (pastille d'indium) de l'opérateur (F. J.) indique une forte activation, son stylo-dosimètre est déchargé, son corps et ses vêtements présentent une activation facilement décelable avec les détecteurs de contamination bêta, gamma. Après une douche et un changement de vêtement pour diminuer l'influence d'une contamination éventuelle, la personne est mesurée au "body counter" et on observe une activité de 8,5 μ Ci en ^{24}Na . Aucune contamination par produits de fission n'est mesurable. La personne est mise au repos dans un lit.

Les stylos-dosimètres des deux autres personnes indiquent des irradiations gamma de 60 et 32 mR; leur mesure au "body counter" n'indique aucune activation mesurable en ^{24}Na , ni aucune contamination. Vers 15 h les films-dosimètres sont développés et mesurés; malheureusement dans la précipitation du moment, le bain de développement ne contenait pas d'étalons de doses élevées.

En se référant aux étalons de doses élevées de la semaine précédente, la dose gamma est au maximum de 700 R.

Une série de films sont irradiés avec une source de ^{60}Co pendant la nuit du 30 au 31 décembre; leur développement indique une

bonne identité de noircissement avec celui obtenu la veille dans le domaine des faibles doses et permet de déduire une dose de 550 R gamma, d'après le nouvel étalonnage.

La différence de noircissement sous cadmium et sous étain est trop faible pour estimer une dose de neutrons thermiques.

Les détecteurs par activation permettent suivant J. A. Dennis, l'évaluation des doses neutrons suivantes:

—la pastille de soufre activée en phosphore 32 par la réaction $^{32}\text{S}(n, p)^{32}\text{P}$ donne 600 dés./min. g de soufre, soit 55 rads de neutrons de fission,

—la pastille d'or, sous cadmium, activée en ^{198}Au par la réaction $^{197}\text{Au}(n, \gamma)^{198}\text{Au}$ donne 1,47 dés./min.g soit 1 rad de neutrons intermédiaires,

—les pastilles d'or, externes (moins l'activité d'or sous cadmium) donnent 5,1 10^6 dés./min.g, soit 0,6 rad de neutrons thermiques.

La mesure du ^{32}P dans les cheveux de l'intéressé donne pour deux échantillons, 320 à 380 dés./min.g soufre, soit 29,4 et 35 rads de neutrons de fission, en supposant une teneur en soufre de 5% du poids des cheveux.

L'importance de l'irradiation et les vomissements du sujet nous amènent à consulter le Dr Jammet le jour même à 16 h. Le Dr Jammet indique immédiatement au médecin du C.E.N. de MOL les premières mesures à prendre. L'irradié est transporté à Zaventem dans la soirée, de là par avion militaire, au Bourget où il est pris en charge par le Dr Jammet. Donc, à cette date, les premières mesures de dosimétrie permettent de déduire que la dose gamma reçue à hauteur de poitrine (endroit du film-dosimètre) est importante et comprise entre 500 et 700 R (avec comme valeur la plus probable 550 R), que la dose due aux neutrons de fission est environ 10 fois plus faible que la dose gamma et que les doses dues aux neutrons épithermiques et thermiques sont négligeables.

Entre le 31 décembre et le 5 janvier, plusieurs faits ont été étudiés, d'une part à MOL, d'autre part à PARIS.

L'interrogatoire de l'accidenté permet déjà d'avoir une idée des conditions d'irradiation, ce qui nous a conduits à faire une série de photographies (fig. 1) auprès du réacteur, avec un opérateur exécutant la même manœuvre.

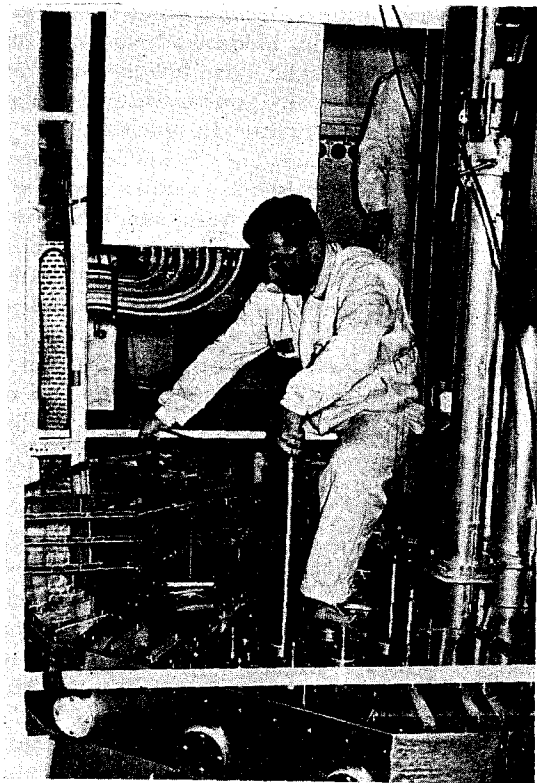


FIG. 1. Photographie d'une personne pendant la reconstitution: position qui se rapproche le plus de celle de l'accidenté.

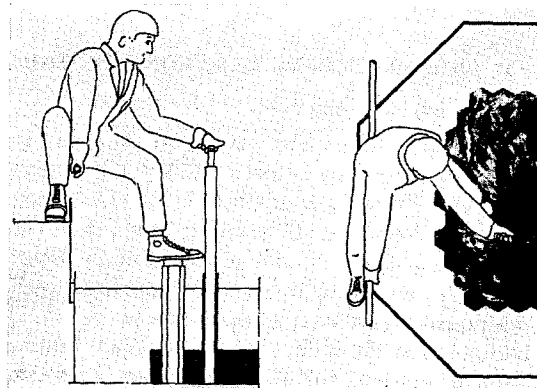


FIG. 2. Schéma de profil et positionnement de l'irradié.

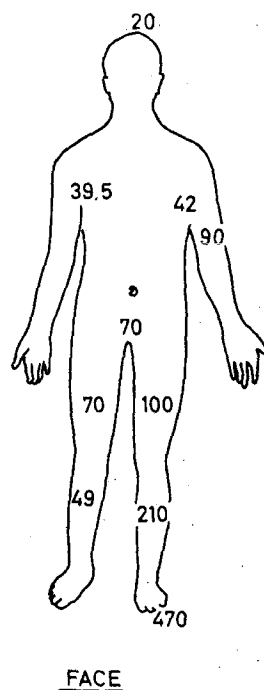


FIG. 3. Doses neutrons de fission en rad. d'après la mesure des phanères.

Ces photographies montrées à l'accidenté nous ont permis de déterminer sa position la plus probable (fig. 2).

Les mesures d'activation du soufre dans les phanères faites au laboratoire d'analyses et de mesures radiobiologiques du D.P.S. mettent en évidence une importante hétérogénéité de l'irradiation comme vous le montre la figure No. 3.

De plus, la mesure d'activation du sodium-24 refaite dans ce laboratoire confirme la mesure initiale faite à MOL.

Le 5 janvier, une réunion groupant l'équipe médicale et les spécialistes en dosimétrie du D.P.S. et du C.E.N. MOL permet de faire un bilan clinique et dosimétrique, d'où ressort la nécessité de pratiquer le plus rapidement possible une reconstitution de l'accident en utilisant un mannequin.

Sur quels paramètres connus, peut se baser cette reconstitution?

—D'abord, l'irradiation est due en majeure

partie à des rayonnements gamma dont la répartition énergétique s'étale jusque 8 MeV. Ces gamma sont dus aux réactions n, γ , particulièrement importantes par suite de l'utilisation de gainage et de matériaux de support en acier inoxydable et inconel. La composante neutronique, constituée essentiellement de neutrons rapides, représente 10% de la dose gamma.

—De plus, cette irradiation a lieu en un temps très bref. Les graphiques des enregistreurs des détecteurs de flux ne permettent pas de préciser ce temps par suite des constantes d'intégration des circuits de mesure. Il est donc logique de supposer l'opérateur pratiquement immobile pendant la courte durée de l'irradiation.

—Enfin, la position de l'accidenté, relativement bien reconstituée, implique une répartition très hétérogène de l'énergie absorbée dans l'organisme.

Le 7 janvier, soit une semaine après l'accident, les premiers essais de mise en place et l'irradiation d'un mannequin muni de dosimètres gamma et neutrons ont lieu. Le but principal de ces essais est de retrouver les rapports entre les activités en différents points du corps, telles qu'elles sont établies par la mesure des phanères de l'accidenté.

Le 8 janvier, une fois la position reconstituée, un premier mannequin, muni de dosimètres externes pour gamma et pour neutrons, et de dosimètres internes gamma, est irradié. Les premiers résultats sont fournis le 10 janvier à l'équipe médicale. La précision des mesures en gamma peut être estimée à 20%. Elles soulignent trois points importants du point de vue médical:

- la colonne vertébrale dans la partie cervicale et dorsale haute a reçu des doses supérieures à 200 rads mais inférieures à 270 rads gamma, donc à 300 rads au total,
- le bassin a subi une forte irradiation, environ 4 fois supérieure à celle de la zone précédente,
- le pied gauche a subi une irradiation très élevée de 4000 à 5000 rads.

Une ponction de moelle osseuse au niveau de la septième vertèbre cervicale confirme la dose relativement faible reçue à ce niveau.

Le 8 février, plus d'un mois après l'accident, devant l'évolution des lésions radiologiques au niveau du pied gauche, une irradiation d'un fantôme de pied est faite pour mesurer les doses internes, surtout au niveau du squelette.

Enfin, en mars 1966, une deuxième (mesure gamma), puis une troisième (mesure neutrons) reconstitution avec mannequin, ont lieu pour mesurer avec plus de précision la répartition des doses absorbées en utilisant 300 points de mesure dans le mannequin pour la dosimétrie gamma et 3 fois 70 points pour la dosimétrie neutrons. Il est bien évident que ces différentes expériences mettant en jeu des moyens importants n'ont pu être réalisées que par une collaboration étroite de différents groupes de travail:

—le Département "Mesure et Contrôle des Radiations" et le Service d'Études des Réacteurs de MOL qui ont assuré l'organisation pratique des reconstitutions ainsi que la dosimétrie neutrons et gamma externe par films et par dosimètres "Manufacture Belge de Lampes et de Matériel Électronique",

—Le Groupe Dosimétrie Biologique du Département de la Protection Sanitaire qui a assuré la dosimétrie gamma interne,

—le Service Technique d'Études de Protection qui a participé à la dosimétrie gamma externe par films, et interne par fluorure de lithium.

Nous n'exposerons pas en détail les résultats des différentes irradiations et ne parlerons que des résultats obtenus après confrontation des expériences successives.

II. PRÉPARATION DE LA RECONSTITUTION

II. 1. Choix du mannequin

En réalité, nous n'avons qu'un type de mannequin à notre disposition le "RANDO" fabriqué par ALDERSON aux États-Unis. Ce mannequin est constitué de matière équivalente aux tissus mous vis à vis des rayonnements électromagnétiques. Il comporte un squelette réel et des poumons en matière équivalente (fig. 4). La composition en différents éléments est résumée dans le tableau suivant (fig. 6) où les valeurs sont exprimées en pourcentage par rapport au poids.

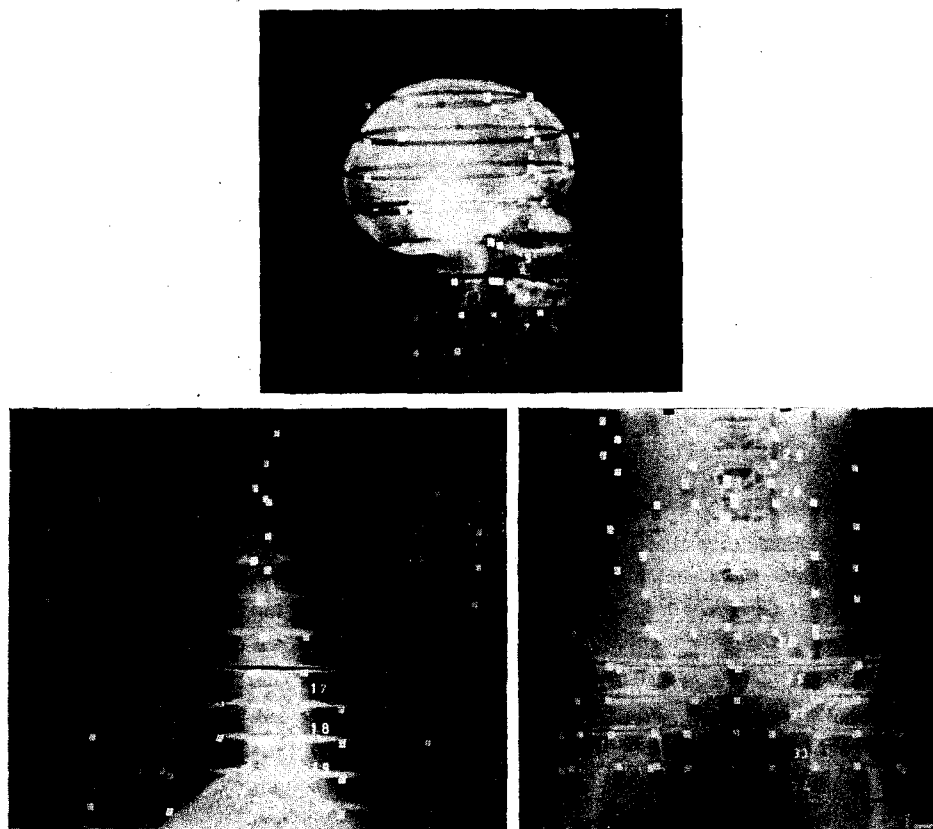


FIG. 4. Radiographies du mannequin "Rando" avec positionnement des détecteurs internes.

	Masse volumique	Nombre d'électrons par g. (Effet Compton)	\bar{Z} (Effet photoélectrique)	\bar{Z} (Création de paires)
Eau	1	$3,34 \cdot 10^{23}$	7,42	6,6
Muscle	1	$3,32 \cdot 10^{23}$	7,50	6,54
Rando	0,995	$3,30 \cdot 10^{23}$	7,43	5,96

FIG. 5. Comparaison de la matière Rando au muscles humain et à l'eau (Equivalence pour les rayonnements électromagnétiques).

Éléments	Rando	Muscle
Hydrogène	9,687%	10,2%
Carbone	65,406%	12,3%
Oxygène	20,146%	77,29%
Azote	2,240%	3,5%
Chlore	2,270%	—
Antimoine	0,069%	—
Calcium	—	0,007%
Potassium	—	0,3%
Soufre	—	0,5%
Phosphore	—	0,2%
Magnésium	—	0,02%
Sodium	—	0,08%

FIG. 6. Composition comparée "Rando" - Muscle (% par rapport au poids)

II. 2. Choix des dosimètres

II. 2.1. *Dosimétrie gamma.* Deux types de dosimètres gamma ont été utilisés :

- des dosimètres photographiques, du type des badges utilisés en protection, modèle PSI du CEA⁽²⁾ et du CEN/Mol, dont l'étalonnage est identique,
- les dosimètres thermoluminescents d'une part, des stylos "M.B.L.E." au fluorure de calcium en externe et surtout des poudres de fluorure de lithium du type 7 (fig. 7) qui permettent seules un nombre impor-

tant de points de mesure en dosimétrie interne.

Nous vous décrirons surtout la méthode utilisant le fluorure de lithium qui présente les avantages suivants :

- faible encombrement,
- indépendance en fonction de l'énergie des rayonnements électromagnétiques (fig. 8 tirée des réf. 3 et 4). Il est, en effet, indépendant entre 100 keV et 30 MeV mais surestime la dose de 20% pour les rayonnements d'énergie inférieure à 100 keV.
- le fluorure de lithium de type 7 est pratiquement insensible aux neutrons rapides.

Par contre, nous ne pouvons l'utiliser, du moins en ce qui concerne la qualité en notre possession qu'entre 1 rad et 500 rads. Il semble, en effet, exister plusieurs plages de linéarité pour une gamme de doses étendue. Enfin, nous ne ferons que donner ici les conditions de lecture utilisées au laboratoire sans les discuter. L'information obtenue par irradiation du fluorure de lithium est lue au moins 48 heures après l'irradiation au moyen d'un appareil Conrad modifié au laboratoire tant au niveau alimentation haute tension qu'au niveau de la chaîne de lecture. En cours d'étalonnage, la poudre est lue par échantillon de 30mg et le lecteur réglé pour avoir 1 rad par "digit"; dans ces conditions, en particulier, utilisation toujours de la même plaquette, l'écart quadratique moyen est de 5%. Précisons que l'étalonnage est fait par comparaison avec une chambre

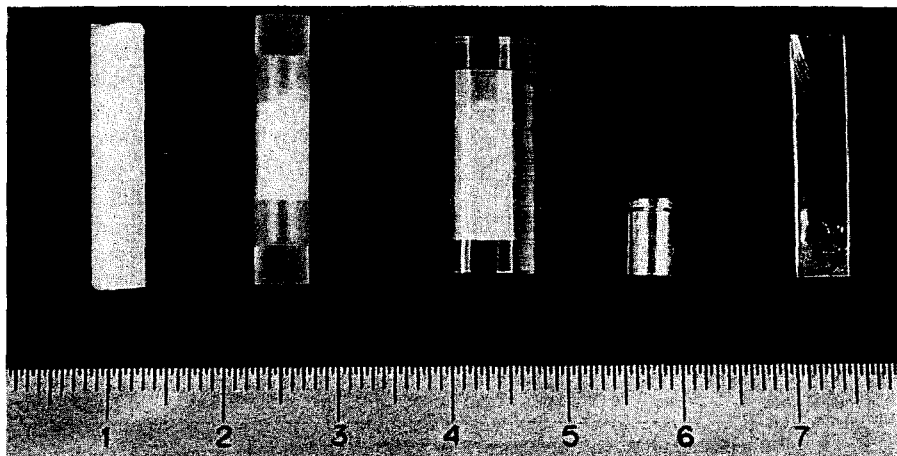


FIG. 7. Vue des différents dosimètres.

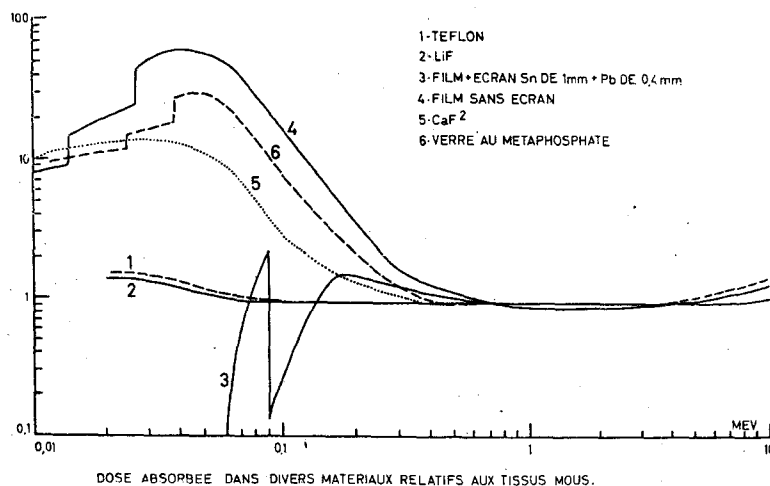


FIG. 8. Courbe de réponse gamma en fonction de l'énergie pour différents dosimètres.

d'ionisation à paroi équivalent air placée en condition d'équilibre électronique dans un faisceau d'une source de ^{60}Co collimatée. Les lectures sont traduites en énergie absorbée en tenant compte du rapport des coefficients d'absorption énergétiques comparés de l'air et du F Li pour un rayonnement γ de 1,25 MeV.

Les lectures pour les manipulations sont faites dans les mêmes conditions. Les containers utilisés pour la reconstitution, de petits cylindres de polyéthylène, contiennent 120 mg de cristaux, permettant ainsi quatre lectures par dosimètre. Dans ces conditions, la précision n'est plus que 10% (utilisation de plaquettes différentes).

II. 2.2. *Dosimétrie neutrons*:— *Neutrons intermédiaires*. Des détecteurs d'or placés dans un boîtier de cadmium ont été utilisés. Vu le peu de place disponible (trous de 5mm de diamètre dans le mannequin) une épaisseur d'or de 1 mm a été employée afin d'augmenter la masse du détecteur, le diamètre étant limité à 3 mm.

D'autre part, pour avoir une indication de l'anisotropie du flux ainsi que pour diminuer l'influence de celle-ci, la pastille d'or a été entourée de deux autres pastilles identiques. Seule la pastille centrale a été systématiquement mesurée.

Lors de la mesure, il existe un effet d'auto-absorption important dans le détecteur d'or entraînant un comptage plus efficace des bords

de la pastille affectés par l'anisotropie du flux. Afin de diminuer cet effet lors du comptage, le détecteur est inséré dans une pastille de métal non irradié de Z voisin de celui de l'or.

Nous avons utilisé une pastille de Pb de 1 mm d'épaisseur et de 12 mm de diamètre.

Les mesures ont été effectuées dans 4 cristaux NaI à puits de $1\frac{3}{4}'' \times 2''$ connectés à un sélecteur 400 canaux. La durée de mesure était de 20 minutes par échantillon. La surface du pic était obtenue par intégration numérique.

— *Neutrons thermiques*. Des détecteurs d'or de 4,5 mm \times 20 \times 0,1 mm ont été placés dans des trous voisins de ceux occupés par les détecteurs sous cadmium.

— *Calibration des détecteurs d'or sous cadmium*. Nous nous sommes référés aux détecteurs d'or minces de dimensions généralement utilisées soit des pastilles de 8 mm de diamètre et de 0,127 mm d'épaisseur. D'après Baumann⁽⁵⁾ on sait que:

$$\frac{(RCd - I)_0}{(RCd - I)_x} = 0,227 \text{ pour } x = 0,127 \text{ mm}$$

Des détecteurs épais blindés par Au et Cd ont été irradiés en même temps que des détecteurs minces dans un convoyeur de BR 1 et dans une pile étalon. On a obtenu:

$$(N/m) \text{ épais.} / (N/m) \text{ mince} = a = 0,267$$

N/m étant le taux de comptage sous le pic par

gramme d'or. On pourra donc passer du résultat N/m mesuré au résultat équivalent avec détecteurs minces en le multipliant par I/a .

—*Calcul du flux de neutrons d'énergies intermédiaires.* On a :

$$\begin{aligned} \varnothing \epsilon_{pi} \cdot t = & \frac{1}{a} \left(\frac{N}{m} \right) 1 \text{ mm} \cdot \frac{M_A}{N_A} \cdot \frac{1}{R} \cdot \frac{T}{0,693} \\ & \cdot \frac{I}{IR} \cdot \frac{(RCd - I)x}{(RCd - I)_o} \end{aligned}$$

où $\varnothing \epsilon_{pi} \cdot t$ = flux intégré par intervalle logarithmique d'énergie (si $t \ll T$).

M_A = masse atomique,

N_A = nombre d'Avogadro,

R = rendement du dispositif de comptage,

T = demi-vie du radio-élément formé,

IR = intégrale de résonance = 1556 barns,

RCd = rapport cadmium,

x = épaisseur de détecteur (0,127 mm).

On suppose que le spectre est de forme $\frac{1}{E}$ et que les limites d'énergie sont 0,12 eV et 1 MeV.

d'où

$$\frac{dE}{E} = 15,9.$$

Le flux épithermique total sera égal à 15,9 fois le flux obtenu ci-dessus.

On a pris d'autre part la valeur indiquée par J. A. Dennis: 1 rad "surface absorbed dose" = $2,81 \cdot 10^9$ n/cm².

—*Calcul du flux thermique.* On a :

$$\begin{aligned} \varnothing_{th} \cdot t = & \frac{N}{m} \cdot \frac{M_A}{N_A} \cdot \frac{1}{R} \cdot \frac{T}{0,693} \\ & \frac{1}{\sigma_{th}} \cdot \left(1 - \frac{1}{RCd} \right) \cdot \frac{1}{F} \end{aligned}$$

où F = facteur de dépression de flux = 0,9,
 σ_{th} = 98,8 barns

Pour déterminer RCd on se basera sur le résultat d'un détecteur or 1 mm sous Cd de position voisine. On a :

$$(N/m)_{0,1 \text{ mm}} = (N/m)_{1 \text{ mm}} \cdot 1/a'$$

$$\begin{aligned} \text{où } a' = & a \frac{(RCd - I)_{0,1 \text{ mm}}}{(RCd - I)_{0,127 \text{ mm}}} = 0,267 \cdot \frac{0,227}{0,250} \\ & = 0,242 \end{aligned}$$

$$\text{d'où } RCd = \frac{0,242 (N/m)_{0,1 \text{ mm}}}{(N/m)_{1 \text{ mm}}}$$

On a pris d'autre part la valeur indiquée par J. A. Dennis: 1 rad "surface absorbed dose" = $1,59 \cdot 10^{10}$ n/cm².

—*Neutrons de fission.* Les détecteurs de neutrons de fission sont des cylindres de soufre de 5 mm de diamètre et de 25 mm de long. Leur activité en ³²P a été mesurée aux compteurs GM après séparation chimique. (6) La dose en rads, due aux neutrons de fission est calculée en supposant, suivant J. A. Dennis, que 1 rad correspond à 10,9 dés./min. et g de soufre. Ces différents détecteurs sont montrés sur la fig. 7.

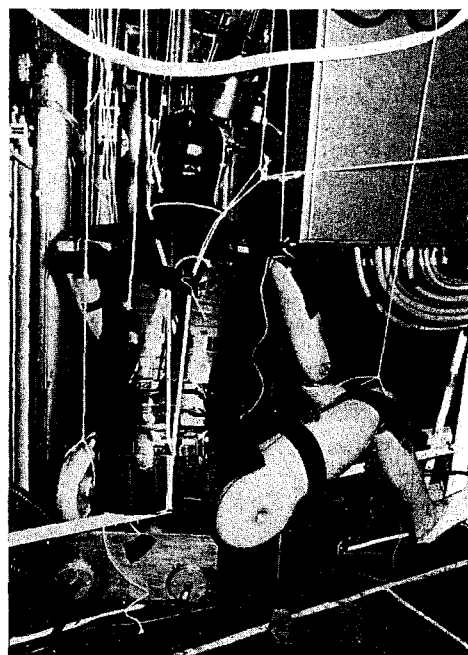


Fig. 9. Vue du mannequin et de son positionnement à Venus.

II. 3. *Reconstitution de la position*

Elle a reposé essentiellement sur trois données :

—l'interrogatoire de l'accidenté: il a eu lieu en deux temps, d'abord un simple interrogatoire qui a permis de faire des essais de position par des agents de tailles voisines avec prises de photographies, puis l'agent a précisé sa position en choisissant les clichés qui lui semblaient les plus proches de ses souvenirs et en les corrigeant;

—la hauteur de la barre de contrôle au moment de la criticité prompte qui a pu être évaluée; l'accidenté la tenait de sa main gauche dont la position est ainsi déterminée;

—enfin, les mesures de l'activité des phanères prélevées en différents points du corps qui nous ont donné des rapports entre l'irradiation de différents points du corps: tête, pubis, membres, en particulier. Les figures 9, 10 et 11 vous montrent le mannequin et son positionnement à Venus lors des différentes reconstitutions.

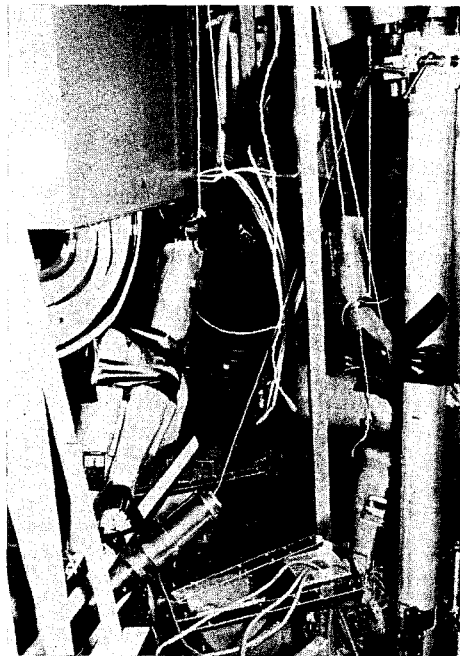


FIG. 11. Vue du mannequin et de son positionnement à Venus.

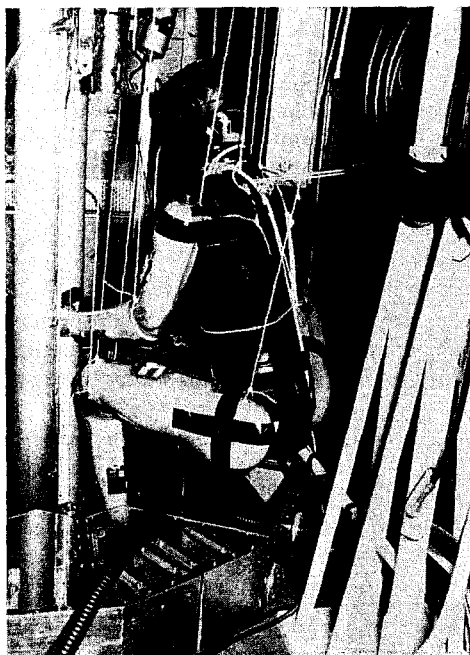


FIG. 10. Vue du mannequin et de son positionnement à Venus.

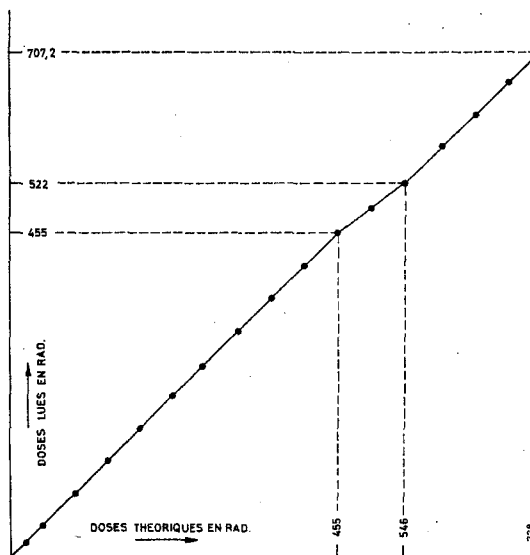


FIG. 12. Courbe d'étalonnage du fluorure de lithium.

II. 4.—*Choix de la dose et valeur de celle-ci lors des reconstitutions.* Les critères de choix ont été les suivants:

—la dose devait être suffisante pour assurer un taux de comptage raisonnable du ^{32}P des bâtonnets de soufre;

—la dose gamma aux différents points du mannequin devait être comprise dans la plage de linéarité du fluorure de lithium (entre 1 R et 500 R; fig. 12).

—la dose ne devait pas être trop importante pour éviter une activité gênante du combustible du réacteur lors de ses manipulations ultérieures.

La reconstitution ne pouvait donc se faire que par des irradiations à flux raisonnable, dans le cœur du réacteur: 10^9 neutrons/cm² sec. au maximum; toutefois cette approximation n'était pas mauvaise, la contribution des doses gamma des produits de fission étant estimée à 14% des doses de gamma prompts de fission et de capture pour une irradiation de deux heures. Le temps d'irradiation choisi est de 2 heures (dose de l'ordre de 500 R au pied gauche).

Le facteur entre l'irradiation lors de l'accident et celle obtenue lors de la reconstitution a été déterminé par plusieurs calculs: d'une part le rapport des doses gamma enregistrées par les films-dosimètres de l'accidenté et du mannequin, soit 7,35, d'autre part, le rapport d'activité en lanthane-140 entre un barreau de combustible prélevé après l'accident et un nouveau barreau utilisé lors des reconstitutions. Ce rapport est de $7,2 \pm 0,2$.

La concordance de ces deux valeurs nous semble justifier la validité des mesures faites.

III. EXPOSÉ DES RÉSULTATS

Il est pratiquement impossible de donner les résultats de tous les points de mesure. Voici, d'abord, les résultats des mesures externes (fig. 13):

Nous allons montrer quelques exemples de mesures au niveau de quelques coupes (figs. 14, 15, 16, 17, 18); puis nous tenterons de résumer

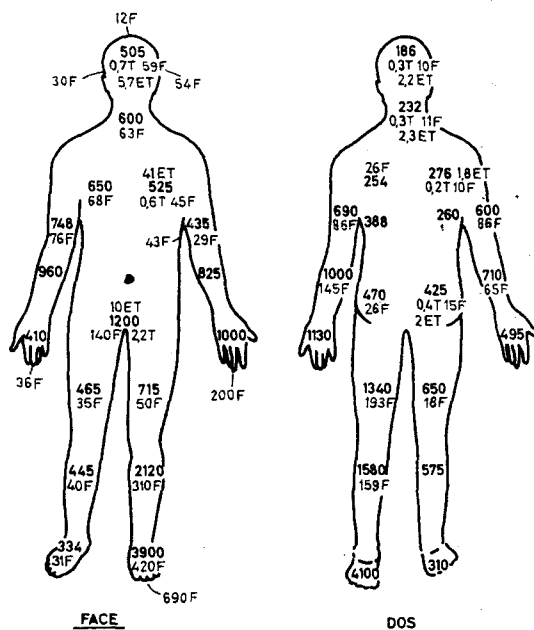


FIG. 13. Doses externes exprimées en rads (γ -pas d'indication—T—neutrons thermiques ET neutrons épithermiques—F neutrons de fission). Sur ce cliché, le degré d'hétérogénéité est déjà mis en évidence—la dose gamma, de même que la dose neutrons est de 2,37 fois plus grande au pubis qu'au front sans parler de la surexposition importante du membre inférieur gauche où les doses γ et neutrons atteignent respectivement 3.900 et 420 rads.

les données pour l'organisme entier (figs. 19 et 20).

Comme vous le montrent ces 5 exemples, il nous a paru difficile de chiffrer, de manière simple, l'irradiation subie par l'accidenté. Il est possible de résumer nos résultats de deux manières:

—d'une part, en traçant les isodoses dans deux plans intéressants: le plan sagittal médian et le plan frontal médian,

—d'autre part, en estimant les doses aux différents organes.

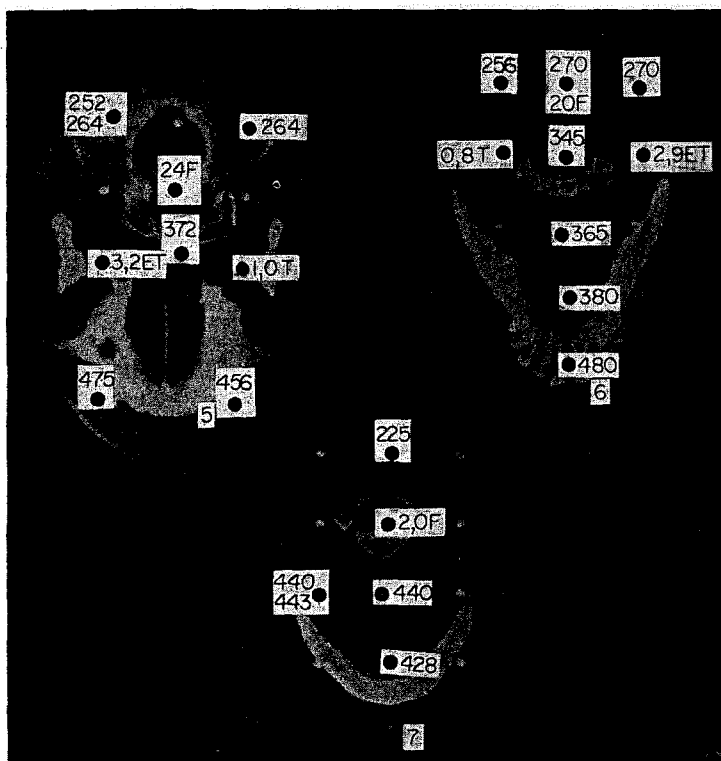
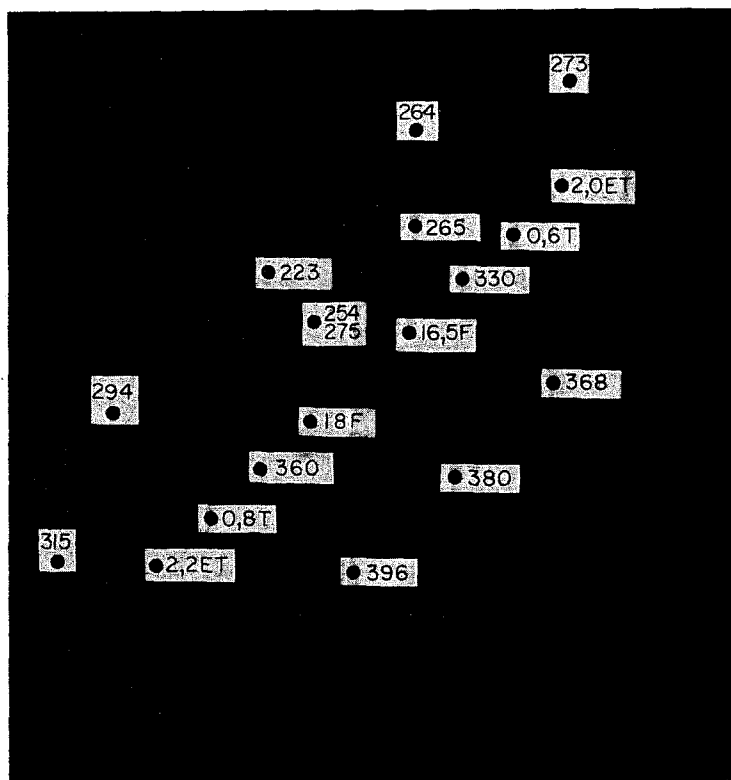


FIG. 14. Cette figure nous montre un exemple des doses mesurées dans 3 tranches situées respectivement au niveau du trou occipital et au niveau du maxillaire inférieur. Elle montre des doses absorbées variant entre 252 et 345 rads au niveau des premières vertèbres cervicales pour des doses atteignant 400 et plus au niveau du maxillaire inférieur. Soulignons tout de suite que la position de la tête est la plus sujette à caution, le degré de flexion étant impossible à préciser.

FIG. 15. Cette tranche se situe au niveau de la première vertèbre dorsale et de l'acromion. Elle permet de voir que la dose absorbée dans le corps vertébral, riche en moelle, est de 275 rads, atteignant 400 environ à la face antérieure du thorax. Déjà apparaît sur cette coupe, la diminution de l'énergie absorbée, d'une part d'avant en arrière, d'autre part de droite à gauche.



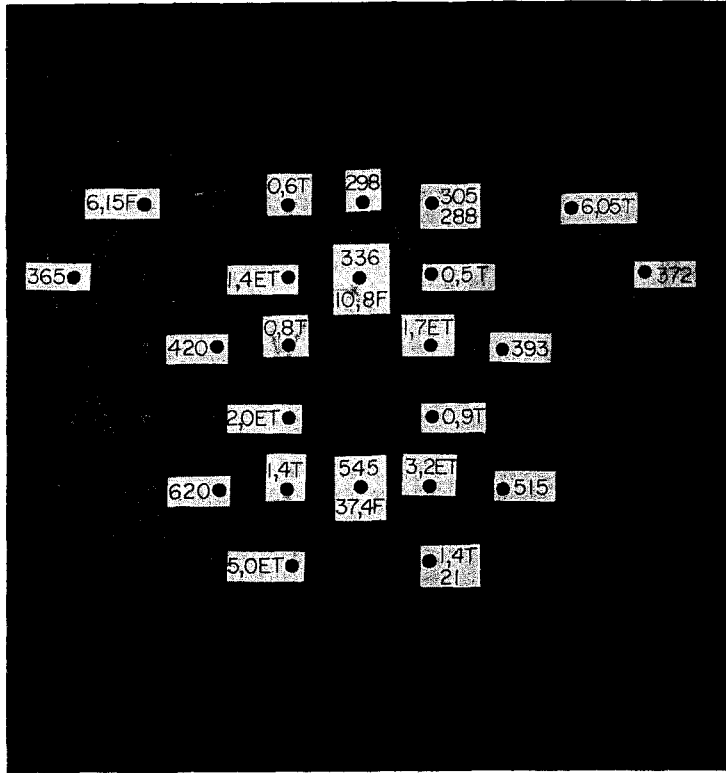
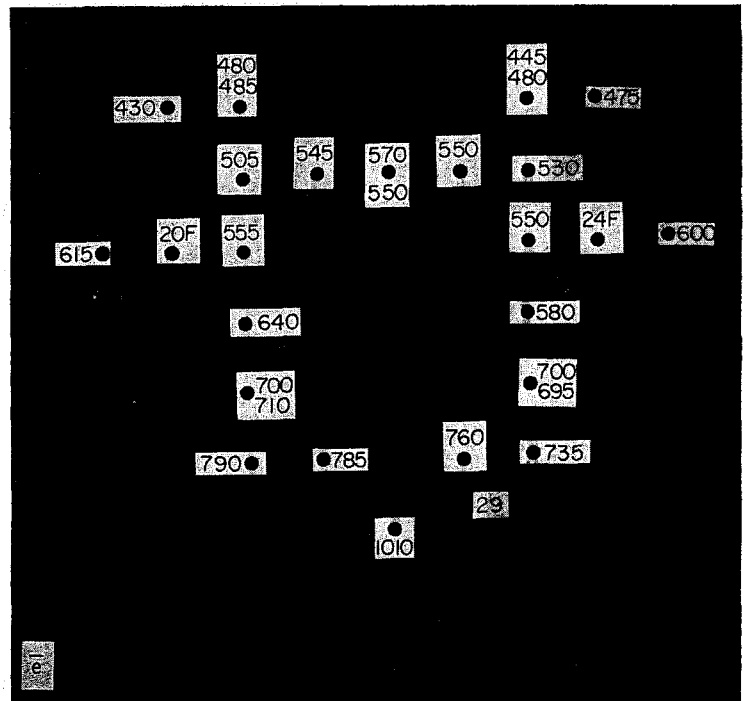


FIG. 16. Ici, la coupe passant par la 10^{ème} vertèbre dorsale, intéresse la région diaphragmatique. Les doses absorbées varient ici entre 620 et 515 dans la région antérieure, et 300 au niveau du corps vertébral. C'est sur cette tranche que l'on peut admettre qu'il existe une thermalisation des neutrons rapides; le rapport entre rapides et thermiques est plus faible que pour les mesures faites en externes.

FIG. 17. Cette coupe passe par la dernière vertèbre lombaire et les crêtes iliaques. Cette région du bassin a été irradiée déjà de manière importante, avec un gradient de dose plus marqué d'avant en arrière, atteignant un facteur 2 (de 500 à 1000 rads), tandis que la dissymétrie latérale disparaît, ce qui se conçoit parfaitement, si l'on se rappelle la position du fantôme. Enfin, ici, le rapport dose neutrons rapides/dose gamma, qui était de 1/10 à la surface, n'est plus que de 1/25, traduisant très certainement la thermalisation neutronique.



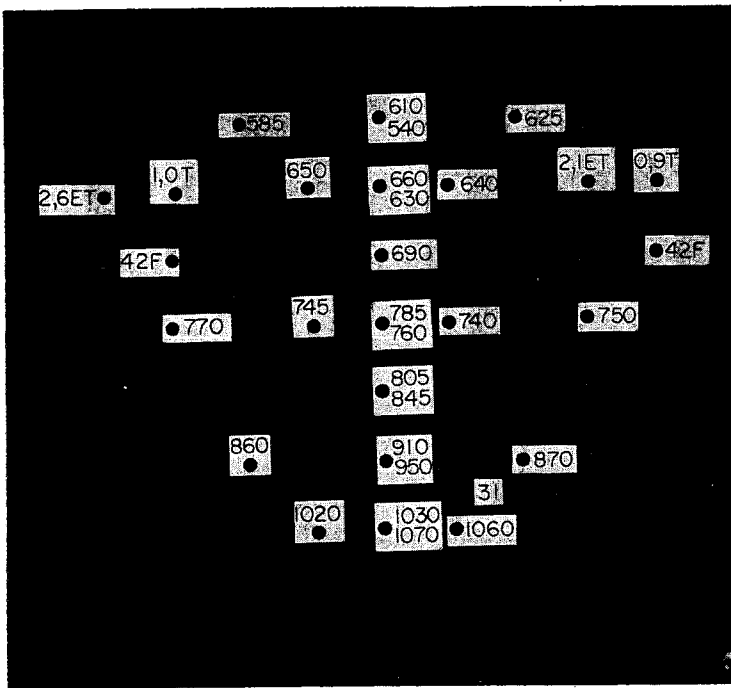
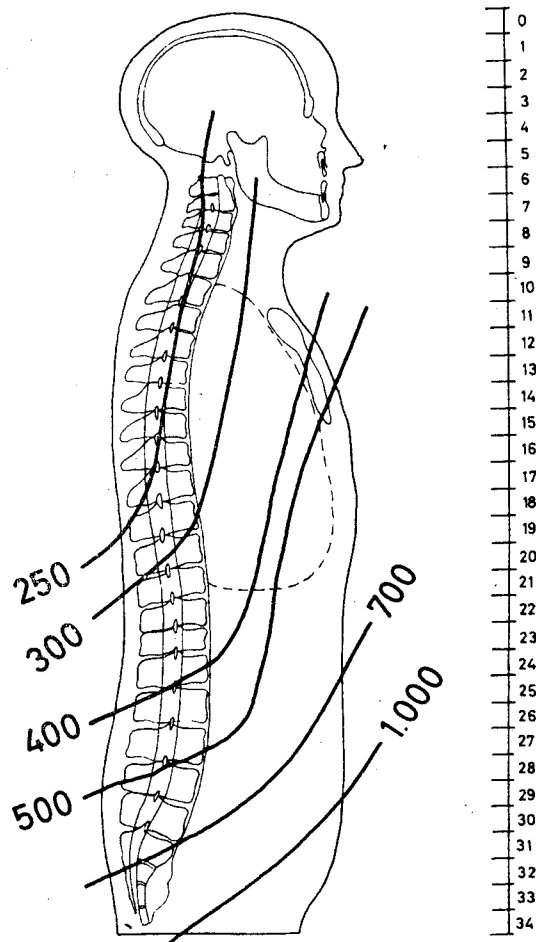


FIG. 18. Ce dernier exemple de tranche du fantôme montre l'irradiation importante subie par le bassin: pratiquement, plus de 600 rads dans toute la ceinture pelvienne, qui représente une quantité importante, de moelle osseuse, et des doses absorbées supérieures à 1.000 rads dans la région antérieure.

FIG. 19. Isodoses dans le plan sagittal médian. Elles mettent en évidence: (1) que les vertèbres cervicales et les 8 premières dorsales sont dans une zone irradiée à moins de 300 rads; (2) que l'abdomen a reçu de 500 à 800 rads; (3) que le rachis lombaire et le sacrum ont reçu plus de 500 rads.



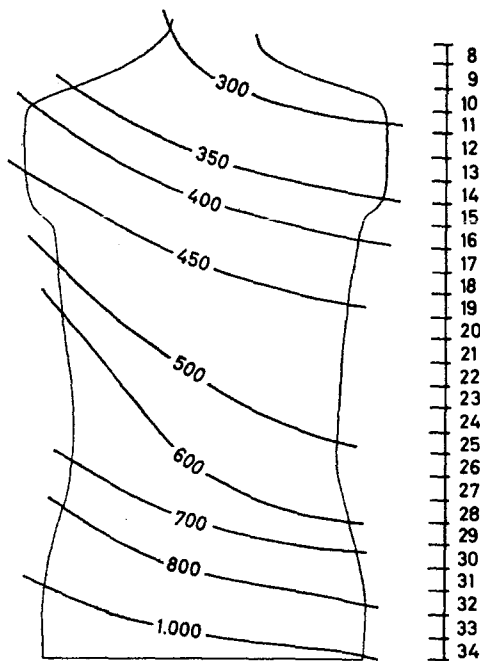


FIG. 20. Isodoses dans le plan frontal médian. L'intérêt de ces isodoses réside surtout dans l'irradiation de l'abdomen qui est très importante. Elles montrent, de plus, la dissymétrie liée à la position du thorax (flexion et rotation interne de l'épaule droite).

Intervalle de doses	Pourcentage total de moelle osseuse représentée	Zone medullaire intéressée
250 à 300	16	Partie postérieure du crâne Humérus Vertèbres cervicales de C ₃ à C ₇ et dorsales D ₁ à D ₇ .
300 à 350	17	Partie antérieure du crâne. Omoplate et clavicule gauches. Régions postérieures des côtes. Vertèbres cervicales C ₁ et C ₂ et dorsales de D ₈ à D ₁₀ .
350 à 400	11	Omoplate et clavicule droites. Vertèbres dorsales D ₁₁ et D ₁₂
400 à 500	8	Maxillaire inférieur et sternum. Région antérieure des 6 premières côtes. Vertèbres lombaires L ₁ et L ₂ .
500 à 1000	48	Région antérieure des 6 dernières côtes Vertèbres lombaires L ₃ à L ₅ . Sacrum et ceinture pelvienne.

FIG. 21. Doses absorbées au niveau de différents territoires médullaires

Organe	Dose Gamma (en rad)	Dose Neutrons (en rad)	Dose totale arrondie au nombre supérieur (en rad)
Cerveau	180 à 270	18 à 27	200 à 300
Cœur	360 à 400	36 à 40	400 à 450
Rate	360	36	400
Foie	360 à 450	36 à 45	400 à 500
Tractus digestif:			
Grêle	500 à 730	50 à 73	550 à 800
Colon ascendant caecum	640	64	700
angle droit	450	45	500
Colon transverse	400 à 450	40 à 45	450 à 500
Sigmoïde	550 à 820	55 à 82	600 à 900
Rectum	680 à 770	68 à 77	750 à 850
Reins	360 à 450	36 à 45	400 à 500
Vessie	730 à 930	73 à 93	800 à 1000
Glandes endocrines:			
Hypophyse	300	30	330
Thyroïde	270	27	300
Surrénales	320 à 360	32 à 36	350 à 400
Gonades	1000	100	> 1100

FIG. 22. Doses absorbées au niveau de différents organes.

Ces doses absorbées au niveau des différents organes peuvent être calculées de manière relativement précise pour les territoires médullaires (fig. 21), mais beaucoup plus approximative pour les autres organes dont la localisation anatomique n'est pas reproduite sur le fantôme (fig. 22).

Enfin, voici les résultats obtenus lors de l'irradiation d'une reproduction du pied gauche. Le mannequin a été fabriqué en MixD avec squelette traité incorporé. Les mesures ont été faites en externe et en interne par du fluorure de lithium pour la dosimétrie gamma et par des détecteurs au soufre pour la dosimétrie des neutrons rapides. Cette reproduction a été posée à l'endroit exact où se trouvait le pied gauche de l'accidenté et a été irradiée à la même dose que lors des précédentes reconstitutions. Nous avons pensé intéressant de vous donner les doses mesurées au niveau du pied en les superposant aux lésions observées (figs. 23, 24 et 25).

Nous avons également reporté les doses absorbées gamma sur les radiographies osseuses du pied (fig. 26).

IV. CONCLUSIONS

Pour conclure cet exposé, il faut tout d'abord rappeler que cette étude dosimétrique a été menée pour résoudre les problèmes posés par l'évolution clinique de la maladie. L'utilisation des dosimètres au fluorure de lithium, quelles que soient les critiques que l'on puisse leur faire, se justifiait par la possibilité d'obtenir rapidement un grand nombre de mesures ponctuelles, par leur qualité d'équivalence aux tissus mous et leur indépendance en fonction de l'énergie. Les résultats ont montré la grande hétérogénéité de la répartition de l'énergie absorbée et la certitude qu'il existait des territoires médullaires encore fonctionnels. Cette donnée a été la base de l'action thérapeutique car dans ce cas, la dose moyenne absorbée n'avait qu'une signification biologique limitée.

De plus, quelques remarques peuvent être faites:

—avec l'apparition des nouveaux matériaux de gainage, la composante γ de la dose devient prédominante, en cas d'accident. Peut-être

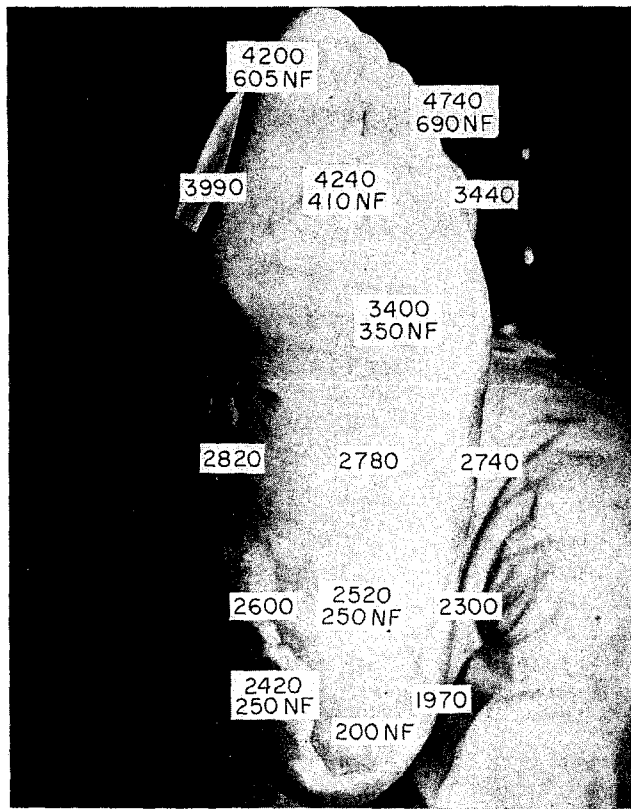


FIG. 23. Doses externes sur la plante du pied Cette photographie montre la plante du pied où les doses atteignent 4700 rads γ et 700 en neutrons rapides au niveau des orteils, zone la plus atteinte.

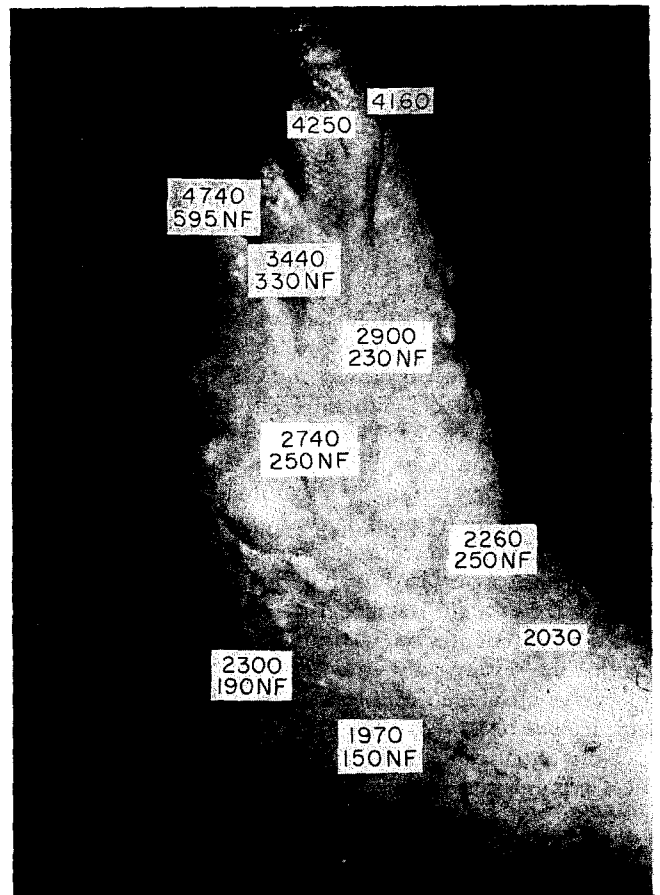


FIG. 24. Cette photographie montre la face supérieure du pied où les doses très importantes sont également au niveau de la zone dont les lésions sont les plus importantes, c'est-à-dire les orteils, alors que les doses de 2000 à 2700 rads γ auxquelles il faut toujours rajouter 10% des doses en neutrons rapides, se trouvent au niveau des zones où apparaissent des bourgeons de réépithélialisation, la photographie du pied ayant été faite 2 mois environ après l'accident.

FIG. 25. Cette photographie montre le bord interne du pied où se retrouvent les mêmes phénomènes.

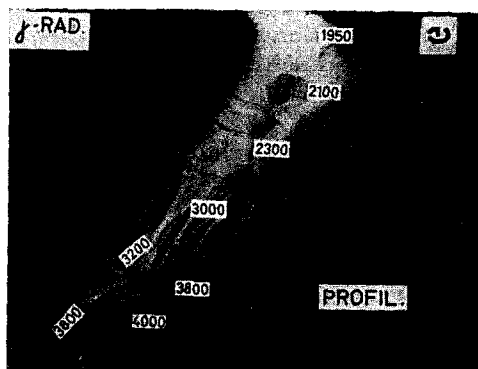
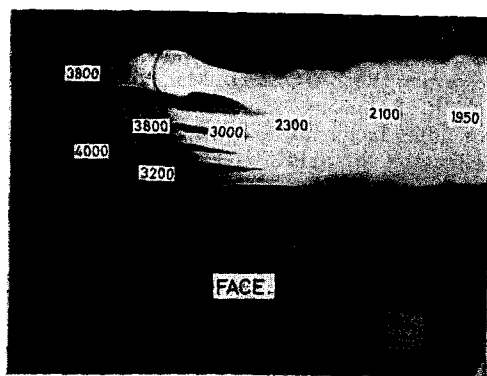
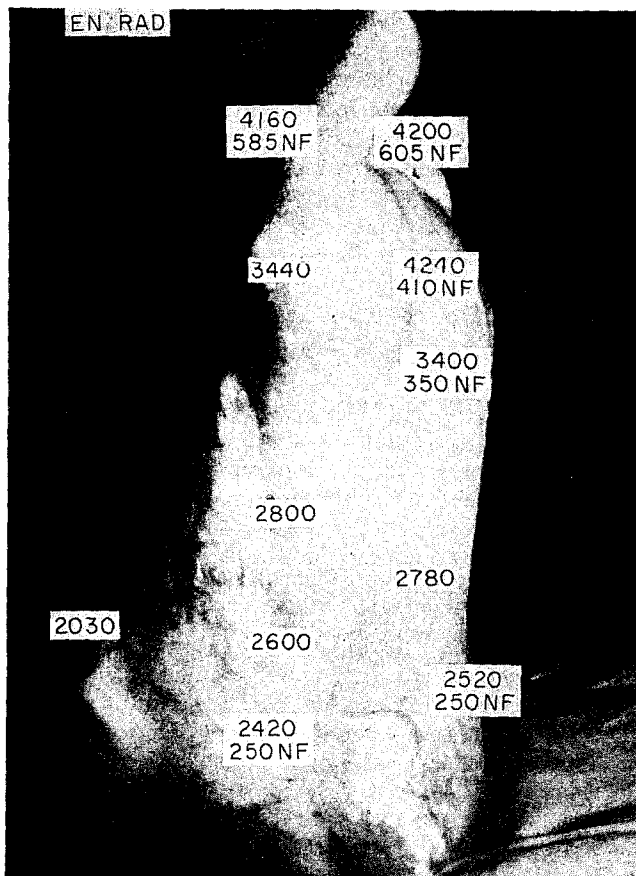


FIG. 26. Doses gamma internes du pied sur radiographie. Voici les doses mesurées dans le fantôme du pied aux différents étages osseux; elles varient de 3.800 et 4.000 rads, au niveau des orteils et 2.000 au niveau de la cheville.

serait-il utile alors de doubler le badge classique par d'autres détecteurs γ ;

—du point de vue clinique et thérapeutique, il est important de pouvoir estimer le degré d'hétérogénéité de l'irradiation: il serait donc intéressant d'équiper les ceintures de sécurité en dosimètres γ ;

—enfin, si l'on veut procéder à une reconstitution immédiate après l'accident, il faut disposer des fantômes, de l'instrumentation de dosimétrie nécessaire et d'une équipe rodée à leur emploi.

REMERCIEMENTS

Nous nous permettons de remercier ici les si nombreuses personnes qui nous ont aidés sans compter à l'exécution de ces mesures et les personnes et organismes qui nous ont prêté le matériel qui nous manquait (nous pensons tout particulièrement au Service de Radiobiologie de l'Université de Liège, à l'Unité de Radiophysique de l'Institut Gustave Roussy, à l'Institut voor Toepassing van Atoomenergie in de Landbouw te Wageningen et à la Manufacture Belge de Lampes et de Matériel Électronique.

ANNEXE No. 1

(m) *FILM-DOSIMÈTRE C.E.N.*

Le film-dosimètre C.E.N. est muni de deux films Gevaert D₂ et D₁₀ permettant la mesure des doses de quelques mR à 1 millier de R. Ces films sont placés dans un boîtier de matière plastique. Ce boîtier contient 4 jeux d'écrans:

1—écrans γ -X: plomb 220 mg/cm², étain 110 mg/cm², aluminium 27 mg/cm²

2—écrans n thermiques: plomb 220 mg/cm², cadmium 1100 mg/cm², aluminium 27 mg/cm².

3—écrans X mous et β : plastique 300 mg/cm²

4—écrans β : plastique 100 mg/cm².

L'identification des films est assurée par mar-

quage aux rayons X de 10 keV au moyen de chiffres de plomb incorporés au boîtier, la partie utile du dosimètre étant protégée.

La seule particularité de ce dosimètre est de contenir des languettes de films non enveloppés dans du papier étanche à la lumière, cette étanchéité étant assurée par le boîtier de polypropylène chargé. L'absence d'enveloppe de papier permet une manipulation plus rapide en chambre noire.

La mesure des doses neutrons dues aux accidents de criticité est faite grâce à trois détecteurs par activation semblables à ceux utilisés à l'A.E.R.E.

—une pastille de soufre de 1 g

—un jeu de 3 pastilles d'or de 4 mm de diamètre et de 0,1 mm d'épaisseur; la pastille centrale est insérée entre 2 écrans de cadmium de 0,7 mm d'épaisseur.

—une pastille d'indium pour la détection rapide des irradiés.

RÉFÉRENCES

1. J. A. DENNIS. Neutron dosimetry using activation techniques. (A.E.R.E.) Les techniques de la dosimétrie individuelle des radiations externes. ENEA/OECD, Madrid, 1963.
2. G. SOUDAIN et G. PORTAL. Caractéristiques d'un dosimètre individuel à fonction multiple. Note CEA 603.
3. G. PORTAL. Bague dosimètre au fluorure de lithium thermoluminescent. Congrès international sur la Radioprotection dans l'utilisation des radioéléments, Paris, 13-15 déc. 1965.
4. H. JOFFRE. Considération sur les problèmes de la dosimétrie individuelle des radiations β , γ et X. (Centre d'Études Nucléaires de Saclay.) Les techniques de la dosimétrie individuelle des radiations externes. ENEA/OECD. Madrid, 1963.
5. N. P. BAUMANN. Resonance integrals and self shielding factors for detector foils. DP-817 (1963).
6. PETERSEN, MITCHELL et LANGHAM. Estimation of fast neutron doses in man by ³²S (n, β) ³²P reaction in body hair. *Health Physics* 6, 1-5 (1961).