MÉTHODE D'EXPLOITATION D'UN DOSIMÈTRE PHOTOGRAPHIQUE SIMPLE

M. BRUNEAU, J. KIENTZEL et Y. DE MORAS *

(Manuscrit reçu le 25 janvier 1971)

RÉSUMÉ

Une méthode de traitement des informations fournies par un dosimètre photographique simple à deux filtres est décrite. Elle permet la détermination précise de l'énergie moyenne d'un rayonnement électromagnétique ionisant de basse énergie, même en présence d'un rayonnement de haute énergie. La détermination de l'énergie, utile en soi, permet en outre de calculer l'exposition à laquelle le dosimètre a été soumis avec le maximum de précision.

La méthode a été programmée en vue de son adaptation au traitement automatique par ordinateur. Les résultats obtenus conduisent à envisager son utilisation en surveillance dosimétrique individuelle.

SUMMARY

Data processing of measures carried out with a simple two filters photographic dosimeter is described. It gives an accurate determination of the average energy of a low energy ionizing radiation even when mixed with high energy ionizing radiations. The determination of the energy, useful in itself, moreover enables calculating of the exposure with an excellent accuracy.

This method has been set up to be adapted for automatic processing by a computer and so can be utilized in personal dosimetry.

INTRODUCTION

La surveillance dosimétrique des personnes exposées à l'action des rayonnements ionisants est née du souci de protéger celles-ci contre le danger que présentent ces rayonnements pour l'organisme. Dans cet esprit, l'objectif principal à atteindre est donc de déterminer la dose éventuellement absorbée soit par l'organisme entier, soit plus simplement par un organe déterminé.

Mais, dans la pratique, un tel objectif est rarement atteint. On doit se contenter de mesurer l'exposition, sans grande précision d'ailleurs, et c'est là, en définitive, la seule information généralement obtenue.

A cet effet, le procédé le plus couramment utilisé est la dosimétrie photographique.

* Laboratoire de métrologie des rayonnements ionisants de l'E.C.E.R.A., Fort de Vanves, 92-Malakoff.

Notre propos n'est pas ici de faire une étude approfondie de tous les avantages ou inconvénients de cette technique, de très nombreux auteurs en ayant déjà largement débattu.

Il s'agit uniquement pour nous d'exposer une méthode d'exploitation d'un dosimètre photographique très simple qui permet de déterminer, en plus de l'exposition, l'énergie moyenne des rayonnements X incidents, donc la dose susceptible d'être absorbée.

Auparavant, il est nécessaire de replacer le problème dans son contexte : on ne connaît pas toujours d'avance la nature et l'énergie du rayonnement auquel une personne risque d'être exposée. Pour couvrir l'ensemble des cas possibles, il serait donc nécessaire de disposer d'un dosimètre capable de donner une réponse valable, aussi bien pour des rayonnements X ou gamma que pour des particules telles que les électrons, les neutrons lents ou rapides. Réaliser un tel dosimètre, même si cela paraît éminemment souhaitable, présente, comme l'a fait remarquer Margaret EHRLICH [8], une difficulté extrême. Néanmoins, de nombreux chercheurs ont tenté d'y parvenir en utilisant des dosimètres photographiques.

Rappelons que l'un des inconvénients reprochés à ces dosimètres photographiques est la dépendance de leur réponse vis-à-vis de l'énergie du rayonnement incident [4], mais ce n'est pas l'apanage de ce seul type de dosimètres. Il n'est pas douteux, en effet, que le rendement photographique peut varier d'un facteur 25 suivant l'énergie du rayonnement (voir annexe 3).

— Plusieurs procédés ont été étudiés pour éviter cet écueil.

— Une solution élégante a été proposée par STORM et SHLAER [16]. Elle consiste à utiliser un filtre multi-éléments, chaque élément jouant, outre son rôle filtrant, un rôle de « radiateur » secondaire. Ainsi, quelle que soit l'énergie du rayonnement incident, celle du rayonnement qui parvient jusqu'à l'émulsion photographique varie peu autour d'une valeur moyenne, la réponse devenant alors indépendante de l'énergie du rayonnement initial. Cette méthode, notons-le, ne permet pas de déterminer l'énergie du rayonnement incident ni, à fortiori, la dose absorbée par tel ou tel organe.

— Plus récemment, TAIT [17] a décrit une méthode d'utilisation d'un dosimètre photographique plus simple comportant un seul filtre et une « fenêtre ». Cette méthode, basée sur un principe initialement indiqué par ALLISY [2] et consistant à additionner les densités optiques derrière la fenêtre et derrière le filtre, rend la réponse du dosimètre indépendante de l'énergie à 20 % près entre 25 KeV et 1 MeV.

Elle permet également de se faire une idée de l'énergie du rayonnement incident, mais sans grande précision et seulement dans le cas où une seule énergie de rayonnement est en cause. De plus, vers les faibles énergies, des rayonnements d'énergie différente peuvent être confondus.

La plupart des autres solutions [1, 7, 9, 10, 12, 13, 14, 18] sont basées sur la multiplication des filtres, d'où une exploitation longue et délicate et aussi un prix de revient excessif des étuis ainsi constitués.

De surcroît, le nombre souvent élevé de rayonnements différents simultanément en cause (gamma, X d'énergie variable, bêta, quelquefois neutrons ther-

miques) ne permet pas d'espérer une très grande précision et les informations obtenues demeurent, en outre, limitées.

Ces considérations ont déjà conduit ATTIX [3], après LANGMEAD [11], à se demander si les dosimètres photographiques ne devraient pas servir aussi de spectromètres gamma; des auteurs, comme WINKLER et LEVIN [19], ont d'ailleurs pensé à utiliser ces dosimètres photographiques pour faire de la spectrométrie.

Dès lors, la dépendance de la réponse des émulsions vis-à-vis de l'énergie n'est plus un inconvénient, elle devient au contraire « la » propriété véritablement utile, et même indispensable, pour apprécier la dose absorbée correspondant à l'exposition mesurée. Nous utiliserons cette propriété dans la méthode que nous allons décrire.

Pour nous, le problème est nettement simplifié puisque l'éventail des rayonnements auxquels peuvent être exposées les personnes que nous contrôlons se limite à des rayonnements X et gamma.

C'est dans ce cadre que nous avons placé notre étude.

I - MATÉRIEL ET MÉTHODES

A - DOSIMÈTRE

Le dosimètre utilisé est le type I Kodak licence Chassende-Baroz qui comprend :

- trois émulsions de photosensibilités différentes sur support opaque,
- un témoin de développement,
- une plage d'identification sur papier piézosensible.

L'ensemble est présenté sous un emballage en complexe aluminium-polyéthylène thermosoudable.

Ce dosifilm est placé dans un étui à deux filtres, recouvrant chacun un tiers des émulsions.

- Un filtre de 0,20 mm de cuivre.
- Un filtre de 1,0 mm de plomb + 0,20 mm de cuivre (fig. 1).
- Si nous appelons émulsion I l'émulsion rapide,
 — II l'émulsion de sensibilité moyenne,
 — III l'émulsion lente.
- Si nous affectons l'indice *a* à la plage sans filtre (fenêtre),
 — *b* à la plage sous filtre de cuivre,
 — *c* à la plage sous filtre plomb + cuivre.

Nous obtenons les neuf plages suivantes :

I_a I_b I_c II_a II_b II_c III_a III_b III_c

Après irradiation, le dosifilm est développé dans du révélateur dektol neuf (dilué au tiers) pendant deux minutes quinze secondes à $(20 \pm 0,5) ^\circ\text{C}$, avec une

FIG. 1. — Le dosimètre : dosifilm, filtres et émulsions impressionnées.

agitation par bullage d'azote (3 secondes toutes les 20 secondes) puis, passé au bain d'arrêt, fixé, lavé et séché. Nous pouvons alors observer 9 densités optiques :

<i>D.O. I_a</i>	<i>D.O. I_b</i>	<i>D.O. I_c</i>
<i>D.O. II_a</i>	<i>D.O. II_b</i>	<i>D.O. II_c</i>
<i>D.O. III_a</i>	<i>D.O. III_b</i>	<i>D.O. III_c</i>

Ces densités optiques sont déterminées au moyen d'un densitomètre Baldwin par réflexion.

B - SOURCES DE RAYONNEMENT GAMMA

Deux sources ont été utilisées :

- 1) Une source de caesium 137 (662 keV) de 3 000 curies avec un banc optique d'une longueur de 12 m.
- 2) Une source de cobalt 60 (1,26 MeV) de 20 curies, avec un banc optique de 6 m.

Il a été vérifié que les réponses des dosimètres sont identiques pour les rayonnements de ces deux radioéléments.

Par la suite, seul le cobalt 60 a été utilisé car, en raison de sa plus faible activité, il s'est montré le mieux adapté aux expériences réalisées.

L'étalonnage a été effectué au moyen de chambres Victoreen haute énergie avec un « Condenser R Meter » dont la précision est de 5 %.

C - SOURCE DE RAYONNEMENT X

Les rayonnements X ont été obtenus avec un générateur Siemens à tension redressée constante réglée à 1 % pour des variations de tension d'alimentation de 15 %.

Le taux d'ondulation résiduelle est de 3 %.

La haute tension maximum est de 200 kV.

La haute tension minimum est de 30 kV.

L'anticathode est en tungstène.

La haute tension est mesurée à 1 % près par un micro-ampèremètre monté en série avec une chaîne de résistances étalonnées.

L'intensité peut varier de 0,5 à 10 mA.

Le débit d'exposition est déterminé avec une grande chambre d'ionisation à air libre, par mesure du courant d'ionisation au moyen d'un picoampèremètre. La précision de ce dernier, contrôlée à l'aide d'une source de courant étalonnée, a été évaluée à 2 %.

D - TYPES DE RAYONNEMENTS

Les rayonnements X utilisés figurent dans la série D du projet d'additif à la norme NF M 60511 concernant les rayonnements de référence.

Leur qualité a été contrôlée au moyen d'un spectrographe gamma de 100 canaux à cristal d'iodure de sodium activé au thallium.

Leurs caractéristiques sont indiquées dans le tableau I ci-après. Rappelons, pour mémoire, la signification de quelques termes figurant dans ce tableau.

TABLEAU I
CARACTÉRISTIQUES DES RAYONNEMENTS X UTILISÉS

Haute tension (kV)	Débit (mA)	Débit d'exposition (mR/s)	Filtration		1 ^{re} C.D.A.	Degré d'homogénéité $\frac{1^{\text{re}} \text{ C.D.A.}}{2^{\text{e}} \text{ C.D.A.}}$	Energie moyenne calculée à partir de la 1 ^{re} C.D.A. (keV)	Energie moyenne déterminée au moyen du spectrographe gamma (keV)
			inhérente mm	additionnelle mm				
50	10	13,9	4 Al	0	2,2 Al	0,85	30	30
60	—	12,8	—	2 Al	3,1 Al	0,81	34	38
80	—	11,9	—	7 Al	0,23 Cu	0,77	44	54
100	—	17,5	—	0,5 Cu	0,5 Cu	0,72	60	66
120	—	7,6	—	2 Cu	1,05 Cu	0,92	82	82
150	—	13,1	—	1 Sn	1,7 Cu	0,85	95	106
200	5	10,3	—	2 Sn	2,9 Cu	0,93	117	140

Le rayonnement gamma utilisé est celui du cobalt 60 (1,17 et 1,33 MeV).

— *Filtration :*

Modification du spectre d'un rayonnement lors de la traversée d'un filtre.

— *Filtration inhérente :*

Filtration due à toute partie intégrante d'un émetteur de rayonnement atteinte par le faisceau utile d'irradiation et qui fait fonction de filtre (paroi du tube radio-gène, fenêtre de la gaine, filtres définitivement fixés, ...). Il est impossible à l'expérimentateur de modifier cette filtration.

— *Filtration additionnelle :*

Filtration due à l'ensemble des filtres additionnels placés sur le trajet du faisceau de rayonnement. L'expérimentateur peut jouer à volonté sur cette filtration.

— *C.D.A. :*

Couche de Demi-Atténuation.

— *1^{re} C.D.A. :*

Epaisseur d'une substance qui, par sa présence, provoque une atténuation physique de 50 % dans des conditions de bonne géométrie.

— 2^e C.D.A. :

Épaisseur d'une substance qui, interposée sur un faisceau de rayonnement déjà atténué par une 1^{re} C.D.A. de la même substance, provoque une nouvelle atténuation physique de 50 % dans des conditions de bonne géométrie.

— Degré d'homogénéité :

Rapport de la 1^{re} à la 2^e C.D.A. (ce rapport serait égal à 1 si le faisceau de rayonnement était monochromatique).

— Atténuation physique :

Réduction d'une grandeur liée au rayonnement lors du passage de ce rayonnement à travers la matière, résultant de tous les types d'interaction avec la matière. La grandeur liée au rayonnement peut être, par exemple, le débit de fluence des particules ou le débit d'exposition.

— Bonne géométrie :

Expression employée quand les conditions géométriques d'un dispositif expérimental, par exemple : dimensions de la source, ouverture angulaire du détecteur, sont telles que le détecteur n'est atteint que par le rayonnement considéré.

II - EXPÉRIMENTATION

A - But

L'idéal, pour l'exploitation rationnelle d'un dosimètre photographique, serait de pouvoir considérer la densité optique lue sur une émulsion derrière un filtre donné comme l'image, dans une transformation intégrale sur l'énergie, de l'exposition du dosimètre aux différentes énergies de rayonnement possibles.

Malheureusement, les méthodes mathématiques précédemment étudiées [6] conduisent à une infinité de solutions; cette difficulté est inhérente à ce genre de problème.

D'après BERMANN et ses collaborateurs [5], en imposant certaines contraintes qui n'ont d'ailleurs pas de sens physique, il serait possible d'envisager une solution unique. Des résultats expérimentaux encourageants ont été obtenus, mais ils ne permettent pas encore une application pratique.

Une expérimentation a donc été réalisée en vue :

- 1) de déterminer exactement les possibilités du dosimètre (ses limites en particulier);
- 2) d'établir des lois mathématiques de réponse des différentes émulsions à travers les différents filtres, lois directement utilisables pour l'exploitation rapide et complète du dosimètre.

Quelques centaines de dosimètres à plusieurs filtres préalablement sélectionnés ont été exposés aux différents rayonnements précités et à des doses variables. Chaque irradiation a été effectuée 5 fois. Plus de 5 000 valeurs de densités optiques

ont été déterminées. Les valeurs moyennes et les écarts-types ont été calculés, permettant d'établir les courbes de réponse et la marge d'erreur dans les étalonnages.

B - RÉSULTATS

Cette expérimentation a permis de dégager les résultats suivants :

a) Résultats qualitatifs : détermination de l'énergie.

1) Les filtres plomb-cuivre (1,0 mm + 0,20 mm) et cuivre (0,20 mm) sont suffisants pour la détermination de l'énergie moyenne des rayonnements en cause.

2) En deçà de 80 keV, le filtre de 0,20 mm de cuivre (page b) peut être utilisé pour déterminer l'énergie moyenne des rayonnements auxquels le dosimètre a été exposé.

A partir de 80 keV, et jusqu'à 200 keV environ, c'est le filtre plomb + cuivre (page c) qui peut être utilisé à cet effet.

La figure 2 permet de comprendre comment on peut y parvenir.

FIG. 2. — Courbes permettant la détermination de l'énergie des rayonnements au-dessous de 200 keV.

Dans la figure 2-a, on a porté en ordonnées $D.O.a - D.O.c$ en fonction de $D.O.b - D.O.c$ portées en abscisses, pour un rayonnement d'énergie déterminée inférieure ou égale à 140 keV. La courbe obtenue est sensiblement une droite

pour les densités optiques inférieures à 1,5. On peut constater qu'à partir de 80 keV, les courbes se confondent presque, elles deviennent donc inutilisables.

Dans la figure 2-b, c'est $D.O._a - D.O._c$ que l'on a portées en ordonnées, en fonction de $D.O._c$ en abscisses, pour chaque énergie de rayonnement comprise entre 80 et 200 keV.

Ces courbes sont les mêmes pour les deux émulsions (moyenne et lente) utilisables pour la dosimétrie des rayonnements de basse énergie.

En les répétant pour différentes énergies, on obtient des tranches telles que le montrent les zones délimitées par les pointillés. C'est l'expérience qui permet de délimiter ces tranches.

Sur la figure 2, on n'a représenté que quelques-unes de ces tranches, pour plus de clarté; on peut cependant en augmenter le nombre autant qu'on le désire.

En d'autres termes, si l'on pose :

$$x = D.O._b - D.O._c \quad (\text{cas de la figure 2-a})$$

ou :

$$x = D.O._c \quad (\text{cas de la figure 2-b})$$

et

$$y = D.O._a - D.O._c \quad \text{on a :}$$

$$y = ax \quad \text{où} \quad a = f(\bar{E})$$

$\bar{E}$ étant l'énergie moyenne du rayonnement et a étant indépendant de l'exposition.

Pour l'exploitation, il suffit de déterminer a pour en déduire $\bar{E}$.

En fait, les courbes de la figure 2 n'étant pas rigoureusement des droites, on ne peut déterminer que 2 valeurs limites de a , a_1 et a_2 avec $a_1 \leq a \leq a_2$.

C'est l'expérience qui permet de déterminer les valeurs a_1 et a_2 correspondant à chaque énergie moyenne.

Les valeurs de a_1 et de a_2 sont très voisines pour les énergies inférieures à 140 keV.

3) Au-delà de 200 keV environ, la réponse du dosimètre est pratiquement stabilisée : elle ne dépend plus de l'énergie.

b) Résultats quantitatifs : détermination de la dose.

Après qu'une série de dosimètres aient été exposés à un rayonnement d'énergie moyenne donnée, à des doses différentes, il est possible d'établir, pour chaque émulsion, les courbes de réponse des plages a (fenêtre) et c (plomb + cuivre).

La figure 3 représente ces courbes pour l'émulsion de moyenne sensibilité, à 30 keV, 80 keV et 1,25 MeV.

Nous constatons que :

— pour 30 keV, la réponse de la plage (a) dénote une grande sensibilité, la réponse de la plage (c) demeure pratiquement nulle jusqu'à 1 R.

— pour 80 keV, la réponse de la plage (a) est inférieure à la précédente, tandis que celle de la plage (c) n'est plus négligeable.

— pour 1,25 MeV, les réponses des plages (a) et (c) sont pratiquement identiques [du fait du rayonnement β rétrodiffusé par le plomb, la réponse de (c)

est très légèrement supérieure à celle de (a)]. De plus, et nous utiliserons cette propriété, nous pouvons voir que les réponses de la plage (c) sont pratiquement

FIG. 3. — Courbes de réponse du dosimètre pour 3 énergies différentes. Emulsion de moyenne sensibilité.

identiques, également, pour 80 keV et 1,25 MeV. Pour l'émulsion considérée, cette réponse est d'ailleurs trop faible pour être utilisée, entre 0 et 1 R, c'est celle de l'émulsion rapide qui va pouvoir servir.

La figure 4 représente les courbes de réponse de l'émulsion rapide, également pour 30 keV, 80 keV et 1,25 MeV et dans la gamme de 0 à 1 R.

Fig. 4. — Courbes de réponse du dosimètre pour 3 énergies différentes. Emulsion rapide.

Nous voyons que, pour des énergies de l'ordre de 30 keV, cette émulsion est inutilisable.

Par contre, à 80 keV, la réponse de la plage ϵ peut être utilisée.

A 1,25 MeV, nous retrouvons les classiques courbes de réponse pratiquement identiques pour les plages *a* et *c*.

FIG. 5. — Courbes de réponse du dosimètre pour 3 énergies différentes. Emulsion lente.

De plus, et ce fait est très intéressant, les réponses de la plage *c* sont encore pratiquement identiques pour 80 keV et 1,25 MeV.

La troisième émulsion (l'émulsion lente) présente la même propriété (fig. 5), si bien que, entre 80 keV et 1,25 MeV, il est possible de n'utiliser qu'une seule

courbe d'étalonnage. Pour des raisons de commodité, c'est la courbe d'étalonnage au cobalt 60 qui est utilisée.

III - PRINCIPE DE LA MÉTHODE D'EXPLOITATION DU DOSIMÈTRE

Compte tenu de ce qui précède, la méthode d'exploitation du dosimètre va suivre le canevas ci-après :

1) RECHERCHE DES ÉNERGIES DES RAYONNEMENTS

Trois cas sont possibles :

- a) Le dosimètre a été irradié uniquement par des rayonnements γ d'énergie ≥ 200 keV.
 - b) Le dosimètre n'a été exposé qu'à des rayonnements X d'énergie < 200 keV.
 - c) Le dosimètre a été exposé à ces deux sortes de rayonnements.
- a) *Premier cas : énergie ≥ 200 keV.*

C'est le cas le plus simple, la réponse des trois plages a , b et c de chacune des trois émulsions I, II et III est la même, à très peu de chose près (tableau II-1).

C'est alors la courbe d'étalonnage de la plage c qui permet de remonter à l'exposition et l'on sait, en outre, puisque $D.O._a \neq D.O._b \neq D.O._c$, que l'énergie du rayonnement responsable de cette exposition est supérieure à 200 keV. On utilise ici la plage c (plage sous plomb) parce que, lors des étalonnages, c'est la plage où le rayonnement diffusé intervient le moins.

- b) *Deuxième cas : énergie < 200 keV.*

Ici, les réponses des plages a , b et c sont différentes (tableaux II-2 et II-3).

L'emploi des courbes de la figure 2-a permet de déterminer la bande d'énergie concernée au-dessous de 80 keV (c'est, de loin, le cas le plus général).

Les courbes de la figure 2-b permettent de déterminer les énergies comprises entre 80 et 200 keV (dans la pratique, ce cas est très rare, et on peut dire que ces courbes interviennent très peu).

- c) *Troisième cas : énergies diverses (tableau II-4).*

C'est, apparemment, le cas le plus complexe.

Toutefois, il suffit d'effectuer, l'une après l'autre, les opérations de b) et de a) pour trouver les énergies moyennes des rayonnements responsables du noircissement des émulsions.

Comment se présente le dosimètre ? Les densités optiques des plages a , b et c sont significativement différentes.

Nous savons (paragraphe III 1-a) que les rayonnements d'énergie supérieure à 200 keV provoquent pratiquement les mêmes densités optiques sur les plages a ,

TABLEAU II

ASPECT DES PLACES *a*, *b* et *c*, POUR UNE ÉMULSION DONNÉE, DANS LES DIFFÉRENTS CAS POSSIBLES 1) : $E \geq 200 \text{ keV}$

$$D.O_a \approx D.O_b \approx D.O_c$$

2) : $E < 80 \text{ keV}$

$$D.O_a \neq D.O_b \neq D.O_c$$

$$D.O_c \approx 0$$

3) : $80 \text{ keV} < E < 200 \text{ keV}$

$$D.O_a \approx D.O_b \neq D.O_c$$

$$D.O_c \neq 0$$

4) Mélange d'énergies

$$D.O_a \neq D.O_b \neq D.O_c$$

$$D.O_c \neq 0$$

b et *c*. Par conséquent, lorsqu'on utilise les courbes de la figure 2-*a*, on élimine systématiquement la contribution de ces rayonnements. Ils ne sont donc pas gênants pour la recherche de l'énergie des rayonnements X au-dessous de 80 keV.

La figure 2-*b*, quant à elle, permet de situer les énergies comprises entre 80 et 200 keV, mais avec une précision nettement moins grande.

2) DÉTERMINATION DE L'EXPOSITION

Une fois l'énergie connue, on calcule l'exposition correspondante, non pas au moyen d'une courbe d'étalonnage qui concernerait uniquement la plage (*a*), mais au moyen de la courbe d'étalonnage (*a* — *c*). Là encore, cela permet d'éliminer systématiquement la contribution de rayonnements d'énergie supérieure à 200 keV.

L'énergie X et l'exposition correspondante étant connues, on calcule (au moyen des courbes d'étalonnage mentionnées au paragraphe II-A) la densité optique correspondante de la plage *c*.

Si cette densité optique est égale à la densité optique attendue, on en conclut qu'il n'y avait pas d'autre rayonnement.

Si elle est supérieure, la différence est due à un rayonnement d'énergie supérieure à 200 keV et il ne reste plus qu'à calculer, au moyen de la courbe d'étalonnage établie avec le cobalt 60, l'exposition correspondante.

En résumé, dans ce cas, les résultats obtenus sont les suivants :

- énergie moyenne des rayonnements X d'énergie < 200 keV, avec l'exposition correspondante,
- exposition due à des rayonnements d'énergie ≥ 200 keV.

Les énergies (surtout les basses) étant connues, les expositions correspondantes également, il devient possible de calculer avec une bonne approximation les doses vraiment absorbées par l'organisme tout entier ou une partie de celui-ci.

IV - APPLICATIONS

L'exploitation des dosimètres peut être réalisée de trois façons différentes :

1) EXPLOITATION « MANUELLE »

Toutes les opérations mentionnées ci-dessus peuvent être effectuées facilement sans le concours de moyens électroniques de calcul.

L'exploitation d'un dosimètre dure de trois à cinq minutes suivant l'expérience de la personne qui la réalise (développement non compris, bien entendu).

Dans ce cas, pour autant que l'on ait affaire à une personne suffisamment compétente, les résultats obtenus sont précis et sûrs.

De nombreux dosimètres ont pu être ainsi exploités, toutefois, la durée des opérations est trop élevée, aussi a-t-il été nécessaire d'envisager l'emploi des moyens modernes de calcul.

2) EXPLOITATION SUR ORDINATEUR

La difficulté principale de l'emploi de l'ordinateur réside dans la nécessité de prévoir tous les cas éventuels d'irradiation du dosimètre et de tenir compte des possibles fluctuations de réponse de ce dernier.

Par ailleurs, il ne faut pas mobiliser la machine très longtemps.

C'est avec ce double souci que la méthode, dont le principe a été décrit plus haut, a été adaptée et programmée.

Il ne saurait être question ici de décrire toutes les phases du programme dont l'organigramme figure en annexe 1.

Une particularité importante mérite toutefois d'être signalée : il s'agit de la forme sous laquelle sont introduites les courbes d'étalonnage.

Ces dernières peuvent être décrites par de nombreuses fonctions mathématiques. La plus courante est un polynôme. L'emploi de ce dernier nécessite le calcul périodique des coefficients, ce qui n'est pas très pratique.

Nous avons choisi une autre fonction particulièrement maniable.

L'expérimentation, en effet, a permis d'établir et de vérifier que, pour toutes les plages du dosimètre, une relation telle que :

$$\lg D.O. = K \lg \text{Exposition} \quad (1)$$

où K est une constante.

Toutefois, et c'est important, cette propriété n'est vérifiée qu'entre certaines limites.

Si nous appelons X l'exposition et Y la densité optique correspondante, la fonction (1) peut s'écrire sous la forme :

$$Y = Y_0 \left(\frac{X}{X_0} \right)^A \quad (2)$$

avec :

$$A = \frac{\lg Y_1/Y_0}{\lg X_1/X_0}$$

où Y_1 et Y_0 représentent les deux valeurs limites (inférieure et supérieure) de la densité optique et où X_0 et X_1 représentent les deux valeurs limites des expositions correspondantes.

De cette façon, on introduit à la fois la courbe d'étalonnage et sa limite de validité ce qui permet de simplifier les opérations et d'éviter certaines erreurs.

Un tableau des premiers résultats obtenus est donné en annexe 2.

3) EXPLOITATION PAR CALCULATRICE DE BUREAU

Les courbes d'étalonnage pouvant être décrites par l'expression mathématique indiquée ci-dessus, on sait que les petites calculatrices programmables de bureau de modèle récent se prêtent particulièrement bien aux opérations à effectuer. Cela permet d'envisager, au cas où l'on voudrait éviter d'utiliser l'ordinateur (urgences) de ramener de quelques minutes à quelques secondes le temps d'exploitation d'un dosimètre.

IV - DISCUSSION

Il est essentiel de retenir que le présent travail tient le plus grand compte des véritables possibilités du dosimètre concerné, en particulier de ses imperfections. A cet égard, nous pouvons dire que si l'émulsion lente du dosifilm était remplacée par deux émulsions couvrant mieux la gamme d'exposition correspondante, une des principales imperfections du dosimètre serait supprimée.

Examinons maintenant la valeur exacte des informations obtenues.

A - DÉTERMINATION DE L'ÉNERGIE

Il est toujours important, certes, de connaître l'énergie du rayonnement en cause. Toutefois, c'est surtout vers les faibles valeurs que sa connaissance prend toute son importance, car elle permet alors de différencier les doses « à la peau » des doses plus profondes.

La méthode préconisée (figure 2-a) permet de déterminer cette énergie avec une grande précision (à ± 5 keV près), au-dessous de 80 keV, même si un autre rayonnement d'énergie supérieure ou égale à 200 keV est simultanément en cause.

Les risques d'irradiation, en France, étant pour environ 75 % d'origine radiologique, le même pourcentage de cas possibles d'irradiation est ainsi couvert dans de bonnes conditions. (Pour les personnes que nous contrôlons, ce pourcentage s'élève d'ailleurs à 90 %).

Entre 80 et 200 keV, la détermination de l'énergie est nettement moins précise (comme on peut le voir en examinant la figure 2-b). Dans le cas où un dosimètre est exploité individuellement, l'énergie ne peut être déterminée qu'à ± 15 keV près, dans le cas de l'exploitation par ordinateur seulement à ± 30 keV près. Cela, en fait, n'est pas très gênant du point de vue de la radioprotection, pour deux raisons principales :

- 1) Il est encore difficile, en radiobiologie de faire la différence entre les dommages causés par un rayonnement de 80 keV et un de 200 keV.
- 2) Cet intervalle d'énergie ne se retrouve qu'exceptionnellement dans les cas pratiques d'irradiation accidentelle (fréquence inférieure à 0,1 %).

C'est pourquoi nous n'avons pas jugé utile d'affiner la méthode de détermination de l'énergie par l'ordinateur à ce niveau, bien que cela soit très possible. Toutefois, si l'utilité venait à s'en faire sentir, quelques modifications du programme permettraient de remédier à cet inconvénient.

Enfin, il reste environ 25 % des risques d'irradiation qui sont d'origine nucléaire.

Les énergies en cause, dans ce cas, sont le plus souvent nettement supérieures à 200 keV. La réponse du dosimètre en fonction de l'énergie étant stabilisée à partir de cette valeur, tout ce que l'on peut dire, en cas d'irradiation, est que l'énergie en cause est supérieure à 200 keV.

Deux remarques, encore, nous paraissent intéressantes :

a) D'une façon très générale, la réponse du dosimètre est la même avec des spectres X étroits qu'avec des spectres larges. Cela nous permet d'utiliser, pour nos irradiations, des spectres larges qui correspondent mieux à la réalité pratique.

b) Nous avons vérifié qu'en cas d'irradiation par des rayonnements X de différentes énergies, si ces dernières ne sont pas exagérément éloignées les unes des autres, la réponse du dosimètre est sensiblement la même que s'il avait été exposé à un rayonnement dont l'énergie serait la moyenne des précédentes, pour une même exposition, bien entendu.

Cette dernière remarque rejoint en fait la précédente.

B - DÉTERMINATION DE L'EXPOSITION

La connaissance de l'énergie, utile en soi pour les raisons déjà évoquées, permet en outre de s'adresser à la bonne courbe d'étalonnage lors du calcul de l'exposition.

Cette dernière peut donc être déterminée avec la plus grande précision possible.

Cette précision, de l'ordre de 5 à 10 % pour le traitement individuel d'un dosimètre, ne tombe jamais (même dans les cas les plus défavorables, d'ailleurs très rares) au-dessous de 20 % pour le traitement par ordinateur (voir tableau en annexe 2. Les décimales qui figurent sur ce tableau y sont à titre indicatif, il va de soi qu'en pratique courante, les valeurs doivent être arrondies).

Pourquoi, dans ce dernier cas, la précision est-elle moins grande ? Essentiellement pour deux raisons :

a) La première et la plus importante est qu'il s'agit d'un traitement de l'information entièrement automatique qui doit tenir compte des fluctuations de réponse du dosimètre. Il vaut mieux, dans ces conditions, obtenir un résultat moins précis mais toujours valable, plutôt qu'un résultat plus précis dans la majorité des cas, mais complètement faux dans d'autres cas.

C'est la fiabilité, avant tout, que nous avons recherchée.

b) La deuxième est que, pour conserver un temps raisonnable de mobilisation de l'ordinateur (1/3 de seconde par dosimètre pour la méthode préconisée), il est nécessaire de ne pas faire appel à des recherches opérationnelles sans doute efficaces, mais trop longues.

* * *

CONCLUSION

La méthode de traitement du dosimètre proposée conduit à obtenir, en peu de temps, les renseignements nécessaires au calcul éventuel de la dose absorbée. Elle atteint donc l'objectif réellement intéressant en radioprotection.

Elle se prête, en pratique courante, à l'emploi d'un ordinateur, dans des conditions de précision et de temps très satisfaisantes.

* * *

Elle peut très certainement être perfectionnée ou modifiée pour être adaptée à des cas particuliers précis, comme par exemple l'exploitation du dosimètre à fonctions multiples mis au point par SOUDAIN et PORTAL [15].

A cet égard il est rappelé que si l'on voulait utiliser la méthode mathématique de dépouillement du dosimètre décrite par CALLONEC [6] on aboutirait à une infinité de solutions. Il serait alors raisonnable de penser que la combinaison des deux méthodes permettrait de délimiter la classe des solutions physiquement intéressantes.

* * *

En tout état de cause, la méthode présentée demeure très simple, comme le dosimètre lui-même, donc peu onéreuse et facile à mettre en œuvre.

* * *

ANNEXE I

FIG. DE L'ANNEXE I. — Organigramme significé du traitement des données du dosimètre par ordinateur.

ANNEXE 2

TRAITEMENT PAR ORDINATEUR DES DONNÉES FOURNIES
PAR LE DOSIMÈTRE

Tableau des résultats

Z ₀	Irradiation				Résultats obtenus				Exposition trouvée Exposition réelle	Remarques
	Energie X	Exposition X (röntgens)	Exposition Co (röntgens)	Exposition totale (röntgens)	Energie X (keV)	Exposition X (röntgens)	Exposition Co (röntgens)	Exposition totale (röntgens)		
1	—	0	0,050	0,050	—	0	0,057	0,057	1,14	
2	—	0	0,100	0,100	—	0	0,117	0,117	1,17	
3	—	0	0,150	0,150	—	0	0,172	0,172	1,15	
4	—	0	0,200	0,200	—	0	0,217	0,217	1,08	
5	—	0	0,300	0,300	—	0	0,301	0,301	1,00	
6	—	0	0,500	0,500	—	0	0,483	0,483	0,97	
7	—	0	0,800	0,800	—	0	0,832	0,832	1,04	
8	—	0	1	1	—	0	1,080	1,080	1,08	
9	—	0	5	5	—	0	5,326	5,326	1,07	
10	—	0	10	10	—	0	10,26	10,26	1,03	
11	—	0	20	20	—	0	19,42	19,42	1,03	
12	—	0	100	100	—	0	102	102	1,02	
13	30	0,050	0	0,050	30	0,043	0	0,043	0,86	
14	30	0,075	0	0,075	30	0,061	0	0,061	0,81	
15	30	0,100	0	0,100	30	0,090	0	0,090	0,90	
16	30	0,150	0	0,150	30	0,143	0,012	0,155	1,03	
17	30	0,200	0	0,200	30	0,195	0,012	0,207	1,04	
18	30	0,300	0	0,300	30	0,286	0,026	0,312	1,04	
19	30	0,500	0	0,500	30	0,466	0,034	0,500	1,00	
20	30	1	0	1	30	0,954	0,048	1,002	1,00	
21	30	5	0	5	30	5,172	0,116	5,288	1,06	
22	30	10	0	10	30	10,780	0,182	10,962	1,10	
23	30	12	0	12	30	12,480	0,130	12,610	1,05	
24	30	14	0	14	30	« Dosimètre à interpréter individuellement ».				Hors des limites des courbes utilisées
25	54	0,050	0	0,050	54	0,055	0	0,055	1,10	
26	54	0,075	0	0,075	54	0,084	0	0,084	1,12	
27	54	0,100	0	0,100	54	0,107	0	0,107	1,07	
28	54	0,150	0	0,150	54	0,170	0	0,170	1,13	

N°	Irradiation				Résultats obtenus				Exposition trouvée Exposition réelle	Remarques
	Energie X	Exposition X (röntgens)	Exposition Co (röntgens)	Exposition totale (röntgens)	Energie X (keV)	Exposition X (röntgens)	Exposition Co (röntgens)	Exposition totale (röntgens)		
29	54	0,200	0	0,200	54	0,218	0	0,218	1,09	Très faible dose d'X « noyée » dans une forte dose de Co.
30	54	0,300	0	0,300	54	0,317	0	0,317	1,06	
31	54	0,500	0	0,500	54	0,494	0	0,494	0,99	
32	54	1	0	1	54	0,841	0,053	0,894	0,89	
33	54	5	0	5	54	4,989	0,627	5,616	1,12	
34	54	7	0	7	54	7,350	0,807	8,157	1,16	
35	54	8	0	8	54	8,377	0,740	9,117	1,14	
36	54	9	0	9	54	9,123	0,642	9,765	1,09	
37	30	0,050	0,050	0,100	30	0,043	0,063	0,106	1,06	
38	30	0,100	0,050	0,150	30	0,090	0,062	0,152	1,01	
39	30	0,200	0,050	0,250	30	0,180	0,078	0,258	1,03	
40	30	0,400	0,050	0,450	30	0,381	0,081	0,462	1,03	
41	30	0,800	0,050	0,850	30	0,740	0,086	0,826	0,97	
42	54	0,050	0,050	0,100	54	0,053	0,056	0,109	1,09	
43	54	0,100	0,050	0,150	54	0,110	0,048	0,158	1,05	
44	54	0,200	0,050	0,250	54	0,223	0,051	0,274	1,10	
45	54	0,400	0,050	0,450	54	0,408	0,040	0,448	1,00	
46	54	0,800	0,050	0,850	54	0,699	0,054	0,753	0,89	
47	30	1	0,200	1,200	30	0,899	0,239	1,138	0,95	
48	30	5	0,200	5,200	30	5,073	0,423	5,496	1,06	
49	54	1	0,200	1,200	54	0,890	0,170	1,060	0,88	
50	54	0,050	5	5,050	140	—	—	5,189	1,03	
51	54	0,100	5	5,100	54	0,045	5,116	5,161	1,01	
52	54	5	8	13	54	4,989	7,258	12,247	0,94	
53	54	0,200	10	10,200	54	0,087	9,779	9,866	0,97	
54	54	0,400	10	10,400	54	0,189	9,843	10,032	0,96	
55	54	1	20	21	54	0,745	18,84	19,585	0,93	

ANNEXE 3

Sensibilité spectrale d'une émulsion photographique.

FIG. DE L'ANNEXE 3. — Sensibilité spectrale d'une émulsion photographique.

BIBLIOGRAPHIE

- [1] ADAMS N. The derivation of absorbed tissue doses from the results of personnel dosimetry techniques, Symposium Madrid, 1963, 413-426.
- [2] ALLISY A. La mesure des doses de rayons X ou gamma à l'aide d'émulsions photographiques. *J. Radiol. Electrol.*, 1956 **37**, n° 1-2, 249-252.
- [3] ATTIX F.H. Must personnel dosimeters also serve as gamma - ray energy spectrometers ? *Health Phys.*, 1967, **13**, n° 2, 219-221.
- [4] BECKER K. Capabilities and limitations of the different methods applied in personnel dosimetry. Symposium Madrid, 1963, 393-412.
- [5] BERMAN F., CAZIN A., MICHEL M.Th. Etat des recherches sur l'analyse et l'exploitation des données d'un film dosimètre. (Application de la programmation linéaire). C.E.A.-DAM/R; 1968, Rapport 68-06 DO 0011 U.R.
- [6] CALLONEC J.P. Méthode de mathématique de dépouillement des films dosimétriques. LCA 1970, Etude n° 07.1, Note n° 143/ET.
- [7] DUHAMEL F., SOUDAIN G. Expérience passée et pratique actuelle de la dosimétrie par films. Symposium Madrid, 1963, 77-87.
- [8] EHRLICH M. Use of photographic films for personnel dosimetry; basic physical considerations, Symposium Madrid, 1963, 49-74.
- [9] HEARD M.J., JONES B.E. A New film holder for personnel dosimetry. Symposium Madrid, 1963, 89-106.
- [10] KIRCHNER R.A., RYAN T.L. A matrix method for the evaluation of beta-gamma dosimeter film, *Health Physics*, 1967, **13**, n° 7, 809-810.
- [11] LANGMEAD W.A. The place of luminescence dosimetry in the control of occupational hazards for ionizing radiation, *Health Physics*, 1965, **11**, n° 8, 813 (résumé).
- [12] LANGMEAD W.A., ADAMS N. Investigations of the accuracy attained in routine film badge dosimetry. *Health Physics*, 1967, **13**, n° 2, 167-180.
- [13] PEIRSON, D.H. Progress in the automation of photographic dosimetry. Symposium Madrid, 1963, 305-317.
- [14] ROSS D.M. External radiation dosimetry practices in the United States. Symposium Madrid, 1963, 443-453.
- [15] SOUDAIN G., PORTAL G. Caractéristiques d'un dosimètre individuel à fonctions multiples. Note C.E.A., 1966- N-603.
- [16] STORM E., SHLAER S. Development of energy - independant film badges with multielement filters. *Health Phys.*, 1965, **11**, n° 11, 1127-44.
- [17] TAIT G.W.C. A simple photographic film dosimeter of low energy dependance. *Health Phys.*, 1970, **15**, n° 3, 289-293.
- [18] WENG P.S. et coll. The investigation of occupational exposure on Taiwan (1961-1966). *Health Phys.*, 1968, **1**, n° 4, 357-359.
- [19] WINKLER K.G., LEVIN S.G. A film method for estimating peak kilovoltage, total filtration, and roentgen output of self-rectified dental X - ray machines. *Health Phys.*, 1966, **12**, n° 3, 345-352.