Calcul de l'irradiation externe dans une mine d'uranium

N. FOURCADE-CANCELLE (*)

(Manuscrit reçu le 5 mars 1975)

RÉSUMÉ

Le débit de dose mesuré au centre d'une galerie creusée dans un minerai à 1 p. mille d'uranium était estimé, en moyenne, à 0,5 mrad/h. On se propose ici de vérifier cette valeur par le calcul en tenant compte de la géométrie des sources et des principaux émetteurs de la famille de l'uranium.

On a calculé le débit de dose par irradiation externe dans deux cas types :
— dans une galerie cylindrique de 50 m de long et de 2 m de diamètre;
— dans une carrière à ciel ouvert de 50 m de long constituée par une paroi verticale de 2 m de haut et par une plate-forme de 8 m de large.

On a ainsi calculé les débits de dose à proximité des parois en tenant compte des différents rayonnements γ et β émis soit par les parois, soit par le radon diffusé dans l'atmosphère, soit par la poussière de minerai déposée sur la peau. Les valeurs obtenues par le calcul sont proches des valeurs mesurées. La contribution des rayonnements dépend du mode d'irradiation; ainsi, devant les parois de grande épaisseur, l'irradiation est due principalement aux rayonnements γ , tandis qu'en atmosphère contaminée de radon ou dans le cas de contamination cutanée, les rayonnements β prédominent.

SUMMARY

The dose rate measured at the centre of a tunnel excavated in an ore at 1 p. thousand of uranium was assessed to average 0.5 mrad/h. This value was verified by calculations taking account of the source geometries and the main emitters of the uranium family. The dose rate from external exposure was calculated for two typical cases:—in a cylindrical tunnel (length = 50 m,

(*) Commissariat à l'Énergie atomique, Département de Protection, Service technique d'Études de Protection et de Pollution atmosphérique, B.P. n° 6, 92260 Fontenay-aux-Roses.

diameter: 2 m);—in an open quarry 50 m long, with a vertical wall, 2 m high, and a platform, 8 m wide. The dose rates were calculated close to the walls, taking account of the various γ and β radiation emitted either by the walls or by atmospheric radon or by the ore dust deposited on the skin. The calculated values were close to the measured values. The radiation contribution depends on the conditions of exposure; exposure is mainly due to γ radiation close to very thick walls whereas β radiation is prevailing in a contaminated atmosphere or in the case of skin contamination.

Pour estimer l'irradiation externe à laquelle on peut s'attendre dans une mine d'uranium on utilise couramment une relation simple tirée de mesures faites sur place il y a déjà de nombreuses années : au centre d'une galerie creusée dans un minerai à 1 p. mille le débit de dose est de 0,5 mrard/h [1].

FIG. 1. — Schéma de la galerie.

FIG. 2. — Schéma de la carrière.

(a) Les débits de dose ont été calculés dans le plan de symétrie.

Les conditions de telles mesures étant souvent incertaines, on s'est proposé ici de vérifier cette règle empirique en calculant le débit de dose reçu des parois dans deux cas types, assez représentatifs de cas réels (fig. 1 et 2) :

— dans une galerie cylindrique de 50 m de long et de 2 m de diamètre creusée dans un minerai de grande épaisseur et à teneur uniforme de 1 p. mille;

— dans une carrière à ciel ouvert, de 50 m de long, constituée par une paroi verticale de 2 m de haut et par une plate-forme horizontale de 8 m de large.

En même temps on a calculé :

— l'irradiation externe résultant d'une concentration atmosphérique de 1.10^{-7} Ci/m³ en radon;

— l'irradiation produite par une contamination cutanée de 10^{-6} μ Ci/cm² en poussières de minerai.

PRINCIPAUX RÉSULTATS

TABLEAU I

DÉBIT DE DOSE PRODUIT PAR DU MINERAI D'URANIUM A 1 P. MILLE.

Débit de dose en mrad/h	γ	β	Total
reçu des parois par les tissus profonds (a) au centre de la galerie	0,65	0,12	0,77
reçu des parois par les tissus profonds, dans la carrière, à 1 mètre du mur et du sol	0,5	0,12	0,62
reçu par les tissus profonds, d'une concentration atmosphérique en radon égale à 1 CMA (10^{-7} Ci/m ³)	$1,2.10^{-3}$	$1,5.10^{-2}$	$1,6.10^{-2}$
reçu par la peau, d'une contamination cutanée de 10^{-6} μ Ci/cm ² en poussières de minerai	$6,8.10^{-5}$	$6,5.10^{-3}$	$6,6.10^{-3}$

(a) c'est-à-dire sous 300 mg/cm²

Dans ce tableau, le débit de dose reçu des parois de la galerie ou de la carrière est celui qui atteindrait un dosimètre porté sur le vêtement. Son calcul tient compte de l'atténuation par le corps d'une partie des rayonnements émis. L'expérience montre que les valeurs de débit de dose calculées sont presque toujours un peu supérieures (d'environ 20 p. cent) aux valeurs mesurées. La règle rappelée au début de cette note donne donc de façon particulièrement simple et commode une bonne approximation. Les tableaux II et III donnent les valeurs du débit de dose γ reçu des parois par l'organisme entier en d'autres emplacements dans la section médiane ou dans la carrière :

TABLEAU II

DÉBIT DE DOSE A DIFFÉRENTES HAUTEURS DANS LA GALERIE

Hauteur au-dessus du sol (en cm)	Débit de dose γ (en mrad/h)
100 (= R)	0,65
70	0,65
50	0,69
30	0,76
10	0,92
5	1,08

TABLEAU III

DÉBIT DE DOSE EN DIFFÉRENTS ENDROITS DANS LA CARRIÈRE.

	à 1 m du mur	à 3 m du mur
à 150 cm du sol	0,46 mrad/h	0,46 mrad/h
à 100 cm du sol	0,50 mrad/h	0,47 mrad/h
à 50 cm du sol	0,65 mrad/h	0,63 mrad/h

COMMENTAIRES

1° On trouvera dans les annexes A, B et C les méthodes et les éléments utilisés pour le calcul de ces résultats.

2° La contribution du rayonnement β à la dose reçue des parois par les tissus profonds est assez faible : 15 à 19 p. cent de la dose totale, à 1 m de la paroi. Ce résultat est en bon accord avec les mesures faites sur un bloc de minerai (voir annexe C). La part du rayonnement β augmente légèrement — jusqu'à 20 p. cent — quand on se rapproche d'une paroi.

3° Par contre, la dose délivrée sous la peau par le radon atmosphérique (supposé en équilibre avec ses descendants) est due pour les 9/10^e au rayonnement β . Mais cette dose, pour 1 CMA de radon, est plus de dix fois inférieure à la dose provenant des parois.

4° Nous avons supposé que la galerie avait 2 m de diamètre et 50 m de long. Mais on peut voir dans l'annexe A que les résultats sont pratiquement indépendants du diamètre de la galerie et qu'ils ne changeraient pas si sa longueur devenait infinie.

5° La densité du minerai supposée pour nos calculs est de 2,6. Si cette densité augmentait sans que la composition massique change, le débit de dose resterait le même car l'intensité de source surfacique S_A est égale à S_v/μ_s (voir

FICHE D'INFORMATION

CHAMBRE A GRILLE POUR SPECTROMETRIE ALPHA

• RESOLUTION GARANTIE : 25 KeV SUR 5 MeV

• SURFACE : 5000 mm²

• LIMITE DE DETECTION : 10 FEMTOCURIES DE PLUTONIUM 239 ($10 \cdot 10^{-15}$ CURIES)

SPECIFICATIONS

Chambre

Géométrie 2π	
Diamètre maximal	: 80 mm (surface 5000 mm ²)
Temps de collection	: 0,5 μ s
Bruit de fond	: 2 coups par heure à 4 et 6 MeV
Gaz argon méthane (à 10% de CH ₄)	
Bouteilles	: 10 m ³
Pression	: 0,5 à 1,2 kg/cm ²
Débit après dégazage	
initial	: 6 litres/heure

Préamplificateur (PNU 14 inclus dans NU 14-B)

Transistor d'entrée à effet de champ	: > 10 ¹² Ω
Bruit équivalent à l'entrée	: 0,6 μ V
Bruit à mi-hauteur	: < 17 KeV
Bruit en nombre d'électrons injectés à l'entrée	~ 2000
Impédance d'entrée	: 50 Ω
Sortie négative	: 200 mV
Temps de montée	: 0,5 μ s
Temps de descente	: 30 μ s
Alimentations	: + 24 V (42 mA)
	– 24 V (27 mA)

annexe A) où S_v (intensité de source volumique) et μ_s (coefficient macroscopique d'absorption γ du minerai) sont tous deux proportionnels à la densité.

En réalité, lorsque la teneur du minerai augmente, la densité augmente mais la composition massique change avec l'enrichissement en uranium; le coefficient massique d'absorption γ de l'uranium étant plus fort que celui de la silice, cet enrichissement conduit, en fait, à une augmentation de μ_s un peu plus rapide que celle de S_v , donc à une légère diminution de S_A . Par exemple, avec un minerai à 30 p. cent on a une densité de 3,5 et un débit de dose, pour une teneur ramenée à 1 p. mille, inférieur de 9 p. cent au débit de dose calculé avec le minerai de densité 2,6.

On commet donc une légère erreur par excès dans l'estimation du débit de dose rapporté à la teneur de 1 p. mille quand on admet que le débit de dose ne change pas lorsque la densité augmente.

ANNEXE A

CALCUL DE L'IRRADIATION EXTERNE
PAR LE RAYONNEMENT γ

TABLEAU IV
PRINCIPAUX ÉMETTEURS γ DE LA FAMILLE DE L'URANIUM.

Emetteurs	Photons émis [2]		Nombre de photons émis par seconde pour 1 kg d'U nat. (a)
	énergie en MeV	%	
^{238}U	0,048	23	$2,82 \cdot 10^6$
^{234}Th	0,09	15	$1,85 \cdot 10^6$
	0,06	6,5	$8 \cdot 10^5$
	0,03	6,5	$8 \cdot 10^5$
			$8 \cdot 10^5$
$^{234\text{m}}\text{Pa}$ [3]	1,83	0,3	$3,7 \cdot 10^4$
	1,01	1,5	$1,85 \cdot 10^5$
	0,8	0,16	$1,97 \cdot 10^4$
	0,77	0,87	$1,07 \cdot 10^5$
^{226}Ra	0,186	4	$4,9 \cdot 10^5$
^{222}Rn	0,325	4	$4,9 \cdot 10^5$
^{214}Pb	0,295	19	$2,34 \cdot 10^6$
	0,352	36	$4,43 \cdot 10^6$
^{214}Bi	0,609	47	$5,8 \cdot 10^6$
	0,769	5	$6,15 \cdot 10^5$
	0,935	3	$3,7 \cdot 10^5$
	1,12	17	$2,1 \cdot 10^6$
	1,238	6	$7,4 \cdot 10^5$
	1,378	5	$6,1 \cdot 10^5$
	1,4	4	$4,9 \cdot 10^5$
	1,509	2	$2,4 \cdot 10^5$
	1,728	3	$3,7 \cdot 10^5$
	1,764	17	$2,1 \cdot 10^6$
	1,848	2	$2,4 \cdot 10^5$
	2,117	1	$1,2 \cdot 10^5$
	2,204	5	$6,2 \cdot 10^5$
	2,445	2	$2,5 \cdot 10^5$
^{235}U	0,14	4	$2,3 \cdot 10^4$
	0,185	54	$3 \cdot 10^5$
	0,204	5	$2,8 \cdot 10^4$
^{231}Pa	0,29	6	$3,4 \cdot 10^4$
^{227}Th	0,24	15	$8,5 \cdot 10^4$
	0,3	8	$4,5 \cdot 10^4$
^{223}Ra	0,15	10	$5,7 \cdot 10^4$
	0,3	16	$9 \cdot 10^4$
^{211}Pb	0,4	5,2	$3 \cdot 10^4$
	0,8	4,4	$2,5 \cdot 10^4$
^{211}Bi	0,35	14	$7,9 \cdot 10^4$
^{211}Po	0,57	0,5	$2,8 \cdot 10^3$
	0,9	0,5	$2,8 \cdot 10^3$

(a) on suppose que l'uranium est en équilibre radioactif avec ses produits de filiation et que tous ceux-ci, y compris le radon et ses descendants, se trouvent dans le minéral.

Pour la commodité du calcul on peut, sans commettre d'erreur par défaut, réduire cet ensemble à cinq groupes d'énergie :

TABLEAU V
ÉMISSIONS, PAR GROUPES D'ÉNERGIE.

Energie moyenne MeV	Nombre de photons émis par seconde	
	par kg d'U nat.	par cm ³ de minerai (densité : 2,6 teneur : 1 p. mille)
0,15	$2,5 \cdot 10^6 \gamma \cdot s^{-1}$	$S_v = 6,5 \gamma \cdot s^{-1} \text{ cm}^{-3}$
0,3	$7,6 \cdot 10^6$	$1,93 \cdot 10^1$
0,6	$6,4 \cdot 10^6$	$1,66 \cdot 10^1$
1,1	$4,1 \cdot 10^6$	$1,07 \cdot 10^1$
1,8	$4,5 \cdot 10^6$	$1,17 \cdot 10^1$

1. IRRADIATION PAR LES PAROIS

MODE DE CALCUL

La masse de minerai dans laquelle est creusée la galerie ou la carrière est une source de grande épaisseur, limitée par une paroi, d'intensité volumique S_v et de coefficient d'absorption μ_s . Elle est équivalente à une source superficielle d'intensité surfacique $S_A = S_v/\mu_s$ [9, p. 305].

La paroi cylindrique de la galerie est formée de $2\pi R$ bandes parallèles à son axe, de 50 m de long et de 1 cm de large. Chacune de ces bandes constitue une source linéaire d'intensité linéique $S_L = S_A \times 1 \text{ cm}$, ce qui produit à une distance a de son milieu un flux :

$$\varphi = \frac{S_L}{2\pi a} \theta \quad [3, \text{p. } 367], \quad (1)$$

où θ est l'angle de tangente $L/2a$. Au centre de la galerie ($a = R$) le flux provenant de toute la paroi, c'est-à-dire, des $2\pi R$ bandes, est alors :

$$\varphi = S_L \theta. \quad (2)$$

De même, dans la carrière, le mur et la plate-forme sont décomposés en n bandes étroites, de 50 m de long et de largeur d , chacune constituant une source linéaire d'intensité linéique $S_L = S_A \times d$ et distante de a du point M considéré. Il en résulte en M un flux total :

$$\varphi = \sum_{i=1}^n \frac{S_L}{2\pi a_i} \theta_i. \quad (3)$$

En toute rigueur, il faudrait tenir compte de l'absorption par l'air, ce qui donnerait pour expression du flux :

$$\varphi = B \frac{S_L}{2\pi a} F(\theta, b) \quad [4, \text{p. 348}], \quad (4)$$

où b est le produit $a \times \mu$, μ étant le coefficient d'absorption du milieu d'épaisseur a (ici, ce milieu est l'air) et B le « build up ».

Mais comme μ est faible, l'absorption par l'air est négligeable aux petites distances a . Ainsi, pour a inférieur ou égal à 3 m, les expressions (1) et (4) donnent le même résultat; pour une distance a de 5 m, l'expression (1) surestime le débit de dose de 10 p. cent et de 15 p. cent si a égale 10 m.

On le vérifie dans le tableau VII où sont données les valeurs de θ et de $F(\theta, b)$ en fonction de a .

Avec un ensemble de sources élémentaires — cas de l'expression (3) — où a_i varie de 1 à 7 m, le débit de dose dû aux sources i dont les distances a_i sont supérieures à 4 m représente seulement 10 p. cent du débit de dose total; l'utilisation de l'expression simple (3) n'entraîne donc qu'une très faible erreur (de l'ordre de quelques p. cent).

La dose que nous considérons est celle qu'indiquera un dosimètre porté sur la poitrine. Dans la galerie, ce dosimètre voit directement une moitié de la source et voit l'autre moitié à travers le corps, qu'on peut assimiler à un écran de 20 cm d'eau. L'expression (2) devient alors :

$$\varphi = S_L \theta \left(\frac{1}{2} + \frac{1}{2} B e^{-b} \right), \quad (5)$$

$B e^{-b}$ est le facteur d'atténuation par l'écran d'eau; sa valeur est très voisine de 0,7 pour les cinq groupes d'énergie retenus.

Dans la carrière, seule une partie du sol est masquée par le corps. Si on voit directement x sources lignes élémentaires, l'expression (3) devient :

$$\varphi = \sum_{i=1}^x \frac{S_L}{2\pi a_i} \theta_i + \sum_{i=x+1}^n \frac{S_L}{2\pi a_i} \theta_i B e^{-b}. \quad (6)$$

C'est, en définitive, à l'aide de ces expressions (5) et (6) que nous calculons le débit de dose donné par les parois. On a, dans les tableaux VI et VII les principaux éléments nécessaires au calcul. L'intensité surfacique S_a a été traduite en débit de dose, pour montrer la part de chaque groupe d'énergie dans la dose totale.

TABLEAU VI
INTENSITÉ VOLUMIQUE ET SURFACIQUE.

Energie moyenne MeV	S_V $\gamma.s^{-1} cm^{-3}$ (voir tabl. V)	μ_s cm^{-1}	S_A $= S_V/\mu_s$ $\gamma.s^{-1} cm^{-2}$	rad/h pour $1 \gamma.s^{-1} cm^{-2}$	S_A en rad/h
0,15	6,5	0,77	8,44	$2,6 \cdot 10^{-7}$	$2,2 \cdot 10^{-6}$
0,3	19,7	0,30	65,6	$5,4 \cdot 10^{-7}$	$3,7 \cdot 10^{-5}$
0,6	16,6	0,21	79	$1,1 \cdot 10^{-6}$	$8,7 \cdot 10^{-5}$
1,1	10,7	0,16	67	$1,85 \cdot 10^{-6}$	$1,24 \cdot 10^{-4}$
1,8	11,7	0,12	97,5	$2,7 \cdot 10^{-6}$	$2,63 \cdot 10^{-4}$

TABLEAU VII
VALEURS DE b ET $F(\theta, b)$ EN FONCTION DE LA DISTANCE A LA SOURCE.

Energie moyenne MeV	μ air en cm^{-1} [7]	$a = 2$ m $\theta = 86^\circ$ $\theta = 1,49$ radian		$a = 3$ m $\theta = 83^\circ$ $\theta = 1,45$ radian		$a = 5$ m $\theta = 78^\circ 5$ $\theta = 1,37$ radian		$a = 10$ m $\theta = 68^\circ$ $\theta = 1,19$ radian	
		b	F(θ ,b)	b	F(θ ,b)	b	F(θ ,b)	b	F(θ ,b)
0,15	$1,74 \cdot 10^{-4}$	$3,48 \cdot 10^{-2}$	# 1,5	$5,2 \cdot 10^{-2}$	1,35	$8,7 \cdot 10^{-2}$	1,20	$1,74 \cdot 10^{-1}$	0,95
0,3	$1,37 \cdot 10^{-4}$	$2,74 \cdot 10^{-2}$		$4,1 \cdot 10^{-2}$	1,35	$6,9 \cdot 10^{-2}$	1,20	$1,37 \cdot 10^{-1}$	0,95
0,6	$1,04 \cdot 10^{-4}$	$2,08 \cdot 10^{-2}$		$3,12 \cdot 10^{-2}$	1,35	$5,2 \cdot 10^{-2}$	1,25	$1,04 \cdot 10^{-1}$	1
1,1	$7,8 \cdot 10^{-5}$	$1,56 \cdot 10^{-2}$		$2,34 \cdot 10^{-2}$	1,40	$3,9 \cdot 10^{-2}$	1,30	$7,8 \cdot 10^{-2}$	1,05
1,8	$6 \cdot 10^{-5}$	$1,2 \cdot 10^{-2}$		$1,8 \cdot 10^{-2}$	1,40	$3 \cdot 10^{-2}$	1,30	$6 \cdot 10^{-2}$	1,05
Pour $a = 0,1$ mètre : $\theta \neq 90^\circ$ $F(\theta, b)$ et θ radians = 1,57 $a = 1$ mètre : $\theta \neq 87,5^\circ$ $F(\theta, b)$ et θ radians = 1,53 Les valeurs de b étant très faibles, B est égal à 1									

REMARQUES

1° θ et $F(\theta, b)$ varient très peu lorsque a varie de 0,1 à quelques mètres; en se reportant aux expressions (2) et (4) on voit alors que le débit de dose au centre de la galerie est, dans ces limites, pratiquement indépendant de la valeur du rayon.

2° Nous avons supposé que galerie et carrière étaient longues de 50 m. Si cette longueur devenait infinie, la très faible variation de θ radians ou de $F(\theta, b)$ lorsque θ approche 90° fait que le débit de dose à de faibles distances des parois (inférieures à quelques mètres) n'augmenterait pratiquement pas.

RÉSULTATS

Le débit de dose γ donné par les parois a été calculé en différents points de la section médiane de la galerie et de la carrière.

TABLEAU VIII

IRRADIATION EXTERNE DANS LA GALERIE.

Hauteur au-dessus du sol, en cm	Débit de dose γ en mrad/h
100	0,65
70	0,65
50	0,69
30	0,76
10	0,92
5	1,08

TABLEAU IX

IRRADIATION EXTERNE DANS LA CARRIÈRE.

	à 1 m du mur	à 3 m du mur
à 150 cm du sol	0,46 mrad/h	0,46 mrad/h
à 100 cm du sol	0,50 mrad/h	0,47 mrad/h
à 50 cm du sol	0,65 mrad/h	0,63 mrad/h

2. IRRADIATION EXTERNE PAR LE RADON

Le calcul de l'irradiation en atmosphère contaminée par le radon 222 a été fait en supposant que cet élément et ses produits de filiation étaient en équilibre radioactif et répartis uniformément. Les principaux de ces radio-nucléides figurent dans le tableau X.

A teneur de minerai égale, on peut s'attendre à ce que la concentration en radon soit plus forte et plus uniforme dans l'atmosphère d'une galerie que dans la carrière à ciel ouvert. Aussi, nous bornerons-nous au cas de la galerie et nous supposons que la concentration en radon est de 1 CMA, c'est-à-dire, 10^{-10} Ci/l ou 10^{-7} Ci/m³.

La source se présente comme une source en volume cylindrique, de rayon R égal à 1 m et de longueur $2h$ égale à 50 m. Le débit de dose en son centre se calcule à l'aide de l'expression suivante [3, p. 382] :

$$\phi = \frac{S_v}{2} h \left[\text{Log} \left(1 + \frac{R^2}{h^2} \right) + \frac{2R}{h} \arctan \frac{h}{R} \right]. \quad (7)$$

TABLEAU X

PRINCIPALES ÉMISSIONS DU RADON ET DE SES DESCENDANTS.

Elément	Mode de désintégration		Emission γ	
	α	β		
		E(MeV) %	E(MeV) %	
radon 222	α		0,325	4
polonium 218 (radium A)				
plomb 214 (radium B)		0,65 44	0,242	4
		0,59 56	0,295	19
			0,352	36
bismuth 214 (radium C)		3,26 19	0,609	47
		1,88 9	0,769	5
		1,51 40	0,935	3
		1 23	1,120	17
		0,4 9	1,238	6
			1,378	5
			1,4	4
			1,509	2
			1,728	3
			1,764	17
polonium 214 (radium C')	α		1,848	2
			2,117	1
			2,204	5
			2,445	2
bismuth 210 m		1,17 100		
polonium 210	α			

L'autoabsorption dans l'air est négligée, mais on tient compte de l'absorption par le corps du flux issu de la moitié du volume source.

Comme précédemment, on a rangé les émetteurs γ en cinq groupes d'énergie et on a calculé pour chaque énergie, la valeur de S_0 exprimée directement en millirad par heure pour 10^{-7} Ci de radon par mètre cube.

Au centre de la galerie, la valeur de ϕ est alors de $1,4 \cdot 10^{-3}$ mrad/h; la moitié du flux ϕ étant atténué par un facteur 0,7, le débit de dose est finalement :

$$\phi \left(\frac{1}{2} + \frac{1}{2} \cdot 0,7 \right) = 1,2 \cdot 10^{-3} \text{ mrad/h.}$$

3. IRRADIATION γ PAR CONTAMINATION CUTANÉE

On suppose que la composition de la poussière déposée sur la peau est la même que celle du minerai exploité (teneur de 1 p. mille en uranium) et que l'activité surfacique de cette contamination est de $10^{-6} \mu\text{Ci } \alpha/\text{cm}^2$ (c'est l'ordre de grandeur de ce que l'on regarde habituellement comme limite admissible pour une contamination de surface par des émetteurs α).

Le minerai considéré ayant une activité massique de $1,67 \cdot 10^{-3} \mu\text{Ci/g}$, la masse correspondant à cette contamination est de $0,6 \text{ mg/cm}^2$; c'est une charge surfacique relativement forte, peu susceptible d'être dépassée sur une grande surface de peau et pendant une longue durée.

Cette couche de poussière peut être assimilée à une plaque mince de grandes dimensions, qui donne le flux :

$$\phi = B \frac{S_A}{2} E_1(b_1) \quad [3, \text{p. } 397]. \quad (8)$$

Dans cette expression, $b_1 = \mu x$, μ est le coefficient linéaire d'absorption des tissus traversés (que l'on peut assimiler à de l'eau) et x la profondeur à laquelle on veut calculer le débit de dose. On admet que les rayonnements qui traversent $7 \cdot 10^{-3} \text{ cm}$ (ou 7 mg/cm^2) atteignent la couche basale de l'épiderme et que ceux qui traversent $0,3 \text{ cm}$ (ou 300 mg/cm^2) atteignent les tissus profonds. La valeur de b_1 étant très faible, B est très peu différent de 1.

Le calcul est résumé dans le tableau XI.

TABLEAU XI

DÉBIT DE DOSE ϕ REÇU PAR LA PEAU ET LES TISSUS PROFONDS.

E (MeV)	Photons émis par seconde pour 0,6 mg de minerai (cf. tableau V)	S _A mrad/h	E ₁ (b ₁)		ϕ mrad/h	
			x = 7.10 ⁻³ cm	x = 3.10 ⁻¹ cm	x = 7.10 ⁻³ cm	x = 3.10 ⁻¹ cm
0,15	1,5 .10 ⁻³	3,9 .10 ⁻⁷	6,3	2,6	1,3 .10 ⁻⁶	5 .10 ⁻⁷
0,3	4,56.10 ⁻³	2,46.10 ⁻⁶	6,5	2,8	8,5 .10 ⁻⁶	3,7.10 ⁻⁶
0,6	3,84.10 ⁻³	4,20.10 ⁻⁶	6,8	3	1,43.10 ⁻⁵	6,3.10 ⁻⁶
1,1	2,46.10 ⁻³	4,55.10 ⁻⁶	7,1	3,2	1,63.10 ⁻⁵	7,4.10 ⁻⁶
1,8	2,7 .10 ⁻³	7,30.10 ⁻⁶	7,4	3,6	2,7 .10 ⁻⁵	1,33.10 ⁻⁵
					6,8 .10 ⁻⁵	3,1.10 ⁻⁵

RÉSULTATS

Débit de dose reçu par la peau : $6,8 \cdot 10^{-5} \text{ mrad/h}$.

Débit de dose reçu par les tissus profonds : $3,1 \cdot 10^{-5} \text{ mrad/h}$.

ANNEXE B

CALCUL DE L'IRRADIATION EXTERNE
PAR LE RAYONNEMENT β

L'irradiation par le rayonnement β peut être importante à faible distance; c'est le cas lorsqu'on est tout près d'une source, ou lorsqu'on se trouve dans une atmosphère contaminée, ou encore si la peau est couverte de poussières radioactives.

On trouvera, ci-dessous, les principaux émetteurs β présents dans le minerai d'uranium [2] :

Principaux émetteurs	Energie maximale β en MeV
^{234}Th	0,19
$^{234\text{m}}\text{Pa}$	2,3
^{214}Pb	0,65
^{214}Bi	3,2
^{210}Bi	1,17

Seuls figurent, dans ce tableau, les émetteurs dont les particules β sont susceptibles d'irradier la couche basale de l'épiderme, c'est-à-dire, celle qui se trouve sous une épaisseur de 7 mg/cm^2 . Les particules β perdent 99 p. cent de leur énergie dans la première moitié de leur parcours R [5]; l'irradiation n'est donc significative que si ce parcours est au moins égal à deux fois l'épaisseur-écran à traverser; R doit alors être, dans l'eau, d'au moins 14 mg/cm^2 , ce qui exige une énergie initiale supérieure à $0,09\text{ MeV}$ [8, p. 70]. Parmi ces particules, seules celles dont l'énergie est supérieure à $1,3\text{ MeV}$ ont un parcours, dans l'eau, d'au moins 600 mg/cm^2 , et peuvent alors irradier le cristallin et les tissus profonds situés sous 300 mg/cm^2 .

En un point d'un milieu radioactif suffisamment étendu pour que ses dimensions dans toutes les directions autour du point soient supérieures au parcours maximal des particules, tout se passe comme si le milieu était infini [5]. Il y a équilibre électronique, c'est-à-dire, que l'énergie absorbée dans une certaine masse de la matière constituant le milieu, est égale à l'énergie émise par cette même masse. La dose qui en résulte est donc la dose maximale que l'on puisse trouver dans le milieu source; sa valeur est [5, p. 569] :

$$I(\text{rad/h}) = 2130 C(\text{mCi/g}) \cdot \bar{E}(\text{MeV}),$$

en particulier, quand il s'agit d'un radioélément dont les particules β ont une énergie initiale E_0 variant entre zéro et une valeur maximale E_m et sont distribuées selon un spectre continu.

$\bar{E}$ est l'énergie moyenne définie par l'énergie totale des particules divisée par leur nombre. La référence [6] donne les valeurs de $\bar{E}$ pour différentes valeurs de E_m (de 0,1 à 5 MeV); on y constate que le rapport $E_m/\bar{E}$ varie de 3 à 2,2.

C est la concentration de l'élément radioactif dans le milieu source.

Si le milieu est limité par une surface plane, la dose en un point de cette surface est, par raison de symétrie, égale à la moitié de la dose précédente :

$$I_s = 1065 C \bar{E} \text{ (rad/h)}.$$

Ceci est vrai si l'épaisseur h du milieu source est supérieure au parcours maximal R des particules β ; si h est inférieur à R , le débit de dose à la surface devient :

$$I_h = I_s (1 - e^{-\mu h}),$$

l'atténuation par la matière pouvant être considérée comme étant de forme exponentielle.

μ est le coefficient d'atténuation apparente dont une expression empirique est donnée ci-après [5, p. 570] :

$$\mu = \frac{18,6}{(E_m - 0,036)^{1,37}} \text{ (cm}^2/\text{g) pour l'eau.}$$

Ces relations ne peuvent être rigoureuses puisque l'atténuation du faisceau d'électrons dépend évidemment de la forme du spectre.

Le coefficient massique d'atténuation (en cm^2/g) se montre peu dépendant de la nature du milieu, c'est-à-dire que le coefficient linéaire d'atténuation (en cm^{-1}) est égal à $\mu\rho$; μ étant le coefficient de l'eau.

L'absorption des particules β se poursuit entre la source et le point irradié. Si la distance à parcourir p est inférieure à la moitié du parcours R des particules, l'atténuation est à peu près exponentielle et l'on a, au point considéré :

$$I_p = I_h e^{-\mu p} \text{ (rad/h)}.$$

Ce modèle de calcul peut s'appliquer dans nos trois cas de milieux-sources, étant donné que deux de leurs dimensions, au moins, sont supérieures au parcours R . On se trouve ici en présence d'un ensemble de cinq spectres β ; on calculera l'effet de chacun, pris séparément, et l'on fera la somme de ces effets.

RÉSULTATS

Irradiation β par les parois

Il s'agit d'une paroi en minerai d'uranium à 1 p. mille défini précédemment. Dans la roche, le parcours R des particules β est inférieur à 1 cm. La concentration C de chaque élément radioactif émetteur β est de $3,33 \cdot 10^{-7}$ mCi/g de roche.

On a, dans le tableau suivant, les principaux éléments du calcul.

Emetteurs β	$E_m(\text{MeV})$	$\bar{E}(\text{MeV})$	Parcours R (g/cm^2)		I_s mrad/h	μ cm^2/g
			air	eau		
234 Th	0,19	0,07	$5,3 \cdot 10^{-2}$	$4,6 \cdot 10^{-2}$	$2,48 \cdot 10^{-2}$	$1,03 \cdot 10^3$
234m Pa	2,3	1	1,2	1,1	$3,55 \cdot 10^{-1}$	6,08
214 Pb	0,65	0,25	$2,4 \cdot 10^{-1}$	$2,2 \cdot 10^{-1}$	$8,85 \cdot 10^{-2}$	$1,55 \cdot 10^2$
214 Bi	3,26	1,5	1,7	1,5	$5,33 \cdot 10^{-1}$	3,84
210 Bi	1,17	0,46	$5,5 \cdot 10^{-1}$	$4,8 \cdot 10^{-1}$	$1,63 \cdot 10^{-1}$	$1,57 \cdot 10^1$

Le point irradié est séparé de la source par une couche d'air et une couche de tissus.

L'épaisseur d'air varie avec la distance; on n'a considéré ici que deux distances, 10 cm et 1 m. L'épaisseur de tissus à traverser sera de $7 \text{ mg}/\text{cm}^2$ pour irradier la couche basale de l'épiderme et $300 \text{ mg}/\text{cm}^2$ pour irradier le cristallin ou les tissus profonds. Dans ces conditions, les valeurs des débits de dose sont les suivantes :

Distance à la paroi (cm)	Epaisseur des tissus traversés	
	$7 \text{ mg}/\text{cm}^2$	$300 \text{ mg}/\text{cm}^2$
10	0,89 mrad/h	0,21 mrad/h
100	0,26 mrad/h	0,12 mrad/h

Irradiation externe β par le radon 222

La concentration C est de 10^{-10} Ci de radon par litre d'air, et le radon est supposé en équilibre radioactif avec ses descendants : ici, plomb 214, bismuth 214 et bismuth 210.

Les valeurs calculées du débit de dose sous 7 mg/cm² et sous 300 mg/cm² sont les suivantes en fonction de l'épaisseur du milieu-source :

Epaisseur h du milieu-source (air contaminé) (cm)	épaisseur p des tissus traversés	
	7 mg/cm ²	300 mg/cm ²
100	$8,4 \cdot 10^{-2}$ mrad/h	$1,5 \cdot 10^{-2}$ mrad/h
200	$1,2 \cdot 10^{-2}$ mrad/h	$2,5 \cdot 10^{-2}$ mrad/h
> 1310 = R maximal	$1,6 \cdot 10^{-2}$ mrad/h	$3,9 \cdot 10^{-2}$ mrad/h

Irradiation β par contamination cutanée

La poussière est supposée identique au minerai d'uranium à 1 p. mille décrit précédemment. Elle se dépose uniformément sur la peau et son activité α est de 10^{-6} μ Ci/cm², ce qui correspond à une concentration C de $3,33 \cdot 10^{-7}$ mCi/g pour chacun des émetteurs et à une épaisseur de poussière égale à 0,6 mg/cm².

Dans ce cas, les particules β sortent d'une source très mince (son épaisseur h est très inférieure au parcours R) et pénètrent directement dans l'épiderme, sans atténuation par l'air; on obtient ainsi :

$$\begin{aligned} 6,5 \cdot 10^{-3} \text{ mrad/h} & \text{ sous } 7 \text{ mg/cm}^2, \\ 6,1 \cdot 10^{-4} \text{ mrad/h} & \text{ sous } 300 \text{ mg/cm}^2. \end{aligned}$$

ANNEXE C

MESURE DU DÉBIT DE DOSE A 1 m ET A 10 cm D'UN BLOC DE MINERAI

On a mesuré l'irradiation due aux rayonnements γ et β , puis au rayonnement γ seul émis par un bloc d'uraninite (minerai d'oxydes d'uranium) à très forte teneur et dont le poids était approximativement de 10 kg, la surface frontale de 230 cm² et la densité de 8.

Le radiamètre utilisé était une Babyline avec paroi de 300 mg/cm² mesurant la dose reçue sous la peau ou par le cristallin. Pour mesurer le rayonnement γ seul, on a éliminé le rayonnement β en interposant une plaque de duralumin épaisse de 6 mm entre la source et l'appareil.

Étant donné la faible valeur du débit de dose à 1 m, on a opéré en intégrant ce débit de dose sur 1 h.

Résultats : débit de dose (en mrad/h)

Débit de dose	à 1 mètre (a)	à 10 cm (a)
$\gamma + \beta$	0,68	35
γ	0,57	27
β	0,11	8
	soit 16 p. cent du total	soit 23 p. cent du total

(a) La distance est mesurée de la surface du bloc au milieu de la chambre de la Babyline.

BIBLIOGRAPHIE

- [1] ZEGERS J. C., PRADEL J. et BILLARD F. La radioprotection dans les mines d'uranium françaises. *Bull. Inf. A.T.E.N.*, 1970, n° 81, 5-15.
- [2] LEDERER M. *Table of isotopes* (6th ed.), New York, J. Wiley, 1968.
- [3] JAEGER R. G. Ed. *Engineering compendium on radiation shielding*, I, 1968.
- [4] ROCKWELL Th. *Reactor shielding design manual*, Princeton, Van Nostrand, 1956.
- [5] TUBIANA M. et coll. *Bases physiques de la radiothérapie et de la radiologie*, Paris, Masson, 1963.
- [6] O'BRIEN K. Subcutaneous β -ray dose rate from fission products deposited on the skin. *Health Phys.*, 1974, 26, 122-127.
- [7] GRODSTEIN G.W. *X ray attenuation coefficients from 10 keV to 100 MeV*. NBS-C-583, 1957.
- [8] JOFFRE H. *Les problèmes physiques de la radioprotection*. In : *Génie atomique*, Paris, Presses universitaires de France, vol. I, 1963.
- [9] GAUZIT M. et KAHAN Th. *Contrôle et protection des réacteurs nucléaires*, Paris, Dunod, vol. II, 1957.