

NATIONS UNIES

ASSEMBLEE
GENERALE



Distr.
GENERALE
A/5058
25 juillet 1958
FRANCAIS
ORIGINAL : ANGLAIS



Treizième session

EFFETS DES RADIATIONS IONISANTES

Contribution à la mise au point d'une méthode générale pour le calcul des doses provenant de la retombée et l'évaluation de leurs effets

Note du Secrétaire général

Les membres de l'Assemblée trouveront ci-joint un document de travail que le Secrétariat avait préparé à l'intentions du Comité scientifique des Nations Unies pour l'étude des effets des radiations ionisantes et que le Comité a décidé de publier.

58-17512

/...

NATIONS UNIES
ASSEMBLEE
GENERALE



Distr.
GENERALE
A/AC.82/INF.3
24 juillet 1958
FRANCAIS
ORIGINAL : ANGLAIS

CONTRIBUTION A LA MISE AU POINT D'UNE METHODE GENERALE
POUR LE CALCUL DES DOSES PROVENANT DE LA RETOMBEE ET
L'EVALUATION DE LEURS EFFETS

Le Secrétariat de l'Organisation des Nations Unies a préparé le présent document de travail en collaboration avec un groupe d'experts du Comité scientifique des Nations Unies pour l'étude des effets des radiations ionisantes. Cette étude n'ayant été achevée que quelques jours avant la cinquième session du Comité (9-13 juin 1958), le Comité n'a pas eu le temps de l'examiner pour lui donner sa sanction. Comme elle présente un grand intérêt scientifique, le Comité a décidé de la rendre publique pour aider les chercheurs à calculer les doses-gonades ou les doses-moelle osseuse et à évaluer leurs effets biologiques.

Table des matières

	<u>Paragraphes</u>
I. INTRODUCTION	1
a) Hypothèse d'une relation dose-effet linéaire, sans seuil	5
b) Hypothèse d'une relation à seuil	10
Hypothèses sur lesquelles sont fondés les calculs	11
II. FONCTIONS RELATIVES A LA RETOMBEE	12
Mécanisme de déplétion de la réserve stratosphérique	12
Facteurs géographiques	14
Expressions générales des fonctions relatives à la retombée ..	17
Hypothèses concernant la poursuite des essais d'armes nucléaires	19
Expressions particulières pour des intervalles de temps déterminés	21
A. Période allant jusqu'à la fin de 1958	22
B. Période allant de la fin de 1958 à la date de cessation des apports	23
C. Période commençant à la date de cessation des apports	24
Récapitulation	25
III. IRRADIATION DES GONADES	28
Relation dose-effet	28
Irradiation des gonades due à la retombée stratosphérique	34
Composante externe	35
Composante interne	38
Formules pour le calcul du débit de la dose-gonade	40
Intégrale de la dose-gonade par rapport à un temps infini	43
Intégrales de la dose-gonade dans un intervalle de 30 ans	45
Contribution de la retombée troposphérique	47
Irradiation externe	51
Irradiation interne	52
Dose-gonade totale provenant de la retombée troposphérique	53
Tableaux récapitulatifs	55
Contribution du carbone-14	56

/...

Table des matières (suite)

	<u>Paragraphes</u>
IV. IRRADIATION DE LA MOELLE OSSEUSE	61
Relation dose-effet	61
Hypothèse d'une relation à seuil	62
Hypothèse d'une relation dose-effet linéaire, sans seuil	68
Irradiation de la moelle osseuse due à la retombée strato- sphérique	70
Charge totale des tissus osseux en strontium-90	72
Formules empiriques pour $c(t)$	85
Intensité d'irradiation de la moelle osseuse	87
Intégrale par rapport à un temps infini	90
Intégrales de la dose-moelle osseuse moyenne dans un intervalle de 70 ans	105
Contribution de la retombée troposphérique	106
Conséquences biologiques éventuelles des essais d'armes nucléaires	109
REFERENCES	

I. INTRODUCTION

La présente étude a été préparée comme document de travail pendant l'établissement du rapport d'ensemble du Comité scientifique des Nations Unies pour l'étude des effets des radiations ionisantes (document A/3838 des Nations Unies). Chaque fois qu'il est question des annexes D, G et H dans le texte qui suit, il s'agit donc des annexes de ce rapport.

1. L'objet des calculs présentés ci-après est d'évaluer la fréquence totale éventuelle des effets biologiques nocifs de la retombée provenant des explosions nucléaires expérimentales. La méthode employée diffère de celle qui a été suivie pour les calculs antérieurs, par exemple dans l'annexe D où l'on a essayé de déterminer cette fréquence pour la génération la plus exposée. Le mode de calcul exposé ici est de caractère plus général.
2. Il est extrêmement difficile d'évaluer les doses provenant de la retombée, et encore plus difficile d'évaluer leurs effets biologiques; par conséquent, les résultats doivent être considérés avec beaucoup de réserve car ils reposent sur de nombreuses hypothèses qu'il n'est pas encore possible de vérifier.
3. Lorsqu'il s'agit d'évaluer les effets biologiques des radiations sur une population, d'après le nombre d'individus chez lesquels apparaîtra telle ou telle lésion, il faut tenir compte du délai qu'entraîne le séjour prolongé des substances radioactives dans la stratosphère. Il faut également du temps pour que se produise l'absorption des substances radioactives et, par suite, l'exposition aux radiations. Bien qu'il y ait un troisième délai pour toutes les sources de rayonnements, à savoir le temps qui s'écoule entre l'irradiation et l'apparition d'une lésion, la plupart des sources autres que la retombée produisent ou déclenchent des effets biologiques qui peuvent être mesurés par l'importance de l'irradiation à un moment quelconque. Dans le cas de la retombée, cependant, s'il y a irradiation à un moment donné, il y aura automatiquement irradiation à d'autres moments par la suite. Pour évaluer l'ensemble des conséquences biologiques des explosions nucléaires expérimentales effectuées jusqu'à une certaine date,

il faut donc calculer non seulement la dose actuelle et la dose passée, mais aussi la dose future, qui sera inévitablement reçue.

4. Les calculs présentés ci-après sont fondés sur deux hypothèses correspondant chacune à une relation différente entre la dose et ses effets biologiques possibles :

- a) Il n'y a pas de seuil pour la dose significative, et la relation dose-effet est **linéaire**;
- b) La dose significative comporte un seuil.

a) Hypothèse d'une relation dose-effet linéaire, sans seuil

5. On calculera la dose significative du point de vue génétique comme la dose-gonade intégrée par rapport à un temps infini, en supposant que tous les individus seront exposés à une irradiation de même intensité - en d'autres termes à une dose de même débit - quels que soient leur âge et leur sexe.

6. Afin d'évaluer la fréquence possible des leucémies radio-induites pour une répartition donnée, dans le temps, de la contamination du milieu, on peut calculer la dose significative en intégrant par rapport à un temps infini la dose moelle osseuse moyenne par individu, compte tenu de l'influence de l'âge. Comme on le verra plus loin, on aboutit au même résultat en employant une méthode de calcul plus directe, qui est celle que l'on a préférée ici.

7. En multipliant ces deux doses par l'effectif de la population et par une constante appropriée, on obtiendra le nombre total d'individus **atteints**, dans la population considérée, pendant un temps infini à partir du moment où l'irradiation a commencé. Tous ces calculs obligent à faire un certain nombre d'hypothèses qui seront exposées plus bas en détail.

8. Il n'est pas possible de prédire avec une rigueur scientifique le rythme futur des essais nucléaires. Le Comité a toutefois jugé utile d'évaluer les dommages que pourraient provoquer des essais se poursuivant au même rythme que pendant les quelques dernières années. Si l'on considère que la relation dose-effet est linéaire et qu'il n'y a pas de seuil, chaque série annuelle d'essais nucléaires doit en fin de compte donner naissance au même nombre total de lésions si le rythme d'apport de produits de fission à longue période dans la stratosphère reste le même. Il convient donc de comparer les doses - et, lorsque cela est possible, les effets biologiques imputables à chaque série annuelle d'essais qui, soit immédiatement soit ultérieurement, exposera la population à des radiations.

/...

9. L'effet total est indépendant de la date à laquelle se produit l'irradiation, et il suffit de connaître la dose significative totale. Il faudrait donc considérer qu'à chaque série annuelle d'essais correspond une dose potentielle totale plutôt qu'une dose effective pour une période donnée.

b) Hypothèse d'une relation à seuil

10. En revanche, si l'on considère qu'il existe un seuil, il est nécessaire de comparer les doses effectives pour rechercher si leur somme dépasse le seuil à un moment quelconque. C'est pour cette raison que l'on a évalué les doses reçues pendant des périodes appropriées (70 ans pour l'irradiation de la moelle osseuse). Comme il peut être intéressant aussi, pour des cas individuels, de savoir à quel moment les mutations affecteront le plus la population, on a calculé les intégrales de la dose-gonade dans un intervalle de 30 ans.

Hypothèses sur lesquelles sont fondés les calculs

11. Pour donner une idée de l'incertitude et de la complexité des calculs, on peut citer l'exemple du calcul de la dose-moelle osseuse significative imputable au strontium-90 provenant de la retombée stratosphérique; ce calcul comporte les étapes suivantes :

1. Hypothèse concernant le rythme d'apport de Sr^{90} dans la stratosphère.
2. Hypothèse concernant le mécanisme de déplétion de la réserve stratosphérique et expression numérique.
3. Calcul du débit de la retombée de Sr^{90} .
4. Hypothèses concernant la répartition géographique de la retombée, et évaluation d'une moyenne pondérée par la population.
5. Calcul du dépôt accumulé de substances provenant de la retombée.
6. Hypothèse concernant l'influence future des agents atmosphériques.
7. Hypothèses numériques concernant la transmission du Sr^{90} par la chaîne alimentaire, et calcul de la contamination des aliments.
8. Hypothèses numériques concernant l'absorption et la rétention de Sr^{90} .
9. Calcul de la concentration de Sr^{90} accumulé dans le tissu osseux, en fonction du temps et de la date de naissance des individus.
10. Hypothèse concernant la relation numérique entre la concentration de Sr^{90} dans le tissu osseux et dans la dose-moelle osseuse, et hypothèse

concernant la répartition du Sr^{90} par rapport à celle de la moelle osseuse active. Il faut faire à ce sujet des hypothèses sur la répartition des cavités médullaires selon la dimension.

11. Hypothèse concernant la dose appropriée pour les évaluations relatives à une induction éventuelle de la leucémie.
12. Hypothèse concernant la relation dose-effet et les coefficients de pondération à utiliser pour l'âge, la masse de la moelle osseuse active ou d'autres paramètres biologiquement importants.
13. Calcul du débit de dose approprié.
14. Calcul de la dose individuelle appropriée.
15. Calcul de la dose moyenne par individu imputable à un certain degré de contamination du milieu.
16. Intégration de la dose moyenne par individu pour toutes les contributions du milieu imputables à un apport donné.

II. FONCTIONS RELATIVES A LA RETOMBEE

Mécanisme de déplétion de la réserve stratosphérique

12. A l'annexe D, on a émis l'hypothèse que le rythme de diminution des quantités de substances radioactives dans la stratosphère est à tout moment proportionnel à la grandeur de ces quantités. Cette hypothèse peut s'exprimer de la manière suivante :

$$\bar{F}_r(t) = k \cdot \bar{Q}(t) \quad (1)$$

où $\bar{F}_r(t)$ = débit de la retombée par unité de surface terrestre (mcuries/km² par an).

k = constante de déplétion (an⁻¹).

$\bar{Q}(t)$ = quantité de strontium-90 (ou de césium-137) dans la stratosphère par unité de surface terrestre (mcuries/km²).

On admet, par hypothèse, que $k = 0,1/\text{an}$. Divers auteurs^{1, 2, 3} estiment que la valeur de k peut se situer entre $0,07/\text{an}$ et $0,2/\text{an}$.

13. Selon l'hypothèse ci-dessus, la rétention est exponentielle; pour évaluer la déplétion, il faut, en outre, recourir aux deux équations générales suivantes, qui représentent l'équilibre physique :

$$\frac{d\bar{Q}}{dt} = n - \lambda \bar{Q} - \bar{F}_r(t) \quad (2)$$

$$\frac{d\bar{F}_d(t)}{dt} = \bar{F}_r(t) - \lambda \bar{F}_d(t) \quad (3)$$

où n = rythme d'apport de strontium-90 (ou de césium-137) dans la stratosphère par unité de surface terrestre (mcuries/km² par an).

$\bar{F}_d(t)$ = dépôt accumulé de strontium-90 (ou de césium-137) par unité de surface (mcuries/km²).

$\lambda = 0,025/\text{an}$ = constante de désintégration du strontium-90 (ou du césium-137).

/...

Facteurs géographiques

14. Dans les équations ci-dessus, $\bar{F}_r(t)$, $\bar{F}_d(t)$ et n ne représentent pas des valeurs pour tel ou tel lieu, mais des moyennes pour toute la surface de la terre. Ces moyennes géographiques ne conviennent pas à l'évaluation des effets biologiques sur une population donnée (i) ou sur l'ensemble de la population du monde. Dans les calculs présentés ici, on ne s'est pas servi des valeurs locales de $F_r^{(i)}(t)$ ni de $F_d^{(i)}(t)$; cependant, on pourrait les obtenir au moyen d'un facteur géographique $G_i(t)$, tel que

$$F_r^{(i)}(t) = G_i(t) \cdot \bar{F}_r(t) \quad (4)$$

$$F_d^{(i)}(t) = G_i(t) \cdot \bar{F}_d(t) \quad (5)$$

Dans l'annexe D, le facteur géographique $G_i(t)$ est présenté comme étant fonction de la latitude.

15. On peut obtenir $\bar{G}(t)$ pour l'ensemble de la population mondiale en faisant la moyenne arithmétique pondérée des facteurs géographiques applicables à toutes les populations N_i . On a calculé que sa valeur actuelle est :

$$\bar{G}(0) = \frac{\sum_i G_i(0) \cdot N_i}{\sum_i N_i} \approx 2 \quad (6)$$

16. Il est possible que les variations locales de $G_i(t)$ se modifient lorsque l'apport aura cessé et que $\bar{G}(t)$ approche de l'unité. Cependant, comme il est actuellement impossible de prévoir quelles seront, à l'avenir, les variations du débit de la retombée en fonction de la situation géographique, on a supposé qu'en tout temps, $\bar{G}(t)$ aurait la valeur suivante :

$$\bar{G}(t) = \bar{G}(0) \approx 2 \quad (7)$$

/...

Expressions générales des fonctions relatives à la retombée

17. Si le rythme d'apport est constant, on peut intégrer les équations (2) et (3); le débit moyen de la retombée, pondéré par la population, a alors pour expression générale :

$$F_r(t) = \bar{G}(t) \cdot \bar{F}_r(0) \cdot e^{-\lambda t} + \bar{G}(t) \cdot \frac{kn}{\lambda} (1 - e^{-\lambda t}) \quad (8)$$

$$F_d(t) = \bar{G}(t) \bar{F}_d(0) \cdot e^{-\lambda t} + \bar{G}(t) \cdot \frac{\bar{F}_r(0)}{k} (e^{-\lambda t} - e^{-\lambda t}) + \bar{G}(t) \cdot \frac{n}{\lambda} \left(\frac{k}{\lambda} + \frac{\lambda}{\lambda} e^{-\lambda t} - e^{-\lambda t} \right) \quad (9)$$

où $\lambda = k + \lambda$.

18. Dans les calculs qui suivent, $F_r(t)$ et $F_d(t)$ représenteront les fonctions relatives à la retombée pondérée par la population, $\bar{G}(t)$ étant considéré comme égal à 2. On supposera que $t = 0$ à la fin de 1958. Pour cette date, on a donné au débit de la retombée et au dépôt les valeurs suivantes (voir l'exposé qui figure dans l'annexe D) :

$$\bar{F}_r(0) = 1,5 \text{ mcurie/km}^2 \text{ par an}$$

$$\bar{F}_d(0) = 5,0 \text{ mcuries/km}^2$$

Hypothèses concernant la poursuite des essais d'armes nucléaires

19. A propos de la cadence des essais, deux cas ont été envisagés dans l'annexe D :

Hypothèse a) : Le débit de la retombée restera constant et sera égal à $\bar{F}_r(0)$.

Dans l'hypothèse exprimée par l'équation (1), la quantité de substances radioactives dans la stratosphère (due principalement à d'importants apports initiaux), sera constante, sa diminution étant compensée par des apports à rythme constant répondant à l'équation suivante :

$$n_a = \bar{F}_r(0) \cdot \frac{1}{k} \quad (10)$$

/...

Hypothèse b) : Le rythme d'apport restera égal à la valeur moyenne de la période 1954-1958, ce qui donne :

$$n_b = \frac{\lambda}{1 - e^{-5\lambda}} \left(\bar{F}_d(0) + \frac{\bar{F}_r(0)}{k} \right) \quad (11)$$

20. Etant donné les valeurs attribuées à λ , k , $\bar{F}_r(0)$ et $\bar{F}_d(0)$, les deux rythmes d'apport seront :

$$n_a = 1,875 \text{ mcurie/km}^2 \text{ par an}$$

$$n_b = 4,25 \text{ mcuries/km}^2 \text{ par an}$$

Expressions particulières pour des intervalles de temps déterminés

21. Pour calculer la dose totale, il faut disposer de données complètes sur les fonctions relatives à la retombée pour n'importe quelle période. Il est nécessaire de considérer séparément chacun des trois intervalles de temps suivants :

- A. Période allant jusqu'à la fin de 1958,
- B. Période allant de la fin de 1958 à la date de cessation des apports,
- C. Période commençant à la date de cessation des apports.

A. Période allant jusqu'à la fin de 1958

22. Ni l'hypothèse a), ni l'hypothèse b) ne correspondent au comportement réel de la retombée pour la période se terminant à la fin de 1958. Pour simplifier les calculs, on tiendra pour négligeable la retombée antérieure à 1954 et l'on supposera qu'après un important apport initial en 1954, l'accroissement du débit de la retombée a été linéaire. Afin de faire cadrer les calculs avec les valeurs attribuées au débit et au dépôt pour 1958, on supposera, pour évaluer le débit de la retombée antérieure, que $\bar{F}_r(t)$ est passé, selon une progression linéaire, de 0,5 mcurie/km² par an au début de 1954 à 1,5 mcurie/km² par an à la fin de 1958. Cette hypothèse implique que $\bar{F}_d(t)$ s'est accru, non pas linéairement, mais selon une fonction du deuxième degré, passant ainsi de 0 au début de 1954 à 5 mcuries/km² à la fin de 1958 :

/...

$$F_r(t) = \bar{G} \cdot \bar{F}_r(t) = \bar{G} \cdot (1,5 + 0,2 t) \quad (12)$$

$$F_d(t) = \bar{G} \cdot \bar{F}_d(t) = \bar{G} \cdot (5 + 1,5 t + 0,1 t^2) \quad (13)$$

($t < 0$, $t = 0$ à la fin de 1958)

Comme la dose due à cette retombée est faible par rapport à celle qui proviendra de la retombée future, cette approximation est suffisante pour le calcul des doses.

B. Période allant de la fin de 1958 à la date de cessation des apports

23. Pour la période allant de la fin de 1958 à la date de cessation des apports, on peut utiliser les équations 8 et 9. On effectuera les calculs pour chacune des hypothèses a) et b) en donnant à n_a et n_b les valeurs indiquées ci-dessus. Les équations peuvent s'écrire sous la forme suivante :

$$F_r(t) = \bar{G} \cdot \frac{kn}{\lambda} - \bar{G} \cdot \left(\frac{kn}{\lambda} - \bar{F}_r(0) \right) \cdot e^{-\lambda t} \quad (14)$$

$$F_d(t) = \bar{G} \cdot \frac{1}{\lambda} \cdot \frac{kn}{\lambda} + \bar{G} \cdot \left(\frac{n}{\lambda} - \frac{\bar{F}_r(0)}{k} \right) \cdot e^{-\lambda t} - \bar{G} \cdot \left(\frac{n}{\lambda} - \frac{\bar{F}_r(0)}{k} - \bar{F}_d(0) \right) \cdot e^{-\lambda t} \quad (15)$$

C. Période commençant à la date de cessation des apports

24. Si tout apport cesse à un moment $t = T$, les fonctions relatives à la retombée auront, pour toute la période qui suivra, les expressions suivantes :

$$F_r(t) = \bar{G} \cdot \bar{F}_r(T) \cdot e^{-\lambda (t - T)} \quad (16)$$

$$F_d(t) = \bar{G} \cdot \left(\bar{F}_d(T) + \frac{1}{k} \bar{F}_r(T) \right) \cdot e^{-\lambda (t - T)} - \bar{G} \cdot \frac{1}{k} \cdot \bar{F}_r(T) \cdot e^{-\lambda (t - T)} \quad (17)$$

Récapitulation

25. Dans les calculs, on a attribué aux constantes les valeurs suivantes :

$$k = 0,1/\text{an}$$

$$\lambda = 0,025/\text{an} \text{ (tant pour le strontium-90 que pour le césium-137)}$$

$$\lambda_d = 0,125/\text{an}$$

/...

$$n_a = 1,875 \text{ mcurie/km}^2 \text{ par an}$$

$$n_b = 4,25 \text{ mcuries/km}^2 \text{ par an}$$

$$\bar{G} = 2$$

$$\bar{F}_r(0) = 1,5 \text{ mcurie/km}^2 \text{ par an}$$

$$\bar{F}_d(0) = 5 \text{ mcuries/km}^2$$

26. Les fonctions relatives à la retombée (les grandeurs étant exprimées dans les mêmes unités que $\bar{F}_r(0)$ et $\bar{F}_d(0)$ ci-dessus et le temps mesuré en années) se présenteront sous la forme simplifiée que voici :

$$A) \quad t < 0 \quad F_r(t) = 3 \div 0,4 t \quad (18)$$

$$F_d(t) = 10 \div 3 t \div 0,2 t^2 \quad (19)$$

$$B) \quad 0 < t < T \quad \text{Hypothèse a) :}$$

$$F_r(t) = 3 \quad (20)$$

$$F_d(t) = 120 - 110 \cdot e^{-0,025 t} \quad (21)$$

Hypothèse b) :

$$F_r(t) = 6,8 - 3,8 \cdot e^{-0,125 t} \quad (22)$$

$$F_d(t) = 272 \div 38 \cdot e^{-0,125 t} - 300 \cdot e^{-0,025 t} \quad (23)$$

C) $t > T$ On se servira ici des équations 16 et 17 pour $T = 0, 10, 20$ et 30 dans chacune des hypothèses a) et b). Pour toutes ces valeurs, les équations sont du type suivant :

$$F_r(t) = \text{const.} \cdot e^{-\lambda(t-T)} = s_1(T) \cdot e^{-0,125 t} \quad (24)$$

$$F_d(t) = s_2(T) \cdot e^{-0,025 t} - s_3(T) \cdot e^{-0,125 t} \quad (25)$$

où les constantes $s_1(T)$, $s_2(T)$ et $s_3(T)$ ont les valeurs suivantes :

/...

	cas	s_1 (T)	s_2 (T)	s_3 (T)
Hypothèse a)	T = 0	3,000	40,00	30,00
	10	10,47	82,60	104,70
	20	36,55	137,30	365,50
	30	127,60	207,60	1.276,00
Hypothèse b)	T = 0	3,000	40,00	30,00
	10	19,93	136,60	199,30
	20	79,04	260,60	790,40
	30	285,4	419,80	2.854,00

27. Les figures 1 et 2 représentent respectivement les fonctions $F_r(t)$ et $F_d(t)$.

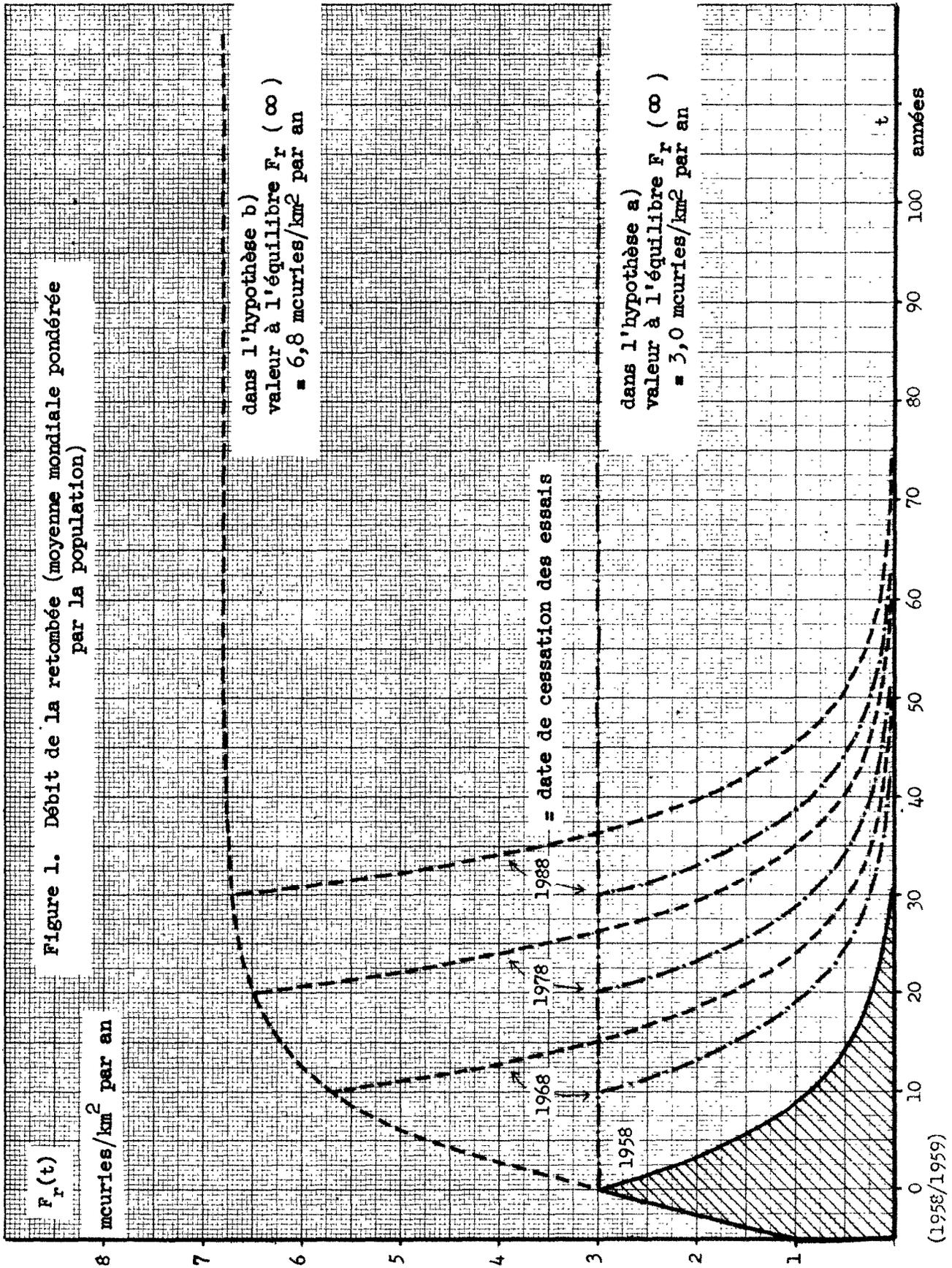
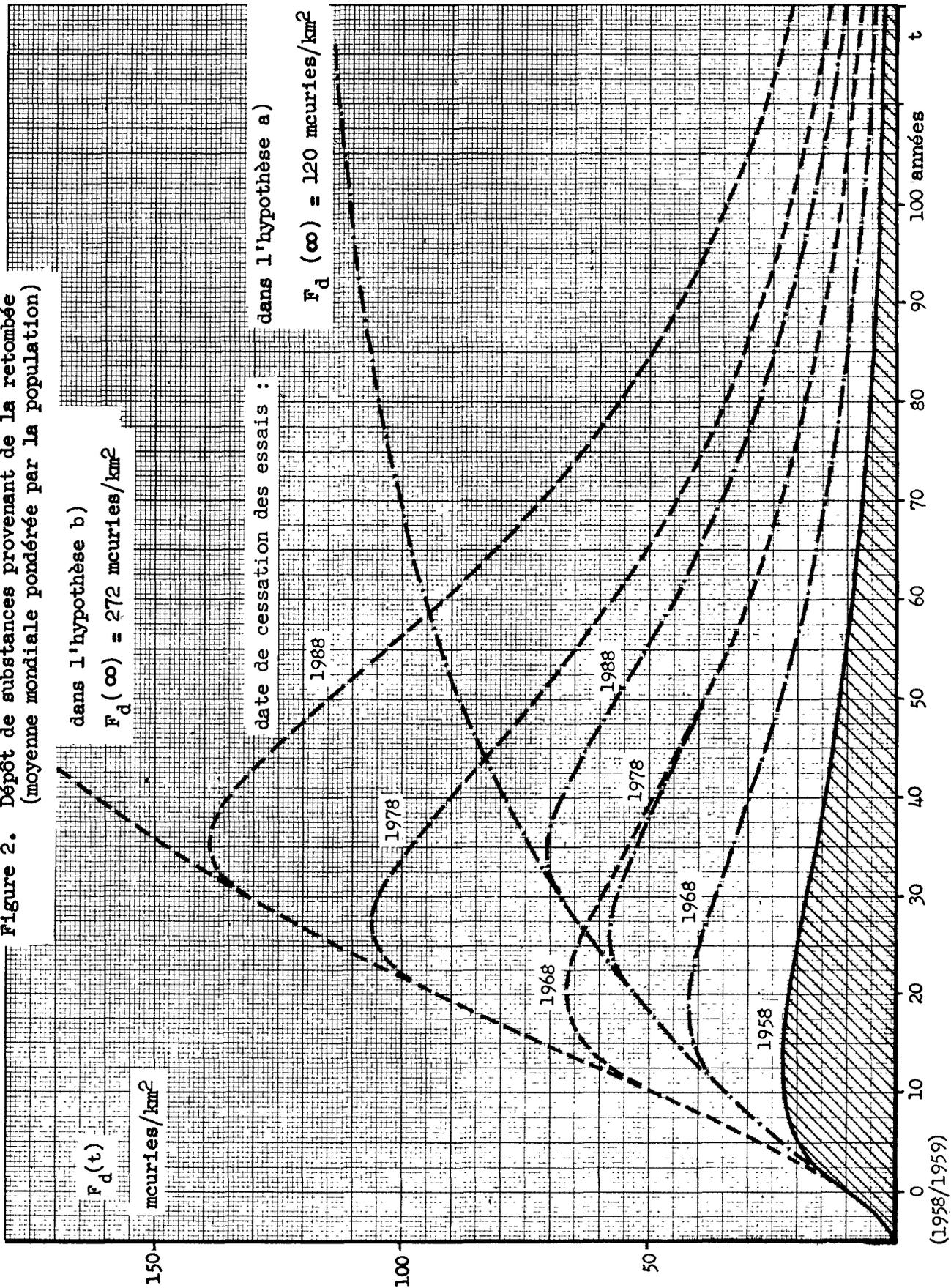


Figure 2. Dépôt de substances provenant de la retombée
 (moyenne mondiale pondérée par la population)



III. IRRADIATION DES GONADES

Relation dose-effet

28. On évaluera l'effet génétique de l'irradiation provenant de la retombée en supposant que la relation dose-effet est linéaire et sans seuil, et qu'au cours des années de procréation, toutes les doses-gonades s'ajoutent.

29. Pour les calculs ci-après, on a choisi une population type (d'effectif constant P) dans laquelle l'âge de procréation est 30 ans et l'âge de décès 70 ans pour tous les individus^x.

30. Le nombre d'individus atteints à la suite d'une certaine irradiation des gonades sera considéré comme étant égal au produit de l'effectif de la population intéressée (que l'on supposera constant) par la dose appropriée et par une constante dose-effet. La dose appropriée est la dose-gonade moyenne reçue par la fraction de la population en âge de procréer. Si la dose augmente de \dot{D} , le nombre de personnes atteintes ultérieurement augmentera de \dot{N} , conformément à l'équation suivante :

$$\dot{N} = K_g \cdot p \cdot \dot{D} \quad (26)$$

31. On peut calculer la constante dose-effet génétique, K_g , à partir d'évaluations de la dose de doublement représentative, \bar{D}_2 , et de la proportion actuelle (f) de naissances d'enfants tarés (voir annexe H). L'équilibre génétique étant posé, si chaque individu reçoit la dose de doublement de sa conception à l'âge de 30 ans, il en résultera fB naissances d'enfants tarés par an, B étant le taux de natalité. Comme la valeur approximative de B est P/70, la relation entre le taux d'apparition d'individus tarés et le taux d'irradiation de la population sera la suivante :

$$\frac{dN}{dt} = \frac{\bar{D}_2}{7} \cdot f \cdot P \cdot \frac{1}{\bar{D}_2} \cdot \frac{dD}{dt} \quad (27)$$

^x Les calculs qui suivent font intervenir le rapport entre le nombre d'individus en âge de procréer et la population totale. Pour la population type envisagée, ce rapport est 30/70. En général, ce rapport a pour valeur w/w (symboles employés dans l'annexe C) dans le cas de populations stationnaires telles qu'on peut en prévoir pour l'avenir éloigné. Pour les populations réelles qui sont déjà relativement stationnaires ("vieilles" au sens démographique du terme), le rapport ne s'éloigne pas sensiblement de 3/7, comme le montrent les données sur l'espérance de fécondité qui figurent dans le tableau I de l'annexe C.

Par conséquent, si l'on prend la population type définie plus haut et qu'il y ait, non pas seulement équilibre génétique, mais une augmentation D de la dose, le nombre total d'individus atteints par la suite sera :

$$N = \frac{3}{7} \cdot f \cdot P \cdot \frac{1}{D_2} \cdot D \quad (28)$$

Pour la population type choisie, la constante s'exprime donc ainsi :

$$K_g = \frac{3}{7} \cdot f \cdot \frac{1}{D_2} \text{ rem}^{-1} \quad (29)$$

32. Dans le cas de la retombée stratosphérique, l'irradiation des gonades se prolongera pendant de nombreuses décennies, même si les apports cessent dès maintenant. Chaque année d'apport prolongera la durée de l'irradiation, c'est-à-dire donnera naissance à une certaine dose potentielle. Pour le calcul de N_g , nombre total d'individus génétiquement atteints pendant les années qui suivent, la dose appropriée correspondant à un rythme quelconque d'apport est l'intégrale, par rapport à un temps infini, de la dose-gonade moyenne reçue par tous les individus en âge de procréer. Si cette dose est désignée par D_{co} , on obtient l'équation suivante :

$$N_g = K_g \cdot P \cdot D_{co} \quad (30)$$

à condition que la population reste stationnaire.

33. Si l'on admet que la proportion d'enfants qui, chaque année, naissent tarés par suite de mutations spontanées est de l'ordre de

$$f = 1 - 4,5 \quad (\text{Annexe H})$$

et que la dose de doublement est de l'ordre de

$$\bar{D}_2 = 10 - 100 \text{ rem}, \quad (\text{Annexe H})$$

la valeur de la constante dose-effet génétique est alors de l'ordre de

$$K_g = 43 - 1.710 \text{ rem}^{-1} \text{ par million}$$

/...

Irradiation des gonades due à la retombée stratosphérique

34. La retombée stratosphérique et la retombée troposphérique contribuent l'une et l'autre à l'irradiation des gonades. Comme la contribution de la retombée troposphérique est directement proportionnelle au rythme d'apport de substances radioactives dans la troposphère, on peut considérer qu'il s'agit d'une contribution annuelle constante tant que l'apport est lui-même constant. Cette question sera examinée plus loin. On admet par hypothèse que la retombée stratosphérique contribuant à l'irradiation des gonades est composée principalement de césium-137. Les fonctions relatives à la retombée que l'on a établies dans la deuxième partie de la présente étude peuvent donc servir de base pour le calcul de la dose. La dose-gonade provenant du césium-137 aura une composante externe et une composante interne.

Composante externe

35. Le débit de la dose-gonade peut s'exprimer de la manière suivante lorsque la source est un dépôt sur un plan infini :

$$\frac{dD}{dt} = k \cdot S \cdot B \cdot F_d(t) \text{ mrem/an} \quad (31)$$

où k = débit de la dose provenant de l'irradiation primaire = 0,08 mrem/an par mcurie/km²

S = facteur de protection de l'organisme $\approx 0,6$

B = facteur d'intensification = rapport entre le débit de la dose totale et le débit de la dose due à l'irradiation primaire ≈ 2

$F_d(t)$ = dépôt de césium-137 en mcuries/km², que l'on suppose égal à la valeur correspondante pour le strontium-90.

36. Dans la pratique, il faut corriger le débit de dose ci-dessus pour tenir compte, d'une part de l'effet des agents atmosphériques et, d'autre part, de la protection offerte par les bâtiments et les irrégularités du terrain. Pour cette double correction, on a proposé⁴⁻⁷ d'utiliser des facteurs allant de 3 à 21; c'est un facteur de 10 que l'on adoptera dans la présente étude. Il convient de signaler que le degré d'incertitude lié à l'emploi de ce facteur peut être plus grand que la dispersion correspondant aux valeurs proposées.

/...

37. A partir des hypothèses ci-dessus, le débit de la dose-gonade due à l'irradiation externe se calculera comme suit :

$$\left(\frac{dD}{dt}\right)_e = g_e \cdot F_d(t) = 0,01 \cdot F_d(t) \text{ mrem/an} \quad (32)$$

Composante interne

38. Le césium-137 est absorbé et excrété assez rapidement par l'organisme, mais les plantes ne l'absorbent pas facilement à partir du sol. On a donc supposé que la contamination des aliments et la concentration dans le corps humain étaient proportionnelles au débit de la retombée :

$$\left(\frac{dD}{dt}\right)_i = g_i \cdot F_r(t) \quad (33)$$

39. Les données expérimentales concernant la charge de césium-137 dans l'organisme indiquent que la dose-gonade moyenne était d'environ 1 mrem par an au Royaume-Uni et aux Etats-Unis pour les années 1956 et 1957^{8,9}. Comme, dans ces deux pays, le débit moyen de la retombée pour 1956 et 1957 a été d'environ 3 mcuries/km² par an (Fig. 2, Annexe D), on supposera que $g_i = 0,3$ mrem par an pour un débit de la retombée de 1 mcurie/km² par an.

Formules pour le calcul du débit de la dose-gonade

40. Les hypothèses ci-dessus permettent d'exprimer le débit de la dose-gonade par la formule :

$$\frac{dD}{dt} = g_i \cdot F_r(t) + g_e \cdot F_d(t) \quad (34)$$

où les constantes ont par hypothèse les valeurs suivantes : $g_i = 0,3$ mrem/an pour un débit de la retombée de mcurie/km² par an et $g_e = 0,01$ mrem/an pour 1 mcurie/km². Comme on se sert des fonctions $F_r(t)$ et $F_d(t)$ qui représentent les moyennes pondérées par la population, on pourra, à partir du débit de la dose, calculer la valeur appropriée de D_{00} pour l'ensemble de la population du monde.

/...

41. Étant donné les valeurs attribuées aux constantes g_i et g_e , le débit de la dose (en mrem/par an; temps en années) s'exprime de la manière suivante :

(A) $t < 0$ $\frac{dD}{dt} = 1,00 + 0,15 t + 0,002 t^2$ (35)

(B) $0 < t < T$ Hypothèse a) :

$$\frac{dD}{dt} = 2,1 - 1,1 \cdot e^{-0,025 t} \quad (36)$$

Hypothèse b) :

$$\frac{dD}{dt} = 4,76 - 0,76 \cdot e^{-1,025 t} - 3,00 \cdot e^{-0,025 t} \quad (37)$$

(C) $t > T$

$$\frac{dD}{dt} = c_1(T) \cdot e^{-0,125 t} + c_2(T) \cdot e^{-0,025 t} \quad (38)$$

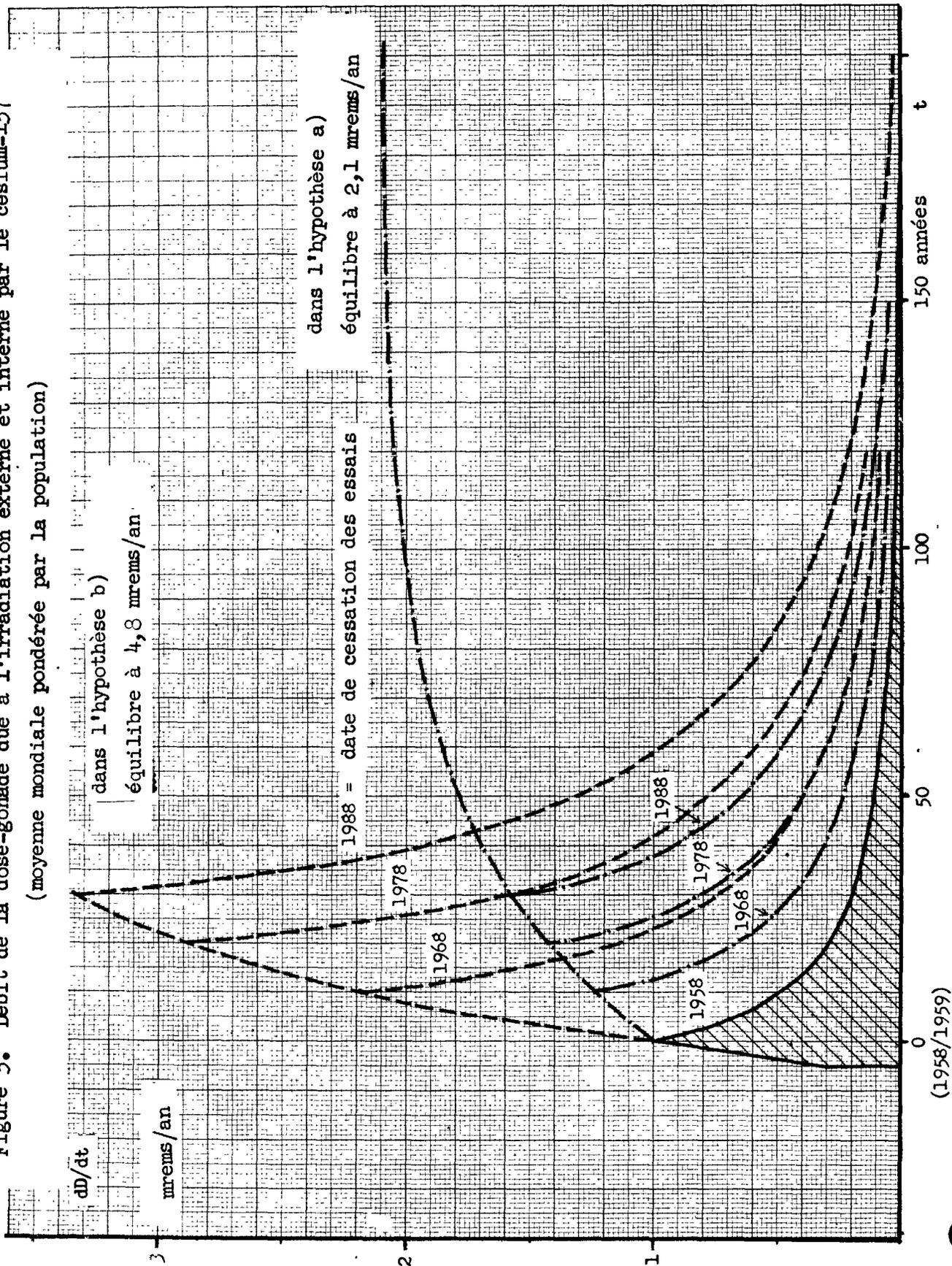
où les constantes $c_1(T)$ et $c_2(T)$ ont les valeurs suivantes :

	cas	$c_1(T)$	$c_2(T)$
Hypothèse a)	$T = 0$	0,6000	0,4000
	10	2,094	0,8260
	20	7,310	1,373
	30	25,52	2,076
Hypothèse b)	$T = 0$	0,6000	0,4000
	10	3,936	1,366
	20	15,81	2,606
	30	57,08	4,198

42. La figure 3 indique, sous forme de graphique, les variations du débit de la dose-gonade en fonction du temps.

/...

Figure 3. Débit de la dose-gonade due à l'irradiation externe et interne par le césium-137
(moyenne mondiale pondérée par la population)



(1958/1959)

Intégrale de la dose-gonade par rapport à un temps infini

43. On a calculé l'intégrale de la dose-gonade par rapport à un temps infini en faisant la somme des diverses contributions D_A ($t < 0$), D_B ($0 < t < T$) et D_C ($t > T$). Le tableau suivant indique les contributions en mrems :

Tableau I
Intégrale de la dose-gonade par rapport à un temps infini (mrems)

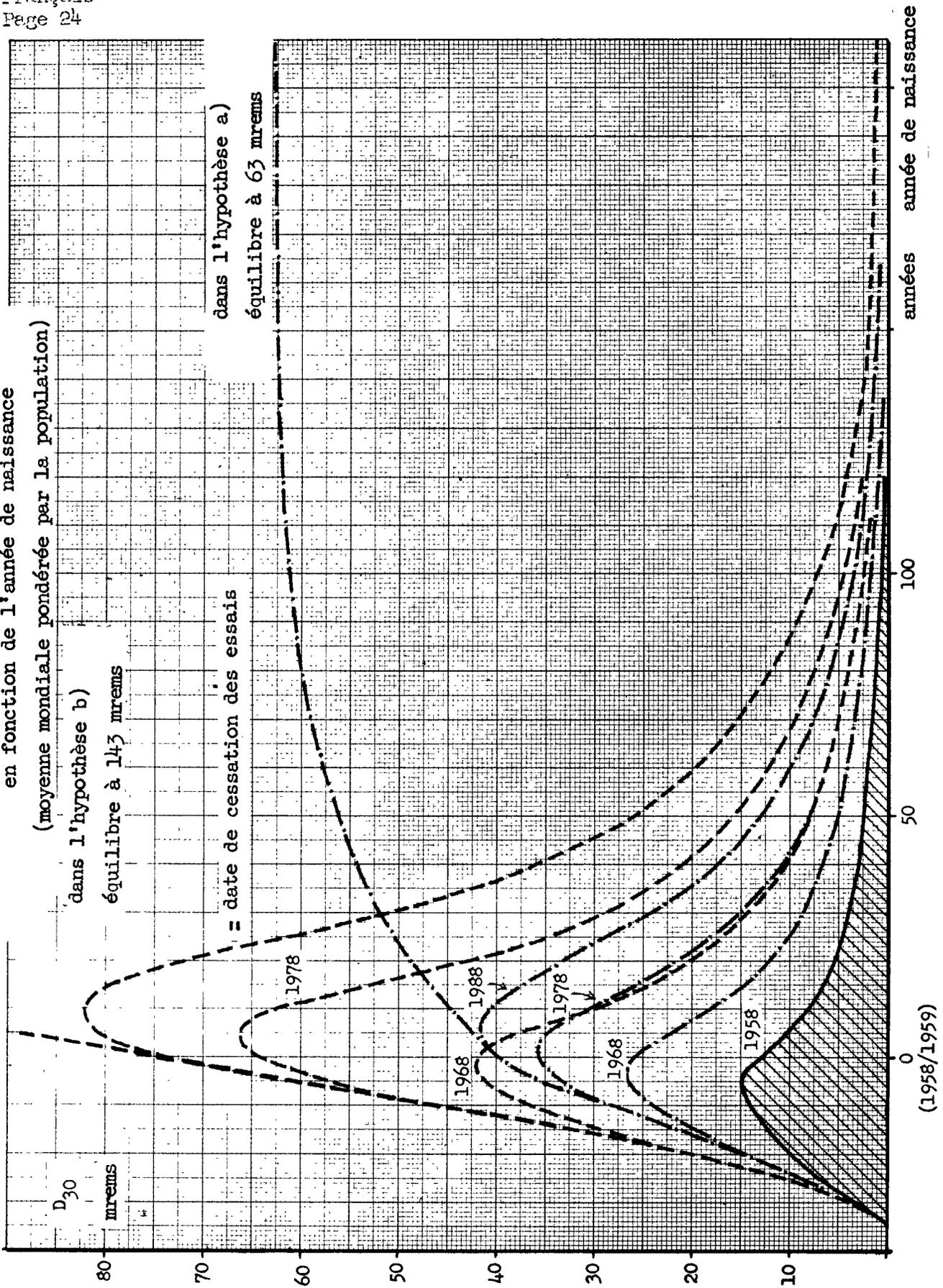
T =	Hypothèse a)				Hypothèse b)			
	0	10	20	30	0	10	20	30
D_A	3,2	3,2	3,2	3,2	3,2	3,2	3,2	3,2
D_B	0,0	11,3	24,7	39,8	0,0	16,7	42,4	73,5
D_C	20,8	30,5	38,1	44,0	20,8	51,7	73,6	90,1
Total	24,0	45,0	66,0	87,0	24,0	71,6	119,2	166,8
Diff.		21,0	21,0	21,0		47,6	47,6	47,6

44. Le tableau I montre qu'à chaque année d'apport correspond une dose potentielle de 2,1 mrems dans l'hypothèse a) et de 4,8 mrems dans l'hypothèse b). Ces chiffres peuvent également être obtenus à partir des équations (36) et (37) comme valeurs à l'équilibre.

Intégrales de la dose-gonade dans un intervalle de 30 ans

45. Comme il peut être intéressant, dans certains cas, de savoir à quel moment les mutations affecteront le plus la population, on a calculé les intégrales D_{30} de la dose-gonade dans un intervalle de 30 ans. La figure 4 montre les variations de D_{30} en fonction de l'année de naissance.

Figure 4. Dose-gonade pour une période de 30 ans
en fonction de l'année de naissance



46. La figure 4 permet de déterminer les valeurs maximums de D_{30} . Lorsque l'apport se poursuit assez longtemps pour que l'équilibre puisse être atteint, les valeurs maximums sont les suivantes : $2,1 \times 30 = 63$ dans l'hypothèse a) et $4,76 \times 30 = 143$ dans l'hypothèse b). Les valeurs maximums de D_{30} sont indiquées au tableau II.

Tableau II
Valeurs maximums de D_{30}

Les essais cessent à la fin de		Hypothèse a)		Hypothèse b)	
		D_{30} (mrems)	Pourcentage de l'équilibre	D_{30} (mrems)	Pourcentage de l'équilibre
T = 0	1958	15	24	15	10
10	1968	27	43	42	29
20	1978	36	57	66	46
30	1988	42	67	82	57
co	-	63	100	143	100

Contribution de la retombée troposphérique

47. Bien qu'on ne connaisse pas le mécanisme de déplétion de la réserve stratosphérique de produits de fission radioactifs, on a, dans les paragraphes précédents, essayé d'évaluer la retombée future en supposant que la rétention était exponentielle. Comme il est probable que la constante de temps est inférieure à la période radioactive moyenne de l'isotope le plus important, le césium-137, cette hypothèse n'aura pas de conséquence sérieuse sur l'évaluation de l'intégrale de la dose-gonade par rapport à un temps infini. Comme, dans le cas de la dose-gonade pour une période de 30 ans, ce sont les personnes nées entre 1950 et 1960 qui recevront la dose maximum, cette évaluation est également assez sûre, quel que soit le mécanisme effectif de la déplétion.

/...

48. Pour la retombée troposphérique, en revanche, l'évaluation variera beaucoup selon l'hypothèse retenue en ce qui concerne le mécanisme de la retombée, étant donné que la nature des isotopes déposés dépendra des constantes de temps. Comme le calcul des effets génétiques dans l'hypothèse d'une relation dose-effet linéaire et sans seuil doit être fondé sur une moyenne mondiale pondérée par la population, il faut admettre certaines variations suivant la situation géographique. Puisque le dépôt de substances provenant de la troposphère est, à l'état d'équilibre, proportionnel au rythme d'apport dans la troposphère, il faut attribuer à ce taux des valeurs hypothétiques pour évaluer le dépôt futur.

49. On peut admettre que, dans le cas de la retombée troposphérique le niveau du dépôt tel qu'il ressort des observations actuelles représente un équilibre des isotopes les plus importants. Si les essais se poursuivent au rythme actuel, on peut donc s'attendre à ce que le dépôt et le débit de la retombée troposphérique restent les mêmes que maintenant. La répartition géographique dépendra des lieux d'essais et des conditions météorologiques.

50. L'élément d'incertitude qui intervient dans le calcul d'une moyenne pondérée par la population pour la dose provenant de la retombée troposphérique tient surtout à ce que même la répartition géographique actuelle n'est pas suffisamment bien connue. Toutefois, s'il faut tenir compte des valeurs locales élevées lorsqu'on a des raisons de supposer qu'il existe un seuil, en revanche, ces valeurs n'ont pas à intervenir dans l'évaluation des effets génétiques subis par l'ensemble de la population.

Irradiation externe

51. Si l'on admet que le niveau actuel de la retombée troposphérique varie de 50 à 200 mcuries par km² selon la situation géographique, la dose-gonade annuelle pondérée par la population est de l'ordre de quelques dixièmes de mrem^{D78}. Il faut signaler que cette estimation est beaucoup plus aléatoire que les estimations de la dose provenant de la retombée stratosphérique.

Irradiation interne

52. En supposant qu'au niveau du sol, la concentration de produits de fission dans l'air est de 10⁻¹⁵ curie/l, on a évalué à 0,1 - 0,2 mrem la dose-gonade annuelle provenant de l'inhalation de matières radioactives. Les données

/...

disponibles sont insuffisantes pour permettre d'évaluer l'irradiation des gonades due aux produits de fission à courte période absorbée avec les aliments. Comme une irradiation par des rayons gamma du même ordre de grandeur que celle que le césium-137 produit dans les tissus apparaîtrait dans une spectrographie gamma de l'ensemble de l'organisme, on pourrait voir dans l'absence de preuves de telles concentrations d'émetteurs gamma à courte période un indice que la totalité de l'irradiation interne produit moins d'1 mrem par an.

Dose-gonade totale provenant de la retombée troposphérique

53. Etant donné le peu de renseignements dont on dispose, l'évaluation de la dose-gonade totale annuelle provenant de la retombée troposphérique est très aléatoire. On supposera ici que cette contribution est en moyenne de 0,5 mrem pour la population mondiale. Comme la retombée troposphérique disparaîtra lorsque les apports cesseront, la dose correspondante n'est reçue que pendant la période d'apport.

54. Une dose annuelle de 0,5 mrem pendant la période d'apport implique une dose potentielle de 0,5 mrem par année d'apport au rythme actuel.

Tableaux récapitulatifs

55. Les tableaux III et IV montrent dans quelle mesure la retombée stratosphérique et la retombée troposphérique contribuent à l'irradiation des gonades. Les données sont présentées sous la forme de doses potentielles par année d'apport, conformément à la définition énoncée aux paragraphes 8 et 9.

Tableau III

Dose potentielle pour certains régimes d'apport

	Dose potentielle (mrems)		Total (mrems)
	Retombée stratosphérique	Retombée troposphérique	
Par année d'apport futur dans l'hypothèse a/	2,1	0,5	2,6
Par année d'apport dans l'hypothèse b/	4,8	0,5	5,3
Contribution des essais jusqu'à la fin de 1958	24	2,5	27

/...

Tableau IV

Dose-gonade maximum pour une période de 30 ans

		Origine de la dose		Total (mrems)	Pourcentage de l'équilibre
		Retombée stratosphérique (mrems)	Retombée troposphérique (mrems)		
<u>Hypothèse a) :</u>					
Les essais cessent					
à la fin de	1958	15	2,5	18	23
	1968	27	7,5	35	45
	1978	36	12,5	49	63
	1988	42	15	57	73
Les essais se poursuivent		63	15	78	100
<u>Hypothèse b) :</u>					
Les essais cessent					
à la fin de	1958	15	2,5	18	11
	1968	42	7,5	50	32
	1978	66	12,5	79	50
	1988	82	15	97	61
Les essais se poursuivent		143	15	158	100

/...

Contribution du carbone-14

56. Lors que l'on considère la dose totale que la population humaine a reçue et recevra dans l'avenir du fait des essais d'armes nucléaires effectués jusqu'à présent, il faut tenir compte également de la contribution due à un accroissement du carbone-14. Rafter et Fergusson¹⁰, qui travaillent sous la latitude de la Nouvelle-Zélande, et d'autres chercheurs travaillant sous des latitudes septentrionales tempérées¹¹ ont signalé que, depuis 1954, la teneur en carbone-14 du carbone atmosphérique s'est accrue de 5 à 10 pour 100, probablement à cause des essais d'armes nucléaires. Etant donné qu'il y a concordance entre des valeurs correspondant à des latitudes très différentes, il est permis de supposer que cet accroissement concerne l'ensemble de la couche inférieure de l'atmosphère. Certaines observations¹⁰ montrent également qu'il s'établit très rapidement un équilibre entre cet excès de carbone-14 et le carbone des eaux de surface des océans.

57. Il est raisonnable de supposer qu'au bout d'un laps de temps relativement court par rapport à la période du carbone-14, il s'établira un équilibre entre le carbone-14 et l'ensemble du carbone de la réserve biosphérique qui est environ 60 fois plus abondant que le carbone atmosphérique¹² si l'on tient compte du carbone inorganique des océans et si l'on néglige la possibilité d'un échange à long terme avec du carbone inorganique d'autre origine. On supposera que la répartition actuelle, entre la stratosphère et la troposphère, du carbone-14 provenant des essais d'armes nucléaires est analogue à celle du strontium-90 et du césium-137, pour lesquels la teneur stratosphérique $\bar{Q}_0 = \bar{F}_d(0)/k$ est en moyenne de 15 curies par km^2 à la surface de la terre, $\bar{F}_d(0)$ étant égal à 5 curies par km^2 . On peut donc supposer qu'à l'heure actuelle, il n'est possible de déceler au niveau du sol qu'un quart de la quantité totale de carbone-14 provenant des essais effectués jusqu'à présent.

58. Il découle de ces hypothèses que les essais d'armes effectués jusqu'à présent produiront vraisemblablement un accroissement de 1/3 à 2/3 pour 100 de la quantité totale de carbone-14 dans la biosphère. On a estimé (voir annexe B) que la dose-gonade due au carbone-14 existant actuellement est d'environ 1,5 mrem par an. L'accroissement sera donc très faible - environ 5 à 10 mrem par an -, mais comme le carbone-14 a une période de 5.600 ans, la dose potentielle totale correspondra à cette dose supplémentaire reçue pendant 8.000 ans. Sa valeur se situera donc entre 40 et 80 mrem.

59. La plus grande partie de cette dose sera délivrée dans un avenir tellement éloigné qu'il est difficile de pondérer de manière à pouvoir la comparer à la même dose délivrée pendant une période beaucoup plus courte. C'est pourquoi la dose potentielle due au carbone-14 est ici considérée séparément et non ajoutée directement aux doses délivrées pendant des périodes relativement courtes, comparables à la durée de la vie humaine, bien que cette dose puisse fort bien arriver à dépasser la somme des autres.

60. Abstraction faite de l'effet direct du rayonnement bêta, il peut y avoir un effet dû à la transmutation du carbone-14 contenu dans l'acide désoxyribonucléique du matériel génétique, mais l'importance de cet effet n'a pas été déterminé expérimentalement.

IV. IRRADIATION DE LA MOELLE OSSEUSE

Relation dose-effet

61. On évaluera l'irradiation de la moelle osseuse pour tenir compte du risque d'induction de leucémie. Deux cas hypothétiques seront traités parallèlement, non pas parce qu'ils paraissent plus probables que certains autres, mais parce qu'ils sont des cas extrêmes. Dans l'un comme dans l'autre, on admettra que les effets ne dépendent pas du débit de la dose ni de son fractionnement. Toute possibilité de restauration a donc été négligée. Les hypothèses retenues sont les suivantes :

- A) La dose significative comporte un seuil
- B) Il n'y a pas de seuil, et la relation dose-effet est linéaire.

Hypothèse d'une relation à seuil

62. Lorsqu'on part de l'hypothèse qu'il existe un seuil, il convient de rechercher si l'irradiation la plus forte donnera une dose qui dépasse la dose-seuil. Si tel n'est pas le cas, on peut évaluer la marge de sécurité, c'est-à-dire déterminer de combien l'irradiation moyenne peut être accrue avant que le seuil ne soit dépassé. A cet effet, même si l'on calcule la dose moyenne reçue par une population, il faut aussi évaluer d'une manière ou d'une autre l'importance des écarts par rapport à cette moyenne.

63. Comme dose significative (dans l'hypothèse où il existe un seuil), on prendra la dose-moelle osseuse moyenne pour une période de 70 ans, calculée pour l'ensemble de la moelle osseuse active. Cette dose peut très bien ne pas être significative si la moelle osseuse n'est exposée qu'en partie, mais étant donné qu'à long terme l'irradiation de la moelle imputable aux produits de fission incorporés dans les tissus osseux sur une longue période est assez uniforme, on utilisera ici, pour les calculs, la dose-moelle osseuse moyenne pour une période de 70 ans.

64. La dose réellement significative est peut-être la dose maximum reçue par les cellules de la moelle osseuse active, en quelque endroit que ce soit.

Toutefois, la moelle osseuse ne pouvant être exposée à des radiations pendant une période plus longue que la durée de la vie, on a retenu la dose pour une période de 70 ans, faute de preuves indiquant qu'une période plus brève serait appropriée.

/...

65. Si l'on suppose que toute l'énergie d'une charge de l'organisme en Sr^{90} équivalant à 1 micromicrocurie de Sr^{90} par gramme de calcium est dissipée dans 7.000 grammes de tissus osseux, l'intensité moyenne d'irradiation - ou débit de dose moyen - sera de 2,64 mrems par année. On considérera ici qu'une partie de cette énergie est délivrée aux 1.500 grammes de moelle rouge, mais on ne tiendra pas compte de l'énergie délivrée à la moelle jaune ou aux tissus extérieurs au squelette. La valeur moyenne de l'intensité d'irradiation a été évaluée à 0,6 mrem par an pour la moelle osseuse et à 0,9 mrem par an pour le tissu spongieux des os^{13,14}. Si l'on admet que le tissu spongieux représente 10 à 12,5 pour 100 de la masse totale des os, il en résulte une intensité d'irradiation de 2,7 mrems par an pour le tissu compact et de 2,5 mrems par an pour l'ensemble des tissus osseux (cf. Tableau V).

Tableau V

Intensités d'irradiation moyennes et maximums, en mrems par an, pour l'empoisonnement chronique micromicrocurie de Sr^{90} par gramme de calcium¹³

	A. Répartition uniforme de la charge		B. Répartition non uniforme (Facteur = 2)	
	Maximum	Moyenne	Maximum	Moyenne
Moelle osseuse	3,0 (1,8)	0,6	5,9 (3,6)	0,6
Tissu spongieux	1,7	0,9	3,4	0,9
Tissu compact	2,7	2,7	5,4	2,7
Ensemble des tissus compact et spongieux	2,7	2,5	5,4	2,5

Les chiffres entre parenthèses sont les valeurs de la dose-moelle osseuse maximum à l'intérieur du tissu spongieux.

/...

66. Le seul facteur dont on a tenu compte pour le calcul des intensités d'irradiation maximums, dans les cas A et B est la distribution géométrique de la charge uniformément répartie.¹³ Pour la moelle osseuse, l'intensité d'irradiation maximum sera atteinte dans les canaux de Havers, à l'intérieur du tissu compact. La différence entre les valeurs de 2,7 et de 3,0 dans le tableau V, correspond à une différence de pouvoir d'arrêt. Les valeurs maximums dues à une répartition non uniforme sont fondées uniquement sur les différences de minéralisation entre des régions dont les dimensions linéaires sont du même ordre que la pénétration des particules β émises par l'yttrium-90. Il n'a pas été tenu compte de l'influence des changements microscopiques dans le degré de minéralisation, mais on pense que cette influence est relativement peu importante et que, très probablement, le facteur correspondant est inférieur à 2. Le rapport entre la dose-moelle osseuse maximum et la dose-moelle osseuse moyenne sera d'environ 10 (facteur 2 pour la répartition non uniforme du ^{90}Sr et facteur 5 pour l'augmentation de l'intensité d'irradiation dans les cavités closes).

67. Pour pouvoir dire où se situe la dose-seuil, il faudrait d'abord avoir réuni des données qui confirment la théorie de l'existence d'un seuil. Faute de données de ce genre, tout ce que l'on peut dire, d'après les renseignements disponibles est que le seuil, s'il en existe un, pourrait se situer entre zéro et 400 rems¹⁵.

Hypothèse d'une relation dose-effet linéaire, sans seuil

68. Dans l'hypothèse opposée où il n'existe pas de seuil, la relation dose-effet étant linéaire, on peut calculer le nombre d'individus qui seront atteints de leucémie après une certaine irradiation de la moelle osseuse en multipliant l'effectif de la population exposée (que l'on supposera constant) par la dose appropriée et une constante dose-effet. La dose appropriée est la dose-moelle osseuse moyenne par individu, la moyenne étant calculée pour la masse totale de la moelle active. On supposera que tout accroissement ΔD de la dose-moelle osseuse moyenne par individu provoquera à l'avenir ΔN cas de leucémie dans les conditions définies par la relation ci-après :

$$\Delta N = K_1 \cdot P \cdot \Delta D \quad (39)$$

où P est l'effectif de la population et K_1 la constante dose-effet pour l'induction de leucémies.

/...

69. Il est possible de calculer la constante dose-effet pour l'induction de leucémies à partir des données réunies jusqu'à présent sur la fréquence de cette maladie à la suite d'une irradiation déterminée (voir annexe G). On supposera qu'une dose unique de 1 rem délivrée à la totalité de la moelle rouge provoquera chaque année 1,5 cas par million de personnes exposées au cours des 15 années suivant l'exposition.²² Il y aura donc au total 23 cas de leucémie par million de personnes exposées et

$$K_1 = 23 \text{ rems}^{-1} \text{ par million}$$

Ce facteur peut être appliqué à toutes les personnes ayant une espérance de vie supérieure à 15 ans au moment de l'exposition. Dans une population type où la longévité est de 70 ans, il vaut donc pour 80 pour 100 de la population. On supposera dans la suite qu'il s'applique à toute la population.

Irradiation de la moelle osseuse due à la retombée stratosphérique

70. Dans le cas de la retombée stratosphérique, la plus importante source d'irradiation de la moelle osseuse est le strontium-90 absorbé par les os. Il existe une autre source d'irradiation - externe et interne - de la moelle osseuse : le césium-137. L'irradiation de la moelle osseuse et l'irradiation des gonades dues au césium-137 varient l'une et l'autre de la même manière en fonction du temps et sont à peu près du même ordre de grandeur. Les courbes de la figure 3 rendent donc également compte de l'irradiation de la moelle osseuse due au césium-137. Toutefois, cette

²² Si le risque d'apparition de leucémies ne se limite pas aux quinze premières années qui suivent l'exposition, mais reste constant pendant toute la vie, l'accroissement dN_k sera différent pour chaque groupe d'âge k de la population exposée à une dose dD . Le facteur dose-effet correspondant serait $1,5 (70 - \tau_k)$ rem^{-1} par million de personnes τ_k étant l'âge au moment de l'exposition. Cependant, les données disponibles semblent indiquer qu'après 10 ans le nombre annuel de cas par million de personnes diminue^{16,17}; la possibilité d'un risque constant ne sera donc pas envisagée ici. L'âge moyen de la population type étant de 35 ans, le facteur dose-effet moyen serait $35 \times 1,5 = 52 \text{ rem}^{-1}$ par million de personnes, c'est-à-dire seulement 2,3 fois plus élevé que le facteur hypothétique.

irradiation ne représentant qu'environ 5 pour 100 de celle qui est due au strontium-90, il n'en sera pas tenu compte dans les calculs qui suivent et l'on considérera que l'irradiation de la moelle osseuse imputable au strontium-90 est la seule irradiation importante résultant de la retombée stratosphérique.

71. L'irradiation de la moelle osseuse imputable au strontium-90 diffère de l'irradiation des gonades par le césium-137 non seulement quantitativement mais encore du point de vue de sa répartition dans le temps. La deuxième est fonction du débit de la retombée et du dépôt au moment de l'exposition car le césium-137 est assez rapidement excrété. Au contraire, étant donné la longue période de rétention du strontium-90, la moelle osseuse reste exposée longtemps après l'absorption de cet isotope et la relation entre les fonctions représentant la retombée et l'irradiation de la moelle osseuse à un moment déterminé est assez compliquée.

Charge totale des tissus osseux en strontium-90

72. On a déjà établi, d'une manière approximative, la relation entre la charge de l'organisme humain en strontium-90, pour toute la population, et celle de l'alimentation (annexe D) en partant de l'hypothèse que tout le calcium se trouvant dans l'organisme aura à tout moment une charge de strontium correspondant à celle des aliments absorbés. C'est évidemment là une exagération mais l'erreur n'est sans doute pas grave en ce qui concerne les enfants et adolescents, étant donné la façon dont s'opère dans le temps la contamination par le strontium-90. On peut faire une évaluation plus rigoureuse et plus générale en utilisant les relations qui existent entre les taux d'accumulation du calcium et du strontium et l'évolution des rapports strontium-90/calcium en fonction du temps. Cette méthode mathématique comporte deux avantages : a) elle donne des résultats plus proches de la réalité pour la charge en strontium-90 et b) elle fournit, pour ce qui est de l'âge, de la date de naissance et de l'évolution des rapports strontium-90/calcium en fonction du temps, des relations générales qui permettent de calculer les doses-moelle osseuse moyenne.

73. Le strontium-90 est absorbé par l'organisme par l'intermédiaire de la chaîne alimentaire. Pour rendre compte des modifications que subit le rapport strontium-90/calcium à chaque étape du cycle sol-tissus osseux, on utilise souvent

/...

des facteurs de discrimination, mais aux fins des présents calculs, on supposera que le taux d'absorption de strontium-90 est donné par la formule empirique ci-après (voir annexe D) :

$$c(t) = a_r \cdot F_r(t) + a_d \cdot F_d(t) \quad (40)$$

où $c(t)$ = rapport strontium-90/calcium dans les minéraux absorbés par les tissus osseux

a_r et a_d = constantes dont la valeur dépend de la chaîne alimentaire considérée.

74. L'équation (40) permet de calculer la quantité (q) de strontium-90 incorporé par les tissus osseux en même temps qu'une certaine masse (α) de calcium :

$$q(t) = c(t) \cdot \alpha \quad (41)$$

Dans les paragraphes qui suivent, q et α représenteront respectivement les taux d'incorporation de strontium-90 et de calcium. Le taux net d'accroissement dépendra du taux de renouvellement des substances antérieurement incorporées.

75. A l'aide d'une formule empirique du type de la formule (40) qui est extrapolable sur 100 ans, on peut calculer la charge de strontium-90 dans les tissus osseux si l'on connaît $c(t)$ et moyennant un certain nombre d'hypothèses sur le métabolisme du calcium et du strontium. On verra que le résultat final (intégrale de l'intensité d'irradiation par rapport à un temps infini ou dose maximum pour une période de 70 ans) dépend peu des hypothèses concernant le métabolisme dans les tissus osseux (voir paragraphe 101).

76. Le rythme auquel le calcium et le strontium-90 des produits alimentaires se fixent dans le squelette dépend de plusieurs processus dont le plus important est la formation de nouveaux minéraux dans les os ainsi que la résorption des minéraux s'y trouvant déjà. Aux fins de la présente étude, on peut négliger les échanges superficiels d'ions entre les tissus osseux et le sang. Il est possible alors de déterminer approximativement la quantité de calcium absorbée, au moyen d'équations reposant sur la différence entre les taux d'accumulation et de résorption.

77. On connaît le processus d'augmentation de la teneur de l'organisme humain en calcium, en fonction de l'âge.¹⁷ Aux fins des présents calculs, on peut rendre compte d'une manière suffisamment exacte de ce processus en supposant que la teneur du corps en calcium augmente proportionnellement à l'âge, à partir de 6 mois après

/...

la conception jusqu'à l'âge de 20 ans. On ne commet qu'une erreur peu importante en remplaçant la courbe d'accroissement sigmoïde par une droite s'interrompant à l'âge de 20 ans car le problème essentiel est de déterminer l'intégrale de la dose dans un intervalle de 70 ans.

78. Le métabolisme des sels dans les tissus osseux a été étudié en détail et l'on a proposé des modèles de complexité variable¹⁸⁻²¹. Le modèle simple qui est décrit ci-dessous est conforme aux principes énoncés dans les ouvrages de référence. En utilisant les données approximatives concernant l'accroissement de la teneur du corps en calcium, on peut calculer l'absorption nette de calcium aux moyens des équations suivantes :

($\tau < 20$ ans)

$$\frac{dB(\tau)}{d\tau} = \alpha - k_0(\tau) \cdot B(\tau) - \text{const.} = \beta \quad (42)$$

où $B(\tau) = \beta \tau$, et $\alpha = \beta + k_0(\tau) \cdot B(\tau) = \beta (1 + k_0 \tau)$ (42a)

($\tau > 20$ ans)

$$\frac{dB(\tau)}{d\tau} = \alpha - k_0(\tau) \cdot B(\tau) = 0 \quad (43)$$

où $B(\tau) = \text{const.} = B_a$, et $\alpha = k_0(\tau) \cdot B_a$ (43 a)

avec, dans les deux équations :

- α = taux d'accumulation totale de calcium,
- $k_0(i)$ = fraction de calcium renouvelée par unité de temps,
- β = accroissement net constant de la masse de calcium par unité de temps en dessous de 20 ans,
- $B(\tau)$ = masse de calcium dans les tissus osseux à l'âge τ ,
- B_a = masse de calcium dans les tissus osseux de l'adulte.

79. On ne connaît pas bien les variations des taux de renouvellement du calcium en fonction de l'âge chez l'homme. Il se pourrait, semble-t-il, que ces taux varient selon des fonctions à exposants, des fonctions exponentielles ou des séries de fonctions exponentielles. Cependant, on n'a pas de données permettant de procéder à des calculs. Il faut donc déterminer comment différentes valeurs du

/...

taux de renouvellement influenceront les résultats obtenus

80. Dans la formule générale

$$\frac{dB}{dt} = (X - k_0) \cdot B(t) \quad (44)$$

il est intéressant de donner à k_0 deux valeurs extrêmes.

I) Si $k_0 = \infty$, une quantité infinie de calcium est absorbée (et renouvelée) par unité de temps. Il en résulte que les tissus osseux sont continuellement en état d'équilibre parfait avec le milieu ambiant et que la concentration apparente de strontium-90 dans les tissus osseux, $s(t, \tau)$, est à tout moment

$$s(t, \tau) = c(t); \quad (45)$$

II) Si $k_0 = 0$, le calcium n'est absorbé que pendant la période de croissance, à un rythme λ , puis retenu dans l'organisme pendant toute la vie.

81. Etant donné que toute courbe de rétention peut être calculée approximativement au moyen d'une série de fonctions exponentielles représentant les diverses constantes de renouvellement fractionnel, le résultat obtenu se trouvera vraisemblablement compris entre les deux limites correspondant aux cas extrêmes (I) et (II). On verra que ces valeurs extrêmes de k_0 donnent des résultats à peu près analogues; dans ces conditions, il semble inutile d'essayer de formuler des hypothèses plus exactes.

82. Une fois qu'on a fait des hypothèses pour le métabolisme du calcium, on peut tirer de l'équation ci-après la charge de strontium-90 dans les tissus osseux.

$$\frac{dQ(\tau)}{d\tau} = q - k_1 \cdot Q(\tau) \quad (46)$$

où q = absorption de strontium-90 par unité de temps - $c(t) \cdot \lambda$,

k_1 = fraction de strontium-90 renouvelée par unité de temps,

$$k_1 = k_{Sr} + \lambda,$$

k_{Sr} étant le facteur de renouvellement biologique et

λ la constante de décroissance radioactive,

$Q(\tau)$ = quantité totale de strontium-90 dans les tissus osseux.

83. D'après les observations qui ont été faites jusqu'à présent, on peut raisonnablement affirmer que les taux de renouvellement du calcium et du strontium sont

/...

pratiquement les mêmes. On verra, au paragraphe 100, quelles sont les conséquences de diverses hypothèses sur la rétention du strontium. L'existence d'une constante K_1 dans l'équation (46) indique que la rétention du strontium dans les tissus osseux est une fonction exponentielle du temps. Les calculs ci-après reposent sur cette hypothèse et l'on évaluera l'erreur qui pourrait en résulter.

84. Pour calculer la concentration apparente de strontium-90 dans les tissus osseux, c'est-à-dire le rapport $s(t, \tau) = Q(t, \tau)/B(\tau)$, il suffit alors d'intégrer l'équation (46), en admettant que k_0 est également constant.

$$(i < 20 \text{ ans})$$

$$s(t, \tau) = e^{-k_1 \tau} \cdot \frac{1}{\tau} \int_0^{\tau} c(t) \cdot (1 + k_0 \tau) \cdot e^{k_1 t} dt \quad (47)$$

$$(i > 20 \text{ ans})$$

$$s(t, \tau) = e^{-k_1 \tau} \left[\frac{1}{20} \int_0^{20} c(t) \cdot (1 + k_0 \tau) \cdot e^{k_1 t} dt + k_0 \cdot \int_{20}^{\tau} c(t) \cdot e^{k_1 t} dt \right] \quad (48)$$

Formules empiriques pour $c(t)$

85. On ne peut utiliser les équations (47) et (48) que si l'on connaît $c(t)$. Comme il est dit au paragraphe 73, on peut tirer des données disponibles des formules empiriques du type de l'égalité (40). En pratique, on admettra que le terme dépendant du débit de la retombée peut être négligé dans les extrapolations à long terme. En conséquence, on utilisera l'équation ci-après :

$$c(t) = a \cdot F_d(t) \quad (49)$$

86. On trouvera dans l'annexe D (paragraphe 118-120) des données et des constantes permettant d'exprimer la relation entre le dépôt accumulé de strontium-90 et le rapport strontium-90/calcium dans le lait (Perry, N.Y. et Royaume-Uni) et dans le riz (Japon). Ces valeurs serviront ici à calculer des doses d'exposition types dans l'hypothèse où ces deux aliments constituent l'unique source de calcium et de strontium-90 dans l'alimentation. Pour déterminer le rapport strontium-90/calcium dans les substances nouvellement incorporées par les tissus osseux, on peut

calculer la constante \underline{a} à partir du rapport strontium-90/calcium dans les deux alimentations envisagées et du facteur de discrimination lait-tissus osseux²².

1) Alimentation à base de lait :

$$a_M = 0,15 \text{ } \mu\text{C Sr}^{90}/\text{g Ca par mc/km}^2$$

2) Alimentation à base de riz :

$$a_R = 0,9 \text{ } \mu\text{C Sr}^{90}/\text{g Ca par mc/km}^2$$

Intensité d'irradiation de la moelle osseuse

87. L'intensité moyenne d'irradiation de la moelle osseuse sera proportionnelle à la concentration apparente de strontium-90, $s(t, \dots)$:

$$\frac{dD(t, \dots)}{dt} = \gamma \cdot s(t, \dots) \quad (50)$$

Comme facteur de proportionnalité γ , on prendra 0,6 mrem par an et par unité de strontium et comme intensité d'irradiation des tissus osseux 2,5 mrems par an et par unité de strontium (voir le paragraphe 65).

88. L'incertitude que comportent les évaluations les plus soigneuses de la constante γ est due surtout au fait qu'on ne sait pas exactement où le strontium absorbé par les tissus osseux se fixe par rapport à la moelle osseuse active, qu'on ne peut pas calculer facilement la répartition effective de la dose à partir des données concernant la répartition du strontium et qu'on est mal renseigné sur la répartition des cavités médullaires selon la dimension.

22 Cette constante donne le rapport du strontium-90 dans les tissus osseux nouvellement formés. Dans le cas d'une excréation rapide s'opérant au cours d'une brève période après l'absorption (rétention selon une fonction à exposant), on suppose que le strontium-90 et le calcium sont excrétés au même rythme. S'il en est ainsi, le rapport pour les fractions retenues pendant de longues périodes sera invariable et les équations (41), (42a) et (43a) donneront toujours la quantité de strontium-90 absorbée et incorporée dans les tissus osseux pendant de longues périodes. Dans le cas inverse, $c(t)$ devrait donner le rapport strontium-90/calcium pour les fractions les plus durablement fixées. Dans ce dernier cas, la constante \underline{a} aura des valeurs plus faibles si le strontium-90 est excrété plus rapidement que le calcium.

89. Etant donné que l'intensité d'irradiation est fonction de la date de naissance aussi bien que du temps, on ne peut pas la représenter par une seule courbe dans chaque hypothèse concernant les séries d'essais. Dans les sections ci-après, on intégrera, par rapport à un temps infini, la dose-moelle osseuse moyenne par individu de manière à obtenir la dose potentielle imputable à chaque série d'essais; on calculera également les doses maximums pour une période de 70 ans afin de déterminer la marge de sécurité dans le cas où il existerait un seuil.

Intégrale par rapport à un temps infini

90. Pour calculer la dose potentielle résultant de l'apport imputable à une série d'essais donnée, on peut intégrer par rapport à un temps infini la dose-moelle osseuse moyenne par individu. Dans les paragraphes ci-après, on a calculé la dose potentielle par une méthode différente à partir de l'effet d'une absorption infinitésimale de strontium-90 à un moment donné.

91. La quantité de strontium-90 absorbée par les tissus osseux au cours d'une période infinitésimale dt , au moment t , peut s'exprimer de la façon suivante :

$$dQ = k_1 \cdot c(t)dt \quad (51)$$

Pour une personne d'âge u au moment de l'absorption, la rétention à l'âge sera :

$$dQ(u, \infty) = dQ(u, t) \cdot e^{-k_1(\infty - u)} \quad (52)$$

92. En intégrant dans l'intervalle constitué par le reste de la vie la dose due au strontium-90 ainsi retenu, on obtient l'accroissement de la dose-moelle osseuse pour la durée de la vie, imputable à une absorption unique de strontium-90 pendant la période dt , à l'âge u , et au moment t , soit :

$$dD(u, t) = F_m(u) \cdot c(t)dt \quad (53)$$

Le facteur d'accroissement de la dose $F_m(u)$ pour les personnes ayant une espérance de vie de m années sera donné par les formules ci-après (voir le paragraphe 97).

$$\text{Moins de 20 ans} \quad F_m(u) = \frac{k_1}{F_1 - E_a} \cdot (1 - e^{-k_1(m-u)}) \quad (54)$$

$$\text{Plus de 20 ans} \quad F_m(u) = k_1 \cdot (1 - e^{-k_1(m-u)}) \quad (55)$$

En général, $\frac{\lambda}{B_a} = k_0 \cdot \frac{B(u)}{B_a} + \frac{\lambda}{B_a}$ et, avec le modèle linéaire simplifié de croissance des tissus osseux, $\frac{\lambda}{B_a} = \frac{1}{20} (1 + k_0 u)$, pour $u < 20$ ans.

93. La valeur $d\bar{D}$ de l'accroissement moyen de la dose reçue pendant la durée de la vie par l'ensemble de la population ayant pu absorber du strontium-90 pendant le temps dt , au moment t , est donnée par :

$$d\bar{D}(t) = \frac{1}{m} \int_0^m dD \, du = \lambda \cdot c(t) \, dt \cdot \bar{F}_m \quad (56)$$

où

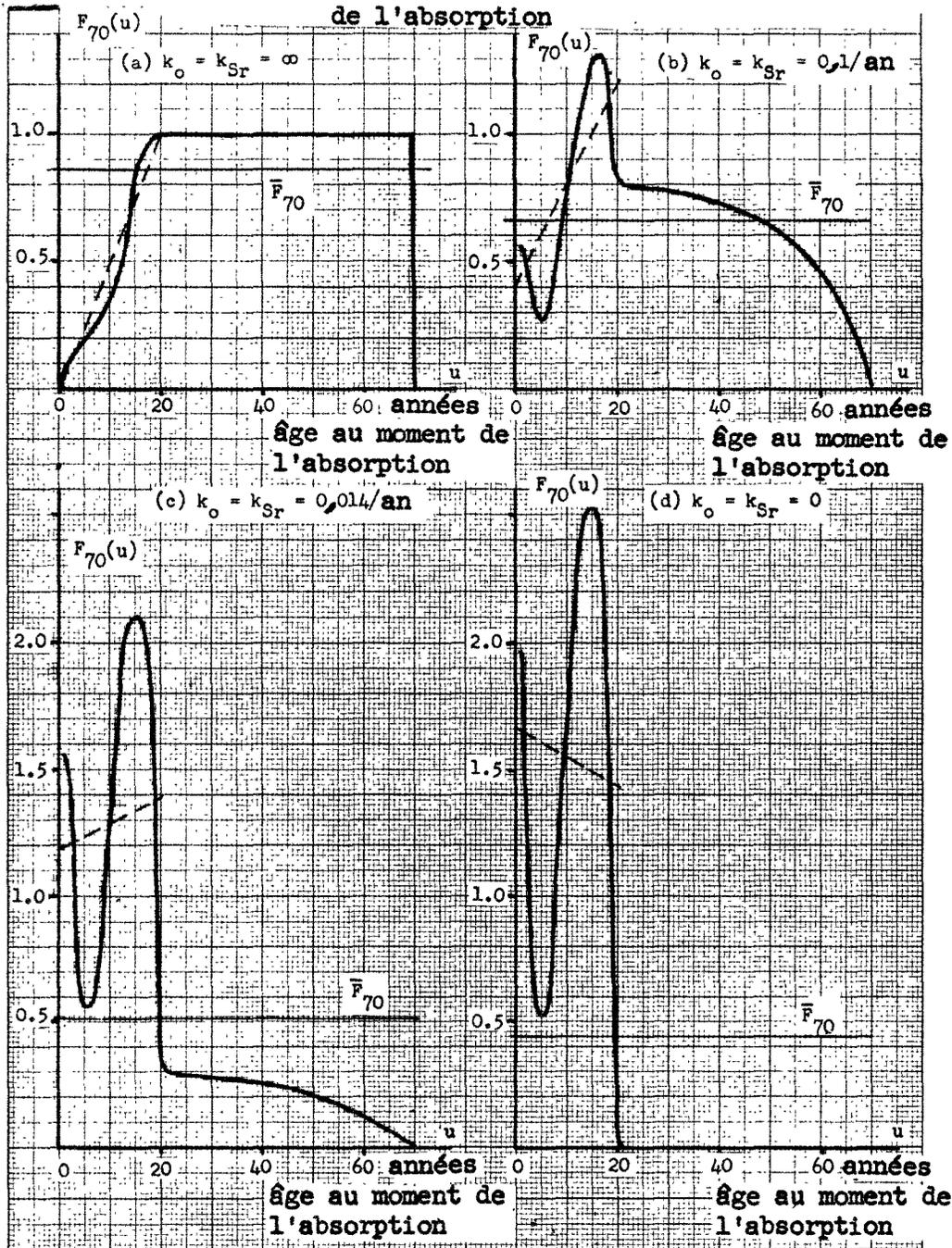
$$\bar{F}_m = \frac{1}{m} \cdot \int_0^m F_m(u) \, du \quad (57)$$

94. Si l'on connaît le facteur d'accroissement moyen de la dose \bar{F}_m pour une population ayant une longévité moyenne de m années, la dose potentielle imputable à l'apport provoquant une contamination $c(t)$ sera donnée par :

$$D_{\infty} = \bar{F}_m \cdot \lambda \int_{-\infty}^{+\infty} c(t) \, dt \quad (58)$$

95. La figure 5 donne le facteur d'accroissement de la dose $F_m(u)$ calculé d'après les chiffres fournis par Mitchell et ses collaborateurs¹⁷ pour l'accumulation de calcium dans le squelette. On a donné une interprétation biologique de ce facteur dans les notes accompagnant la figure. Les diagrammes indiquent les valeurs moyennes de F_{70} pour une population type où tous les individus atteindraient l'âge de 70 ans. On verra que F_m dépend peu des taux de renouvellement du calcium et du strontium ni de l'âge moyen de la population. Avec le modèle linéaire simple d'accumulation de calcium avant l'âge de 20 ans, on obtient les résultats indiqués par les lignes en pointillés dans la figure 5.

Figure 5. Facteur d'accroissement de la dose F_{70} pour une espérance de vie de 70 ans en fonction de l'âge au moment de l'absorption



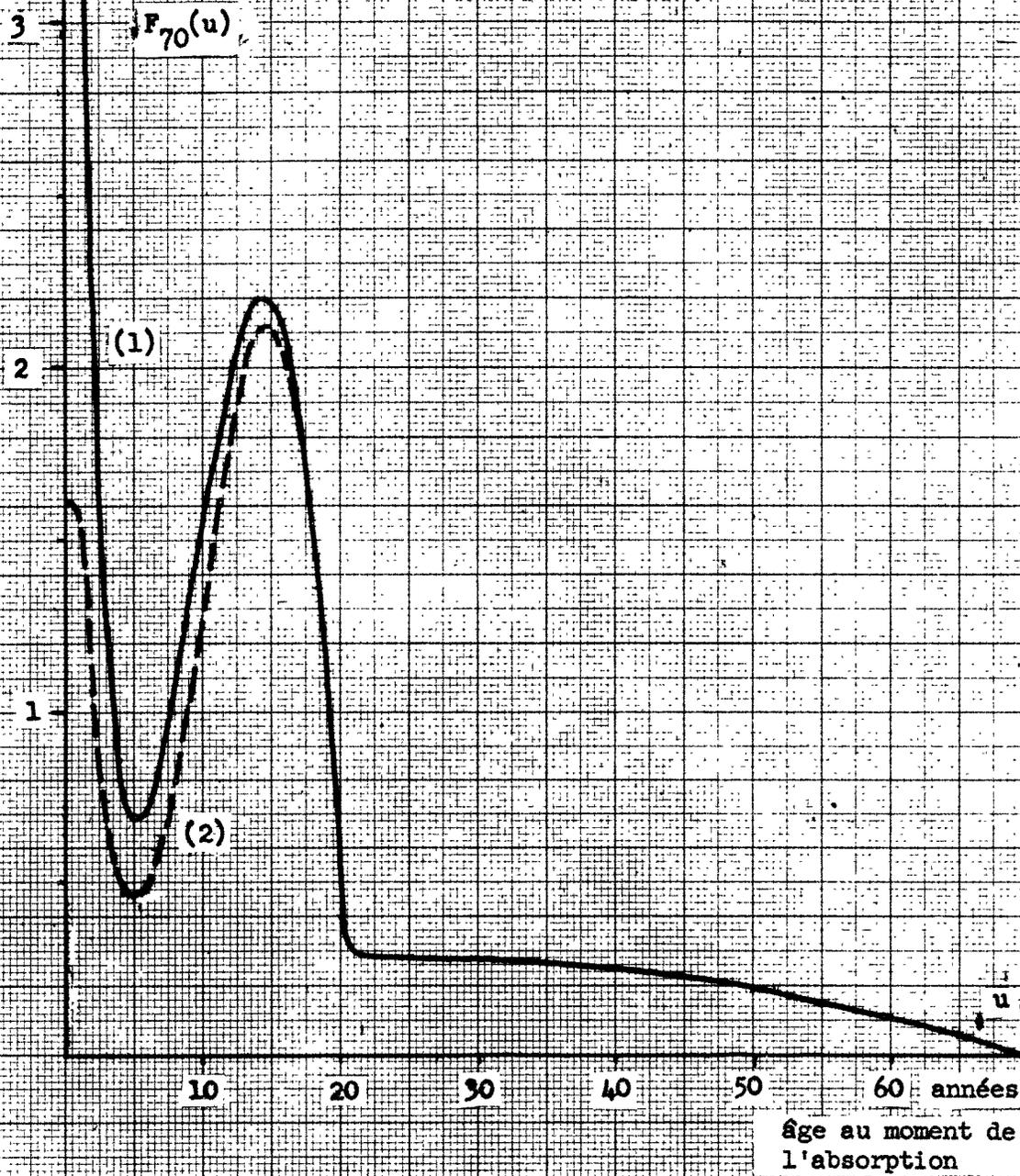
- Cas extrême d'équilibre instantané entre le strontium-90 des tissus osseux et celui du milieu, avec une constante de renouvellement infinie. Noter la dose élevée qui en résulterait pour l'adulte.
- On suppose que la période biologique du strontium est de 7 ans ($k_{Sr} = 0,1/\text{an}$).
- On suppose que la période biologique du strontium est de 50 ans ($k_{Sr} = 0,014/\text{an}$). Noter l'importance croissante de l'absorption et de la rétention chez l'enfant et l'absorption réduite chez l'adulte.
- Pratiquement pas de renouvellement du strontium. Absorption seulement pendant la période de croissance des tissus osseux chez l'enfant.

96. Les équations (54) et (55) reposent sur une hypothèse précise concernant la dose-moelle osseuse significative chez les enfants. Dans le cas d'une relation dose-effet linéaire, sans seuil, les doses-moelle osseuse moyennes doivent être pondérées par la masse de la moelle. On a envisagé les deux cas extrêmes ci-après :

- 1) Il n'est pas fait de pondération pour tenir compte du fait que la masse de la moelle osseuse est plus faible chez l'enfant.
- 2) La dose reçue par les enfants est pondérée en fonction de la masse des tissus osseux.

Comme le rapport de la masse de la moelle osseuse à la masse des tissus osseux est plus élevé chez l'enfant que chez l'adulte, les résultats obtenus dans le deuxième cas comportent une réduction exagérée et il est probable que les valeurs vraies se situent entre celles que l'on obtient dans le premier et dans le deuxième cas. La figure 6 illustre l'influence de la pondération en fonction de la masse de la moelle.

Figure 6. Influence de la pondération en fonction de la masse de la moelle sur le facteur d'accroissement de la dose $F_{70}(u)$, dans l'hypothèse où la période biologique du strontium est de 50 ans.



- 1) Sans pondération pour tenir compte du fait que la masse de la moelle est plus faible chez l'enfant.
- 2) Avec pondération en fonction de la masse des tissus osseux chez l'enfant.

97. Lorsque l'on pondère la masse de la moelle en fonction de celle des tissus osseux, on peut déduire les formules (54) et (55) de la formule (53) où $dD(u,t)$ est l'intégrale de la dose imputable à $dQ(u, \tau)$ pour le reste de la vie; on a :

$$dD(u, t) = \int_u^m \frac{d}{d\tau} (dD) d\tau \quad (59)$$

et

$$\frac{d}{d\tau} (dD) = \frac{\lambda}{B_a} \cdot dQ(u, \tau) \quad (60)$$

Après intégration, on a :

$$u < 20 \text{ ans} : dD(u, t) = \int_u^m c(t) dt \cdot \frac{1}{k_1 \cdot B_a} (1 - e^{-k_1(m-u)}) \quad (61)$$

$$u > 20 \text{ ans} : dD(u, t) = \int_u^m c(t) dt \cdot \frac{k_0}{k_1} (1 - e^{-k_1(m-u)}) \quad (62)$$

98. Si l'on ne pondère pas en fonction de la masse de la moelle, il faut remplacer la formule (60) par la formule ci-après pour $u < 20$ ans :

$$\frac{d}{d\tau} (dD) = \frac{1}{B} \cdot dQ(u, \tau) \quad (63)$$

qui, avec le modèle linéaire simple de croissance des tissus osseux, donne :

$$u < 20 \text{ ans} \quad dD(u, t) = \int_u^m c(t) dt \cdot (1 + k_0 u) \left\{ e^{k_1 u} \left[E_i(k_1 u) - E_i(20k_1) \right] + \frac{1}{20k_1} (e^{-k_1(20-u)} - e^{-k_1(m-u)}) \right\} \quad (64)$$

où E_i désigne l'intégrale d'une fonction exponentielle.

En conséquence, le facteur d'accroissement de la dose sera :

$$F_m(u) = (1 + k_0 u) \cdot \left\{ e^{k_1 u} \left[E_i(k_1 u) - E_i(20k_1) \right] + \frac{1}{20k_1} (e^{-k_1(20-u)} - e^{-k_1(m-u)}) \right\} \quad (65)$$

La figure 6 illustre l'influence de la pondération en fonction de la masse de la moelle. Tous les autres diagrammes ont été établis à partir des formules (54) et (55) et non à partir de la formule (65); en d'autres termes, ils représentent la pondération en fonction de la masse de la moelle.

/...

99. La figure 7 montre quelles sont, pour diverses valeurs de l'espérance de vie (m) les variations du facteur d'accroissement de la dose $F_m(u)$ dans le cas spécial où $k_o = k_{Sr} = 0,014$.

100. La figure 8 indique les variations de $\bar{F}_m(u)$ dans le cas où le renouvellement du strontium est plus rapide que celui du calcium.

101. La figure 9 résume les résultats en indiquant les variations du facteur moyen d'accroissement de la dose \bar{F}_m en fonction du taux de renouvellement du calcium et de l'espérance de vie pour une population déterminée. Il apparaît que les variations sont très limitées : elles sont comprises entre 0,5 à 0,6 pour des valeurs vraisemblables de k et de m .

102. Etant donné que \bar{F}_m n'est pas lié de façon très sensible aux hypothèses relatives au métabolisme dans les tissus osseux, la rétention de calcium sera ici évaluée de manière approximative au moyen d'une seule fonction exponentielle du temps, avec $k_o = 0,014$, ce qui correspond à une période de 50 ans. C'est d'ailleurs le chiffre proposé par la CIPK. Si l'on suppose que le strontium-90 a la même période biologique que le calcium, k_1 aura pour valeur 0,04. Dans les calculs ci-après, on prendra $F_m = 0,5$. Si l'on ne fait pas de correction pour tenir compte de la masse de la moelle, le facteur sera alors égal à 0,65 pour $m = 70$ ans dans le cas représenté par la figure 6.

Figure 7. Variation du facteur d'accroissement de la dose $F_m(u)$ en fonction de l'espérance de vie (m), dans l'hypothèse où la période biologique du strontium est de 50 ans.

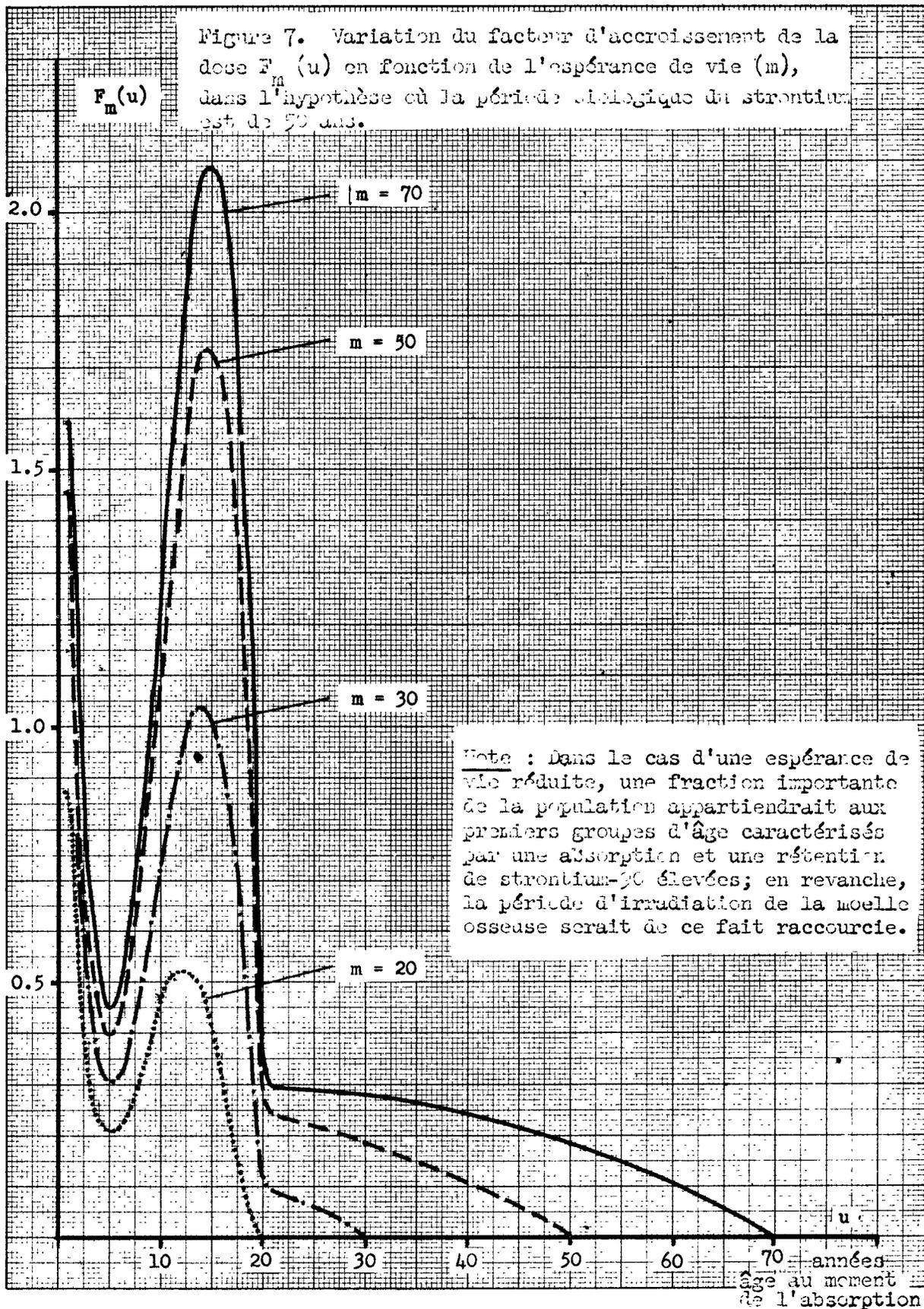
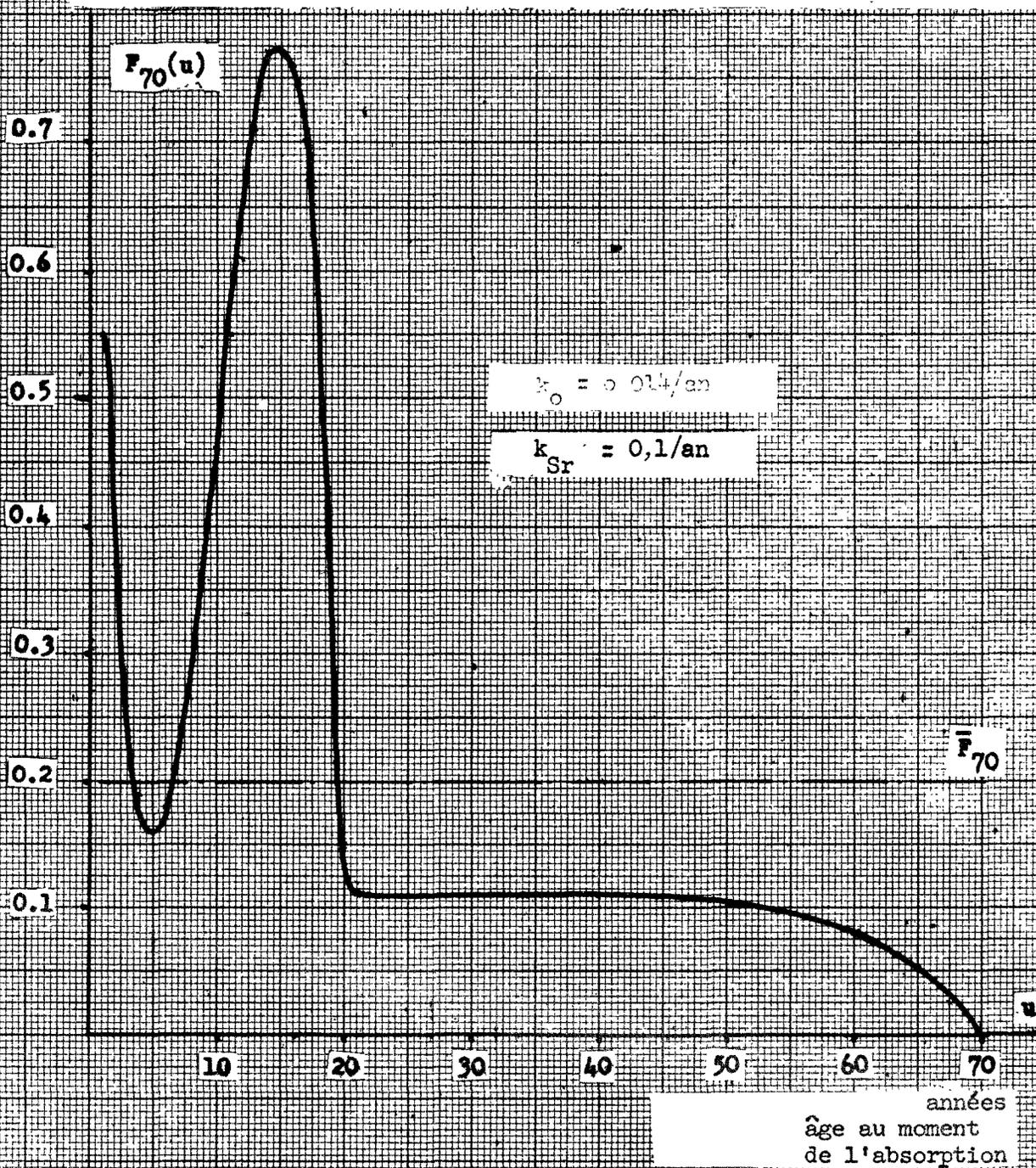
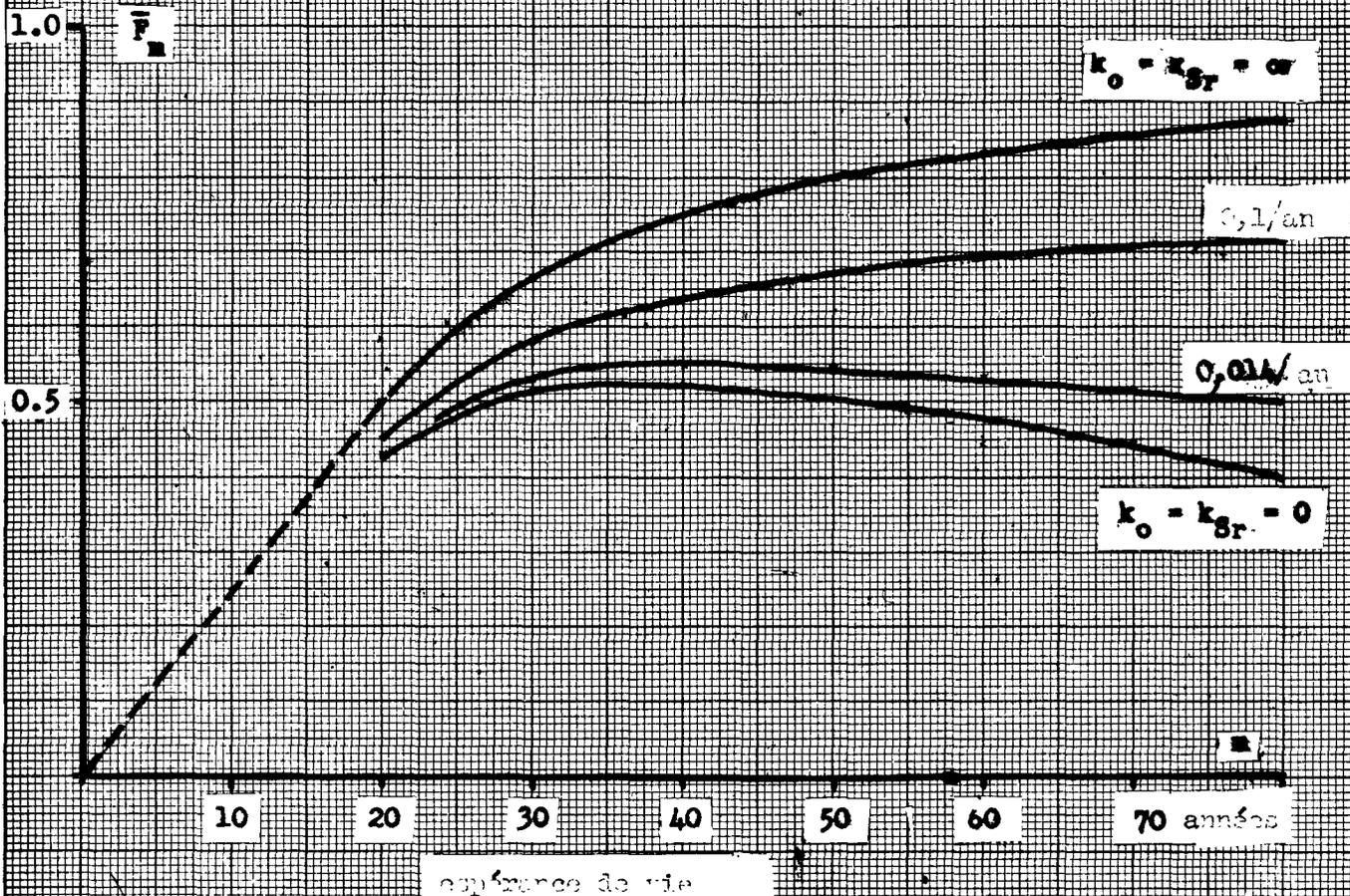


Figure 8. Facteur d'accroissement de la dose $F_{70}(u)$ en fonction de l'âge au moment de l'absorption de strontium-90, dans l'hypothèse où la période biologique du calcium est de 50 ans et celle du strontium de 7 ans.



Note : Il s'agit d'un cas extrême fondé sur l'hypothèse selon laquelle le strontium est renouvelé beaucoup plus rapidement que le calcium. Les expériences sur les animaux et les données provenant des cas d'empoisonnement par le radium chez l'homme semblent indiquer que les deux taux de renouvellement sont extrêmement faibles chez l'adulte.

Figure 9. Moyenne du facteur d'accroissement de la dose, calculée pour l'ensemble de la population et pour différentes constantes de renouvellement, en fonction de l'espérance de vie.



Note : Pour des espérances de vie comprises entre 30 et 50 ans et pour des valeurs de $k_{Sr} = k_0$ dans les tissus osseux comprises entre 0 et ∞ , le facteur moyen d'accroissement de la dose reçue par la population (\bar{F}_m) ne varie qu'entre 0,5 et 0,8. Si l'intervalle de variation est si réduit, c'est à cause des effets compensatoires des modifications correspondant aux diverses hypothèses retenues. Par exemple, à un renouvellement plus rapide correspondra une diminution de la rétention du strontium chez les enfants, et un accroissement de l'absorption et de l'irradiation chez les adultes. Si l'espérance de vie moyenne était plus courte, une plus grande fraction de la population appartiendrait aux premiers groupes d'âge caractérisés par une absorption de strontium élevée; en revanche, l'irradiation totale pendant la durée de la vie serait de ce fait réduite.

103. Si l'on fait $\bar{F}_m = 0,5$ et $\gamma = 0,6$, les équations (58) et (49) donnent :

1) Pour l'alimentation à base de lait :

$$D_{\infty} = 0,045 \int_{-\infty}^{+\infty} F_d(t) dt \quad (\text{mrem par mc/km}^2) \quad (66)$$

2) Pour l'alimentation à base de riz :

$$D_{\infty} = 0,27 \int_{-\infty}^{+\infty} F_d(t) dt \quad (\text{mrem par mc/km}^2) \quad (67)$$

104. La dose potentielle par année d'apport sera toujours la même, quel que soit le moment où l'apport se produit. On peut donc la calculer dans l'hypothèse d'un état d'équilibre au moyen des équations (21) et (23); on obtient :

$$D_{\infty}^1 = \bar{F}_m \cdot \gamma \cdot a \cdot F_d(\infty) \quad (68)$$

ce qui donne 36a et 82a respectivement dans les hypothèses (a) et (b) concernant le taux d'apport. En utilisant les valeurs de la constante a données dans le paragraphe 86, on obtient pour les doses potentielles les valeurs inscrites dans le tableau VI.

Tableau VI
Doses potentielles pour certains régimes d'apport

	Dose potentielle (mrem) par année d'apport	
	Hypothèse (a)	Hypothèse (b)
1) Alimentation à base de lait	5,4	12
2) Alimentation à base de riz	32	73

/...

Figure 10. Dose-moelle osseuse moyenne par individu jusqu'à l'âge de 70 ans (moyenne mondiale pondérée par la population) en fonction de la date de naissance, si les essais se poursuivent conformément à l'hypothèse (a).

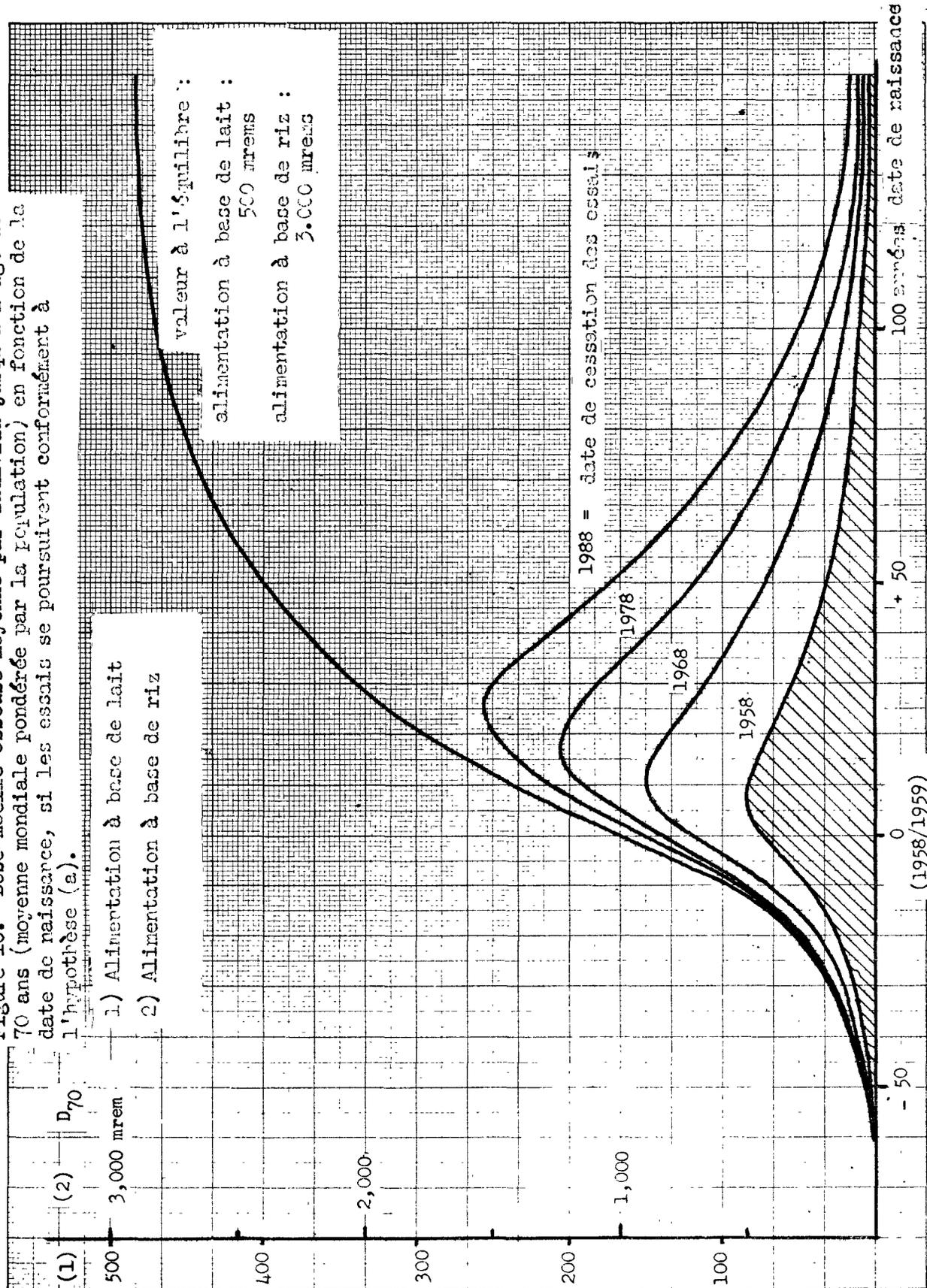
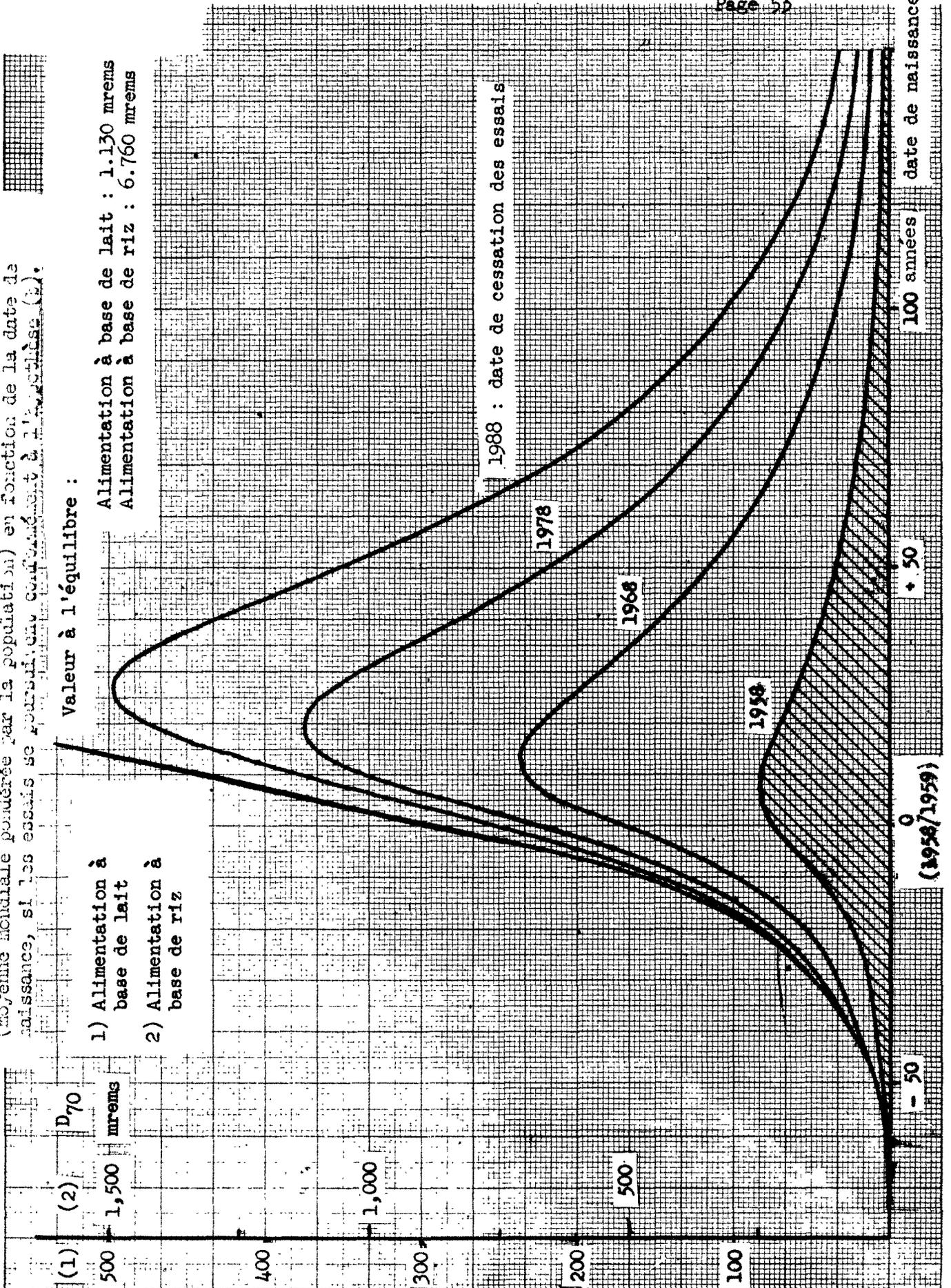


Figure 11. Dose-mecelle osseuse moyenne par individu jusqu'à l'âge de 70 ans (moyenne mondiale pondérée par la population) en fonction de la date de naissance, si les essais se poursuivent conformément à l'Annexe (B).



Intégrales de la dose-moelle osseuse moyenne dans un intervalle de 70 ans

105. On calculera la dose-moelle osseuse moyenne pour la durée de la vie, en fonction de la date de naissance t_b par la formule suivante :

$$D_{70}(t_b) = \int_0^{70} \frac{dD(t, t)}{dt} dt = \int_0^{70} \gamma \cdot s(t, t) dt \quad (69)$$

$s(t, t)$ étant déterminé au moyen des formules (47) et (48). C'est là un calcul numériquement très compliqué que l'on a fait pour diverses valeurs du rythme d'apport et pour différentes dates de cessation des apports. Les résultats obtenus apparaissent dans les graphiques des figures 10 et 11 et les doses maximums pour 70 ans sont indiquées dans le tableau VII.

Contribution de la retombée troposphérique

106. La figure 12 donne un exemple de la variation du facteur d'accroissement de la dose $F_m(u)$, d'après les équations (54) et (55), pour une absorption $c(t)dt$ de Sr^{89} , le plus important des isotopes à prendre en considération lorsqu'on veut évaluer l'irradiation de la moelle osseuse imputable à la retombée troposphérique. Pour $F_m = 5 \cdot 10^{-3}$, la dose potentielle imputable à une série d'essais provoquant une contamination $c(t)$ est donnée par la formule :

$$D_{\infty} = 5 \cdot 10^{-3} \cdot \gamma \int_{-\infty}^{+\infty} c(t)dt \quad (70)$$

107. Dans le cas du Sr^{89} , on admet que la constante de dose γ est 1 mrem/an par micromicrocurie de Sr^{89} /g Ca. On supposera que $c(t)$ est égal à 0,5 fois la concentration de Sr^{89} dans le lait (voir la figure 13 pour les valeurs de cette concentration selon une communication canadienne). L'intégration de $c(t)$ dans un intervalle d'un an donne environ 20 micromicrocuries/g Ca par an. Par conséquent, la dose potentielle pour une année d'apport est la suivante :

$$D_{\infty}^1 = 5 \cdot 10^{-3} \cdot 1 \cdot 20 = 0,1 \text{ mrem}$$

/...

Figure 12. Facteur d'accroissement de la dose $F_{70}(u)$ dans le cas du Sr^{89} dont la période physique est de 51 jours ($k_{Sr^{89}} = 5/\text{an}$).

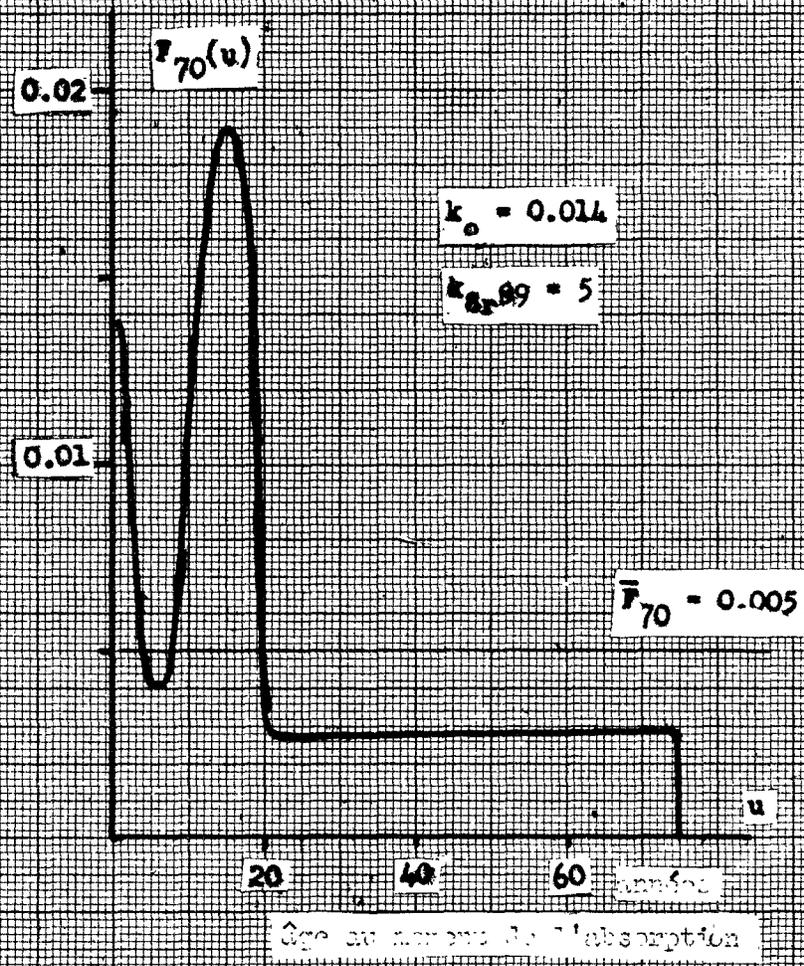
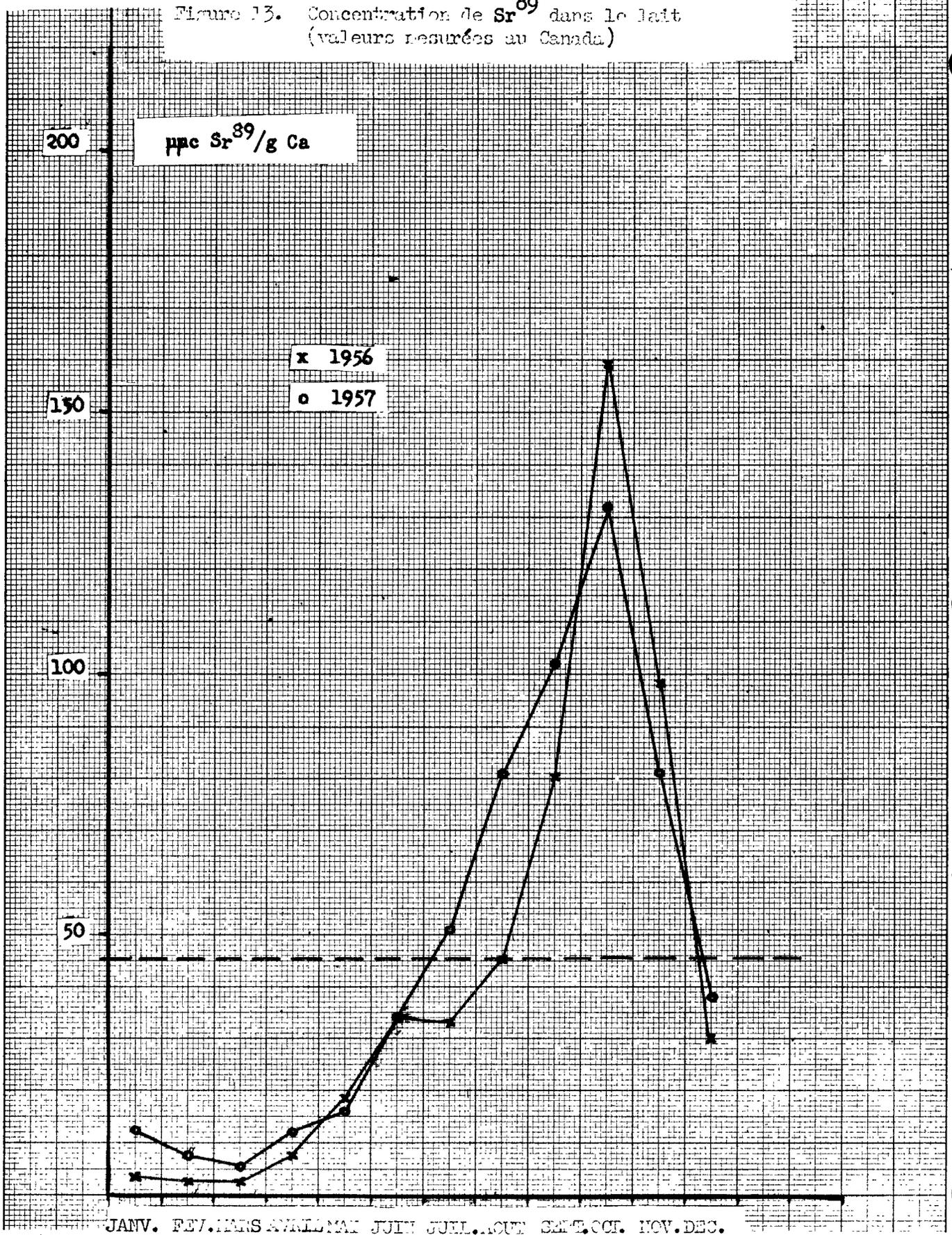
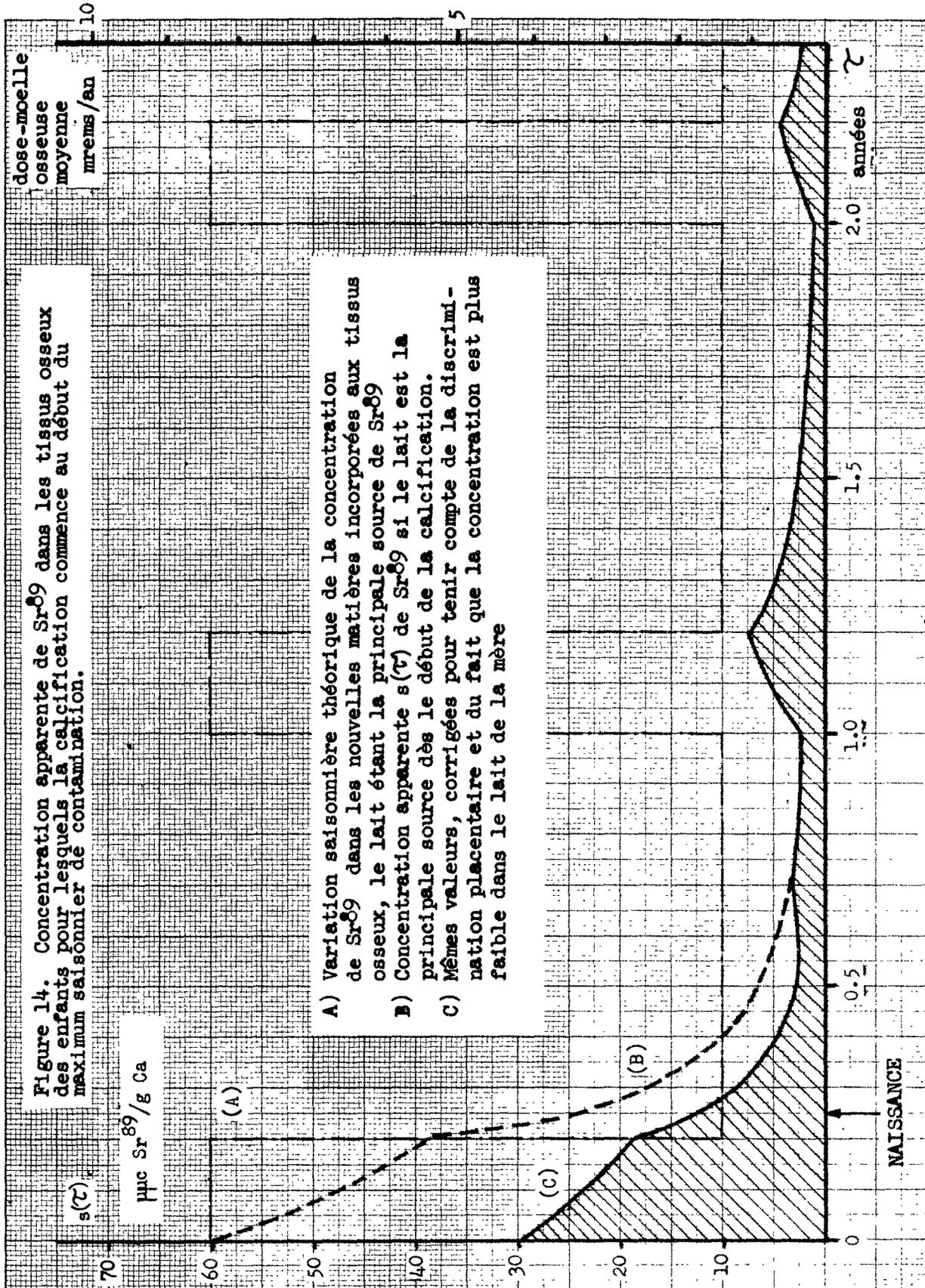


Figure 13. Concentration de Sr^{89} dans le lait
(valeurs mesurées au Canada)





108. On peut utiliser la formule (47) pour évaluer la concentration apparente de Sr^{89} dans l'organisme d'un enfant. D'après les résultats des mesures effectuées au Canada ²² (figure 13) on a établi un schéma des variations saisonnières de la teneur du lait en Sr^{90} pour calculer le degré de contamination des tissus osseux chez les jeunes enfants nés à une date telle que la calcification commence au début du maximum de contamination du milieu ambiant. Pour ces enfants, la dose-moelle osseuse moyenne sera d'environ 10 mrem^{*} pendant la première année, et la dose-moelle osseuse moyenne pour une période de 70 ans sera de quelque 20 mrem, si l'apport de matières radioactives dans la troposphère se poursuit. Toutefois, pour les enfants nés à d'autres époques de l'année, la dose sera plus faible, et la dose-moelle osseuse moyenne par individu pour l'ensemble de la population, y compris les adultes, sera de l'ordre de 0,1 mrem par an^{*}. La figure 14 indique l'intensité moyenne d'irradiation de la moelle osseuse chez les enfants en bas âge.

Conséquences biologiques éventuelles des essais d'armes nucl'
Conséquences biologiques éventuelles des essais d'armes nucléaires

109. En utilisant les constantes dose-effet et les doses potentielles par année d'apport, on peut évaluer le nombre des personnes qui seront sérieusement atteintes dans toute la population du globe mais on ne peut pas dire que les chiffres obtenus représenteront des résultats attendus, ni même des résultats probables, car on ne peut associer aucune probabilité aux hypothèses qui ont été faites. Toutefois, ce sont des chiffres que nos connaissances actuelles ne permettent pas d'exclure et qui découlent des hypothèses retenues du début de la présente étude. Le tableau VIII indique l'importance des effets biologiques potentiels par année d'apport.

110. Les conséquences totales, c'est-à-dire le nombre de cas pour toutes les années suivant une année d'apport de produits de fission dans la stratosphère, dans l'hypothèse où il n'existe pas de seuil et où la relation dose-effet est linéaire, ont été calculées d'après les formules ci-après qui résument les calculs exposés plus haut.

* Dans l'hypothèse où il existe un seuil, auquel cas la dose-moelle osseuse maximum peut être significative, il est important de noter que la dose-moelle osseuse maximum imputable à un empoisonnement aigu par le radiostrontium peut dépasser de 25 à 50 fois la dose-moelle osseuse moyenne, contre 10 fois pour l'empoisonnement chronique¹¹.

Effets génétiques importants

$$N = K_g \cdot P \cdot D_{CO}^1 = K_g \cdot P \cdot \left[g_i \cdot F_r (co) + g_e \cdot F_d (co) + D_{trop}^1 \right] \quad (71)$$

D_{trop}^1 étant la dose-gonade annuelle imputable à la retombée troposphérique, et les autres symboles ceux qui ont été utilisés ci-dessus.

Cas de leucémie

$$N = K_1 \cdot P \cdot D_{CO}^1 = K_1 \cdot P \cdot \bar{F}_m \cdot \chi \cdot a \cdot F_d (co) \quad (72)$$

111. On a pris pour l'effectif P de la population mondiale $5 \cdot 10^9$ dans le cas des effets génétiques et $3 \cdot 10^9$ dans le cas des effets somatiques.

112. Le nombre total de cas n'a pas été calculé dans l'annexe D et ne figure nulle part ailleurs dans le rapport du Comité. Les résultats présentés ici (tableau VIII) ne supposent aucune autre modification des hypothèses énoncées dans l'annexe D que celles qui correspondent aux facteurs utilisés dans les formules (71) et (72).

113. Dans l'annexe D, on avait calculé le nombre annuel de cas, mais on ne peut le faire par la méthode utilisée ici. Les valeurs de la dose-gonade, pour 30 ans et de la dose-moelle osseuse pour 70 ans calculées plus haut ne diffèrent pas sensiblement des valeurs calculées dans l'annexe D et les chiffres approximatifs plus faibles qui figurent dans cette annexe conduisent à des résultats qui ne sont pas très différents de ceux auxquels on parvient ici.

114. Dans l'hypothèse où la relation dose-effet comporte un seuil, le nombre de cas ne peut être évalué qu'à partir du nombre d'individus qui recevraient de l'ensemble des sources de radiations une dose supérieure à la dose-seuil. La fréquence des lésions serait très inférieure au nombre de personnes ayant dépassé ce seuil. Les doses-moelle osseuse pour une période de 70 ans qui sont indiquées dans le tableau VII peuvent ne pas être significatives s'il existe un seuil; il se peut qu'il faille les multiplier par un facteur de distribution non uniforme de l'ordre de 10 dans le cas de l'empoisonnement chronique par le Sr^{90} . Les moyennes pondérées par la population ne sont pas non plus applicables et il faut remplacer \bar{G} par les valeurs locales du facteur géographique G_i .

Tableau VII

Doses moelle osseuse moyennes maximums pour une période de 70 ans

A) Alimentation à base de lait

Les essais d'armes cessant à la fin de		Hypothèse (a)		Hypothèse (b)	
		D ₇₀ (mrems)	% de l'équilibre	D ₇₀ (mrems)	% de l'équilibre
T = 0	1958	83	17	83	7
10	1968	150	30	235	21
20	1978	205	41	375	33
30	1988	255	51	495	44
∞	-	500	100	1.130	100

B) Alimentation à base de riz

Les essais d'armes cessant à la fin de		Hypothèse (a)		Hypothèse (b)	
		D ₇₀ (mrems)	% de l'équilibre	D ₇₀ (mrems)	% de l'équilibre
T = 0	1958	500	17	500	8
10	1968	900	30	1.420	21
20	1978	1.250	41	2.250	33
30	1988	1.550	51	3.000	44
∞	-	3.000	100	6.760	100

Tableau VIII

Estimations concernant certaines conséquences éventuelles,
 génétiques et leucémogéniques, des irradiations reçues par
 l'ensemble de la population mondiale

(Afin de faciliter les vérifications numériques, on n'a pas arrondi les chiffres du tableau dans toute la mesure où on aurait pu le faire pour tenir compte du degré d'incertitude)	Total, après une année d'exposition aux rayonnements naturels	Total, après une année d'explosions nucléaires expérimentales	
		Les essais continuent suivant l'hypothèse a) ^x	Les essais continuent suivant l'hypothèse b) ^{x xx}
<p><u>Leucémie</u> (dans l'hypothèse où il n'existe pas de seuil :</p> <p>Nombre de cas pour</p> <p>1) une alimentation à base de lait</p> <p>2) une alimentation à base de riz</p> <p>(dans l'hypothèse où il existe un seuil : voir paragraphe 114)</p>	<p>6.800</p> <p>6.800</p>	<p>365</p> <p>2.190</p>	<p>820</p> <p>4.920</p>
<p><u>Effets génétiques importants</u> :</p> <p>Nombre de cas si la dose de doublement est de 100 rems et si la proportion actuelle des enfants tarés à la naissance est de 1 pour 100</p>	<p>21.500</p>	<p>560</p>	<p>1.140</p>
<p>Nombre de cas si la dose de doublement est de 10 rems et si la proportion actuelle des enfants tarés à la naissance est de 4 pour 100</p>	<p>850.000</p>	<p>22.400</p>	<p>43.600</p>

^x Voir paragraphe 19.

^{xx} Cela vaudrait également pour les années de la période 1954-1958.

/ Il n'a pas été tenu compte de la dose provenant du C¹⁴ produit par les essais d'armes nucléaires, car cette dose est délivrée sur une période beaucoup plus étendue que celle qui est imputable au Cs¹³⁷ (voir le paragraphe 59).

REFERENCES

1. Stewart, N.G., Crooks, R.N., et Fisher, E.M.R. : Dose d'irradiation reçue par la population du Royaume-Uni du fait de matières provenant d'explosions nucléaires expérimentales antérieures à janvier 1956. A/AC.82/G/R.20.
2. Libby, W.F. : Radioactive strontium fallout. Proc. Natl. Acad. Sci. (U.S.), 42, 365-390 (1956), et A/AC.82/G/R.131.
3. Communication de L. Machta, représentant de l'Organisation météorologique mondiale auprès du Comité scientifique des Nations Unies pour l'étude des effets des radiations ionisantes, 1958.
4. Marley, W.G. : The long range fall-out from nuclear test explosions. Medical Research Council (U.K.) : The hazard to man of nuclear and allied radiations, London (1956), p. 121-125. A/AC.82/G/R.2.
5. Miyaka, Y., Sugiura, Y., Saruhashi, K., et Kanazawa, T. : Strontium-90 et rayonnement gamma pour une étendue infinie, provenant de sources artificielles : estimation du dépôt de strontium et de la dose gamma d'origine externe au Japon. A/AC.82/G/R.172.
6. Alba A., F., Brody, T.A., Cameras, R., Palacios, A., Rickards C., G., Tejera R., A., et de Velarde, E.G.B. : Troisième rapport sur les études de la retombée radioactive. A/AC.82/G/R.164.
7. Blok, J. : Mesures de la retombée radioactive aux Pays-Bas jusqu'au 31 décembre 1957. A/AC.82/G/R.184.
8. Anderson, E.C., Schuch, R.L., Fisher, W.R., et Langham, W. : Radioactivity of people and foods. Science 125, 1273-1278 (1957), et A/AC.82/G/R.123.
9. Rundo, J. : Mesures du césium-137 sur l'être humain dans le Royaume-Uni, 1956/57. A/AC.82/G/R.167.
10. Rafter, T.A. et Fergusson, G.J. : The atom bomb effect. Recent increase in the C^{14} content of the atmosphere, biosphere, and surface waters of the oceans. New Zealand J. of Sci. and Tech., Sect.B., 38, 871-883 (1957).
11. de Vries, H. : "Atom bomb effect". The natural activity of radiocarbon in plants, shells and snails in the past four years. Science, 128, 250-251 (1958).
12. Fergusson, G.J. : Reduction of atmospheric radiocarbon concentration by fossil fuel carbon dioxide and the mean life of carbon dioxide in the atmosphere. Proc. Roy. Soc. (London), 243, 561-574 (1958).
13. Communication de R. Björnerstedt et A. Engström, 1958.
14. Communication de F.W. Spiers, 1958.
15. Court-Brown, W.M. et Doll, R. : Radiation and leukaemia. Lancet 1, 162-163 (1958).
16. Wald, N. : Leukemia in Hiroshima City atomic bomb survivors. Science 127, 699-700 (1958).

17. Mitchell, H.H., Hamilton, T.S., Steggerda, F.R., et Bean, H.W. : The chemical composition of the adult human body and its bearing on the biochemistry of growth. J. Biol. Chem. 158, 625-637 (1945).
18. Bronner, F. et Harris, R.S. : Absorption and metabolism of calcium in human beings, studied with calcium-45. Ann. New York Acad. Sci., 64, 314-325 (1956).
19. Bauer, G.C.H., Carlsson, A., et Lindquist, B. : Bone salt metabolism in humans studied by means of radiocalcium. Acta medica Scandinavica 158, 143-150 (1957).
20. Bauer, G.C.H. et Ray, R.D. : Kinetics of strontium metabolism in man. J. of Bone and Joint Surgery, 40 A., 171-186 (1958).
21. Bronner, F., Benda; C.E., Harris, R.S., et Kreplick, J. : Calcium metabolism in a case of gargoylism, studied with the aid of radiocalcium. J. Clinical Investigation, 37, 139-147 (1958).
22. Grummitt, W.E. et Mar, P.G. : Levels of strontium-90 in Canada in 1957. Atomic Energy of Canada Limited and Department of National Health and Welfare Report CRC 786 (1958).
