Un exemple d'optimisation de la protection radiologique des mineurs d'uranium¹

A. OUDIZ*, J. LOMBARD* et P. ZETTWOOG**

(Manuscrit reçu le 20 mai 1983)

RÉSUMÉ

Cet article présente les résultats d'une étude d'optimisation de la protection radiologique d'une mine d'uranium. A partir d'une modélisation de la contamination alpha (liée aux descendants à vie courte du radon) d'une mine simplifiée, plusieurs stratégies de protection sont comparées à l'aide d'une analyse coût-efficacité. Il ressort de cet exemple que les mesures actuellement en vigueur sont "coût-efficaces" et que le choix d'un dispositif supplémentaire pourrait être envisagé.

ABSTRACT

This paper presents the results of an optimisation study dealing with radiological protection in a uranium mine. The modelization of alpha contamination, associated with short-lived radon daughters in a simplified mine, allows various protection strategies to be compared, using a cost-effectiveness analysis. This example shows that the options already implemented are "cost-effective" and that a new option might be considered for further control.

I. INTRODUCTION

Cette étude constitue un exemple d'optimisation de la protection des travailleurs d'une mine souterraine non sédimentaire vis-à-vis du risque de contamination alpha lié aux descendants du radon à vie courte.

Une part significative de l'étude est consacrée à l'évaluation de la contamination alpha dans le modèle de mine qu'il a fallu définir en vue de permettre ce calcul.

La procédure d'optimisation s'appuie classiquement sur l'indicateur de détriment exprimé en équivalent de dose effectif collectif. Les techniques assurant l'optimisation sont multiples [5] ; on a adopté ici l'analyse coût-efficacité, laquelle présente l'intérêt de rendre aisée la discus-

1. Cet article a été élaboré à partir d'une étude [6] financée par l'Association Euratom - CEA. Contrat n° SC - 003 - BIAF - 423 F.

* Centre d'étude sur l'évaluation de la protection dans le domaine nucléaire (CEPN), BP 48, 92260 Fontenay-aux-Roses.

** Commissariat à l'énergie atomique, IPSN, Département de protection technique, SPIN, BP 6, 92260 Fontenay-aux-Roses.

sion des choix de protection en fonction d'une valeur de l'homme-sievert qu'il n'est pas nécessaire de fixer au préalable. Les stratégies de protection envisagées reposent en partie sur des options classiques telles que la pose de barrage, l'augmentation des débits d'aérage, mais aussi sur des techniques nouvelles telles que les filtres électrostatiques.

II. PRESENTATION DE LA MODELISATION

La procédure d'optimisation requiert la connaissance de l'équivalent de dose effectif collectif en fonction des stratégies de protection envisageables. Dans ce but, il est nécessaire de définir un modèle de mine à partir duquel on procèdera à la modélisation de la contamination alpha liée aux descendants du radon à vie courte. Enfin, on établira un programme informatique permettant de calculer l'équivalent de dose effectif associé aux diverses stratégies de protection.

1. Le modèle de mine

Le calcul des équivalents de dose effectifs liés aux éléments de filiation du radon 222 (radium A, B et C) est effectué à partir de la représentation simplifiée d'une mine non sédimentaire. Celle-ci peut être conçue comme une combinaison plus ou moins complexe d'un ensemble d'éléments simples constitués d'une galerie principale et de ses chantiers, que l'on appellera "ligne de courant". On se restreindra ici au calcul des équivalents de dose effectifs dans une ligne de courant. Celle-ci consiste en une galerie communiquant avec un vieux chantier situé en amont de dix chantiers actifs (fig. 1).

Fig. 1. - Le modèle de mine considéré.

La section carrée de la galerie et des chantiers est de 16 m^2 . Tous les chantiers sont identiques, ce sont des parallélépipèdes rectangles de 12 m de longueur, de 4 m de hauteur et de 4 m de côté.

On considère qu'il s'agit d'une mine à tranche descendante dont le toit a été comblé avec du ciment. On admettra donc que la teneur en uranium du toit est nulle, que celle des parois latérales, quasi stériles, est de 0,1 ‰ et que celle du front de taille et du plancher est de 2 ‰. On suppose d'autre part, que l'âge du radon sortant du vieux chantier est de 25 min.

Pour des raisons liées à la modélisation de l'évolution de l'énergie alpha dans les chantiers, on a distingué, dans ces derniers, deux parties d'égales dimensions : un compartiment de travail et un compartiment de retour d'air (fig. 2).

Fig. 2. - Les caractéristiques du chantier et les options de protection associées.

L'effectif employé dans la ligne de courant est de 17 mineurs. De par leur activité, ils séjournent diversement dans les différentes zones de la mine.

On a donc distingué trois groupes I, II et III dont voici les temps de séjour dans les galeries et les chantiers (tableau I) :

TABLEAU I
Les effectifs employés

Groupe	Effectif	% du temps passé dans :		
		Galerie	Chantier	
			C. Travail	C. retour d'air
I	4		100	
II	4		50	50
III	9	50	25	25

2. La modélisation de la contamination alpha

La ligne de courant contient 10 chantiers actifs. Afin de disposer d'équations applicables sans modification à une ligne comportant un nombre quelconque de chantiers, on a considéré la ligne de courant comme une succession de 10 couples "galerie-chantier".

2.1. L'évolution de l'énergie alpha dans la galerie

L'énergie alpha se calcule à partir des concentrations d'atomes de descendants à vie courte du radon. Ces concentrations s'obtiennent en résolvant un système d'équations différentielles décrivant la variation de la concentration de radon et des ses descendants en fonction du temps. L'évolution des concentrations est liée aux phénomènes de décroissance et à l'apport de radon jeune des parois du chantier et de la galerie. Les équations différentielles qui régissent l'évolution dans une galerie sont les suivantes :

$$\text{Radon 222} \quad d \text{QRG} (t) = - \lambda_R \cdot \text{QRG} (t) dt + \varphi_G \frac{SG}{VG} dt$$

$$\text{Radium } i \quad d \text{QG}_i (t) = - \lambda_i \cdot \text{QG}_i (t) dt + \lambda_{i-1} \cdot \text{QG}_{i-1} (t) dt$$

où $i = 1, 2, 3$ représentent respectivement les radium A, B et C.

$i = 0$ désigne le radon 222, $\text{QRG} (t)$ et $\text{QG}_i (t)$ sont les concentrations en radon et radium i à l'instant t ; λ_R , λ_i , les constantes de décroissance ; φ_G est le flux d'émanation de radon par m^2 de galerie et par seconde ; SG et VG , la surface et le volume de la galerie.

La résolution des équations différentielles fait intervenir l'ensemble des paramètres ayant trait aux caractéristiques de la mine (surface, volume, flux d'émanation du radon, vieux chantier) et à celles des options de protection (débit d'aéragage primaire, présence éventuelle d'un barrage obstruant le vieux chantier,...). A titre d'illustration, on donnera ici l'expression de la concentration QRGT de radon dans l'air de la galerie, à l'entrée du chantier actif :

$$\text{QRGT} = \text{QRSO} e^{-\lambda_R t_s} + \frac{\varphi_G SG}{\lambda_R VG} (1 - e^{-\lambda_R VG/DP})$$

où : QRSO représente la concentration dans la galerie des atomes de radon provenant du vieux chantier ou du chantier actif du couple "galerie-chantier" précédents dont l'âge est t_s , et DP le débit d'aéragage primaire.

On a établi aussi les expressions, plus complexes, des concentrations QG_i , des radiums A, B et C dans la galerie.

2.2 L'évolution de l'énergie alpha dans le chantier

Afin de mieux rendre compte du phénomène de stagnation de l'air dans les chantiers, du fait de la présence du "cul de sac" que constitue le front de taille, on a modélisé l'évolution de l'énergie alpha à l'aide d'un modèle à compartiment. On est ainsi conduit à considérer, dans chaque chantier, deux zones distinctes : le compartiment de travail contenant le front de taille et le compartiment de retour d'air communiquant avec la galerie. Rappelons que le principe d'un tel modèle est de considérer que la concentration d'atomes est uniforme dans chacun des compartiments et que le bilan des entrées et sorties d'atomes doit être nul.

Dans le compartiment de retour d'air, les atomes proviennent de l'air capté dans la galerie avec un débit PSI 1, du flux de radon émanant des parois et de l'air provenant du compartiment de travail, dont le débit est PSI 2. Les atomes qui sortent se dirigent vers la galerie ou vers le compartiment de travail, avec les débits PSI 1 et PSI 2 respectivement (fig. 3).

Par ailleurs, on tient compte du phénomène d'apparition et de disparition d'atomes par décroissance radioactive.

On procède de la même façon pour le compartiment de travail. A partir des deux équations de bilan, on déduit les concentrations de radon et radium i dans les deux compartiments. Ici encore, ces équations font intervenir les paramètres décrivant l'influence des options de protection (débit d'aérage secondaire, présence de filtres, etc.). Ces paramètres vont être à présent décrits brièvement.

Fig. 3. - Schéma d'un chantier.

2.3. Paramètres du modèle rendant compte des options de protection

Les options permettant de diminuer la contamination alpha seront décrites dans le chapitre III. On indiquera ici la façon dont on tient compte de leur action dans la modélisation de la contamination alpha. Ces options sont l'accroissement des débits d'aérage primaire et secondaire, la pose d'un barrage afin d'isoler le vieux chantier, l'introduction de ventilateurs dits "turbulateurs" ou de filtres électrostatiques. La pose d'un barrage a pour effet d'annuler les concentrations QRSO, QASO, QBSO et QCSO de radon et des descendants à vie courte qui en proviennent.

Les turbulateurs ont pour effet d'accroître de $1 \text{ m}^3/\text{s}$ le débit PSI 2 assurant le renouvellement de l'air dans le compartiment de travail.

Le rôle des filtres est décrit à l'aide d'un coefficient multiplicatif permettant de diminuer les concentrations de descendants à vie courte provenant de la galerie et pénétrant dans le chantier.

3. Calcul de l'équivalent de dose effectif à partir de l'énergie alpha

Disposant des concentrations en descendants du radon à vie courte, il est possible de calculer l'énergie alpha potentielle inhalée par les différents groupes de mineurs et, par suite, l'équivalent de dose effectif associé, à l'aide du facteur proposé par la Commission internationale de protection radiologique (CIPR) [4] à des fins d'optimisation :

$$H_E/I_p = 2,5 \text{ Sv par joule}$$

H_E = équivalent de dose effectif par unité d'énergie alpha potentielle incorporée I_p .

4. Le modèle conversationnel informatisé

Afin de disposer d'un outil de calcul souple, capable d'intégrer toute modification des paramètres liés aux options de protection, on a élaboré un programme conversationnel en langage APL.

Ce programme calcule par itération, autant de fois qu'il y a de couples "galerie-chantier" donc ici 10 fois, l'équivalent de dose effectif individuel d'un individu séjournant 2 000 heures par an dans l'une quelconque des trois zones de travail (galerie, compartiments de travail et retour d'air). Il fournit, en définitive, l'équivalent de dose collectif délivré aux 17 mineurs, ainsi que l'équivalent de dose effectif individuel concernant chaque groupe de travailleurs en fonction des temps de travail réels dans chacune des trois zones de travail.

III. LES OPTIONS DESTINEES A REDUIRE LA CONTAMINATION INTERNE LIEE AUX DESCENDANTS A VIE COURTE DU RADON

1. Description des stratégies de protection envisagées

Une stratégie de protection est une combinaison d'options élémentaires de protection. Les options élémentaires sont les suivantes (fig. 2) :

- a) Barrage : pose de barrages isolant les vieux chantiers. Une ligne de courant durant en moyenne 6 mois, il convient de prévoir 20 barrages pour 10 ans d'exploitation de la mine.
- b) Débit d'aérage primaire : choix parmi quatre débits d'aérage primaire : 20, 30, 60 ou 120 m³/s. Ces équipements ont une durée de vie de 10 ans.
- c) Débit d'aérage secondaire : choix parmi trois débits d'aérage secondaire : 3 — 5 ou 11 m³/s. Ces équipements ont une durée de vie de 10 ans. Il convient, cependant, de prévoir 12 ventilateurs secondaires pour pouvoir équiper en permanence les dix chantiers.
- d) Turbulateur : pose d'un ventilateur de faible puissance (≈ 2 kW) dans le compartiment de travail afin de mieux ventiler le front de taille. Comme pour les ventilateurs secondaires il faut 12 turbulateurs pour 10 ans d'exploitation de 10 chantiers.
- e) Filtres : pose de filtres électrostatiques (constitués de 1, 2, 3 ou 4 cellules) permettant de filtrer l'air primaire entrant dans le chantier et de retenir ainsi les descendants du radon à vie courte. La durée de vie de ces équipements est pour l'instant de 2,5 ans. Il convient donc de prévoir 40 filtres pour équiper dix chantiers pendant 10 ans.

2. Le coût des stratégies de protection

Le coût des stratégies de protection est la somme des coûts de chacune des options élémentaires qui la constituent. Dans la perspective de l'analyse coût-efficacité il faut tenir compte de la durée de vie des équipements afin de procéder à une comparaison cohérente des stratégies. On s'est fixé une durée d'exploitation de la mine égale à dix ans et on a calculé le montant total des coûts d'investissement et d'exploitation-maintenance relatifs à cette période.

En ce qui concerne les filtres si l'on exprime les coûts de maintenance en terme d'investissement il convient de prévoir 6 filtres par chantier au lieu de 4 pour 10 ans d'exploitation. Au total on a donc considéré le coût de 60 filtres électrostatiques équipés de 1 à 4 cellules pour les 10 ans d'exploitation de la ligne de courant.

On aboutit aux coûts totaux suivants calculés sans faire intervenir un taux d'actualisation à des fins de simplicité. Le tableau II fournit aussi les coûts d'investissement et d'exploitation-maintenance de chacune des options élémentaires.

TABLEAU II

Coût des options de protection envisagées (10 ans d'exploitation)

Options	Coût d'investissement (kF)		Coût d'exploitation-maintenance (kF)		Coût total sur 10 ans (kF)
	Unitaire	10 ans	Annuel	10 ans	
Barrages	11,5	230	0	0	230
Aérage primaire					
20 m ³ /s	56	56	46	460	516
30 m ³ /s	58	58	113,4	1 134	1 192
60 m ³ /s	106	106	245,3	2 453	2 559
120 m ³ /s	212	212	490,6	4 906	5 118
Aérage secondaire					
3 m ³ /s	10	120	17,9	179	299
5 m ³ /s	21	252	38,3	383	635
11 m ³ /s	48	576	140,5	1 405	1 981
Turbulateur	6,5	78	5,1	51	129
Filtre électrostatique					
1 cellule	15,5	930	ε	ε	930

IV. L'ANALYSE COUT-EFFICACITE

1. La nécessité de recourir à des stratégies de protection

Afin de comparer l'intérêt respectif de diverses stratégies susceptibles d'être mises en œuvre, nous avons procédé à une analyse coût-

efficacité qui met en balance, pour une période de 10 ans, le coût total et la réduction de l'équivalent de dose effectif collectif correspondant à chaque stratégie.

On est conduit à aborder l'analyse en terme de stratégies (combinaisons d'options élémentaires) à cause de l'interdépendance des efficacités des options élémentaires. L'efficacité d'une option élémentaire est, en effet, fonction des options déjà mises en place. On conçoit notamment que l'intérêt d'une série de filtres électrostatiques diminuera lorsque le débit d'aérage primaire sera plus important (les éléments de filiation du radon à filtrer étant moins nombreux) ou lorsque le débit d'aérage secondaire augmentera (le temps de passage dans le filtre étant réduit). Il a donc fallu envisager des stratégies de protection constituées par la pose éventuelle d'un barrage, d'un turbulateur et d'une série de 1 à 4 filtres et par les débits d'aérage primaire et secondaire. On dénombre *a priori* 240 stratégies possibles allant de la moins performante (ni barrage, ni turbulateur, ni filtre, débits d'aérage primaires et secondaires de 20 et 3 m³/s)¹ à la plus performante (barrage ; turbulateur ; 4 filtres ; débits d'aérage de 120 à 11 m³/s).

2. La procédure coût-efficacité

L'analyse coût-efficacité consiste à étudier la partie inférieure de l'enveloppe convexe du nuage des points correspondant aux 240 stratégies possibles (chaque point étant défini à partir du coût total et de l'équivalent de dose effectif collectif associé à chaque stratégie) comme l'illustre la figure 4 :

Fig. 4. - La constitution de la courbe coût-efficacité.

Ceci se fait en choisissant, étape par étape, la stratégie "coût-efficacité" i présentant le ratio $\alpha_i = \frac{C_i - C_{i-1}}{D_{i-1} - D_i}$ minimal (la stratégie $i-1$ ayant été choisie

1. Le recours à un aérage plus faible ne serait pas concevable.

à l'étape précédente, l'initialisation $i = 1$ étant faite avec la stratégie minimale). Le ratio α_i correspond au coût de l'homme-sievert associé à la stratégie "coût-efficace" i .

3. Résultats et commentaires

L'analyse coût-efficacité conduit aux résultats suivants (tableau III). Il apparaît que la partie inférieure de l'enveloppe convexe est constituée des neuf stratégies suivantes :

TABLEAU III
Résultats de l'analyse

i	Stratégie de protection					Ci (kF)	Di (h.Sv)	$\alpha_i = \frac{C_i - C_{i-1}}{D_{i-1} - D_i}$ (kF/h.Sv)
	B	T	F	AP	AS			
1	N	N	N	20	3	815	7,04	—
2	O	N	N	20	3	1 045	4,54	92
3	O	N	N	30	3	1 721	2,50	331
4	O	O	N	30	3	1 850	2,28	586
5	O	O	N	60	3	3 217	0,89	984
6	O	O	N	60	5	3 553	0,70	1 768
7	O	O	N	120	5	6 112	0,29	6 242
8	O	O	N	120	11	7 458	0,19	13 460
9	O	O	O	120	11	11 178	0,14	74 400

B, T, F. : mise en place (Oui ou Non) de barrage, turbulateur, ou filtres (4 par chantier) ; AP, AS : débits d'aérage primaire et secondaire en m³/s ; Ci : coût total actualisé sur 10 ans ; Di : équivalent de dose effectif collectif "radon" pour 10 ans ; α_i : coût de l'homme-sievert.

Avant d'aborder le choix d'une stratégie de protection, il convient de faire quelques commentaires sur les résultats de l'analyse coût-efficacité. L'introduction de barrages destinés à isoler les "vieux chantiers" est la stratégie qui succède à la stratégie minimale. Ce résultat n'est pas surprenant, car pour un faible surcoût, elle permet d'éliminer le tiers des éléments de filiation. Il ne serait pas concevable d'imaginer de nos jours une mine dépourvue de tels barrages. La stratégie suivante consiste à augmenter l'aérage primaire. Cette action est également classique et il n'est pas surprenant de la voir aussi bien placée. En revanche, on peut être étonné du fait que les turbulateurs apparaissent en aussi bonne position (avant l'augmentation de l'aérage secondaire !). Ceci est lié au faible coût de ces ventilateurs de faible puissance et au fait qu'ils agissent principalement sur le front de taille où l'on rencontre le risque potentiel le plus élevé. L'introduction préalable des turbulateurs réduit l'intérêt de l'augmentation du débit d'aérage secondaire et cette option (passage de 3 à 5 m³/s) n'apparaît qu'en sixième position. Mais le plus paradoxal

est la dernière place occupée par les filtres électrostatiques. On pourrait attribuer *a priori* un meilleur rang à ce dispositif qui filtre les différents radium à l'entrée de chaque chantier et peut donc éliminer une partie importante du risque. Ces filtres ne sont performants que si les débits d'aérage sont relativement faibles. L'augmentation de l'aérage primaire (passage à 30 puis à 60 m³/s) a donc diminué leur intérêt.

Deux considérations doivent être évoquées, cependant, en ce qui concerne le classement des filtres. On a dû, en effet, renoncer, faute de données quantitatives suffisantes, à rendre compte de l'efficacité des diverses options sur le plan de la réduction de la contamination alpha due aux poussières à vie longue. Or, il convient de noter que les filtres présentent, vis-à-vis de ces poussières, une efficacité au moins aussi bonne que celle observée à propos des descendants du radon. Or, il existe certaines présomptions, qu'il conviendrait de confirmer expérimentalement, qui suggèrent que les options ayant trait au débit d'aérage n'exercent pas une influence aussi favorable sur la réduction de la contamination liée aux poussières que les filtres, aussi ces derniers sont-ils probablement pénalisés dans la présente étude.

D'autre part, la durée de vie des cellules électrostatiques, supposée ici de 2,5 ans pourrait être accrue à l'avenir, ce qui permettrait de réduire le coût total associé à cette option.

V. LE CHOIX D'UNE STRATEGIE DE PROTECTION

L'analyse coût-efficacité permet de sélectionner les stratégies les plus *rentables* vis-à-vis des deux critères : coût total et équivalent de dose effectif collectif. Elle ne permet cependant pas de procéder directement au choix de la *meilleure* stratégie. Il faut, pour ce faire, disposer d'une valeur de l'homme-sievert de référence α . Si cette valeur est fixée, la stratégie "optimale" (au sens de la CIPR 26 [2]) est celle dont le coût de l'homme-sievert α_i est le plus proche, par défaut, de cette valeur de référence α .

Afin de se conformer au troisième principe de la CIPR relatif au respect de la limite de dose individuelle (50 mSv/an), on a calculé l'équivalent de dose annuel délivré à un mineur appartenant à chacun des trois groupes I, II et III évoqués plus haut, et ce, pour chacune des stratégies considérées. Ce calcul permet d'autre part de faire intervenir des considérations de risque individuel dans la procédure de choix de la stratégie "optimale". La prise en compte de cette dimension du risque se justifie particulièrement dans le cas des mines souterraines dans la mesure où ce secteur d'activité est l'un de ceux où l'on rencontre les équivalents de dose individuels les plus élevés du cycle du combustible.

Dans une telle perspective, il convient alors de tenir compte également des risques liés à l'irradiation externe et aux poussières de minerai bien que l'on ait admis, faute de données suffisantes, que les stratégies de protection n'influent que sur le niveau de contamination alpha lié aux descendants du radon et non sur celui lié aux poussières à vie longue.

En ce qui concerne ces dernières, la valeur moyenne annuelle des quantités inhalées par les travailleurs dans les mines françaises est de

$2,8 \cdot 10^{-9}$ Ci/an [1], soit environ 104 Bq/an. Or, si la publication 30 de la CIPR [3] ne fournit pas de limite annuelle d'incorporation pour le mélange d' ^{238}U , ^{234}U , ^{230}Th , ^{226}Ra et ^{210}Po , elle donne cependant les limites pour chacun des constituants des poussières à vie longue. Le calcul de la limite annuelle d'incorporation du mélange conduit alors à une valeur d'environ 1 700 Bq. On constate donc que la quantité moyenne inhalée par les mineurs en France représente environ 6 % de cette valeur de 1 700 Bq. On admettra que cette moyenne reflète la répartition suivante : 13 % (Groupe I), 6 % (Groupe II), 3 % (Groupe III).

L'irradiation externe dépend principalement de la teneur en uranium des parois. L'équation fournissant l'équivalent de dose est, d'après [8] : $H_E = K \cdot \tau \cdot h$ où K est un coefficient exprimé en sieverts par heure, dépendant de la géométrie de la mine (K vaut $5 \cdot 10^{-3}$ pour une galerie, et $3 \cdot 10^{-3}$ pour un chantier), τ la moyenne pondérée par les surfaces des teneurs en uranium des parois (0,1 ‰ pour la galerie, 0,55 ‰ pour le compartiment de retour d'air et 0,75 ‰ pour le compartiment de travail) et h la durée d'exposition (2 000 h/an). En fonction du temps passé dans les différentes zones de la ligne de courant, on obtient les valeurs H_E suivantes : 4,5 mSv/an pour le groupe I, 3,9 mSv/an pour le groupe II et 2,45 mSv/an pour le groupe III. Ces valeurs ne dépendent pas des stratégies de protection envisagées ici.

On obtient donc les résultats suivants en considérant plus particulièrement le groupe I qui est le plus exposé (tableau IV).

TABLEAU IV

Résultats tenant compte de l'irradiation externe et des poussières

i	Stratégie de protection					DT i (h.Sv)	DM i (mSv/an)	α_i (kF/h.Sv)
	B	T	F	AP	AS			
1	N	N	N	20	3	8.12	55.9	—
2	O	N	N	20	3	5.62	40.8	92
3	O	N	N	30	3	3.58	28.4	331
4	O	O	N	30	3	3.36	26	586
5	O	O	N	60	3	1.97	17.5	984
6	O	O	N	60	5	1.78	15.8	1 768
7	O	O	N	120	5	1.37	13.3	6 242
8	O	O	N	120	11	1.27	12.3	13 460
9	O	O	O	120	11	1.22	12	74 400

DT_i : Equivalent de dose effectif collectif total (radon + gamma + poussières pour 10 ans d'activité), l'équivalent de dose effectif collectif pour 10 ans d'exploitation lié aux poussières étant de 0,52 h.Sv et celui lié à l'irradiation externe de 0,56 h.Sv.

DM_i : Equivalent de dose effectif individuel annuel (radon + gamma + poussières) total maximal (pour le groupe I).

α_i : Coût de l'homme-sievert.

L'évolution du coût total de protection et de l'équivalent de dose effectif collectif "radon" pour les neuf stratégies de protection "coût-efficaces" est illustrée dans la figure 5.

Fig. 5. - Courbe coût-efficacité.

Avant même de procéder à la sélection de la stratégie de protection "optimale" on peut d'emblée éliminer la stratégie minimale (1) qui conduit pour les foreurs (Groupe I) à un dépassement de la limite de dose individuelle annuelle de 50 mSv/an (près de 56 mSv/an). Le choix se restreint donc aux huit dernières stratégies "coût-efficaces" [2 - 9].

Afin de déterminer quelle stratégie de protection est "optimale" il convient de se fixer une valeur de référence de l'homme-sievert. De nombreuses valeurs ont été évoquées à ce jour pour ce paramètre clé. On peut estimer raisonnable une fourchette de 10 kF à 1 000 kF (1981) pour l'homme-sievert, valeurs correspondant à celles fournies quelques années auparavant dans la littérature (de 10 à 1 000 dollars l'homme-rem). Pour les valeurs inférieures de la fourchette, la stratégie "optimale" est la combinaison 2 ($\alpha \leq 100$ kF) ; pour des valeurs moyennes ($\alpha \simeq 400$ kF), ce serait la 3^e et pour les valeurs supérieures, la 4^e, voire la 5^e ($\alpha \simeq 1\,000$ kF).

Notons, par ailleurs, que c'est la stratégie 3 qui reflèterait au mieux les efforts de protection qui seraient actuellement consentis pour une telle mine.

VI. CONCLUSION

L'objet de cette étude est de contribuer à l'analyse des choix en matière de protection dans une mine. Le recours à l'optimisation permet, en effet, de comparer des techniques nouvelles telles que le turbulateur ou les filtres électrostatiques à d'autres plus traditionnelles (modification des débits d'aérage).

RÉFÉRENCES

- [1] S. BERNHARD. "L'irradiation du personnel dans les mines souterraines de la Cogéma en 1979" - Session d'étude sur la protection contre les rayonnements lors de l'exploitation et le traitement des minerais d'uranium, Vassivière, 22 - 24 septembre 1980.
- [2] CIPR. Recommandations, Publication CIPR n° 26. Oxford : Pergamon Press, 1977.
- [3] CIPR. Limits for intakes of radionuclides by workers, ICRP Publication 30, Part 1. Oxford : Pergamon Press, 1979.
- [4] CIPR. Limits for inhalation of radon daughter by workers, ICRP Publication 32. Oxford : Pergamon Press, 1981.
- [5] J. LOMBARD. La rationalisation des choix de radioprotection : revue des principales méthodes envisageables. Rapport CEA-R-5129.
- [6] A. OUDIZ, J. LOMBARD. Recherche des valeurs implicites du détriment sanitaire professionnel : approche méthodologique dans le cas de l'extraction de l'uranium. Rapport CEPN n° 63, 1982.
- [7] P. ZETTWOOG. Modèle théorique des processus de l'irradiation du personnel dans les mines d'uranium (Communication personnelle, 1980).