

COMMISSARIAT A L'ENERGIE ATOMIQUE

INSTITUT DE PROTECTION ET DE SURETE NUCLEAIRE

DEPARTEMENT DE PROTECTION

Service d'Etudes et Recherches sur l'Environnement

Section de Radioécologie



ETUDE RADIOECOLOGIQUE DU SITE DE NOGENT SUR SEINE

POINT ZÉRO RADIOACTIF

MESURE DU RAYONNEMENT GAMMA AMBIANT

ANNEXE I - METHODOLOGIE

LABORATOIRE DES TRANSFERTS ATMOSPHERIQUES

Etude faite à la demande d'Electricité de France

Région d'Équipement de Paris

Contrat VEN 1752-04

C.E.A/FONTENAY-AUX-ROSES - B.P. N°6 - 92260

JUIN 1982

COMMISSARIAT A L'ENERGIE ATOMIQUE

INSTITUT DE PROTECTION ET DE SURETE ~~NUCLEAIRE~~

DÉPARTEMENT DE PROTECTION

Service d'Etudes et Recherches sur l'Environnement

MESURE DU RAYONNEMENT GAMMA AMBIANT AU MOYEN
D'UNE CHAMBRE D'IONISATION DE GRANDE SENSIBILITÉ

par

D. GAUTHIER, C. CAPUT, T. MARINI

La politique actuelle en matière d'environnement associée au développement de l'industrie nucléaire impose l'étude d'impact des installations et dans ce cadre, la connaissance de l'état radiologique des sites avant implantation.

La mesure du rayonnement gamma ambiant est l'une des composantes de ce point zéro radiologique et il convient de l'obtenir à l'aide d'une technologie appropriée.

Différents types d'appareillages ont été étudiés à cet effet mettant en évidence les qualités et défauts caractéristiques de chacun d'eux. Il est ainsi apparu que la chambre RSS 111 (REUTER-STOKES) présente les meilleures performances relativement aux mesures envisagées.

La méthodologie que nous décrivons ici comporte, après un examen des caractéristiques de la chambre RSS 111, l'établissement d'un protocole d'utilisation spécialement adapté à la mesure du rayonnement gamma à très faible niveau.

I - INTRODUCTION

L'implantation des installations électronucléaires est subordonnée au respect de la réglementation spécifiant notamment que le niveau de radioactivité de l'environnement doit être mesuré préalablement à la mise en service. En ce qui concerne le rayonnement gamma ambiant, la variabilité de niveau d'un point à un autre, impose de dresser une carte régionale détaillée en essayant de ne pas laisser échapper d'anomalies locales. Ceci implique l'utilisation de moyens de mesure mobiles délivrant le débit de dose exprimé en Gy.h^{-1} . Cette unité correspond à l'absorption d'une énergie de 1. Joule par heure et par kilogramme de matière (l'air dans le cas présent). L'appareillage devra répondre à un certain nombre de caractéristiques dont les plus importantes sont les suivantes:

Signal indépendant de l'énergie sachant que le rayonnement gamma ambiant est formé de tout un spectre de photons d'énergies diverses et approximativement comprises entre 100 keV et 2 MeV

Grande sensibilité étant donné les très faibles niveaux de débit de dose à enregistrer.

Réponse rapide qui permette la détection de toutes les variations significatives rencontrées en circulant.

Réponse isotrope de façon à mesurer également les diverses composantes du rayonnement ambiant quelles que soient leurs directions d'origine.

* Les unités de dose de rayonnement absorbée et de débit de dose respectivement le gray (Gy) et le gray par heure (Gy.h^{-1}) ont été adoptées conformément à la décision du 8.11.1979 prenant effet à partir du 1.12.1979. L'équivalence avec l'unité employée précédemment est la suivante : 1 Gy = 100 rad soit 10 nGy = 1 mrad.

La première difficulté de cette mesure réside à priori dans le fait que l'on ignore le spectre d'énergie et les parts respectives des rayonnements d'origine tellurique, cosmique et des basses couches atmosphériques.

RAYONNEMENT D'ORIGINE TELLURIQUE

Les corps radioactifs de base à longue période contenus dans la lithosphère sont par ordre d'importance l'Uranium 238, le Thorium 232, et l'Uranium 235 ; ces trois grandes familles appelées Uranium-Radium, Thorium et actino-Uranium conduisent toutes à des isotopes inactifs du plomb : ^{206}Pb , ^{208}Pb , ^{207}Pb . Les autres émetteurs présents dans le sol sont dans l'ordre d'importance décroissante : le Potassium 40 le Lanthane 138 et le Lutétium 176. L'abondance des corps radioactifs dans le sol peut varier de façon importante suivant le lieu comme l'indiquent les spectres de la figure (1) relatifs à des échantillons de terrain prélevés dans l'environnement de différents sites français en cours d'équipement.

Les valeurs minimales du débit de dose obtenues pour le rayonnement tellurique sont de l'ordre de 30 à 40 nGy.h^{-1} , toutefois certains matériaux rapportés tels que des revêtements routiers, des ouvrages d'art ou des zones urbaines peuvent constituer un écran d'atténuation, ou bien au contraire une composante supplémentaire au rayonnement gamma ambiant.

RAYONNEMENT D'ORIGINE COSMIQUE

Son effet constitue au dessus du sol un fond radioactif toujours présent et stable pour un lieu donné ; s'il varie faiblement avec la latitude (12 % de plus aux pôles qu'à l'équateur), les variations sont plus conséquentes avec l'altitude comme l'indiquent LOWDER et BECK¹⁻² (fig.2).

A Oak Ridge AUXIER³ trouve un débit de dose de 32,7 nGy.h^{-1} ; pour la région parisienne⁴, on admet 34,2 nGy.h^{-1} .

RADIOACTIVITÉ DE L'AIR ET DES AÉROSOLS

Emetteurs naturels.

Outre le Béryllium 7, ce sont les émanations des trois grandes familles et leurs produits de désintégration qui se fixent sur les aérosols atmosphériques. L'ensemble constitue une source de rayonnement gamma de faible intensité.

On note la présence d'un certain nombre de radioéléments résultants essentiellement des explosions nucléaires. Celles-ci entraînent une pollution radioactive de l'atmosphère, très importante du point de vue radioécologique (contamination de la chaîne alimentaire), mais faible en ce qui concerne l'irradiation externe. A l'époque des tirs russes puissants et très fréquents, GREVET⁵ trouvait en France un débit de dose de $3,3 \text{ nGy.h}^{-1}$ ce qui était déjà faible relativement à la composante tellurique, et a depuis considérablement diminué (deux à trois ordres de grandeur).

II - APPAREILLAGE

CRITÈRES D'UTILISATION

La chambre d'ionisation destinée à la mesure du rayonnement gamma ambiant doit répondre à un certain nombre de critères liés soit à la nature et à l'intensité du phénomène, soit aux conditions d'emploi.

En premier lieu, le signal doit être proportionnel au phénomène à mesurer de façon à être exprimé directement en unité de débit de dose, c'est à dire en Gy.h^{-1} . La sensibilité doit permettre de mesurer avec précision les plus faibles valeurs, ce qui correspond si l'on réfère au chapitre précédent, à un niveau de l'ordre de 60 nGy.h^{-1} pour le territoire Français métropolitain. Par ailleurs

la mesure ayant lieu sous un angle solide de 4π stéradians, la réponse doit être isotrope. Enfin, l'appareillage étant embarqué sur un véhicule et les mesures étant, au moins dans un premier temps, effectuées en circulant, le temps de réponse doit être court pour conserver une bonne précision lors de variations très locales de la radioactivité. La constante de temps doit être telle qu'à une vitesse de déplacement de 7 km.h^{-1} (vitesse constante minimale du véhicule) il soit possible de percevoir une variation du débit de dose de 10 nGy.h^{-1} ; ce qui revient en pratique à évaluer 50 % de cette variation c'est à dire 5 nGy.h^{-1} lors d'un passage du véhicule devant une zone radioactive de 10 m de long. Cette condition implique que la constante de temps de l'appareillage soit inférieure ou égale à environ 7 secondes.

PRÉSENTATION ET PRINCIPE

Principe des chambres d'ionisation.

Ce sont des cavités de forme cylindrique ou sphérique comportant une électrode centrale également cylindrique ou sphérique. La paroi extérieure constitue l'électrode périphérique et l'espace inter-électrodes est composé d'un gaz qui est généralement de l'air. Lorsque l'on soumet cet espace à un champ électrique minimal de 500 V.cm^{-1} , les ions créés par le rayonnement gamma au sein du gaz de la chambre, sont entraînés vers les électrodes ; le courant électrique ainsi formé par la collection continue des charges est proportionnel à l'ionisation dans le volume de la chambre. L'une des caractéristiques essentielles des chambres d'ionisation est que leur sensibilité dépend de la nature et du nombre de molécules du gaz de remplissage soumis au champ électrique. A titre d'exemple le remplacement de l'air par de l'Argon accroît la sensibilité d'un facteur 1,25, de même la pressurisation augmente la sensibilité dans le rapport des pressions. Les chambres d'ionisation bien que théoriquement parfaites sont toutefois affectées de quelques défauts mineurs tels que les courants de fuites au niveau des isolants, les recombinaisons des

ions avant collection, les effets électrostatiques, et l'émission par les parois, mais les altérations provoquées restent de faible importance et sont souvent effacées par des particularités de construction. Il n'en demeure pas moins que le phénomène le plus gênant résulte de la présence des parois dont, l'absorption provoque une perte de sensibilité aux basses énergies et une émission secondaire (effet Compton) qui peut modifier la courbe de réponse aux environ de 100 keV.

La chambre RSS 111.

La chambre RSS 111 est du type à gaz pressurisé, c'est une sphère de 25,4 cm de diamètre contenant de l'Argon sous une pression de 25 atmosphères STP (0°C et 760 mm Hg). La paroi est en acier de 3 mm d'épaisseur et l'électrode centrale, également sphérique, a un diamètre de 5,08 cm. Le volume de chambre est donc d'environ 8,5 dm³.

RÉPONSE EN FONCTION DE L'ÉNERGIE DU RAYONNEMENT

Théoriquement les appareils doivent présenter une réponse proportionnelle au débit de dose et ceci quelle que soit l'énergie des photons incidents. Il en résulte que pour un débit de dose donné, la réponse doit être constante quelle que soit l'énergie. En réalité ainsi que nous l'avons déjà vu précédemment l'absorption au niveau des parois des chambres d'ionisation limite et modifie cette représentation. L'appareil aura ainsi une courbe de réponse limitée aux basses valeurs de l'énergie soit aux environs de 100 keV.

Afin d'établir la courbe de réponse l'appareil a été soumis à des flux de photons issus de sources radioactives d'énergies différentes et d'activités connues. Les débits de dose correspondants ont été déterminés en utilisant les courbes de ROCKWELL⁶ (fig.3) qui donnent le pouvoir d'ionisation en fonction de l'énergie et à partir des spectres d'émission de chaque radioélément. Ceci a permis de tracer la courbe de réponse à débit de

dose constant (fig.4), laquelle met en évidence l'étendue du domaine spectral et notamment l'énergie de coupure à 80 % de la valeur nominale, vers 65 keV. Il est à remarquer aussi que la courbe laisse apparaître un léger maximum aux environs de 100 keV qui provient probablement de l'effet de Compton à la surface interne des parois ; nous verrons plus loin que ce défaut constitue en fait un avantage dans le cadre de l'utilisation. A l'issue de ce test il apparaît que la réponse en fonction de l'énergie est correcte, le seuil étant inférieur à 100 keV ; en effet la proportion du rayonnement gamma ambiant d'énergie inférieure à cette valeur est faible et par ailleurs, d'un point de vue sanitaire le pouvoir d'ionisation des photons est très bas dans cette gamme d'énergie.

SENSIBILITÉ ET FLUCTUATION RELATIVE DES MESURES

La mesure à hauteur d'homme doit être représentée par une élancement suffisante relativement à la déviation de pleine échelle et accompagnée d'un très faible taux de fluctuations lors de l'enregistrement des valeurs les plus basses du gamma ambiant. L'appareil a été soumis à des intensités de rayonnement ambiant d'environ 140 nGy.h^{-1} , ce qui a permis d'obtenir :

La déviation moyenne relative à la déviation de pleine échelle soit 25 %. Le taux de fluctuation relativement à la valeur de déviation moyenne, soit $\pm 5 \%$.

Les valeurs obtenues montrent qu'il est possible de mesurer le rayonnement gamma ambiant, le faible taux de fluctuation résiduel étant dû principalement à la distribution statistique du rayonnement gamma incident. Seul une intégration du signal au niveau de l'électronique pourrait encore réduire ces fluctuations mais ce serait augmenter le temps de réponse ce qui n'est pas souhaitable.

ISOTROPIE

Cette étude consiste à rechercher la qualité omnidirectionnelle de la sensibilité du détecteur. Pour cela une source radioactive ponctuelle de ^{60}Co a été disposée dans des directions différentes et à distance constante du centre géométrique de la chambre. La courbe de sensibilité de l'appareil est normée à 1 pour la valeur maximale et correspond à un plan sécant du détecteur tel que l'on peut déduire l'ensemble des sensibilité dans un angle solide de 4π stéradians par symétrie de révolution autour de l'axe du détecteur.

L'examen de cette courbe montre que la chambre RSS 111 est proche des conditions souhaitées avec dans la direction la plus défavorable 20 % d'écart relatif par rapport à la valeur maximale.

RAPIDITÉ DE RÉPONSE

La réponse d'un appareil à une variation - échelon de niveau est régie par une relation de la forme

$$N = N_0 \left(1 - e^{-\frac{t}{\theta}} \right)$$

N étant le signal en fonction du temps de mesure t , N_0 le signal pour $t = \infty$ et θ la constante de temps, soit, par définition, le temps au bout duquel $\frac{N}{N_0} = 0,633$; le temps de réponse, lui, correspond à la fraction $\frac{N}{N_0} = 0,9$, l'appareil ayant été testé par une sollicitation radioactive de type échelon, les valeurs obtenues en fonction du temps ont permis de déterminer la constante de temps θ soit 6 secondes et le temps de réponse défini comme précédemment soit 13,8 secondes. Ces valeurs satisfont aux critères de mesures mobiles établis au début de ce texte, la constante de temps ne devant pas excéder $\theta \approx 7$ secondes.

III - ADAPTATION AUX MESURES DANS L'ENVIRONNEMENT

Le dispositif est installé dans un véhicule laboratoire calorifugé et pourvu de sources d'énergie composées de batteries de 12 V et d'un groupe électrogène dans un compartiment isolé thermiquement et phoniquement. Le signal est enregistré sur un graphique à déroulement rapide.

La présence des parois du véhicule adsorbe une fraction non négligeable du rayonnement qui atteindrait le détecteur s'il était placé à l'extérieur et cette atténuation est d'autant plus importante que l'énergie du rayonnement à mesurer est plus faible d'où la nécessité d'utiliser un détecteur doté d'une bonne sensibilité pour les basses énergies : dans le cas de la chambre d'ionisation RSS 111 il se trouve que la courbe de réponse en fonction de l'énergie présente une augmentation du niveau aux environs de 100 keV, telle que la réponse après atténuation par les parois du véhicule choisi est à peu près constante (fig.6). On notera qu'une chambre Equivalent-Tissu CET 72 perdrait ici pour l'usage envisagé sa qualité fondamentale liée à la très faible absorption par les parois, celles du véhicule étant prépondérantes et réduisant de plus la sensibilité déjà médiocre de ce détecteur. La valeur moyenne de l'épaisseur des parois du véhicule, pondérée sur 4π a été déterminée expérimentalement à l'aide d'une source de ^{60}Co dont l'atténuation du rayonnement a été mesurée dans diverses directions. Connaissant la valeur des épaisseurs $1/10$ ème pour l'acier, la relation d'atténuation :

$$N/N_0 = e^{-2,3 \frac{x}{x_{1/10}}}$$

a permis de déterminer une épaisseur pondérée du véhicule de 4,6 mm. (Dans la relation N et N_0 sont exprimés en densité de flux de photons ou en débit de dose et les épaisseurs x et $x_{1/10}$ en g.cm^{-2}). A partir de ce résultat la courbe de réponse du détecteur à l'intérieur du véhicule en fonction de l'énergie (fig.6) est alors calculée à partir de la courbe expérimentale hors-véhicule (fig.4). Pour les énergies supérieures à 120 keV,

la sensibilité de la chaîne de mesure opérationnelle sur le terrain est de $1,64 \text{ mV/nGy.h}^{-1} \pm 1\%$. En ce qui concerne la composante cosmique, le rayonnement n'étant pratiquement pas absorbé par les parois compte tenu de son énergie, en admettant une intensité correspondant à l'altitude ($34,2 \text{ nGy.h}^{-1}$ pour la région parisienne), le point de départ de la courbe finale d'utilisation de l'ensemble de mesure (fig.7) peut être déterminé à ce débit de dose de $34,2 \text{ nGy.h}^{-1}$ correspond un signal de 75 mV.

IV - PROTOCOLE SUIVI POUR ETABLIR LA CARTOGRAPHIE REGIONALE

La zone étudiée est incluse dans un cercle de rayon 20 km centrée sur la future installation nucléaire. Cette zone est représentée sur des cartes au 1/25000 de l'Institut Géographique National (généralement 8) repertoriées sur une carte-index.

Les mesures sont effectuées en continu sur les routes et chemins de la région concernée, la vitesse du véhicule étant de 7 km h^{-1} pour tenir compte du temps de réponse de l'appareillage. Les itinéraires sont choisis de façon à constituer un maillage régional relativement serré autour du site étudié avec des mesures complémentaires sur les chemins de terre et dans les champs.

Le débit de dose absorbé dû au rayonnement gamma ambiant est indiqué sur les cartes élémentaires du quadrillage par des valeurs exprimées en nGy.h^{-1} . Elles s'interprètent de la façon suivante : les mesures étant réalisées par enregistrement continu le long d'un itinéraire, les valeurs indiquées sur les cartes correspondent à une succession de valeurs minimales et maximales, l'évolution entre deux valeurs consécutives se faisant de façon continue et progressive.

Lorsqu'un point du parcours se particularise par une valeur très différente de celle du voisinage immédiat, la valeur est repérée par un cercle et ne s'intègre pas dans le processus d'interprétation précédent. Ce type de mesure donne lieu systématiquement à la recherche du maximum et la valeur est obtenue par point fixe du véhicule.

Dans les villes on note généralement une élévation de la mesure du rayonnement gamma ambiant en des zones limitées. Ce phénomène est dû à la présence de matériaux importés tels que les granites et les syénites ; par ailleurs, dans les rues ou auprès de certains ouvrages ou édifices, la disposition des éléments rayonnants par rapport au véhicule détecteur améliore la géométrie de mesure et accroît le niveau gamma ambiant local. Aussi des plans des principales agglomérations sont-ils établis en plus des cartes au 1/25000 pour mettre en évidence les anomalies à caractère généralement très local. Outre cette cartographie, le rapport d'étude comporte une description géologique accompagné d'une carte géologique de la région concernée. L'interprétation des valeurs les plus faibles et les plus fortes est faite à partir de la structure géologique et de mesures par spectrométrie gamma d'échantillons de terrains ou de matériaux prélevés sur place.

V - DISCUSSION ET CONCLUSION

Lors de la détermination de l'atténuation du rayonnement naturel par les parois du véhicule et de la chambre il est admis que les émissions gamma issues du sol peuvent varier en abondance mais que leur répartition spectrale reste approximativement inchangée. Cette hypothèse est assez réaliste puisque l'essentiel du rayonnement est fourni par les éléments des trois grandes familles naturelles. L'énergie moyenne du rayonnement tellurique que nous avons déterminée expérimentalement⁷ est en concordance avec celle calculée sur des données bibliographiques, sa valeur est de 450 keV. Toutefois, si au cours des campagnes de mesures auxquelles l'appareillage est destiné, il se trouvait que des énergies différentes soient à détecter et à mesurer, l'erreur commise serait très faible, en effet l'énergie moyenne du rayonnement tellurique ne peut pas varier beaucoup autour de sa valeur normale de 450 keV ; en admettant une variation de ± 250 keV, l'erreur commise sur le taux d'atténuation du rayonnement tellurique serait au maximum de $\pm 3\%$, ce qui n'affecterait l'ensemble de la mesure que d'un pourcentage plus faible encore puisque la part due au rayonnement cosmique ne subit pratiquement aucune atténuation.

Le dispositif décrit ici permet de mesurer des débits de dose à 1 nGy.h^{-1} près, sensibilité nécessaire si l'on a en vue 1°/ de mettre en évidence un éventuel impact probablement très faible, de la future installation nucléaire sur le rayonnement gamma ambiant.

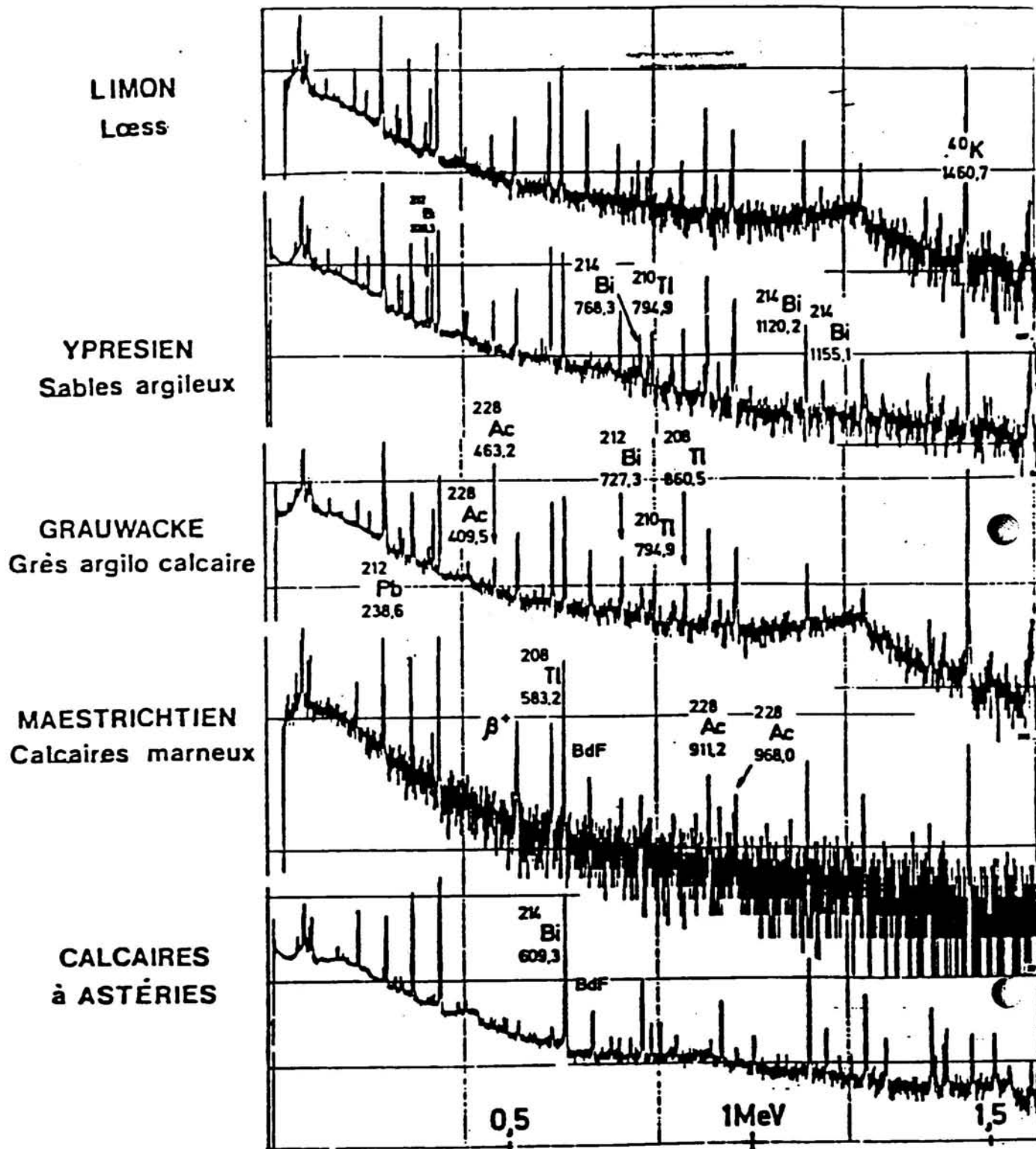
2°/ de disposer d'éléments de réponse précis opposables à une éventuelle contestation après mise en service de l'installation.

Par rapport au détecteur, précédemment utilisé (chambre d'ionisation CD 43 de 240 litres), ce dispositif présente deux avantages : une sensibilité légèrement améliorée et surtout, compte tenu de son faible encombrement, la possibilité d'effectuer des mesures complémentaires dans les endroits inaccessibles au véhicule.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

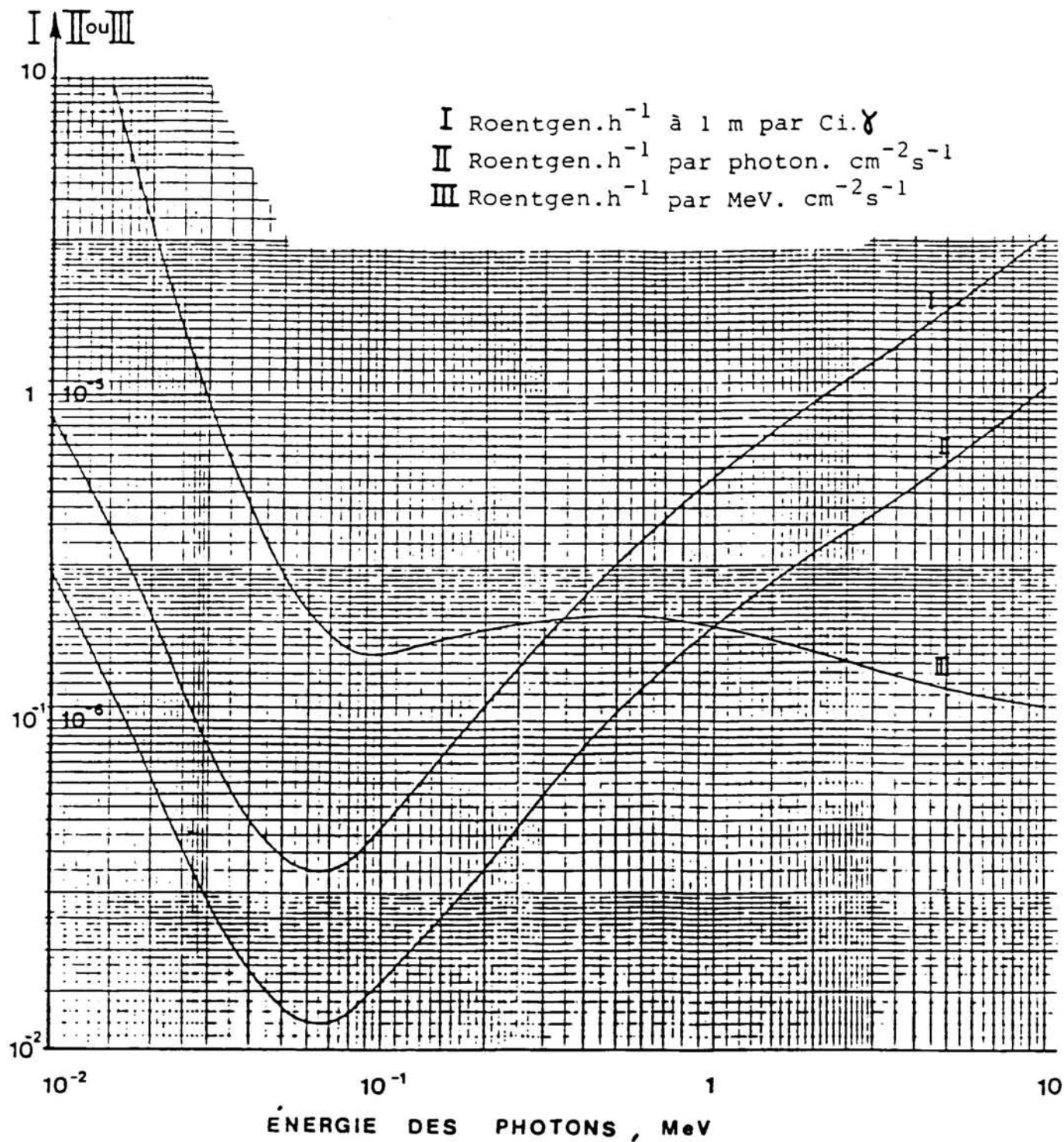
1. W.M. LOWDER, H.L.BECK, B.G. BENNETT and W.J. CONDON Further studies of external environmental radiation - USAEC Report HASL - 170 (1966).
2. W.M. LOWDER, P.D. RAFT and H.L. BECK Experimental determinations of cosmic-ray charged particle intensity profiles in the atmosphere - Proc. of Nat. Symp. on natural and manmade radiation in space - NASA - TM-X-2440.(1972).
3. J.A. AUXIER, D.J. CHRITAIN, T.D. JONES. Contribution of natural terrestrial sources to the total radiation dose to man - OAK-RIDGE NATIONAL LABORATORY, ORNL-TM-4323. (1973).
4. H. JAMMET . Les normes de sécurité fondamentales - Génie Atomique - INSTN - Presses Universitaires de France, 108 Boulevard St Germain Paris 6^{ème} (1963).
5. P. GREVET. Mesure de l'intensité totale d'ionisation au voisinage du sol ; séparation des différentes composantes - Rapport C.E.A. - R - 2880. (1966).
6. T. ROCKWELL. Reactor Shielding design manual Van Uostrand, Princeton, p 19. (1956).
7. D. GAUTHIER et C. CAPUT. Mesure du rayonnement gamma ambiant au moyen d'une chambre d'ionisation de grand volume - Note CEA N 2114 (1980).

- Fig.1 Exemples de spectrogrammes gamma issus de différents échantillons de terrains.
- Fig.2 Débit de dose dû au rayonnement cosmique aux latitudes moyennes en fonction de l'altitude (Lowder et Beck, 1966).
- Fig.3 Ionisation par les photons en fonction de l'énergie (Rockwell, 1956).
- Fig.4 Sensibilité de la chambre d'ionisation RSS 111 en fonction de l'énergie.
- Fig.5 Rendement de la chambre d'ionisation RSS 111 en fonction de l'incidence du rayonnement.
- Fig.6 Sensibilité de la chambre d'ionisation-RSS 111 installée à l'intérieur du véhicule en fonction de l'énergie du rayonnement.
- Fig.7 Débit de dose en fonction du signal délivré par la chambre d'ionisation RSS 111 installée à l'intérieur du véhicule.

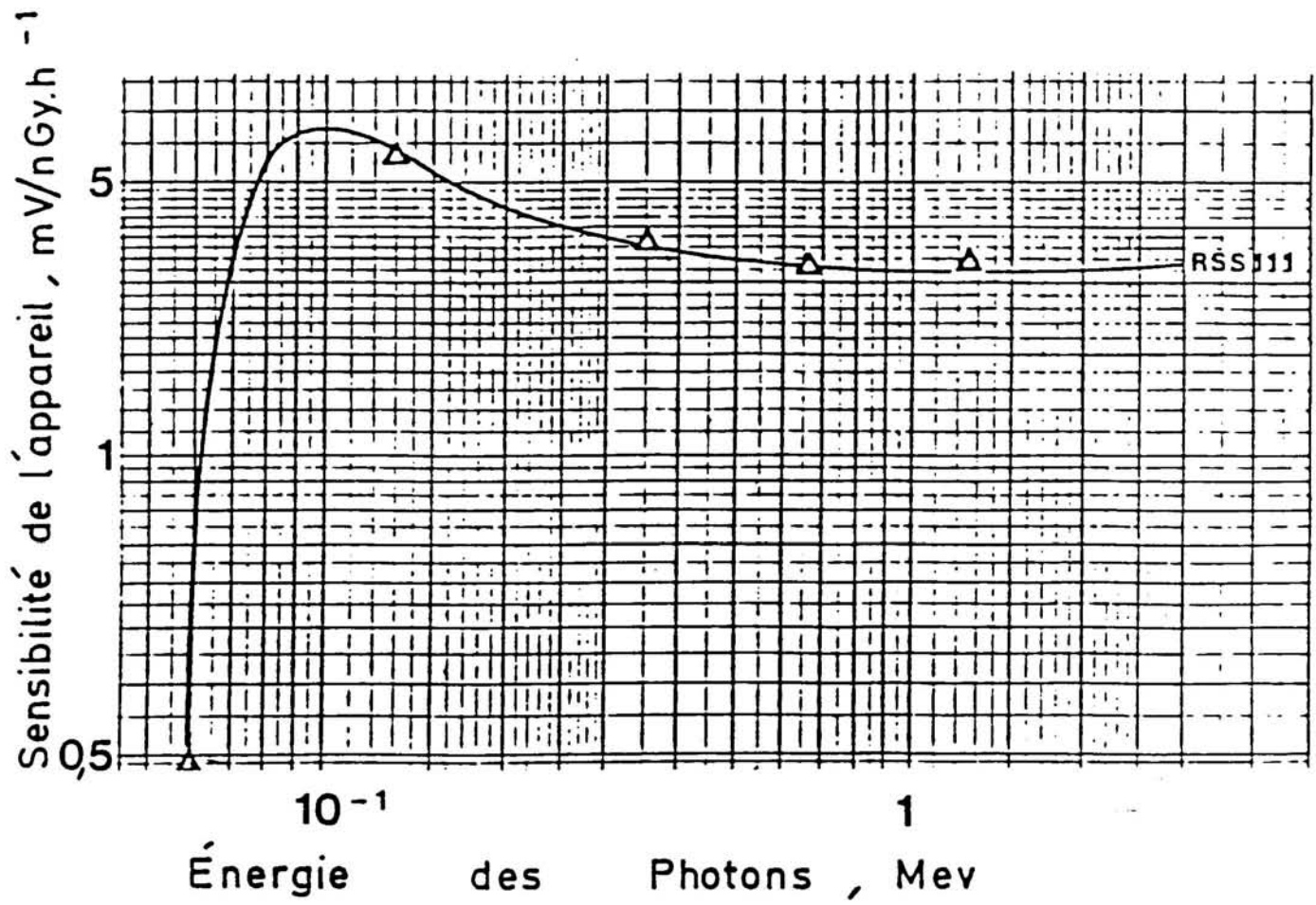


Exemples de spectrogrammes gamma issus de différents échantillons de terrains.

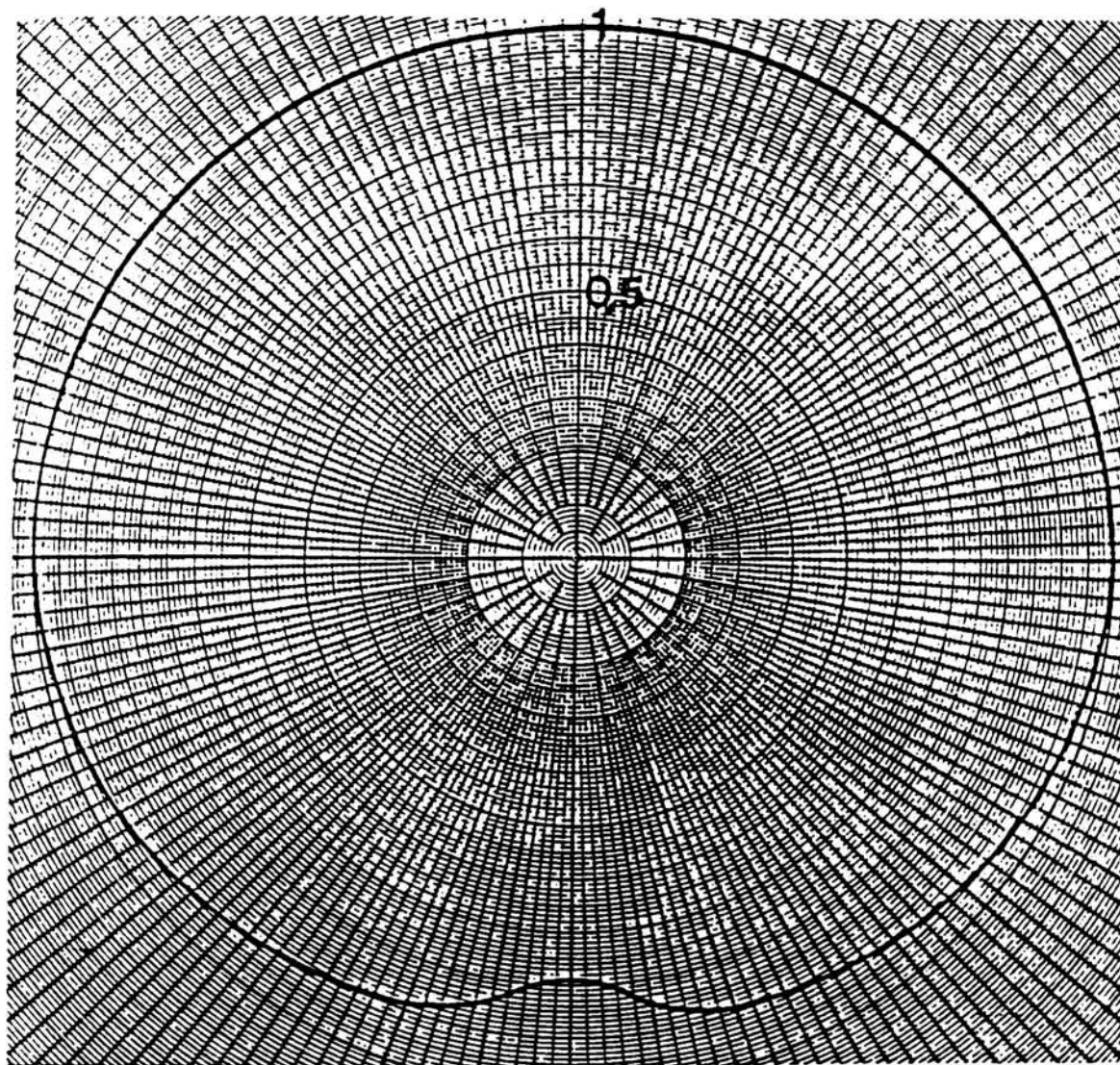
Figure 1



Ionisation par les photons en fonction de l'énergie (Rockwell, 1956).

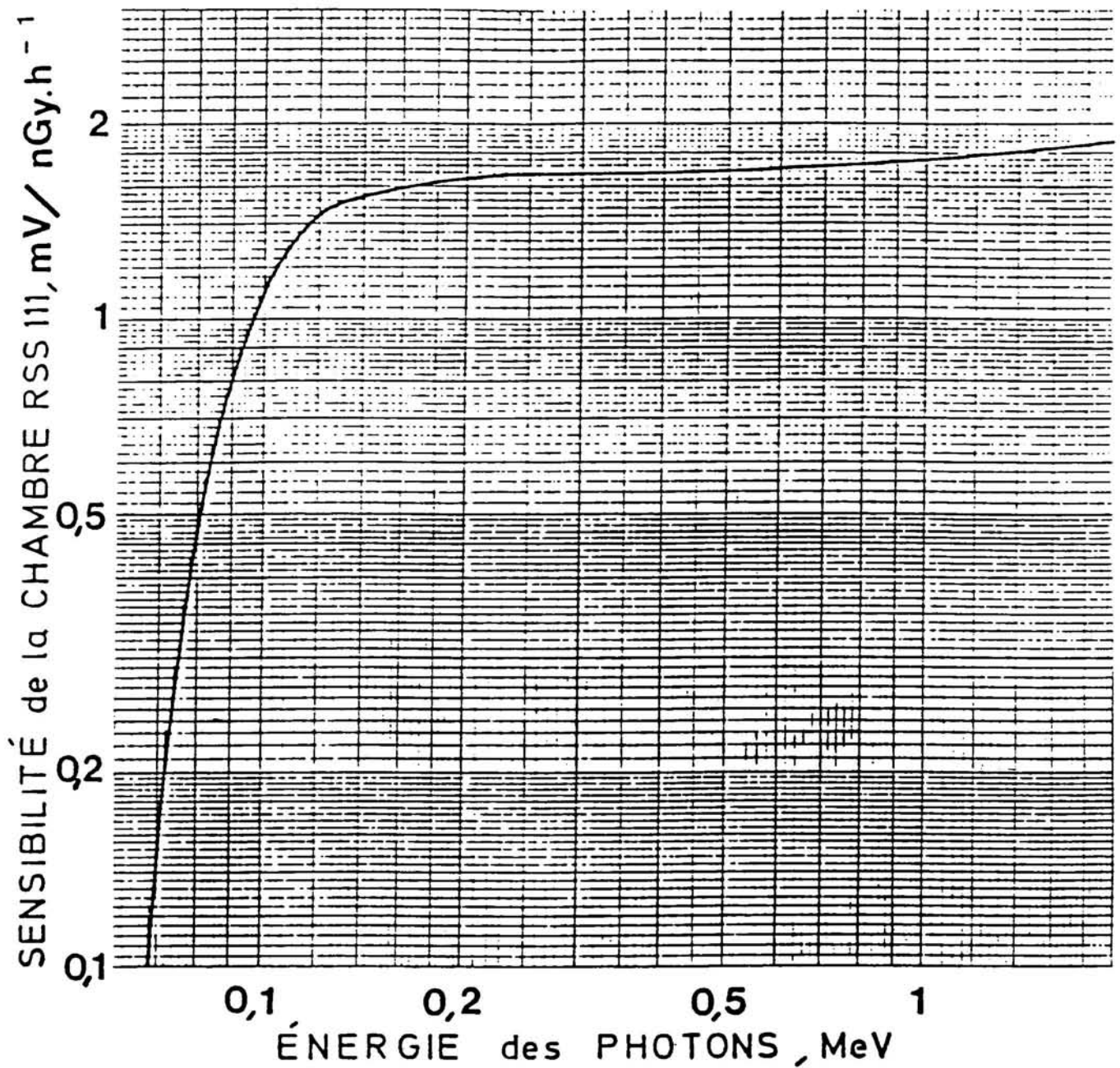


Sensibilité de la chambre d'ionisation RSS 111 en fonction de l'énergie du rayonnement gamma



Efficacité de la chambre d'ionisation RSS 111 en fonction de l'incidence du rayonnement et relativement à la sensibilité maximale.

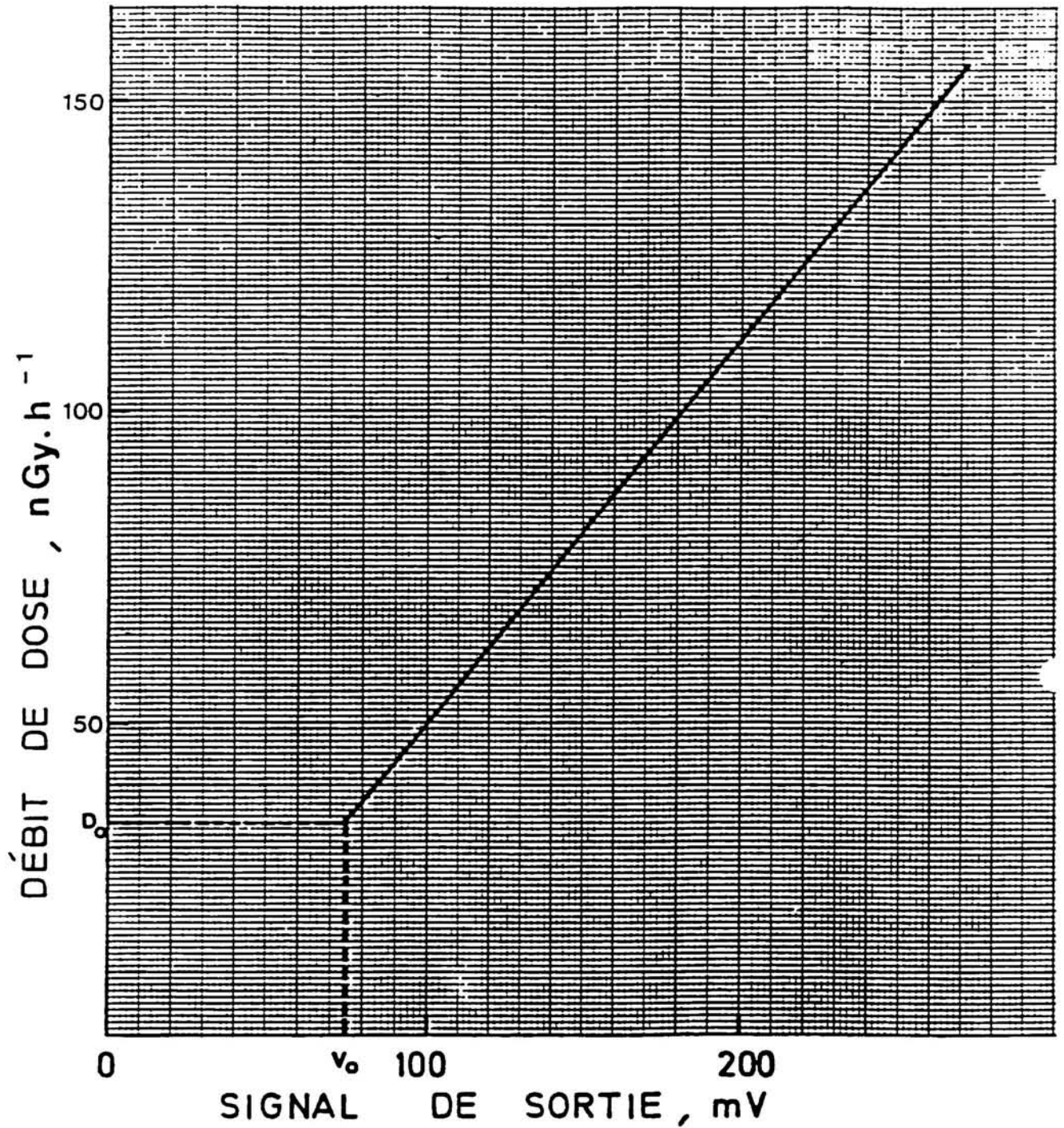
Figure 5



Réponse de la chambre d'ionisation RSS 111 disposée dans son véhicule et relativement à l'énergie du rayonnement gamma provenant de l'extérieur

Figure 6

Débit de dose en fonction du signal de sortie de la chambre RSS 1 pour un rayonnement provenant de l'extérieur du véhicule (chambre à l'intérieur)



* 10 nGy = 1 μrad

Figure 7