Détection et dosage de la radioactivité naturelle de l'atmosphère

Daniel Blanc, Jacques Fontan, René Soulhier, Gilbert Vedrenne

▶ **To cite this version:**

Daniel Blanc, Jacques Fontan, René Soulhier, Gilbert Vedrenne. Détection et dosage de la radioactivité naturelle de l'atmosphère. Journal de Physique et le Radium, 1961, 22 (1), pp.50-59. 10.1051/jphysrad:0196100220105000 . jpa-00236405

HAL Id: jpa-00236405
https://hal.science/jpa-00236405

Submitted on 4 Feb 2008

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

EXPOSÉ ET MISE AU POINT BIBLIOGRAPHIQUE

DÉTECTION ET DOSAGE DE LA RADIOACTIVITÉ NATURELLE DE L'ATMOSPHÈRE

Par DANIEL BLANC, JACQUES FONTAN, RENÉ SOULHIER et GILBERT VEDRENNE,
Centre de Physique Nucléaire, Faculté des Sciences de Toulouse.

Résumé. — Après avoir rappelé quelle est la nature de la radioactivité naturelle de l'atmosphère, on passe en revue les divers procédés de détection et de dosage de cette radioactivité : les méthodes directes (chambre d'ionisation, compteur proportionnel, scintillateur) et les méthodes indirectes (précipitation thermique, précipitation par centrifugation, précipitation électrostatique, filtration).

Compte tenu de la diffusion de l'émanation et des conditions météorologiques qui modifient la radioactivité naturelle de l'air, on donne enfin l'ordre de grandeur de cette radioactivité.

Abstract. — After recalling the nature of natural atmospheric radioactivity, we survey the various methods of detection and dosimetry of this radioactivity : direct methods (ionization chamber proportional counter, scintillator) and indirect methods (thermal, centrifugal and electrostatic precipitations, filtration).

Finally, taking into account the diffusion of the emanation and the meteorological conditions that modify the natural radioactivity of air, we give the order of magnitude of this radioactivity.

Origine et nature de la radioactivité naturelle de l'atmosphère. — En 1901, Elster et Geitel [El-1] ont mis en évidence l'existence d'une radioactivité de l'air atmosphérique. On reconnut assez rapidement qu'elle a pour origine deux gaz, le radon ($^{222}_{86}$Em) et le thoron ($^{220}_{86}$Em), qui sont deux isotopes de l'élément 86, appelé « Émanation ». Le premier appartient à la famille radioactive naturelle (uranium-radium) : il est produit par la désintégration alpha de $^{226}_{88}$Ra. Le second appartient à la famille du thorium : il provient de la désintégration du thorium X ($^{224}_{88}$Ra).

Il existe un troisième isotope gazeux de l'élément 86, l'actinon : il appartient à la famille de l'actinium et résulte de la désintégration de l'actinium X ($^{223}_{88}$Ra) ; sa période est très brève (3,92 secondes) et l'atmosphère ne contient que de très faibles quantités de ce gaz ; la radioactivité correspondante est négligeable.

Le radon et le thoron se forment à l'intérieur du sol, à partir de l'uranium et du thorium qui s'y trouvent en faibles concentrations ; ils diffusent ensuite vers la surface et se dégagent dans l'atmosphère. Les matériaux de construction habituels (briques, pierres, béton, etc...) contiennent des traces d'uranium et de thorium : du radon et du thoron se dégagent à l'intérieur des bâtiments. Bien plus, selon Anderson et ses collaborateurs [An-1], [An-2], [An-3], une partie du radon présent dans l'atmosphère des régions industrielles proviendrait de la combustion du charbon.

Dans l'atmosphère, le radon et le thoron se désintègrent à leur tour pour donner deux chaînes de descendants radioactifs (*fig.* 1 et 2). Tous ces descendants sont solides ; lors de leur formation, ils possèdent une grande mobilité et se fixent rapidement sur les aérosols et les poussières en suspension dans l'air, comme l'ont montré Labeyrie [La-2], ainsi que Carmichael et Tunnicliffe [Ca-2]. Voir aussi : [Bu-1], [Po-1].

Ces aérosols, de très faibles dimensions, peuvent rester longtemps présents dans l'atmosphère, en l'absence d'une cause extérieure entraînant leur précipitation au sol, et la radioactivité des descendants s'ajoute à la radioactivité du radon et du thoron ; le calcul de l'ensemble est assez complexe [Co-4], [Ha-1], [He-1], [So-1].

On a mesuré l'activité de tous les descendants du thoron. Pour le radon, celles de RaA, RaB, RaC et RaC' ont été déterminées (*fig.* 1). La période du descendant suivant, le RaD, est beaucoup plus longue (22 ans) : les aérosols sur lesquels il se fixe sont entraînés vers le sol, par leur poids ou par les précipitations, avant qu'un équilibre ait pu être atteint ; d'après Blifford et ses collaborateurs [Bl-3], la période de séjour des aérosols dans l'atmosphère serait en effet voisine de 10 jours. Il en résulte que la radioactivité due aux descendants à vie longue (RaD, RaE, RaF) est très faible [Ki-1].

Procédés de détection. — CHOIX DE LA MÉTHODE. — Selon la valeur de la concentration des aérosols ou des gaz radioactifs dans l'air, les méthodes utilisées sont très différentes.

1° Si l'activité est supérieure à 10^{-9} curie par litre (plus de 2 220 désintégrations par litre et par minute) on peut plonger directement dans l'air un détecteur, compteur de Geiger-Müller ou scintillateur, par exemple [Ak-1]. De tels niveaux d'activité sont supérieurs à 10 fois l'activité tolérable sans danger, d'après

Article published online by EDP Sciences and available at http://dx.doi.org/10.1051/jphysrad:0196100220105000

les normes de l'EURATOM. Ils ne peuvent être atteints qu'à l'intérieur des mines d'uranium.

2° Si l'activité est de l'ordre de 10^{-12} curie par litre (environ deux désintégrations par minute et par litre), on peut enfermer une certaine quantité du gaz étudié dans un détecteur convenablement choisi. Il s'agit d'une méthode directe de mesure, analogue à celle employée dans l'étude des radioéléments gazeux

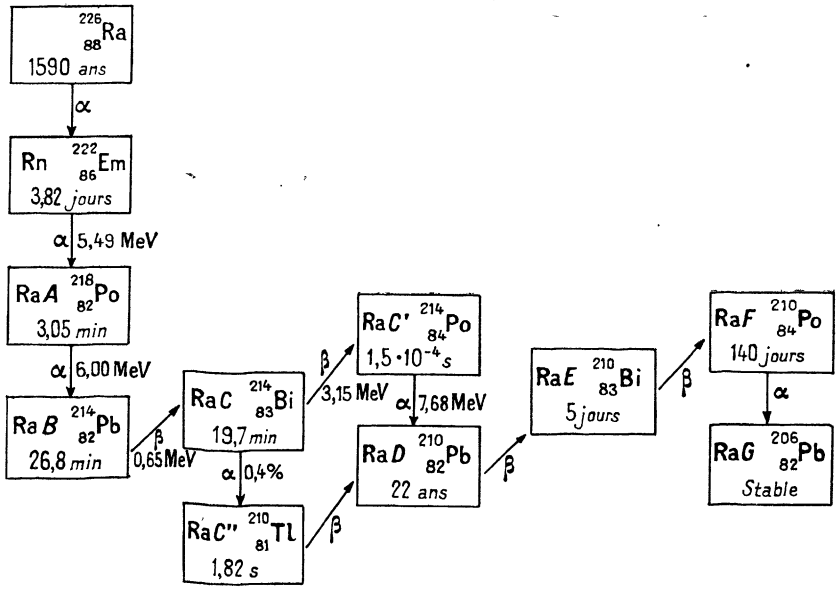

FIG. 1. — Chaîne de désintégration des descendants du radium.

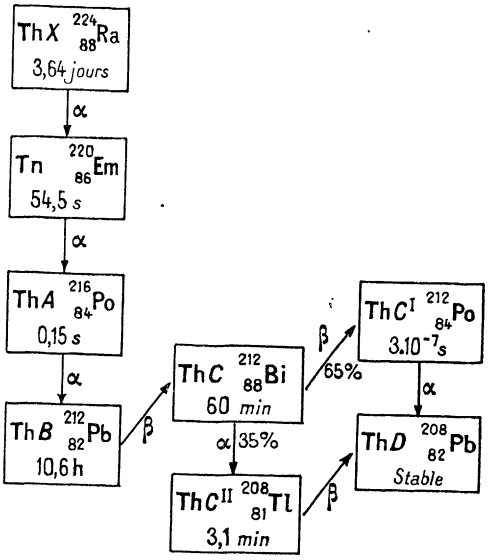

FIG. 2. — Chaîne de désintégration des descendants du thorium *X*.

comme le tritium ($^{3}_{1}H$) [Bl-1], [Sh-1] ou $^{14}_{6}C$ sous la forme d'anhydride carbonique [St-3].

3° Pour des concentrations nettement plus faibles (10^{-15} curie par litre, ou moins) la méthode précédente ne peut plus s'appliquer. On peut concentrer le gaz radioactif avant de l'envoyer dans le détecteur où opérer de façon indirecte en rassemblant sur un collecteur les aérosols présents dans l'atmosphère ; l'activité recueillie est ensuite analysée.

MÉTHODES DIRECTES. — L'air est envoyé à l'intérieur d'un détecteur (chambre d'ionisation, compteur proportionnel, scintillateur spécial).

1° *Chambres d'ionisation.* — Les électroscopes utilisés par les premiers expérimentateurs tels que Ashman [As-1] et Eve [Ev-3] rentrent dans cette catégorie. Après concentration sur du charbon actif, très poreux, ou condensation à la température de l'air liquide, l'émanation était envoyée à l'intérieur de l'électroscope ; l'ionisation produite par les particules alpha avait pour effet de décharger l'électrode centrale. De la vitesse de ce phénomène, on déduisait la quantité d'émanation introduite ; l'appareil était préalablement étalonné à l'aide d'une source de radium, émettant par unité de temps une quantité connue de radon.

La méthode fut progressivement perfectionnée : le gaz à analyser était envoyé dans une chambre d'ionisation dont l'électrode centrale était reliée à un électroscope ou à un électromètre [La-4], [Sa-1]. De nombreux montages utilisant des chambres d'ionisation sont encore employés : ils diffèrent en général par la façon dont on mesure le courant d'ionisation : on utilise des tubes électromètres [Fi-1], des amplificateurs de courant continu [De-3], à condensateur vibrant [Ba-2], [Hu-3], ou même des électromètres classiques [An-2], [Ja-2], [He-5].

On peut aussi faire fonctionner la chambre en impulsions et détecter le passage de chaque particule [Ca-2], [Cu-3] ; la hauteur d'impulsion étant proportionnelle à l'énergie perdue par la particule dans le gaz du compteur, on peut séparer les différents émetteurs alpha en associant la chambre d'ionisation à un sélecteur d'amplitudes [Fa-2], [Fa-3], [Hu-1].

Dans le cas d'activités très faibles, on peut utiliser un montage différentiel à deux chambres d'ionisation, dont la sensibilité est plus grande : l'une d'entre elles, fermée, enregistre l'ionisation due aux rayonnements parasites (rayons cosmiques, etc...) ; le courant qu'elle délivre est automatiquement soustrait de celui de l'autre chambre, dans laquelle on envoie le gaz à étudier [Ev-1], [Ja-1], [Wi-2]. Un tel montage peut fonctionner de façon continue. On trouvera sur la figure 3 l'ensemble réalisé par Labeyrie et Weill [La-3].

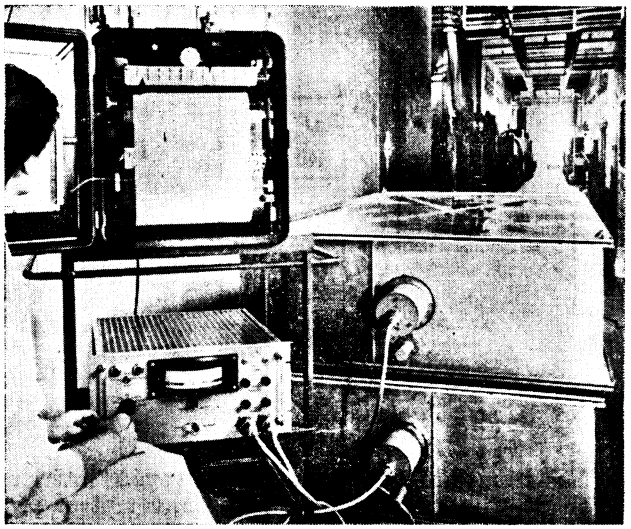

FIG. 3. — Chambre d'ionisation différentielle à fonctionnement continu. D'après [La-3].

Les chambres d'ionisation et les électromètres continuent à être employés pour la mesure du radon et du thoron qui se dégagent des eaux thermales [Du-1], [Ku-2], [Tr-1].

2° *Compteurs proportionnels.* — Ils sont souvent utilisés pour mesurer la quantité de radon et de thoron qui se dégage des roches, des liquides, etc... [Be-2], [Br-2], [Si-2]. Le gaz est envoyé à l'intérieur d'un compteur proportionnel fonctionnant de manière classique [Bl-1]. Malgré sa grande sensibilité, la méthode ne s'applique pas à la radioactivité de l'air lui-même : l'oxygène et l'anhydride carbonique qu'il contient sont les sources d'un grand nombre d'ions négatifs qui produisent des impulsions parasites. Nous citons cette méthode pour mémoire.

3° *Scintillateurs.* — Cette méthode, plus récente, a trouvé de nombreuses applications. Le gaz est envoyé dans une chambre dont les parois internes sont recouvertes d'un scintillateur pour rayons alpha, en général une poudre polycristalline de sulfure de zinc activé à l'argent [An-4]. Une fenêtre, ménagée dans la paroi, est occupée par la photocathode d'un photomultiplicateur qui permet le comptage des scintillations. Ces scintillations sont produites par les particules alpha du radon, lorsqu'elles heurtent la paroi, et aux descendants du radon émetteurs alpha (Ra*A* et Ra*C'*), qui se fixent très rapidement sur les parois de la chambre, comme l'a montré Labeyrie [La-2]. La détection du thoron, moins abondant, est plus délicate.

Les chambres sont souvent des ballons de verre ou de pyrex. Il semble toutefois que le bruit de fond du détecteur soit très diminué lorsque l'on utilise des parois de Kovar ou d'acier inoxydable [Lu-1]. Le volume de l'appareil est en général de quelques centaines de cm^3, [Ku-3], [Va-1] : on ne peut alors mesurer, avec une bonne précision, que des concentrations de radon supérieures à 10^{-13} curie par litre, telles que celles employées dans certaines études de biologie [Da-2], [Ma-4], [Ma-5], [Va-1].

Pour mesurer la concentration du radon dans l'air, le service d'Électronique Physique du Commissariat à l'Énergie Atomique a mis au point un ballon de verre à fond plat, d'un volume de 1 litre, dont la paroi interne est recouverte de sulfure de zinc activé à l'argent : un tel volume permet de mesurer les concentrations de radon habituellement rencontrées dans l'atmosphère. Un ballon scintillateur analogue, d'un volume de 500 cm^3, a été utilisé par Pradel et Billard [Pr-1] pour le dosage du thoron au voisinage des mines de thorium ; on mesure ainsi les concentrations en thoron supérieures à 5.10^{-13} curie par litre.

MÉTHODES INDIRECTES. — Le principe reste toujours le même : on rassemble sur un collecteur convenable les produits de désintégration du radon et du thoron en suspension dans l'air. Ces produits sont, le plus souvent, portés par des aérosols et les procédés industriels de dépoussiérage s'appliquent : précipitation thermique, précipitation par centrifugation, précipitation électrostatique, filtration. Nous examinerons successivement ces divers procédés.

1° *Précipitation thermique.* — Le principe de cette méthode est voisin de celui de la séparation isotopique : l'air chargé de poussières passe lentement entre deux parois, entre lesquelles existe un certain gradient de température. Les molécules situées au voisinage de la paroi chaude ont une énergie cinétique moyenne plus grande que l'énergie cinétique de celles situées au

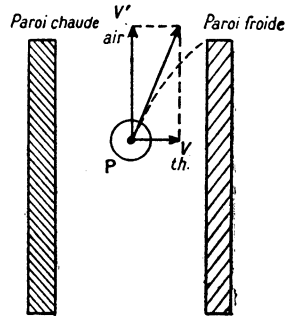

FIG. 4. — Principe de la précipitation thermique. La particule P est déviée vers la paroi froide. D'après [De-2].

voisinage de la paroi froide. Finalement, les poussières et aérosols P transportés par l'air recevront davantage de chocs du côté chaud que du côté froid : ils auront tendance à se coller sur la paroi froide (*fig.* 4), [Br-1], [Wa-1], [Wi-6]. Ce procédé présente l'avantage de collecter les plus petites particules : un tel appareil

aurait une efficacité très voisine de 100 % pour des perticules de diamètres inférieurs à un micron [Pa-1]. Malheureusement, le débit ne peut guère dépasser 10 cm^3 par minute, ce qui limite considérablement son emploi.

2° *Précipitation par centrifugation.* — L'air est aspiré à travers une série d'ouvertures en face desquelles sont placées des plaques qui dévient brutalement les filets d'air. Cette déviation projette les poussières sur la plaque où elles sont recueillies par un enduit adhésif (colle, graisse de silicones, etc...) [Gr-1], [Ma-7], ou par un liquide mouillant [Da-3], [Fr-1]. A l'inverse de la précédente, cette méthode possède un rendement beaucoup plus grand pour les grosses particules que pour les petites. On peut l'associer à un autre procédé (filtration, précipitation électrostatique) pour pallier cet inconvénient. En faisant suivre d'une rondelle de papier filtre quatre jets successifs, Laskin [La-5], [St-2] est parvenu à obtenir un rendement variable mais parfois voisin de 100 %, pour des aérosols de 0,2 micron à 50 microns de diamètre.

3° *Précipitation électrostatique.* — Nous avons groupé dans ce paragraphe les appareils qui utilisent la charge des particules pour les envoyer sur un collecteur grâce à un champ électrique. Selon l'origine de cette charge, il faut cependant distinguer deux catégories : à la première appartiennent les appareils dans lesquels les particules se chargent en passant dans un champ électrique intense ; dans la seconde sont rangés les appareils qui utilisent la propriété d'ionisation des atomes venant de subir une désintégration alpha.

Première catégorie. — L'industrie emploie un certain nombre de procédés de dépoussiérage électrique dont le principe est le suivant : l'air à dépoussiérer est envoyé dans une région où règne un champ électrique intense, créé par une forte différence de potentiel (10 000 à 100 000 volts) établie entre un fil [Ha-5] ou une série de fils et un système d'électrodes. Au voisinage du fil, l'air est ionisé par effet couronne : les ions ainsi créés ionisent à leur tour les particules en suspension dans l'air ; ces particules sont entraînées sur l'électrode collectrice. Dans tous ces appareils, on place l'électrode collectrice à la haute tension positive : ainsi, le courant de décharge est légèrement plus élevé et la tension d'amorçage entre les électrodes sensiblement augmentée [De-1].

Le mécanisme de l'ionisation des particules a fait l'objet de plusieurs théories. On pourra se reporter aux travaux de Pauthenier et de ses collaborateurs [Ch-3], [Pa-2], [Pa-3], de Loeb [Lo-2], de Lowe et Lucas [Lo-3], etc...

L'application de la précipitation électrostatique à la mesure de la radioactivité de l'air fut suggérée en 1902 par Sella, mais c'est M^lle^ Aliverti qui, en 1931, construisit et mit au point le premier appareil fonctionnant sur ce principe [Al-2], [Al-3] ; l'effluve n'est plus créée par le gradient du champ au voisinage de l'électrode centrale, mais par une série de pointes dirigées vers l'électrode collectrice. Cette méthode fut reprise par de nombreux expérimentateurs [Ca-2], [Ma-1]. Wilkening [Wi-2] a utilisé ce procédé pour mesurer les dimensions des aérosols radioactifs de l'air.

Deux électrodes courbes et coaxiales présentent l'inconvénient de collecter les poussières sur une grande surface, et l'analyse radioactive devient plus difficile. On préfère souvent utiliser l'effluve produite entre une série de pointes et un plan pour que les poussières se rassemblent sur ce plan [Ch-2], [Pi-1]. Les différences de potentiel sont inférieures à 10 000 volts, la distance entre les pointes et la plaque étant de quelques millimètres. En remplaçant cette plaque par une bande d'aluminium en déroulement continu, on peut réaliser un enregistrement continu des variations de la radioactivité de l'air en un point donné [Be-4], [Be-5], [Ka-1] [Kn-1], [Wi-3] ; l'efficacité est en général excellente et voisine de 100 %. Bergstedt [Be-5] juge cependant que cette estimation est trop optimiste.

Seconde catégorie. — Un atome qui vient d'émettre une particule alpha se transforme en ion positif ; le passage de la particule alpha dans le cortège électronique de l'atome modifie en effet profondément le champ électrique qui y règne et provoque le départ de plusieurs électrons. Les ions ainsi créés se déplacent dans l'atmosphère sous l'effet du champ électrique. On pourra les recueillir sur un fil ou une plaque chargés négativement. Cette méthode dite « d'activation » ou « de l'activité induite » a été souvent employée pour mesurer la radioactivité atmosphérique, dès les premières recherches [As-1], [El-1], [Ja-2], et, plus récemment, par Evans et Godeman [Ev-2], Wilkening [Wi-4], Skorka [Sk-1]. Vohra l'a utilisée pour mesurer la teneur de l'air en dérivés du thorium, et procéder à des repérages de gisements à distance [Vo-1] ou à des mesures de contaminations atmosphériques [Vo-2]. D'autres auteurs ont employé ce procédé pour mesurer les concentrations de radon et de thoron au voisinage de sources thermales [Le-3], [Le-4], [Pr-3].

La méthode d'activation présente un inconvénient : les ions positifs créés dans l'atmosphère par désintégrations alpha se fixent sur les aérosols de l'air, ce qui diminue leur mobilité ; ils peuvent aussi rencontrer des ions négatifs, également présents dans l'atmosphère, avec lesquels il se recombinent. Le nombre des particules chargées collectées sera donc diminué du nombre des particules recombinées ; il faut tenir compte de cette recombinaison pour évaluer l'activité présente dans l'air. Certains des auteurs cités plus haut ont commis l'erreur de ne pas effectuer cette correction.

4° *Filtration.* — On débarrasse l'air de ses poussières en le faisant passer à travers une surface filtrante. Les méthodes de filtration sont appliquées industriellement, par exemple pour assurer la décontamination de l'air ayant séjourné dans les laboratoires de radiochimie traitant des produits très actifs. Les caractéristiques de plusieurs modèles de filtres commerciaux ont fait l'objet d'études [Be-1], [Co-1], [Fi-2], [Ja-1].

Le principe de la méthode est simple : l'air à dépoussiérer est aspiré à travers un filtre qui peut être constitué par un bourrage ou un feutrage de fibres de cellulose [St-4], de laine de verre, d'amiante, de matières végétales ou de matière plastique. Le diamètre moyen de chaque fibre va de quelques microns à quelques dizaines de microns.

La filtration des poussières provient : 1) d'un *effet de tamisage* en ce qui concerne les grosses particules ou les agglomérats de particules ; 2) d'un *effet d'inertie*, par déviation des filets d'air au passage sur les fibres ;

3) d'un *effet de diffusion* pour les particules les plus fines : les particules de diamètre inférieur à quelques dixièmes de micron, entraînées par le courant d'air, oscillent par agitation thermique autour d'une ligne moyenne ; l'amplitude des oscillations augmente quand les dimensions des aérosols diminuent. La probabilité de rencontre d'une particule avec une fibre, par effet de diffusion, augmente donc de la même manière ; 4) pour certains filtres, s'ajoute un *effet électrostatique*, les fibres ayant gardé une charge électrique lors de leur compression.

Dans le cas de la radioactivité atmosphérique, les filtres sont d'un type plus particulier : il s'agit, en général, de papiers filtres de quelques dixièmes de millimètre d'épaisseur. Il faut cependant citer une intéressante réalisation du Commissariat à l'Énergie Atomique : il s'agit d'un appareil portatif où l'air est filtré sur du charbon de bois qui retient également le radon [Ca-1]. Le comptage est assuré par un compteur de Geiger-Müller placé au centre de la cartouche de charbon.

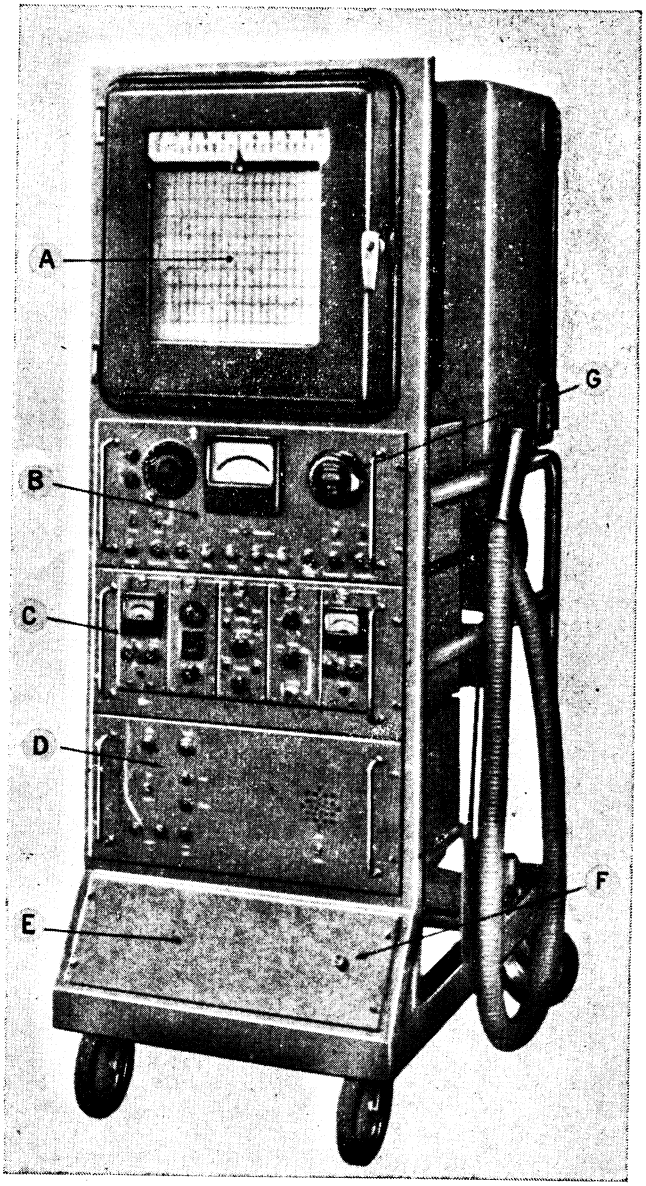

FIG. 5. — EAR-600 vu de face. D'après [La-3].

A : Enregistreur MECI. — B : Panneau général de commande. — C : Panneau intégrateur. — D : Alimentation stabilisée des circuits électroniques (ALS). — E : Panneau libre. — F : Prise de masse. — G : Compteur horaire.

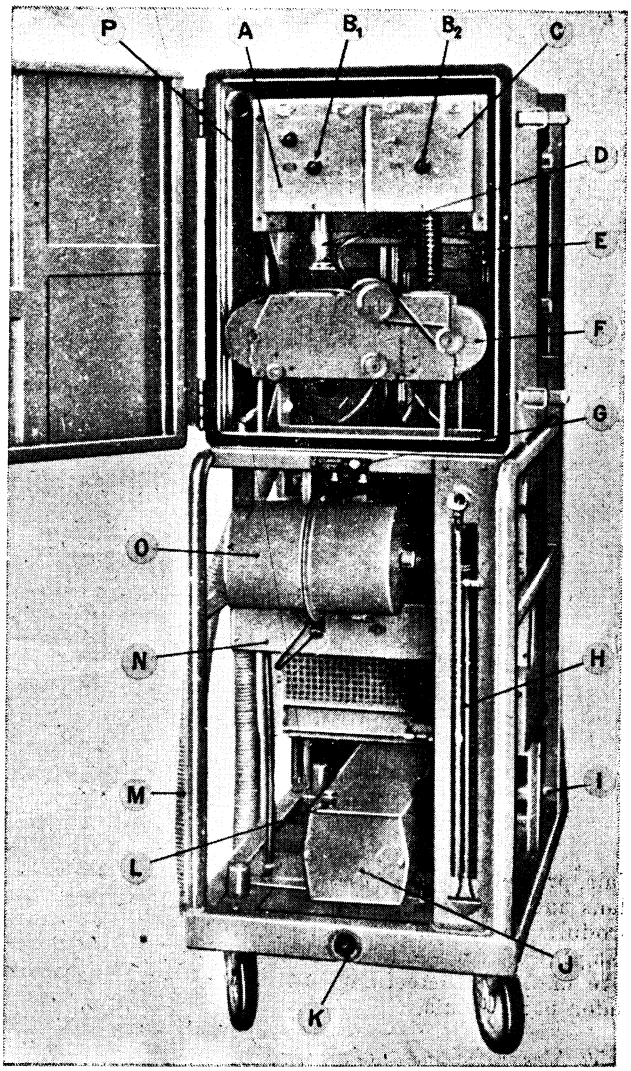

FIG. 6. — Vue arrière de l'EAR-600. D'après [La-3].

A : Préampli GM (P_1). — C : Préampli. — D : Détecteur GM. — E : Détecteur PM. — F : Dérouleur. — G : Interrupteur de l'éclairage du coffre. — H : Manomètre à liquides. — I : Détendeur (caché en partie). J : régulateur de tension. — K : Prise secteur. — L : Commutateur 110-220 V. — M : Trompe d'aspiration. — N : Barrette de distribution. — O : Aspirateur. — P. Coffre de prélèvement (ouvert).

Selon l'installation, le filtre peut être fixe [Ba-1], [Bo-1], [Da-1], [Ha-2], [Ha-3], [Ha-4], [Sc-2], ou mobile. Dans ce dernier cas, on obtient un enregistrement continu des variations de la radioactivité atmosphérique ; les appareils E. A. R. construits par le Commissariat à l'Énergie Atomique [Je-2], [La-1], [La-3], ainsi que de nombreux appareils étrangers [An-5], [Bo-1], [De-4], [Ku-1], [Ma-6], [Sa-4], [Sp-1], [Wa-2] rentrent dans cette catégorie. On trouvera sur les figures 5 et 6 l'EAR-600 du Commissariat à l'Énergie Atomique.

La plupart des filtres ont une efficacité qui varie de 90 % à 100 % pour les poussières industrielles de diamètre supérieur à un micron. Cette efficacité n'est plus que de 30 à 40 % pour des aérosols de dimensions voisines de 0,1 micron ; elle atteint à nouveau 90 % pour des gros ions de dimensions voisines de 0,001 micron [Ja-1].

Nous pouvons classer dans cette catégorie notre appareil de dosage continu des gaz radioactifs [Bl-2] : dans les méthodes qui précèdent, on suppose implicitement que l'équilibre radioactif est atteint entre le radon et ses descendants, mais ce n'est pas toujours le cas, particulièrement en atmosphère agitée. Labeyrie et Weill [La-3] ont abordé ce problème en utilisant une chambre d'ionisation différentielle et en l'alimentant à travers un filtre (*fig.* 3). Dans notre appareil (*fig.* 7),

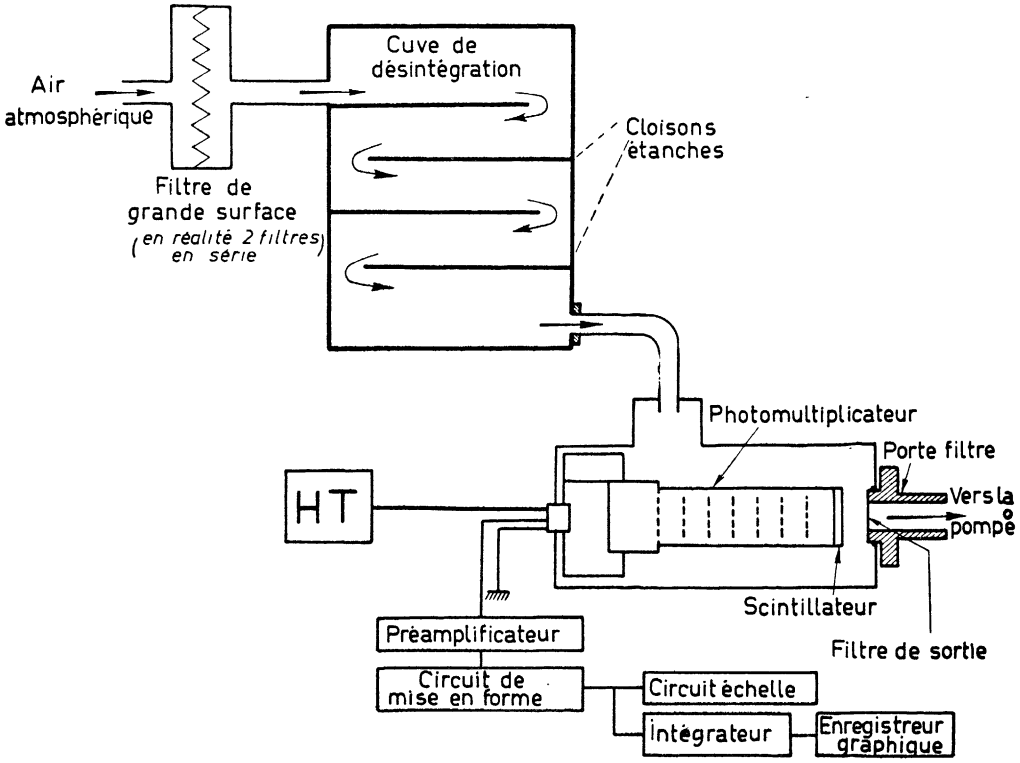

FIG. 7. — Ensemble de dosage continu du radon dans l'atmosphère [Bl-2].

l'air, préalablement filtré, est envoyé de façon continue dans une chambre de désintégration (1 000 litres). Les produits de désintégration du radon formés dans cette chambre sont recueillis sur un filtre et analysés. L'activité minimale détectable est de $1{,}4.10^{-14}$ curie de radon par litre d'air.

5° *Mesure de l'activité des prélèvements.* — Les aérosols radioactifs sont toujours recueillis sur un support et la moitié du rayonnement émis est dirigée vers l'intérieur du collecteur ; elle ne pourra pas être comptée, sauf si le support est un papier filtre de faible épaisseur et si l'on opère par comptage bêta.

La mesure de l'activité recueillie sur le collecteur peut se faire par comptage α ou par comptages β et γ. Les aérosols radioactifs naturels sont émetteurs α, β et γ, alors que les aérosols radioactifs artificiels (produits de fission, surtout) sont émetteurs β et γ ; un comptage α permet de séparer les éléments naturels des éléments artificiels. Remarquons que, lorsque l'on mesure la radioactivité totale de l'atmosphère par comptage β, on peut séparer facilement les éléments naturels des éléments artificiels en étudiant la loi de variation des courbes de décroissance.

Le premier appareil de mesure utilisé fut l'électroscope. Il fut remplacé ensuite par la chambre d'ionisation, dans laquelle sont placés les fils ou les plaques chargés d'aérosols [Sa-1]. Cette méthode continue à être employée dans le cas de la précipitation électrostatique [Al-2], [Al-3] et dans celui de la filtration [Cr-1], [Fa-1], [Ma-3], [Sm-1].

Si la chambre fonctionne en impulsions, l'emploi de chambres spécialement étudiées permet de tracer le spectre des éléments recueillis par précipitation électrostatique ; c'est ainsi qu'ont opéré Facchini et Malvicini [Fa-1], [Fa-2].

Quelques auteurs ont utilisé des compteurs proportionnels à l'intérieur desquels ils plaçaient l'électrode collectrice d'un précipitateur [Ca-2], [Wi-2]. Ce procédé est assez difficile, car le remplissage du compteur doit être renouvelé à chaque opération.

Le compteur de Geiger-Müller est le détecteur le plus employé dans les mesures β ou γ sur un collecteur. La mesure de l'activité recueillie sur un filtre peut se faire simultanément à l'aide de deux compteurs de Geiger-Müller placés de part et d'autre du filtre [Ph-1]. Quivy [Qu-1] a calculé quelle est, entre les deux compteurs, la différence du taux de comptage due à l'absorption des rayons β à l'intérieur du filtre.

Les appareils employant des scintillateurs sont aussi très nombreux. Certains auteurs utilisent simultanément un compteur à scintillations, pour la mesure des rayons α, et un compteur de Geiger-Müller, pour la mesure des rayons β, ces deux détecteurs étant placés de part et d'autre du filtre [Wa-2]. On peut employer, de même, deux compteurs à scintillations, l'un des scintillateurs étant une poudre de ZnS(Ag), l'autre un scintillateur plastique pour rayons β.

Il est assez courant de placer les plaques ou le filtre à analyser au contact d'une émulsion nucléaire [Al-4], [Al-5], [Ch-1], [Fa-4], [La-2], [Le-1], [Ma-3], [Mo-1], [Mo-2], [Si-1]. On peut même recueillir directement sur la plaque photographique les aérosols, par précipitation [Er-1], [Je-1]. L'examen au microscope des traces obtenues dans les plaques développées donne des renseignements sur le nombre et sur la nature des particules recueillies sur le collecteur.

On peut enfin faire appel à l'analyse chimique des poussières recueillies [Ki-1], [Al-1]. Avy et Raillère [Av-1], par exemple, emploient pour recueillir les poussières un filtre cristallin soluble.

Causes diverses de variation de la radioactivité naturelle de l'air. — Diffusion de l'émanation. — La radioactivité naturelle de l'atmosphère varie beaucoup d'un lieu à un autre ; en un même lieu, on observe des variations fréquentes et importantes [Bl-4].

Cette radioactivité provient de la diffusion de radon et de thoron à partir du sol : elle est fortement influencée par les conditions météorologiques des couches inférieures de l'atmosphère, et, en particulier, par l'existence de courants de convection au niveau du sol. Elle est liée à un phénomène d'échange dont il est possible de faire une étude quantitative.

La fonction $s(z)$, qui représente la distribution verticale du radon dans l'atmosphère, est la solution d'une équation différentielle de la forme [Co-3], [Is-1] :

$$\frac{A}{\rho}\frac{\mathrm{d}^2 s}{\mathrm{d}z^2} + \frac{1}{\rho}\frac{\mathrm{d}A}{\mathrm{d}z}\cdot\frac{\mathrm{d}s}{\mathrm{d}z} - \lambda s = \frac{\mathrm{d}E}{\mathrm{d}z}.$$

s = densité de l'émanation (curie cm^{-3}).
E = quantité d'émanation (curie cm^{-2} s^{-1}).
A = coefficient d'échange (g cm^{-1} s^{-1}).
λ = constante radioactive du radon (s^{-1}).
ρ = densité de l'air.

Cette équation reste valable pour le thoron. Elle a été intégrée en supposant $\mathrm{d}A/\mathrm{d}z = 0$ [He-3], ou en donnant à A des valeurs arbitraires. Les résultats obtenus s'accordent grossièrement avec la valeur expérimentale de E :

$$E = 40.10^{-18} \text{ curie cm}^{-2}\text{ s}^{-1} \qquad \text{(Is-1)}$$

La concentration optimale a été obtenue par Priebsch [Pr-2] ; dans certains cas, les écarts sont importants : à New-York, par exemple, Cullen a trouvé $E = 5.10^{-18}$ curie cm^{-2} sec^{-1} [Cu-1]. Ces écarts semblent dus à la nature des sols.

Influence des conditions météorologiques. — L'équation précédente n'est valable qu'en atmosphère calme (absence de vent, pas d'inversion de température).

L'influence du vent se manifeste de deux manières [Ch-2], [Fu-1], [He-2], [Hu-2] : la vitesse d'émission du radon est augmentée, ce qui entraîne une augmentation de la radioactivité ; d'autre part, le vent, emmenant au loin les particules formées, provoquerait une diminution de leur concentration. Enfin, la direction du vent joue un rôle important [Ch-2], [Co-2], [Je-3], [Je-4], [Re-1], [Sk-1], [St-1], [Ta-1], et l'on a pu ainsi procéder au repérage à distance de gisements de thorium [Vo-1].

Sur la diffusion à partir du sol, l'influence de la température est très faible : il faut que la température s'élève de 120° à 150 °C pour que la quantité de gaz émanant des roches soit doublée [Gi-1]. Par contre, son influence est très importante dans les variations quotidiennes de la radioactivité de l'air. En général, en atmosphère calme, on trouve un minimum d'activité dans l'après-midi ou à la tombée de la nuit, au moment où les courants de convection de l'atmosphère sont favorisés par l'échauffement du sol, et un maximum durant la nuit ou aux premières heures de la matinée, alors que l'air froid demeure au voisinage du sol [Wi-4]. Se basant sur les données de Lettau [Le-5], Cotton [Co-3] a fait le calcul théorique du rapport des activités diurne et nocturne : ce rapport est d'autant plus grand que la radioactivité moyenne est plus faible.

D'autre part, en un lieu donné, la radioactivité est maximale lors des inversions de température, c'est-à-dire quand les basses couches de l'atmosphère se maintiennent constamment au voisinage du sol.

La pluie provoque une décroissance de l'activité naturelle ; elle entraîne vers le sol les aérosols en suspension dans l'air, elle colmate les fissures et les capillaires du sol par lesquels s'échappe l'émanation [Ko-1]. La neige et le gel produisent le même effet. Le brouillard retient au contraire les particules au voisinage du sol, ce qui augmente l'activité de l'air ; les aérosols formés ont aussi des dimensions plus grandes et leur probabilité de capture est augmentée.

La radioactivité dépend de la pression atmosphérique [Sa-2] : le radon se dégage d'autant plus facilement que la pression atmosphérique est plus faible [He-2].

Enfin, on note une variation saisonnière marquée, présentant un maximum annuel, mais la période de l'année à laquelle se manifeste ce maximum est variable d'une région à une autre [Bl-4], [Wi-5].

Il est très difficile d'établir une théorie globale de la variation de la radioactivité naturelle de l'atmosphère, en raison de la complexité des facteurs météorologiques qui interviennent dans les observations.

Ordre de grandeur de la radioactivité naturelle. — Compte tenu des divers facteurs que nous venons de citer, nous pouvons donner la *valeur moyenne* de la

radioactivité atmosphérique. Sur les continents, et au niveau du sol, elle est de l'ordre de 1 à 2.10^{-13} curie par litre d'air pour le radon, et de 2 à 3.10^{-15} curie par litre pour le thoron.

Au-dessus des océans, les valeurs trouvées sont beaucoup plus faibles : 10^{-15} curie par litre pour le radon, $0{,}1.10^{-15}$ curie par litre pour le thoron [Bl-4], [He-4], [He-5], [Is-1], [Sk-1].

En montagne, on obtient des résultats plus forts, alors qu'à haute altitude, les mesures aériennes faites par Wilkening [Wi-4] et par Garrigue [Ga-1], [Ga-2] montrent que la radioactivité décroît très vite quand l'altitude augmente : au-dessus de 3 000 mètres, on rencontre surtout des ions libres, non recombinés.

La dose de tolérance est plus de dix fois supérieure aux plus fortes concentrations enregistrées. Il n'en est plus de même dans les mines d'uranium où des installations de contrôle fonctionnant en permanence sont indispensables.

Nous remercions, Mlle Huguette Bourdès, Secrétaire du Centre de Physique Nucléaire, pour sa participation au dépouillement de la documentation.

Cette étude a pu être menée à bien grâce à un contrat du Commissariat à l'Énergie Atomique.

Manuscrit reçu le 27 juillet 1960.

BIBLIOGRAPHIE

[Ak-1] AKPINAR (S.), *Istambul Univ. Fak. Mecmuasi*, 1957, **27**, n° 2.
[Al-1] ALERCIO (J. S.) et HARLEY (J. H.), *Nucleonics*, 1952, **10**, n° 11, 87.
[Al-2] ALIVERTI (G.), *Nuovo Cimento*, 1931, **8**, 233.
[Al-3] ALIVERTI (G.), *Nuovo Cimento*, 1932, **9**, 313.
[Al-4] ALIVERTI (G.) et coll., *Nuovo Cimento*, 1957, **7**, 270.
[Al-5] ALIVERTI (G.) et coll., *Nuovo Cimento*, 1958, **1**, 68.
[An-1] ANDERSON (J. R.), *Brit. Chem. Eng.*, 1956, **12**, 418.
[An-2] ANDERSON (W.), MAYNEOR (D. V. D.) et TURNER (R. C.), *Nature*, 1954, **174**, 424.
[An-3] ANDERSON (W.) et TURNER (R. C.), *Nature*, 1956, **178**, 203.
[An-4] ANTHONY (J. P.), Thèse Doctorat ès Sciences, Paris, 1955.
[An-5] ANTON (N.), *C. R. Conf. Intern. Appl. Pac. Energie Atomique*, Genève, 1955, vol. **14**, 316.
[As-1] ASHMAN (G.), *Amer. J. Sc.*, 1908, **26**, 119.
[Au-1] AURAND (K.), *Beit. Phys. Atmosphäre*, 1959, **31**, 244.
[Av-1] AVY et RAILLERE, *Memorial Serv. Chim. Etat*, 1944, **31**, 74.
[Ba-1] BARREIRA (F.) et LARANJERA (M.), *C. R. Conf. Intern. Appl. Pac. Energie Atomique*, Genève, 1955, vol. **9**, 860.
[Ba-2] BATE (G. L.), VOLCHOK (H. L.) et KULP (J. L.), *Rev. Sc. Instr.*, 1954, **25**, 153.
[Ba-3] BAUS (R. A.), *Journ. Atmosph. Terr. Phys.*, 1956 **89**, 1.
[Be-1] BECKER (A.), LE GALLIC (Y.) et THÉNARD (M.), *Bull. Inform. Sc. Techn. C. E. A.*, 1959, n° 33.
[Be-2] BEGEMANN (F.), *Helv. Phys. Acta*, 1954, **27**, 451.
[Be-3] BELWICKE (C. C.) et STOUT (P. R.), *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 1959, **40**, 285.
[Be-4] BERGSTED (B. A.), *C. R. Conf. Intern. Appl. Pac. Energie Atomique*, Genève, 1955, vol. **9**, 868.
[Be-5] BERGSTED (B. A.), *J. Sc. Instr.*, 1956, **33**, 142.
[Bl-1] BLANC (D.), Détecteurs de particules, compteurs et scintillateurs, Masson, édit., Paris, 1959.
[Bl-2] BLANC (D.), FONTAN (J.) et VEDRENNE (G.), *C. R. Acad. Sc.*, 1960, **250**, 3629.
[Bl-3] BLIFFORD (I. H.) et coll., *J. Geophys. Res.*, 1952, **57**, 449.
[Bl-4] BLIFFORD (I. H.), *J. Atmosph. Terr. Phys.*, 1956, **89**, 1.
[Bo-1] BOSCH (J.) et ULSENHEIMER (G.), *Nukleonik*, 1958, **1**, 157.
[Br-1] BREDL (J.) et GRIEVE (T. W.), *J. Sc. Instr.*, 1951, **28**, 21.
[Br-2] BROWN (S. C.), ELLIOTT (L. G.) et EVANS (R. D.), *Rev. Sc. Instr.*, 1942, **13**, 147.
[Bu-1] BURKE (T.) et NOLAN (J. J.), *Proc. Royal Irish Acad.*, 1950, **53**, sect. A, n° 9.
[Ca-1] CADUDAL (C.), *J. Physique Rad.*, 1955, **16**, 479.
[Ca-2] CARMICHAEL (H.) et TUNNICLIFFE (P. R.), *J. Ind. Hyg. Toxicol.*, 1948, **30**, n° 4, 21.
[Ch-1] CHAMIE (C.), *J. Chem. Physics*, 1931, **28**, 228.
[Ch-2] CHAPMAN (N. G.) et HUMPHREY (R. W.), *J. Sc. Technol.*, 1955, **37**, n° 3.
[Ch-3] CHALLANDE (R.), *J. Rech. C. N. R. S.*, 1954-1955, **28**, 291.
[Cl-1] CLERC (H.), École Franç. Meunerie, 1953, **135**, 120.
[Co-1] COCHINAL (R.), note C. E. A., n° 177, 1956.
[Co-2] CORTON (H. C.) et HALES (W. B.), *Proc. Utah Acad. Sc. Arts Let.*, 1953, **30**, 124.
[Co-3] COTTON (E. S.), *J. Atmospher. Terr. Phys.*, 1955, **7**, 90.
[Co-4] COURTIER (G. B.), *Nature*, 1957, **180**, 382.
[Cr-1] CROSTHWAIT (L. B.), *J. Sc. Technol.*, 1955, **37**, 382.
[Cu-1] CULLEN (T. L.), *An. Acad. Bras. Cianc.*, 1957, **29**, 545.
[Cu-2] CURIE (Mme), Radioactivité, Hermann, édit., Paris, 1935.
[Cu-3] CURTIS (L. F.) et DAVIS (F. J.), *Bur. Standards J. Res.*, 1943, **31**, 1.
[Da-1] DADDI (L.), *Ricerca Sci.*, 1957, **3**, 313.
[Da-2] DAMON (P. E.) et HYDE (H. T.), *Rev. Sc. Instr.*, 1952, **23**, 766.
[Da-3] DAUTREBANDE (L.), Librairie de l'Association des Industriels de Belgique, 1952.
[De-1] DELASSALLE (A.), *Rev. Gén. Electr.*, juillet 1939, 851.
[De-2] DELIBRIAS (G.) et LABEYRIE (J.), *J. Physique Rad.*, 1953, **14**, 407.
[De-3] DELIBRIAS (G.), *J. Physique Rad.*, 1954, **15**, 78-A.
[De-4] DELWICHE (C. C.) et STOUT (P. R.), *Bull. Amer. Meteorol. Soc.*, 1959, **40**, n° 6.
[Du-1] DUCHON (R.), *J. Physique Rad.*, 1937, **8**, 285.
[El-1] ELSTER (J.) et GEITEL (M.), *Phys. Z.*, 1901, **2**, 560.
[Er-1] ERDIK (E.), *J. Physique Rad.*, 1954, **15**, 445.
[Ev-1] EVANS (R. D.), *Rev. Sc. Instr.*, 1935, **6**, 99.
[Ev-2] EVANS (R. D.) et GODEMAN (C.), *J. Ind. Hyg. Toxicol.*, 1940, **22**, 89.
[Ev-3] EVE (A. S.), *Phil. Mag.*, 1907, **14**, 724 ; *Phil. Mag.*, 1908, **16**, 622.
[Fa-1] FACCHINI (V.) et MALVICINI (A.), *Nucleonics*, 1955, **13**, n° 4, 36.
[Fa-2] FACCHINI (V.) et MALVICINI (A.), *Nuovo Cimento*, 1955, **2**, 340.
[Fa-3] FACCHINI (V.) et MALVICINI (A.), *C. R. Conf. Intern. Appl. Pac. Energie Atomique*, Genève, 1955, **9**, 865.
[Fa-4] FARAGGI (H.), Thèse Doctorat ès Sciences, Paris, 1950.
[Fi-1] FINNEY (G. D.) et EVANS (R. D.), *Phys. Rev.*, 1935, **48**, 503.
[Fi-2] FITZGERALD (J. J.) et DETWILER (G. G.), U.S.A.E.C., rapport KAPL-1088 (15 mars 1954).
[Fl-1] FLANAGAN (F. J.) et SENFTLE (F. E.), *Anal. Chem.*, 1954, **26**, n° 10.
[Fr-1] FRANEAU (J.) et QUIVY (R.), Publ. Association des

Ingénieurs de la Faculté Polytechnique de Mons, 1957, 4e fasc.
[Fu-1] FURTADO-ALVES (M. A.), *Rev. Fac. Ci.*, Lisboa, 1957, **26**, 97.
[Ga-1] GARRIGUE (H.), *C. R. Acad. Sc.*, Paris, 1951, **232**, 722.
[Ga-2] GARRIGUE (H.), *Ind. Atom.*, 1958, **7-8**, 125.
[Gi-1] GILETTI (B. J.) et KULP (J. L.), *Amer. Mineral.*, 1955, **40**, 481.
[Gr-1] GROUPE DE ROCHESTER, The pharmacology and toxicology of uranium compounds. *Nat. Nucl. Energ.*, Ser. VI, MacGraw-Hill, édit., New-York, 1949.
[Ha-1] HARLEY (J.), *Thèse*, Rensslaer Polyth. Inst., juin 1952.
[Ha-2] HASENCLEVER (D.), *Staub*, 1958, **18**, n° 2, 44.
[Ha-3] HASENCLEVER (D.), *Staub*, 1959, **19**, n° 2, 37.
[Ha-4] HAXEL (O.), *Z. Angew. Phys.*, 1953, **5**, 241.
[Ha-5] HAYES (A. D.), *Arch. Ind. Hyg. Occup. Medic.*, 1954, **9**, 69.
[He-1] HEALY (J. W.), *Nucleonics*, 1952, **10**, n° 10, 14.
[He-2] HESS (C. F.), *S. B. Acad. Wiss. Wien. Ber.*, 1910, **119**, 145.
[He-3] HESS (V. F.) et SCHMIDT (W.), *Phys. Z.*, 1918, **19**, 109.
[He-4] HESS (V. F.), *S. B. Akad. Wiss. Wien. Ber.*, 1918, **217**, 1927.
[He-5] HESS (V. F.), *J. Atmosph. terrest. Phys.*, 1953, **3**, n° 3.
[He-6] HESS (V. F.) et JAKI (S. L.), *J. Geoph. Res.*, U. S. A., 1958, **63**, 373.
[Hu-1] HUDGENS (J. E.) et coll., *Nucleonics*, 1951, **9**, n° 3, 2.
[Hu-2] HUMPHREY (R. W.) et CHAPMANN (N. G.), *J. Sc. Technol.*, 1955, **37**, 396.
[Hu-3] HURLEY (P. M.), *Bull. Geol. Soc. Amer.*, 1950, **61**, 1.
[Is-1] ISRAEL (H.), *Amer. Meteorol. Soc., Comp. Meteorol.*, Boston, 1951, 155.
[Ja-1] JACOBI (W.), SCHRAUB (A.), AURAND (K.) et MUTH (H.), *Beitr. z. Phys. Atmosphäre*, 1959, **31**, 244.
[Ja-2] JAKI (S. L.) et HESS (V. F.), *J. Geophys. Res.*, 1958, **63**, 373.
[Je-1] JECH (C.), *Coll. Trav. Chem. Tchecoslov.*, 1951, **15**, 719 ; *Phys. Rev.*, 1949, **76**, 1731.
[Je-2] JEHANNO (C.), BLANC (A.), LALLEMANT (C.) et ROUX (G.), *C. R. Conf. Intern. Appl. Pac. Energie Atomique*, Genève, 1958, vol. **23**, 372.
[Je-3] JEHANNO (C.) et LABEYRIE (J.), *J. Mécan. Phys. Atmosphère*, 1959, **1**, 1.
[Je-4] JEHANNO (C.) et TANAEVSKY (O.), *J. Mecan. Phys. Atmosphère*, 1959, n° **1**, 5.
[Ka-1] KAWANO (M.) et NAKATANI (S.), *J. Meteorol. Soc.*, Japan, 1958, **38**, n° 4, 13.
[Ki-1] KING (P.), LOCKHART (L. B.), FRIEDMAN (H.) et BLIFFORD (I. H.), *Nucleonics*, 1956, **14**, n° 6, 78.
[Kn-1] KNOWLES (D. J.), *Nucleonics*, 1955, **13**, n° 6, 99.
[Ko-1] KOVACH (E. M.), *Terr. Magn. Atom. Electr.*, 1946, **51**, 45.
[Ku-1] KUPER (J. B. H.), FOSTER (E. H.) et BERNSTEIN (W.), *Nucleonics*, 1950, **6**, n° 4, 44.
[Ku-2] KURODA (K.), *Anal. Chem.*, 1953, **25**, 832.
[Ku-3] KUSNETZ (H. L.), *Arch. Industr. Health*, 1957, **15**, 83.
[La-1] LABEYRIE (J.) et PELLE (M.), *J. Physique Rad.*, 1953, **14**, 477.
[La-2] LABEYRIE (J.), *Thèse* Doctorat ès Sciences, Paris, 1954 ; rapport C. E. A. n° 335.
[La-3] LABEYRIE (J.) et WEILL (J.), *C. R. Conf. Intern. Appl. Pac. Energie Atomique*, Genève, 1955, vol. **9**, 856.
[La-4] LANGEVIN (P.), *C. R. Acad. Sc.*, Paris, 1905, **140**, 232.
[La-5] LASKIN (S.), Modified cascade impactor, U.S.A.E.C., rapport MDDC-1500, 1946.
[Le-1] LEARY (J. A.), *Anal. Chem.*, 1951, **23**, 850.
[Le-2] LEHMANN (I.), *Staub*, 1959, **19**, n° 1, 16.
[Le-3] LEPAPE (A.), *C. R. Acad. Sc.*, Paris, 1924, **178**, 931.
[Le-4] LEPAPE (A.) et GESLIN (M.), *C. R. Acad. Sc.*, Paris, 1940, **210**, 223.
[Le-5] LETTAU (M.), *Beitr. Geophys.*, 1941, **57**, 365.
[Lo-1] LOCKHART (L. B.), *J. Geoph. Res.*, 1959, **64**, 1445.
[Lo-2] LOEB (L. B.), Fundamental processes of electrical discharges in gases. John Wiley and Sons, édit., New-York, 1939.
[Lo-3] LOWE (H. J.) et LUCAS (D. H.), *Brit. J. Appl. Physics*, 1953, suppl. **2**, S-40.
[Lu-1] LUCAS (H. F.), *Rev. Sc. Instr.*, 1957, **28**, 680.
[Ma-1] MACEK (O. I.), *Beitr. Geoph.*, 1935, **43**, 388.
[Ma-2] DE MAIO (A.), *Geof. e Meteorol.*, 1956, **4**, n° 3, 37.
[Ma-3] DE MAIO (A.) et ALIVERTI (G.), *Nuovo Cimento*, 1954, **12**, 270.
[Ma-4] MALVICINI (A.), *Nuovo Cimento*, 1954, **12**, 479.
[Ma-5] MALVICINI (A.), *Nuovo Cimento*, 1954, **12**, 822.
[Ma-6] MANSFIELD (T. H.), *Nucleonics*, 1952, **10**, n° 9, 55.
[Ma-7] MAY (K. R.), *J. Sc. Instr.*, 1945, **22**, 187.
[Mo-1] MORASCHINELLI (E.), *Nuovo Cimento*, 1953, **10**, 1341.
[Mo-2] MORASCHINELLI (E.), *Annali Geofis.*, 1953, **6**, 361.
[Pa-1] PATTY (F. A.), *Industr. Hygien and Toxicol.*, Interscience Edit., New York, 1948.
[Pa-2] PAUTHENIER (M.) et Mme MOREAU-HANOT, *J. Physique Rad.*, 1932, **3**, 590.
[Pa-3] PAUTHENIER (M.) et CHALLANDE (R.), *C. R. Acad. Sc.*, Paris, 1953, **236**, 69.
[Ph-1] PHILIPPOT (J. C.), *Bull. Inf. Sc. Techn. C. E. A.*, 1958, **19**, 2.
[Pi-1] PIZZO (M.), *Atti Acad. Sc. Ferrara*, 1952-1953 ; *Nuovo Cimento*, 1954, **12**, suppl.
[Po-1] POLLOCK (J. A., *Phil. Mag.*, 1915, **29**, 636.
[Pr-1] PRADEL (J.) et BILLARD (A.), *C. R. Conf. Intern. Appl. Pac. Energie Atomique*, Genève, 1958, **23**, 313.
[Pr-2] PRIEBSCH (J.), *Physik. Z.*, 1931, **32**, 622.
[Pr-3] PROIX-NOE (G.), *C. R. Acad. Sc.*, Paris, 1946, **223**, 548.
[Qu-1] QUIVY (R.), *C. R. Conf. Intern. Appl. Pac. Energie Atomique*, Genève, 1958, **23**, 395.
[Re-1] REITER (R.), *Z. Naturforsch.*, 1956, **11-a**, 411.
[Sa-1] SATTERLY (J.), *Phil. Mag.*, 1908, **16**, 584.
[Sa-2] SATTERLY (J.), *Le Radium*, 1912, **9**, 101.
[Sa-3] SAVEL (P.), *J. Physique Rad.*, 1954, **15**, 113-A.
[Sa-4] SAWLE (O. R.), *Nucleonics*, 1956, **14**, n° 8, 90.
[Sc-1] SCHONLAND (B. F. J.), Atmospheric electricity, Methuen and Co, edit., Londres, 1953.
[Sc-2] SCHUMANN (G.), *Arch. Meteor., Geophys. Bioklimatol.*, 1956, **9**, 205.
[Se-1] SELLA (A.), *Atti Acad. Lincei*, 1902, **11**, 57 ; *Atti Acad. Lincei*, 1902, **11**, 222.
[Sh-1] SHAW (D. F.), *J. Sc. Instr.*, 1955, **32**, 178.
[Si-1] SIKSNA, *Ark. Geof.*, 1950, **1**, 123.
[Si-2] SILKER (W. D.), The determination of thorium by proportional counting of thoron. Off. Techn. Serv. U. S. Dep. Commerce, Washington, rapport X. W. 32.436, avril 1956.
[Sk-1] SKORKA (S.), *Atomkern Energie*, 1958, **3**, 182.
[Sm-1] SMITH (R. C.), *Nucleonics*, 1952, **10**, n° 10, 71.
[So-1] SOULHIER (R.), Réalisation et étude d'un système de dosage continu de gaz radioactifs. Thèse d'Ingénieur-Docteur, Toulouse, 1960, n° 49.
[Sp-1] SPAA (J. H.), *C. R. Conf. Intern. Appl. Pac. Energie Atomique*, Genève, 1958, vol. **21**, 169.
[St-1] STIERSTADT (K.), *Atomkern Energie*, 1959, **4**, 147.
[St-2] STOKINGER (H. E.) et LASKIN (S.), *Nucleonics*, 1950, n° 8.
[St-3] STRANKS (D. R.), *J. Sc. Instr.*, 1956, **33**, 1.
[St-4] STRUBE (H.), *Schwebstofftechn. Arbeit.*, 1958, **23**, 27.
[Ta-1] TANAEVSKY (O.) et VASSY (E.), *Ann. Géophys.*, 1955, **11**, 486.
[Tr-1] TREMBACZOWSKI (E.), *Acta Geophys. Polonica*, 1953, **1**, 126.

[Va-1] VAN-DILLA (M. A.) et TAYSUM (D. H.), *Nucleonics*, 1955, **13**, n° 2, 68.
[Vo-1] VOHRA (K. G.), *C. R. Conf. Intern. Appl. Pac. Energie Atomique*, Genève, 1955, vol. **6**, 872.
[Vo-2] VOHRA (K. G.), *C. R. Conf. Intern. Appl. Pac. Energie Atomique*, Genève, 1958, vol. **23**, 367.
[Wa-1] WATSON (H. H.), *Rev. Trans. Faraday Soc.*, 1936, **32**, 1073.
[Wa-2] WATTS, BRAUNER, BURGWALD et REIFFEL, *Nucleonics*, 1951, **9**, n° 3, 72.
[Wi-1] WILKENING (M. H.), *J. Geophys. Res.*, 1909, **64**, 54.
[Wi-2] WILKENING (M. H.), *Rev. Sc. Instr.*, 1952, **23**, 13.
[Wi-3] WILKENING (M. H.), *Nucleonics*, 1952, **10**, n° 6, 36.
[Wi-4] WILKENING (M. H.), *Trans. Amer. Geophys. Union*, 1956, **37**, 177.
[Wi-5] WILKENING (M. H.), *Bull. Amer. Phys. Soc.*, 1956, **1**, n° 1, 35.
[Wi-6] WILSON, LASKIN et MEIER, Design of an oscillatory thermal precipitator. Univ. Rochester, Atom. Energ. Quarterly Report (Dec. 1949).