

ÉTUDE BIBLIOGRAPHIQUE DE L'ÉNERGIE MOYENNE DÉPENSÉE PAR LES ÉLECTRONS POUR CRÉER UNE PAIRE D'IONS DANS L'AIR

Evelyne BERTEL*
(Manuscrit reçu le 3 juillet 1969)

RÉSUMÉ

L'étude critique des principaux travaux expérimentaux effectués pour mesurer l'énergie moyenne dépensée pour créer une paire d'ions dans l'air, a permis de mettre en évidence les meilleures méthodes utilisées.

Les différents résultats ayant conduit à la valeur adoptée par la C.I.U.R. en 1964 et utilisée jusqu'à ce jour, sont indiqués.

La bibliographie rassemble l'essentiel des publications sur ce sujet.

ABSTRACT

A critical study of the most important experimental works done about the average energy lost to produce one ion pair in air is done. This study enable us to find the best methods used.

Experimental results which were taken to determine the value adopted by the I.C.R.U. in 1964 and used at present time, are noted.

The references group the most important works about this available in litterature.

INTRODUCTION

L'énergie moyenne W nécessaire à la création d'une paire d'ions est une des grandeurs fondamentales de la radioprotection, qu'il est nécessaire de très bien connaître pour interpréter les résultats de mesure en dosimétrie.

La théorie de la pénétration des particules à travers la matière ne permet pas un calcul exact de W en raison de la complexité des phénomènes qui entrent en jeu. Les études théoriques ne conduisent à des équations solubles que dans le cas d'un gaz monoatomique simple tel que l'hélium. Dans les autres gaz, la détermination de W doit être faite expérimentalement.

Le gaz le plus souvent étudié est l'air qui est fréquemment employé dans les chambres d'ionisation.

Alors que les premières mesures effectuées donnaient des résultats très différents, il y a, depuis plusieurs années, un excellent accord entre les différents expérimentateurs quelle que soit la méthode utilisée. Ceci est dû à l'amélioration de la précision des techniques expérimentales et à une meilleure mise au point des méthodes de mesure.

Dans cette étude bibliographique, nous ne parlerons en détail que des mesures les plus récentes et les plus précises dont les résultats ont servi à déterminer la valeur $W_{air} = 33,73$

(*) Service de Protection contre les Radiations, Centre d'Etudes Nucléaires de Saclay - B.P. n° 2, 91 - Gif-sur-Yvette.

$\pm 0,15$ eV par paire d'ions, adoptée par la C.I.U.R. en 1964 et reprise par J.T. MYERS en 1968 [1]. Nous nous bornerons à rappeler les grandes lignes des méthodes utilisées en essayant d'en souligner les principales caractéristiques et à donner les valeurs finales trouvées par les différents auteurs.

MÉTHODES UTILISÉES ET RÉSULTATS OBTENUS

1. LA CHAMBRE DE WILSON :

La méthode consiste à produire un photo-électron dans la chambre à partir d'un rayonnement X d'énergie connue. On mesure ensuite le nombre de gouttes de condensation le long de la trace de l'électron qui est égal au nombre de paires d'ions créés.

Bien que cette méthode soit très directe et assez simple, les résultats obtenus n'ont pas été retenus car ils sont en désaccord avec ceux des autres méthodes [2]. Ceci est dû au mauvais fonctionnement de la chambre quand elle est remplie du gaz pur à étudier, les gaz de remplissage normaux étant des mélanges.

2. LES FAISCEAUX D'ÉLECTRONS :

Un faisceau d'électrons émis par un filament chauffé constitue la source de rayonnement et on mesure le courant produit dans une chambre d'ionisation où le faisceau est absorbé.

Cette méthode présente un grave inconvénient : il est très difficile d'obtenir un faisceau d'électrons homogène; c'est sans doute pourquoi elle a été abandonnée dans les travaux récents.

3. UTILISATION D'UN TUBE EN COMPTEUR PROPORTIONNEL PUIS EN CHAMBRE D'IONISATION

Une source de rayonnement ionisant, d'énergie moyenne E connue, est placée à l'intérieur d'un tube. En régime proportionnel, on mesure le nombre N de particules émises, le tube est ensuite utilisé comme chambre d'ionisation pour mesurer le courant I , on a alors :

$$W = \frac{NeE}{I}$$

Cette méthode mise au point par CURRAN *et alii.* [3] a été employée notamment par VALENTINE [4], FAILLA et ROSSI [5]. VALENTINE obtient $W = 35$ eV par paire d'ions avec comme source le rayonnement β du tritium et FAILLA 32,5 eV par paire d'ions avec une source β de soufre 35.

Ces résultats s'écartent sensiblement de ceux obtenus ultérieurement par les autres méthodes, par contre, cette technique expérimentale semble bien adaptée à l'étude de la variation de W en fonction de l'énergie des électrons.

4. CHAMBRE D'IONISATION ET DOSIMÈTRE CHIMIQUE

WEISS et BERNSTEIN [6] ont calculé W en mesurant, d'une part l'énergie émise par la source de rayonnement à l'aide d'un dosimètre à sulfate ferreux, d'autre part le courant d'ionisation avec une chambre à extrapolation. Les auteurs ont étudié le rendement du dosimètre dans une précédente expérience. Ils utilisent le faisceau de rayonnement X d'environ 1 MeV produit dans la cible en or d'un Van de Graaff à électrons. La chambre à extrapolation est remplie d'air ou d'un autre gaz que l'on veut étudier; elle a des parois de polyéthylène et c'est une cavité de BRAGG-GRAY.

Les résultats obtenus sont en bon accord avec ceux des mesures calorimétriques et la précision est bonne.

$W_{air} = 33,9 \pm 0,8$ eV par paire d'ions dans l'air.

Les facteurs d'imprécision sont la détermination du rendement du dosimètre à sulfate ferreux et le calcul du rapport des pouvoirs d'arrêt des électrons dans le polyéthylène et dans le gaz étudié.

5. CHAMBRE D'IONISATION ET MESURES CALORIMÉTRIQUES :

La plupart des mesures récentes sont faites suivant cette méthode. L'énergie émise par la source est mesurée dans un calorimètre. Ces mesures permettent une grande précision et les corrections à apporter ont été étudiées en détail par les différents expérimentateurs.

Z. BAY et ses collaborateurs du N.B.S. ont réalisé une mesure absolue de \mathcal{W} dans l'air avec une source de soufre 35 émettant des bêta [7]. L'énergie émise par la source a été mesurée avec une très grande précision par microcalorimétrie; la préparation chimique de cette source a été très soigneusement étudiée pour obtenir une autoabsorption minimale.

Le courant d'ionisation est mesuré à l'aide d'une chambre à air libre ce qui élimine l'effet de paroi et les corrections qui en découlent.

Pour éliminer le bruit de fond et les erreurs dues aux fluctuations de la haute tension, la mesure est faite par différence avec deux chambres absolues identiques.

Afin d'améliorer la précision, l'expérience est répétée avec sept sources. Les résultats sont corrigés pour tenir compte de l'autoabsorption dans la source, de l'absorption dans le film sur lequel elle est déposée, de l'énergie dépensée pour la recombinaison du chlore 35 et de la décroissance radioactive de la source entre la mesure de l'intensité et celle du courant d'ionisation.

Le résultat final, qui est parmi les valeurs retenues par la C.I.U.R., est $\mathcal{W} = 33,7 \pm 0,3$ eV par paire d'ions dans l'air.

GROSS et ses collaborateurs [8] ont également déterminé la valeur absolue de \mathcal{W} dans l'air avec une source de soufre 35. La mesure de l'énergie émise par la source est faite au N.B.S. par microcalorimétrie en tenant compte de la fraction dépensée pour la recombinaison du chlore 35. Une chambre à extrapolation ayant une paroi de solution de sulfate de sodium actif et l'autre d'aluminium permet la mesure du courant d'ionisation; deux facteurs correctifs sont appliqués pour tenir compte de la rétrodiffusion sur l'aluminium et de la présence de vapeur d'eau dans le gaz de la chambre. Le calcul de \mathcal{W} résulte de l'application du principe de BRAGG-GRAY, il nécessite la connaissance de deux grandeurs qui ont été mesurées par les auteurs dans des expériences préliminaires :

- le rapport des pouvoirs d'arrêt de l'air et de l'eau pour les électrons.
- le rapport des valeurs de \mathcal{W} dans l'air et dans l'eau.

Le \mathcal{W}_{air} ainsi mesuré est de $33,6 \pm 0,3$ eV par paire d'ions.

GOODWIN [9] a déterminé le facteur de conversion des γ du caesium 137 en mesurant l'intensité de la source par calorimétrie, la surface du faisceau avec un film et le courant d'ionisation produit dans une chambre-dé de BALDWIN-FARMER. Par ailleurs, le facteur de conversion pouvant être calculé théoriquement par la méthode de MAYNEORD [10], la mesure précédente conduit à la valeur de \mathcal{W}_{air} soit $33,9 \pm 0,5$ eV par paire d'ions.

REID et JOHNS [11] ont mesuré, à l'aide d'un calorimètre et de thermistances, la dose absorbée dans l'air pour deux sources l'une de cobalt 60 et l'autre de caesium 137. Le calorimètre, la méthode de mesure et les corrections à apporter ont été étudiés préalablement très en détail [12]. La mesure du courant d'ionisation est faite dans une petite chambre à laquelle le principe de BRAGG-GRAY s'applique. Connaissant la dose absorbée et le rapport des pouvoirs d'arrêt massique des électrons dans l'air et dans l'absorbant (valeurs théoriques données par la C.I.U.R. (*)), les auteurs déterminent \mathcal{W} par la formule de BRAGG-GRAY. Ils trouvent pour les deux sources :

$$\mathcal{W} = 33,8 \pm 0,4 \text{ eV par paire d'ions dans l'air.}$$

MYERS et ses collaborateurs ont réalisé et décrit [13] un calorimètre permettant la mesure de l'intensité d'une source radioactive et ils ont déterminé la dose absorbée dans l'air pour une source de rayonnement γ de cobalt 60. En mesurant ensuite le courant d'ionisation dans une chambre à air libre sans paroi et en appliquant le principe de BRAGG-GRAY, ils calculent \mathcal{W} dans l'air. Les différentes sources d'erreurs sont examinées en détail et la précision évaluée très soigneusement. Le résultat final est :

$$\mathcal{W} = 33,84 \pm 0,34 \text{ eV par paire d'ions dans l'air.}$$

Le tableau donné en annexe rappelle l'ensemble des résultats et les principales caractéristiques des méthodes utilisées.

CONCLUSION

Comme le montre le présent résumé, l'étude de \mathcal{W} a fait l'objet de très nombreuses expériences. En plus des mesures dans l'air dont il est question ici, la valeur de \mathcal{W} a été déterminée

(*) De nouvelles valeurs du pouvoir d'arrêt des électrons dans différents matériaux ont été calculées récemment mais la légère modification de ce facteur n'a pas d'incidence notable sur la valeur de \mathcal{W} .

dans beaucoup d'autres gaz; nous n'avons pas passé en revue ces expériences car il s'agit le plus souvent de mesures relatives.

Il faut signaler, en outre, que plusieurs articles de synthèse récents [14], [15], [16], [17] font le point de connaissances acquises dans ce domaine.

A notre connaissance, il n'existe pas de calcul théorique de W dans l'air mais les expériences les plus récentes sont en excellent accord, quelle que soit la méthode utilisée, et donnent la valeur de W dans l'air avec une très grande précision. Depuis plusieurs années, la valeur expérimentale moyenne ne varie pas et MYERS [1] reprend en 1968 la valeur de $33,73 \pm 0,15$ eV par paire d'ions créée dans l'air, donnée par la C.I.U.R. en 1964.

Il semble donc que, grâce à l'amélioration des techniques expérimentales et à la multiplication des mesures, on soit maintenant arrivé à connaître, avec une excellente précision, la valeur de l'énergie moyenne nécessaire pour créer une paire d'ions dans l'air.

BIBLIOGRAPHIE

- [1] MYERS I.T., Ionization. *Radiation Dosimetry*, p. 317, second edition, vol. 1, édité par Attix F.H. et Roech W.C., 1968.
- [2] FROST H. and NIELSEN E. The specific ionization of electrons observed with a Wilson cloud chamber. *Physical Review* 91, p. 864-870, 1953.
- [3] CURRAN S.C., COCKROFT A.L. and INSCH G.M. Energy expenditure per ion for slow electrons in various gases. *Philosophical magazine* 41, p. 517-524, 1950.
- [4] VALENTINE J.M. Energy per ion pair for electrons in gases and gas mixtures. Proceedings of the Royal Society A 211, p. 75-85, 1952.
- [5] FAILLA G. and ROSSI H.H. Annual Report on Research Project. Report NY 0 4008, 1952.
- [6] WEISS J. and BERNSTEIN W. Energy required to produce one ion pair for several gases. *Physical Review* 98, p. 1828-1831, 1955.
- [7] BAY Z., MANN W.B., SELIGER H.H. and WYCKOFF H.O. - N.B.S. Absolute measurement of W for sulphur 35 beta rays. *Radiation Research* 7, p. 558-569, 1957.
- [8] GROSS W., WINGATE C. and FAILLA G. Average energy lost by sulphur 35 beta rays per ion pair produced in air. *Radiation Research* 7, p. 570-580, 1957.
- [9] GOODWIN P.N. Calorimetric measurements on a caesium-137 teletherapy unit. *Radiation Research* 10, p. 6-12, 1959.
- [10] MAYNEORD W.V. Some application of nuclear physics to medicine. *British Journal of Radiology*, suppl. 2, p. 133-136, 1950.
- [11] REID W.B. and JOHNS H.E. Measurement of absorbed dose with calorimeter and determination of W . *Radiation Research* 14, p. 1-16, 1961.
- [12] BERNIER J.P., SKARSGARD L.D., CORMACK D.V. and JOHNS H.E. A calorimetric determination of the energy required to produce an ion pair for cobalt 60 gamma rays. *Radiation Research* 5, p. 613-633, 1956.
- [13] MYERS I.T., LE BLANC W.H., FLENNING D.M. and WICKOFF H.O. An adiabatic calorimeter for high precision source standardization and determination of W (air). Report HW-SA-21 265, 1961.
- [14] WEISS J. and BERNSTEIN W. The current status of W , the energy to produce one ion pair in a gas. *Radiation Research* 6, p. 603-610, 1957.
- [15] VALENTINE J.M. and CURRAN S.C. Average energy expenditure per ion pair in gases and gas mixtures. Reports on Progress Physics 21, p. 1-29, 1958.
- [16] MYERS I.T. The measurement of the electron energy required to produce an ion pair in various gases. Report HW - SA - 2 146, 1958.
- [17] WHYTE G.N. Energy per ion pair for charged particles in gases. *Radiation Research* 18, p. 265-271, 1963.

TABLEAU DES PRINCIPALES MESURES DE \bar{W} EFFECTUÉES

Auteurs et Référence	Date	Source	Méthode de mesure		Résultat \bar{W}_{air} en eV par paire d'ions
			de l'énergie rayonnée par la source	du courant d'ionisation produit	
FROST ET NIELSEN [2]	1953	Faisceau d'électrons	Mesure du rayon de courbure de la trace des électrons dans une chambre de Wilson	Détermination du nombre de gouttes de condensation le long de la trace	$31,2 \pm 1,5$ (a)
FAILLA et ROSSI [5]	1952	β du soufre 35	Mesure du taux de comptage dans un compteur proportionnel et calcul de l'énergie moyenne sur le spectre de désintégration	Le même compteur proportionnel utilisé en chambre d'ionisation	$32,5$ (a)
VALENTINE [4]	1952	β du tritium	Compteur proportionnel	Même compteur fonctionnant en chambre d'ionisation	$35,0 \pm 0,5$ (a)
WEISS et BERNSTEIN [6]	1955	X de 1 MeV produits dans la cible en or d'un Van de Graaff à électrons	Dosimètre à sulfate ferreux précision $\approx 1\%$	Chambre à extrapolation à parois de polyéthylène précision $\approx 1\%$	$35,9 \pm 0,8$ (b)
FAILLA et <i>alii</i> [8]	1957	β de soufre 35	Microcalorimètre mis au point par MANN du N.B.S. précision $\approx 0,4\%$	Chambre à extrapolation dont une paroi est une solution de sulfate de fer actif précision $\approx 0,7\%$	$35,6 \pm 0,3$ (b)
GOODWIN [9]	1959	γ du césium 137	Calorimètre précision $\approx 1\%$	Chambre-dé de BALDWIN-FARMER précision $\approx 1\%$	$33,9 \pm 0,5$ (b) (c)
REID et JOHNS [11]	1961	γ du cobalt 60 et du césium 137	Calorimètre mis au point par BERNIER	Chambre-dé précision globale $\approx 0,9\%$	$33,8 \pm 0,4$ (b)
BAY et <i>alii</i> [7]	1957	β du soufre 35	Microcalorimètre à effet Peltier mis au point par MANN précision $\approx 0,3\%$	Chambre absolue précision $\approx 0,25\%$	$33,7 \pm 0,3$
MYERS et <i>alii</i> [13]	1961	γ du cobalt 60	Calorimètre adiabatique précision $\approx 0,4\%$	Chambre absolue précision $\approx 0,6\%$	$33,84 \pm 0,34$

(a) Ces mesures déjà anciennes et qui ne sont pas très précises n'ont pas été retenues par la C.I.U.R.

(b) Dans ces expériences, \bar{W} est calculée à l'aide du principe de BRAGG-GRAY et on utilise la valeur du rapport des pouvoirs d'arrêt massique des électrons dans l'air et dans la paroi de la chambre.(c) \bar{W} est déterminée en utilisant la valeur du facteur de conversion calculé par MAYNEORD.