

## LES UNITÉS QUANTITOMÉTRIQUES EN RÖNTGENTHÉRAPIE

Par ISER SOLOMON (1)

L'avènement de l'ionométrie, tout le monde est d'accord à ce sujet, a marqué un gros progrès dans la technique röntgenthérapique ; pour la première fois une méthode précise et sensible permettait la mesure intermittente ou continue du rayonnement utilisé ou dans des conditions analogues à son utilisation. Il n'y a pas lieu d'exposer ici les bases de l'ionométrie, ainsi que les appareils utilisés en quantitométrie ionométrique (2) nous discuterons seulement les diverses unités de mesure proposées ; l'adoption d'une unité de mesure convenable est d'une importance capitale, car il ne suffit pas d'avoir une méthode de mesure et l'appareillage approprié, il est indispensable d'exprimer la quantité de rayonnement mesuré au moyen d'unités permettant une comparaison facile entre les diverses doses appliquées par des expérimentateurs différents et même par le même expérimentateur. Prendre comme unité dosimétrique, même personnelle, le nombre des décharges d'un appareil de mesure ou l'inverse du temps de décharge, est réellement dépourvu de tout intérêt scientifique, aucune posologie sérieuse n'est possible avec des notations quantitomériques de ce genre. Il s'agit donc d'édifier un système d'unités quantitomériques permettant d'exprimer la quantité de rayonnement de Röntgen au moyen d'une notation précise, pratique, rendant l'étalonnage d'un appareil de mesure à la portée de tout radiologiste ; cette notation doit rendre possibles des évaluations identiques de la même quantité de rayonnement, quelle que soit l'origine de l'appareil de mesure, la précision seule de l'évaluation dépendant de l'appareil de mesure utilisé.

Dès 1908, Villard (3), qui construisit le premier ionomètre à usage médical, proposa comme unité quantitomérique la quantité de rayonnement qui libère une unité électrostatique par centimètre cube d'air dans les conditions normales de température et de pression. En 1914 (4), Szilard proposa comme unité quantitomérique un multiple de l'unité électrostatique, le méga-mégaion. Le méga-mégaion représente l'énergie d'un rayonnement susceptible de créer un million de fois un million d'ions,  $10^{12}$  ions. La charge d'un ion étant de  $5,4 \cdot 10^{-10}$  unités électrostatiques, un méga-mégaion correspond donc à  $5,4 \cdot 10^{-10} \cdot 10^{12} = 540$  unités électrostatiques.

La notation en unités électrostatiques a été de nouveau proposée par Friedrich en 1918 (5) et l'unité  $e$  est ainsi définie par cet auteur : c'est la quantité de rayonnement qui permet le transport par ionisation, dans 1 cc. d'air, d'une quantité d'électricité correspondant à une unité électrostatique. Pour Krönig et Friedrich la dose susceptible de produire un érythème est de 170  $e$  et ces auteurs ont indiqué (6) une notation en unités  $e$

(1) Communication au Congrès de l'A. F. A. S., Liège, Août 1924.

(2) Voir Iser Solomon : *La Radiothérapie profonde*, p. 101.

(3) *Archives d'Electricité médicale*, 1908.

(4) *Archives d'Electricité médicale*, 1914, t. II, p. 51.

(5) KRÖNIG et FRIEDRICH. *Physikalische und biologische Grundlagen*, etc., p. 77.

(6) Voir SOLOMON. Les doses biologiques, *Journal de Radiologie*, 1925.

de différentes doses susceptibles de produire certains effets biologiques, la dose d'aménorrhée correspond à 55 *e*, la dose cancéricide à 150 *e*.

La notation en unités électrostatiques est également utilisée par Duane<sup>(1)</sup> qui prend comme unité de l'intensité du rayonnement l'intensité d'un rayonnement de Röntgen qui permet le transport par ionisation, dans 1 cc. d'air, d'une unité électrostatique. Cette unité que Duane désigne par la lettre E est une unité d'intensité, la quantité du rayonnement est donnée par l'intensité multipliée par le temps d'application.

Une unité électrostatique valant  $0,55 \cdot 10^{-9}$  ampères, on voit facilement que la notation en *e*, en méga-mégaions, en E, en ampères, se rattachent directement l'une à l'autre et si la notation en unités électrostatiques pouvait convenir, l'unité électrostatique pourrait être adoptée comme unité quantitométrique internationale.

Si on désigne par C la capacité du dispositif de mesure, par  $V_0$  et  $V_1$  le potentiel initial et final correspondant à deux positions de la feuille ou de l'aiguille de l'appareil de mesure, par *v* le volume de la chambre d'ionisation, le nombre d'unités électrostatiques libérées sera égale à  $\frac{C(V_0 - V_1)}{500 \cdot v}$ .

L'étalonnage de l'appareil de mesure comporterait donc la mesure précise de la capacité du dispositif ionométrique en ordre de marche, un étalonnage en volts des déplacements de l'aiguille de l'appareil de mesure, une mesure du volume de la chambre d'ionisation. De ces différentes mesures, certaines sont très délicates et ne peuvent être menées à bien que par un physicien très expérimenté et dans un laboratoire de physique très bien outillé; toutes modifications d'une partie quelconque de l'appareil de mesure (modification du conducteur, changement de la feuille de l'électroscope, etc.), entraîne un nouvel étalonnage aussi laborieux que le premier. Malgré ces difficultés, tout en adoptant un système pratique d'étalonnage comme celui que nous exposerons plus loin, il semblait que rien ne pouvait s'opposer théoriquement à l'adoption de l'unité électrostatique comme unité quantitométrique internationale. Malheureusement la pratique nous a montré que malgré les difficultés techniques rencontrées, la notation en unités électrostatiques ne conduit pas à des résultats univoques. Nous avons montré<sup>(2)</sup> qu'un système d'unités fondé sur la mesure du potentiel et des constantes géométriques du système de mesure peut donner lieu à de grosses erreurs dosimétriques. Krönig et Friedrich indiquent, nous l'avons vu plus haut, 170 *e* comme dose susceptible de produire un érythème. L'étalonnage en unités électrostatiques d'un de nos ionomètres, étalonnage effectué avec toute la précision désirable au Laboratoire de l'École supérieure d'Électricité nous a donné l'égalité suivante : 170 *e* = 245 R, nous reviendrons plus loin sur notre notation en R. Comme la dose susceptible de produire un érythème est au moins 10 fois plus élevée, il résulterait que la dose d'érythème, évaluée avec notre ionomètre, serait de 1700 unités électrostatiques. Pour Szilard, la teinte B du Radiomètre de Sabouraud et Noiré correspond à 4 méga-mégaions; comme un méga-mégaion correspond à 540 unités électrostatiques, il résulte donc que 5 H correspond à 1560 unités électrostatiques, ce qui diffère encore considérablement des résultats de Friedrich.

Duane indique, dans le travail précédemment cité, qu'avec un tube Coolidge travaillant sous 200 000 volts, avec une intensité de 4 milliampères, une distance focale de 80 cm., rayonnement filtré sur 0,5 mm. de cuivre, avec ces diverses constantes, l'intensité était de l'ordre de 0,21 E; la dose de 170 *e* était donc obtenue en 15 minutes, or avec

<sup>(1)</sup> *American Journal of Roentgenology*, 1922, p. 787.

<sup>(2)</sup> *Radio-Électricité*, Mai 1922.

les constances indiquées par Duane, le temps pour obtenir un érythème devait être au moins 10 fois plus long.

Il est donc évident que, suivant l'appareil de mesure utilisé, la notation en unités électrostatiques permet d'attribuer des valeurs très différentes à la même quantité de rayonnement; ces différences s'expliquent aisément, car dans la notation en unités électrostatiques n'interviennent que les mesures de la capacité, du potentiel et du volume de l'air ionisé. Or, l'épaisseur des parois de la chambre d'ionisation, la composition de ces parois, la forme de la chambre d'ionisation jouent un rôle considérable et n'entrent pas en ligne de compte dans la formule nous donnant l'évaluation de la quantité de rayonnement en unités électrostatiques. La notation en unités électrostatiques doit donc être abandonnée, elle ne peut pas constituer une notation quantitométrique à caractère universel.

Dauvillier <sup>(1)</sup> a proposé comme unité quantitométrique l'erg, et cette proposition est rationnelle puisqu'il s'agit de mesurer une énergie. Dans le dosimètre de Dauvillier, comme dans celui de Duane, l'appareil de mesure est un galvanomètre très sensible. Si  $I$  est l'intensité du courant d'ionisation mesuré au galvanomètre,  $c$  le rapport des unités électrostatiques aux unités électro-magnétiques,  $v$  le volume de la chambre d'ionisation,  $P$  le potentiel moyen d'ionisation qui est de 55 volts pour l'air, l'énergie est exprimée en ergs-seconde par la formule :

$$W = \frac{cIP}{3000 \text{ v.}}$$

et comme 1 cc. d'eau absorbe 850 fois plus qu'un cc. d'air, l'énergie absorbée dans 1 cc. d'eau sera donnée par :

$$W = \frac{850 \cdot cIP}{3000 \cdot \text{v.}}$$

Comme  $P = 55$  volts,  $c = 5 \cdot 10^{10}$ ,  $v$  est déterminé une fois pour toutes, la mesure de l'énergie est déduite en réalité de la mesure du courant d'ionisation au moyen d'un galvanomètre, la méthode consiste donc à multiplier par une constante l'intensité du courant d'ionisation exprimé en ampères. Cette méthode ne diffère donc pas essentiellement des méthodes précédentes et est sujette aux mêmes critiques. Les diverses formes de chambre d'ionisation, de galvanomètre, etc., sont susceptibles de donner des indications assez différentes pour la même quantité de rayonnement. Dauvillier indique 30 000 ergs comme représentant la dose susceptible de produire un érythème. Avec l'iontoquantimètre de Friedrich cette dose correspondrait à 21 500 ergs, avec l'appareil de Szilard cette dose serait de 240 000 ergs, avec notre ionomètre on obtient une dose voisine de celle de Szilard, 250 000 ergs environ.

Si la mesure de l'énergie absorbée dans les tissus, ou dans des conditions analogues, pouvait s'effectuer directement, la notation en ergs serait parfaite, mais, comme nous venons de le voir, elle résulte d'une mesure indirecte, et dans l'état actuel des choses cette notation nous semble inutilisable par le praticien, malgré l'intérêt théorique considérable de cette notation.

Pour que les indications des différents ionomètres, quelle que soit leur origine, puissent être comparables entre elles il suffit de pouvoir étalonner les appareils de mesure au moyen d'une source ionisante constante; ce que demande le radiothérapeute

<sup>(1)</sup> *Revue générale d'Électricité*, 1925, p. 887.

c'est de connaître avec une précision suffisante la dose administrée, de pouvoir administrer de nouveau la même dose, d'exprimer cette dose au moyen d'une notation commune à tous les radiothérapeutes. L'utilisation d'une ampoule radiogène comme étalon est impossible, il n'est guère possible de réaliser une ampoule et un générateur de haute tension absolument constants et donnant dans les mains de n'importe quel expérimentateur la même intensité de rayonnement. Heureusement nous possédons une autre source ionisante, absolument constante, qui convient parfaitement à l'étalonnage des ionomètres, cette source est constituée par le rayonnement  $\gamma$  du radium.

Nous avons proposé, dès 1920, une méthode très simple, très précise, d'application courante en radioactivité, consistant à étalonner tout ionomètre radiologique avec une quantité connue de radium exprimée en radium-élément. Nous avons pris comme unité quantitométrique l'unité R (le Röntgen).

Nous définissons ainsi l'unité R : c'est l'intensité d'un rayonnement de Röntgen produisant la même ionisation à la seconde qu'un gramme de radium-élément, placé à 2 cm. de la chambre d'ionisation (d'axe en axe) et filtré sur 0,5 mm. de platine. La quantité de rayonnement sera donnée par l'intensité du rayonnement exprimée en R à la seconde multipliée par le temps d'application.

Si l'on fait tomber un faisceau de rayons de Röntgen sur une chambre d'ionisation, le courant d'ionisation peut être exprimé en unités arbitraires par :

$$i = \frac{1}{t}$$

$t$  étant le temps, exprimé en secondes, qui s'écoule entre deux positions de la feuille, si on se sert d'un électroscope comme appareil de mesure. Pour rendre comparables entre eux les différents ionomètres, quelle que soit leur origine, il suffit de déterminer leur constante K, constante déterminée en utilisant comme source ionisante une quantité connue de radium-élément. La formule précédente devient :

$$i = \frac{K}{t}$$

Pour déterminer K il suffit de multiplier la teneur en radium-élément, exprimée en grammes, par le temps de chute de la feuille de l'électroscope, temps exprimé en secondes. Supposons qu'on possède, pour étalonner un dispositif ionométrique quelconque, 10 mgr. de Ra-El. que nous disposons à 2 cm. de l'axe de la chambre d'ionisation. Soit 50 000 secondes le temps de chute de la feuille de l'électroscope pour toute la graduation de l'appareil de mesure ; K sera donné par  $\frac{10}{1000} \cdot 50\,000 = 500$  et l'intensité du rayonnement de Röntgen sera donnée, en unités R, en divisant 500 par le temps de chute de la feuille. Si ce temps est à 100 secondes, l'intensité du rayonnement sera de 5 R et la quantité de rayonnement sera donnée par l'intensité du rayonnement exprimée en R par le temps d'application exprimé en secondes. Connaissant le débit en R d'une installation donnée, on peut calculer facilement le temps d'application pour obtenir la dose voulue ; par exemple, si le débit est de 5 R, le temps pour 1000 R sera de 200 secondes ; réciproquement, connaissant le débit et le temps d'application, on peut calculer la dose appliquée en supposant le débit constant.

Les appareils de mesure fondés sur l'ionisation des gaz, les ionomètres, peuvent être divisés en deux groupes : les intensimètres ionométriques et les quantitomètres

ionométriques. Les premiers permettent la mesure de l'intensité du rayonnement et la mesure de la quantité est déduite de celle de l'intensité multipliée par le temps d'application, ces appareils travaillent à potentiel constant; les quantitomètres ionométriques permettent une mesure intégrale de la quantité de rayonnement, indépendamment du temps d'application, ces appareils travaillent à potentiel variable, une certaine perte de charge correspond à une quantité déterminée d'énergie röntgénienne. Dans ce dernier groupe d'appareils, les plus intéressants pour le praticien, la graduation de l'appareil de mesure pourra être effectuée directement en unités R, la chute de la feuille de l'électroscope, indépendamment de la vitesse de la chute indiquera donc la quantité de rayonnement exprimée en R. Dans l'exemple choisi plus haut la graduation de l'appareil correspond à 500 R; quand la feuille de l'électroscope a parcouru toute la graduation, une dose de 500 R a été appliquée.

Pour effectuer l'étalonnage d'un dispositif de mesure ionométrique, autrement dit pour déterminer la constante K, nous procédons de la façon suivante: la chambre d'ionisation du dispositif de mesure en ordre de marche est introduite dans un orifice pratiqué dans un petit cylindre creux, en plomb, cylindre ayant un diamètre extérieur de 5 cm. et un diamètre intérieur de 4 cm. Un couvercle amovible permet de placer le tube de radium sur un plateau situé à l'intérieur du cylindre en plomb de façon que la distance qui sépare le tube de la chambre d'ionisation soit de 2 cm. Les parois du tube contenant le radium doivent être en platine et avoir une épaisseur de 0,5 mm. Si ces conditions de filtration ne sont pas remplies, des corrections sont nécessaires, corrections qu'on peut d'ailleurs effectuer facilement en se servant des données qu'on trouve dans tous les traités de radioactivité; par exemple, si le radium est filtré par une paroi de 1 mm. de platine, la correction est de 6 0/0. Comme on le voit ce dispositif d'étalonnage est très simple et peut être reproduit n'importe où.

La forme du tube de radium n'est pas sans importance sur les résultats de l'étalonnage, surtout à cause de la petite distance qui sépare le tube contenant le radium de la chambre d'ionisation. Des raisons exclusivement économiques nous ont obligé de choisir la distance de deux centimètres; il aurait mieux valu, pour augmenter le degré de précision de l'étalonnage, de choisir une distance plus grande, par exemple 10 cm.; mais dans ce cas la quantité de radium-élément nécessaire pour faire un bon étalonnage aurait dû être de l'ordre du décigramme, condition très souvent prohibitive pour un praticien.

Néanmoins, même à 2 cm., avec les tubes habituellement utilisés en curiethérapie, l'étalonnage peut être effectué, sans différence importante, à condition d'utiliser des tubes dont la teneur en radium ne soit pas inférieure à 5 mgr. de radium-élément. Nos recherches ont été effectuées avec des tubes contenant de 7 à 12 mgr. de radium élément, diamètre compris entre 2 et 5 mm., longueur entre 12 et 16 mm. Dans le calcul de la constante K on ne doit pas oublier d'effectuer la correction nécessaire du fait de la fuite spontanée de l'appareil de mesure, fuite qui peut prendre une grande importance si la quantité de radium dont on dispose est trop petite.

On a objecté à notre système de notation qu'il n'était pas très légitime d'étalonner des chambres ionométriques avec un rayonnement  $\gamma$  très pénétrant correspondant à un quantum de l'ordre du million de volts, environ 5 fois plus élevé que le quantum des rayons de Röntgen les plus pénétrants utilisée aujourd'hui en radiothérapie. Mais les recherches de Friedrich, confirmées par celles plus récentes de Glasser nos propres recherches, ont montré qu'il y a un parallélisme parfait entre l'action ionisante des

rayons  $\gamma$  et celle des rayons de Röntgen, quand les chambres d'ionisation sont bien construites. Il est facile de s'en convaincre en faisant fonctionner en même temps, sous l'action d'un même rayonnement, deux ionomètres ayant des constantes très différentes. Si le rapport des deux constantes est  $a$ , le rapport des temps de décharge sous l'action d'un même faisceau de rayons de Röntgen est également  $a$ , aux erreurs d'expérience près. Nous devons ajouter que certains protagonistes de la notation en unités électrostatiques, par exemple Friedrich, utilisent, afin de vérifier la constance de leur dispositif de mesure, un étalonnage avec une quantité connue de radium-élément.

Pour nous résumer, la notation en unités R présente le double avantage :

1° De permettre à tout radiothérapeute l'étalonnage de son dispositif de mesure, quelle que soit sa provenance et quelles que soient les modifications apportées à ce dispositif; 2° d'introduire une unité internationale pratique, rigoureusement la même pour tout le monde. Une bonne partie des radiothérapeutes de langue française utilisent déjà cette notation, la dosimétrie radiothérapeutique a gagné considérablement en précision <sup>(1)</sup>.

En réalisant cette méthode d'étalonnage nous avons suivi le même chemin que celui déjà utilisé en Optique. Pour les radiations visibles du spectre, l'intensité lumineuse peut être évaluée en ergs, s'il s'agit d'une lumière monochromatique, mais pratiquement l'intensité lumineuse est évaluée en bougies internationales, les bougies internationales étant des étalons constitués par des lampes électriques à incandescence, fonctionnant dans des conditions bien déterminées <sup>(2)</sup>.

<sup>(1)</sup> Une confusion regrettable est due à Behnkin. Cet auteur, ignorant sans doute notre notation, désigne par R (Röntgen) une unité quantimétrique fondée sur l'étalonnage en unités électrostatiques d'une chambre d'ionisation contenant de l'air comprimé à 10 atmosphères. (Voir H. KÜNSTNER, *Die Standardisierung der Röntgen-Dosis Messung*, in *Klinische Wochenschrift*, 25 avril 1924).

<sup>(2)</sup> A. BLANC. *Rayonnement. Principes scientifiques de l'Eclairage*. Paris (Colin).