

**Annalen
van
de Belgische Vereniging
voor
Stralingsbescherming**

Vol.1 N° 4

Driemaandelijkse
uitgave

1976

Publication
trimestrielle

**Annales
de
l'Association Belge
de
Radioprotection**

Hoofdredacteur

Prof. Dr. O. SEGAERT

Rédacteur en Chef

Redactiesecretariaat

Mme Cl. STIEVENART

Sécretaire de Rédaction

Juliette Wytsmanstraat 14

14 rue Juliette Wytsman

1050

BRUSSEL

1050

BRUXELLES

INHOUD

SOMMAIRE

Editoriaal	276
Editorial	277
S. SIMON :	
Philosophie de la Radioprotection.	279
R.F. VERHEYEN :	
Conséquences écologiques du fonctionnement des centrales nucléaires.	293
P. PYCHLAU :	
Calibration of Dosimeters.	305
G.H. HOFMEESTER, A. SOMERWIL :	
Absolute exposure measurements in the Netherlands in the 10-250 kV X-ray region and for ^{60}Co -gamma rays.	317
K. HOHLFELD :	
Calorimetric standard device for measurement of absorbed dose for high energy photons and electrons.	327

EDITORIAAL

De voordrachten over het onderwerp " Dosimetrie " gehouden door de hh. Dr. P. PYCHLAU, Ir. G. HOFMEESTER, Dr. K. HOHLFELD, tijdens de vergadering van de Belgische Vereniging voor Stralingsbescherming in de Akademierraadzaal van de Rijksuniversiteit te Gent op 19 april 1975, werden gepubliceerd in de " Journal Belge de Radiologie ", Volume 58 n° 6 (1975). Uitzonderlijk, om redenen onafhankelijk van onze wil, verkeerden we niet in de mogelijkheid deze serie van voordrachten aan onze leden te bezorgen onder de gebruikelijke vorm als " Mededelingen van de Belgische Vereniging voor Stralingsbescherming ".

Met goedkeuring van de auteurs en van de Voorzitter van de Belgische Koninklijke Vereniging voor Radiologie en met instemming van de uitgever van de " Journal Belge de Radiologie ", worden deze voordrachten nogmaals gepubliceerd in de " Annalen van de Belgische Vereniging voor Stralingsbescherming ", Vol. I, n° 4.

De hoofdredacteur,

O. SEGAERT.

EDITORIAL

Les conférences données sur le sujet " Dosimetrie " par Dr. P. PYCHLAU, Ir. G. HOFMEESTER, Dr. K. HOHLFELD au cours de la réunion de l' Association Belge de Radioprotection en la salle académique de l' Université de Gand, le 19 avril 1975, ont été publiées au " Journal Belge de Radiologie " volume 58 n° 6 (1975).

Exceptionnellement et ce pour des raisons indépendantes de notre volonté, nous n'avons pas faire parvenir aux membres cette série de conférences sous forme de " Communications de l' Association Belge de Radioprotection ".

En accord avec les auteurs, avec le Président de la Société Royale Belge de Radiologie et avec le consentement de l'éditeur du " Journal Belge de Radiologie ", ces conférences ont été reprises aux " Annales de l' Association Belge de Radioprotection ", volume I, n° 4.

Le Rédacteur en Chef,

O. SEGAERT.

PHILOSOPHIE DE LA RADIOPROTECTION

Prof. S. SIMON

Université Libre de Bruxelles

4 décembre 1976

L'énergie nucléaire a pris un développement tel que les problèmes de la radioprotection se trouvent au premier plan de l'actualité.

Ceci est d'autant plus important que de multiples groupes de pression s'en sont emparé pour mobiliser l'opinion publique dans des buts variés. Or le grand public n'est que trop prompt à réagir de façon impulsive; sensibilisé par les ravages provoqués par les premières explosions des bombes atomiques, il est devenu allergique à tout ce qui touche à la radio-activité.

Il est d'ailleurs assez curieux de constater la quasi-indifférence que manifestent les mass media vis à vis de nombreuses sources de pollution dont les conséquences actuelles sont autrement graves : anthraco-silicose des mineurs, cancers pulmonaires dans les industries utilisant l'amiante, hécatombes sur les routes, tabagisme générateur de cancers et d'affections cardiaques, alcoolisme et ses conséquences sur la descendance, pollution des mers par le pétrole et des rivières par les déversements chimiques d'usines, etc, etc. Les périls que peut faire courir la radio-activité sont potentiels et la radio-protection, si elle est appliquée scrupuleusement, permet de les éviter; nous nous trouvons même en présence de la seule industrie pour laquelle des mesures de protection préventives ont été légalement prises avant que les accidents ne surviennent. Mais il semble que, psychologiquement, des menaces imprécises à allure diabolique affectent la sensibilité plus que des faits précis contre lesquels des mesures concrètes pourraient être prises, mais, hélas! aux dépens de trop d'intérêts privés.

C'est pourquoi je pense qu'il faudrait fournir une meilleure information afin de neutraliser ces éléments passionnels. Il serait puéril de nier les dangers que peuvent faire courir les radiations ; mais il faut les envisager de sang-froid, se dire qu'on a en main tous les atouts néces-

saires pour les éviter, donner aux travailleurs qui seront professionnellement exposés la formation théorique et pratique indispensable, et veiller à ce que les pouvoirs publics remplissent sans défaillance leur mission de contrôle.

Le problème est en effet loin d'être nouveau, et nous avons dépassé depuis longtemps la période de rodage. C'est en 1895 que l'humanité est entrée dans l'ère nucléaire, lorsque Roentgen découvrit les rayons X et que, peu après, Becquerel et les Curie mirent en évidence la radio-activité de l'uranium et isolèrent les premiers radio-éléments.

Très rapidement, physiciens, biologistes et médecins réalisèrent l'intérêt considérable de ces découvertes et passèrent aux applications pratiques. Le radio-diagnostic, même sous ses formes rudimentaires initiales, a fait faire un fantastique bond en avant à la médecine; le radium a permis d'espérer guérir des cancers jusques là incurables.

Mais le mode d'action de ces nouveaux agents techniques était révolutionnaire et ne fut pas immédiatement compris. La nécessité d'une radio-protection fut totalement méconnue. Le premier quart du siècle a été la période des pionniers, mais aussi celle des martyrs.

La mise au point des principes de radio-protection se situe entre 1920 et 1935, et a permis aux utilisateurs du radium et des rayons X de travailler dès lors en sécurité. Mais la période contemporaine a vu l'efflorescence des radio-éléments artificiels et leur utilisation de plus en plus généralisée; d'une phase artisanale on est passé à une période industrielle, bien que ses bases soient restées les mêmes, la radio-protection a dû être envisagée sous une optique différente. Il y a donc trois périodes dans l'évolution de la radio-protection; cette approche historique permet de préciser les écueils menaçants, de définir les problèmes qui se posent actuellement et de préciser comment les résoudre.

Sans en être le moins du monde conscients, les précurseurs qui ont manipulé les radiations au début du siècle ont servi de cobayes. Lorsque la seconde génération a repris le flambeau, les accidents étaient déjà assez nombreux et assez spectaculaires pour que les nouveaux venus réalisent l'impérieuse nécessité de se protéger. Il n'a jamais été question de renoncer aux possibilités exaltantes que les radiations ouvraient en science et en médecine, mais il fallait pouvoir le faire en toute sécurité. Il a fallu plusieurs années et d'acribes controverses avant que l'on ad-

mette l'effet destructeur direct des radiations sur les tissus. De nombreuses explications étaient proposées et défendues avec acharnement. Pendant longtemps, on a cru qu'il s'agissait d'une action chimique sur l'air entraînant l'apparition de composés irritants, et on conseillait aux radiologues d'enduire leurs mains de corps gras pour les isoler des substances toxiques !

D'autre part, les appareils de radiographie étaient fort primitifs; il fallait en régler continuellement le vide avant usage, et un radiologue américain prudent conseillait à ses collègues de vérifier le pouvoir de pénétration du rayonnement en radioscopant seulement le petit doigt de leur main gauche et non en exposant la main entière! Les étudiants en médecine s'amusaient à se faire radiographier le crâne; mais comme les temps de pose prenaient 15 à 20 minutes, ils étaient fort étonnés d'être chauves trois semaines après. Les utilisateurs de radium n'étaient guère plus prudents et transportaient dans leur poche le précieux produit, sans gaine protectrice, s'occasionnant ainsi des brûlures cutanées dont ils décrivaient minutieusement l'évolution.

Les contaminations internes ont également fourni leur contingent de victimes spectaculaires. Il y eut en particulier, en 1917, une épidémie de fractures spontanées chez les jeunes ouvrières d'une fabrique américaine de montres; elles peignaient les cadrans lumineux avec une poudre radioactive et, pour travailler plus vite avec un meilleur rendement, elles humectaient le pinceau avec leur salive; les examens montrèrent que leur squelette était devenu radio-actif de façon irréversible; nombre d'entre elles firent ultérieurement des cancers osseux. Il y eut, également aux Etats-Unis, une mode d'eaux rendues artificiellement radio-actives; destinées à concurrencer les eaux minérales européennes dont les propriétés médicinales étaient attribuées à des traces de radio-activité, elles déclenchèrent, chez les gens assez riches pour les boire, des anémies aplastiques par destruction de la moelle osseuse.

Quand l'action nocive directe sur les tissus fut enfin admise, les victimes avaient déjà reçu des doses considérables et les accidents tardifs ne tardèrent pas à survenir. Radiodermites chroniques, radio-nécroses tardives, anémies aplastiques, leucémies, cancers cutanés et autres sortirent de la boîte de Pandore, et pratiquement tous les pionniers en furent les victimes. Lorsque les Congrès Internationaux de Radiologie ont débuté en 1925, les jeunes médecins, biologistes et physiciens qui entraient

dans la carrière pouvaient constater de visu les épouvantables lésions irréversibles qui ravageaient leurs aînés. Et je revois encore, alors que je faisais un stage chez Holfelder en 1928, le dos d'un ingénieur qui était en traitement : pendant des années, il avait testé des appareils d'X fonctionnant tous ensemble dans un vaste hall; le résultat était une efflorescence de macarons sarcomateux qui couvraient tout son dos, et qui étaient incurables.

Profondément motivés par ces faits et réalisant l'extrême gravité de la situation, les principaux intéressés mirent sur pied tout un programme de recherches sur l'action biologique des radiations et sur les procédés possibles de radio-protection. Le 2^e Congrès International, en 1928, décida la création de la " Commission Internationale de Protection contre les Radiations " (C.I.P.R., ou I.C.R.P. pour les Anglo-Saxons) qui reste, encore actuellement, la pierre angulaire sur laquelle est bâtie la radio-protection. Treize savants furent sélectionnés pour leur compétence en radiologie, physique, biologie, génétique, biochimie et biophysique, en dehors de tout autre considération. Cette Commission reçut mission de mettre au point des mesures de protection et de faire rapport aux Congrès Internationaux qui se tenaient tous les trois ans.

Les premières mesures prises - écrans protecteurs, utilisation du carré de la distance, limitation de la durée de travail avec les radiations, contrôles sanguins réguliers - furent très efficaces tout en étant faciles à appliquer. Et ceux qui sont entrés dans la carrière après cette période et ont observé les règles de protection préconisées n'ont pratiquement plus présenté d'accidents.

Le C.I.P.R. a continué à jouer un rôle très actif, suscitant des recherches physiques et biologiques, principalement dans le domaine de la dosimétrie, et diffusant ses recommandations par le truchement des Congrès Internationaux. Ceux-ci n'avaient pas l'ampleur des congrès actuels; ils ne réunissaient que quelques centaines de participants qui se connaissaient bien et travaillaient tous dans la même direction. Pour éviter toute sclérose bureaucratique, on renouvelait de deux à quatre membres lors de chaque congrès; la cooptation des nouveaux membres se faisait selon les mêmes critères. Par cette méthode, le C.I.R.P. est resté vivant et constamment sur la brèche.

En 1935, un palier paraissait atteint, aussi bien au point de vue théorique qu'en ce qui concerne les résultats thérapeutiques obtenus avec les

Radiations ionisantes. Si l'on envisage les problèmes propres à la radio-protection, on peut constater qu'un certain nombre de notions fondamentales sont solidement établies :

1. Les caractéristiques physiques des diverses radiations ionisantes, électromagnétiques (X et γ) et corpusculaires (α , β , neutrons), sont connues de façon précise. Leur dosimétrie est à peu près standardisée. Leurs actions biologiques et thérapeutiques sont connues. Les méthodes de protection sont mise au point.
2. Il est établi que la radiolésion primaire se produit pendant l'irradiation et conditionne toute l'évolution ultérieure. Elle consiste essentiellement en une ionisation qui cesse lorsque l'irradiation s'arrête; le retour à la neutralité se fait en donnant naissance à des groupements moléculaires nouveaux qui modifieront le comportement des cellules.

Bien que des processus de guérison existent, ils ne sont jamais complets. En pratique, la radiolésion primaire doit être considérée comme indélébile.

Les radiolésions secondaires et tertiaires, qui apparaîtront ultérieurement, dépendront des espèces animales, de la nature des tissus et des conditions métaboliques.

3. Il est démontré qu'il faut distinguer très nettement les irradiations totales et les irradiations segmentaires. Il ne s'agit pas d'une différence de degré, mais d'une différence d'action fondamentale. Les irradiations totales, qui intéressent l'ensemble de l'organisme, sont extrêmement dangereuses, et de faibles doses sont mortelles. Des doses très faibles, mais répétées, sont susceptibles, par effet cumulatif, d'entraîner des accidents sanguins à longue échéance. Par contre, les irradiations segmentaires sont très bien tolérées. C'est pourquoi il est possible d'administrer aux tissus cancéreux des doses élevées, capables de les détruire tout en permettant la cicatrisation des tissus sains. L'art du radiothérapeute consiste à jouer avec les radio-sensibilités relatives des divers tissus en conservant une marge de sécurité.

Dans cette optique, on a poussé fort loin les recherches sur l'influence du fractionnement des doses et de leur étalement dans le temps, sur les différences existant entre les pouvoirs de récupération des divers types cellulaires et des tissus pathologiques, sur les effets

cumulatifs et les accidents tardifs consécutifs à la répétition d'irradiations segmentaires. On en a tiré des conclusions pratiques concernant la radio-protection.

4. L'extrême gravité des contaminations internes par les corps radioactifs a été mise en évidence par un certain nombre d'accidents dramatiques : cas des ouvrières des cadrans lumineux, cas des eaux radioactives, cancers du poumon chez les mineurs travaillant dans les mines à radon, cancers consécutifs à l'emploi du thorotrast en radio-diagnostic, etc.
5. Les expériences sur les animaux et les plantes ont mis en évidence les effets génétiques. On a vu que le taux des mutations est accru, mais on n'a pas vu apparaître des mutations inconnues antérieurement; nombre de mutations sont léthales, beaucoup sont récessives, peu sont bénéfiques. Les différences de comportement entre les gonades mâles et femelles sont connues.

Tenant compte de ces divers éléments, le C.I.P.R. a estimé qu'une irradiation totale annuelle de 15 roentgen ne faisait pas courir de risque d'accident somatique, immédiat ou tardif. Les complications génétiques ont été considérées comme négligeables, étant donné leur faible incidence et le petit nombre d'individus concernés. En pratique, les mesures de protection préconisées devaient avoir pour but de ne pas dépasser une dose maximale admissible de 0,3 r par semaine, l'exposition professionnelle étant de 50 semaines par an.

Il faut noter qu'on ne possédait pas de méthode permettant de mesurer individuellement les doses effectivement reçues par les travailleurs. Les mesures de protection et la durée du travail étaient calculées par les physiciens et on surveillait de près la formule sanguine des intéressés. Ce système de radio-protection présentait une très grave lacune : les recommandations du C.I.P.R. n'avaient qu'une valeur indicative et aucune disposition législative ne les rendait impératives dans aucun pays. D'autre part, il n'existait aucun contrôle de la formation des utilisateurs de radiations; en médecine en particulier, au moins en Belgique, L'enseignement universitaire ne prévoyait rien à ce sujet. Le respect des directives du C.I.P.R. dépendait uniquement de la bonne volonté des intéressés. Il en résultait que, si ces normes étaient en général appliquées dans les centres anticancéreux officiels et dans les services de radio-

diagnostic universitaires, la plupart des médecins travaillant en privé ne se souciaient guère de prendre les dispositions onéreuses que nécessitaient les mesures de protection et se refusaient aux contraintes qu'elles impliquaient, aussi bien pour eux que pour leurs collaborateurs. Mais les dangers n'étaient plus ignorés et on connaissait les mesures qu'il convenait de prendre pour les éviter. La plus impressionnante démonstration en a été l'absence d'accident dû à la radio-activité au cours de la construction de la première pile atomique par Fermi et ses collaborateurs, non plus que lors des manipulations extrêmement dangereuses qui ont conduit à réaliser, à l'échelle industrielle, les trois premières bombes atomiques.

La situation a changé radicalement lorsque la guerre a été terminée. La réaction en chaîne contrôlée a mis à la disposition des chercheurs et des industriels des corps radioactifs artificiels en nombre et en quantités pratiquement illimités. Un formidable champ d'activité s'est ouvert dans des domaines extrêmement variés.

Conscients de leur responsabilité, les Etats détenteurs des sources de radioactivité artificielle ont immédiatement pris des mesures pour contrôler la diffusion et éviter les accidents. Conservant le monopole de l'exploitation des centrales nucléaires, ils ne fournissaient les radionucléides qu'aux institutions qui possédaient des équipements de protection et de contrôle adéquats. En pratique, les centres anti-cancéreux qui voulaient faire bénéficier leur patients de ces nouveaux moyens thérapeutiques devaient fournir la preuve qu'ils avaient des laboratoires correctement équipés et un service de physique entraîné au contrôle et la manipulation de corps radioactifs.

D'autre part, le C.I.P.R., devant l'ampleur des problèmes qui se posaient pour assurer la protection des travailleurs et de la population, a, en 1950, modifié son mode de fonctionnement pour être à même de répondre rapidement aux besoins pressants qui se manifestaient de toute part.

Au cours de la conférence de Stockholm (1952), en liaison avec le Comité Mixte International de Radiobiologie, le C.I.P.R. se subdivisa en cinq Comités, chargés chacun d'un secteur particulier de la radio-protection :

Comité I : reste la commission principale de coordination.

Comité II : s'occupe de la protection vis à vis des contaminations internes.

Comité III : est chargé des mesures de protection contre les rayons X

d'énergie inférieure à 3 MeV et contre les rayons β et γ provenant de sources scellées.

Comité IV : s'occupe de la protection contre les rayonnements électromagnétiques d'énergie supérieure à 3 MeV et contre les électrons les neutrons et les protons.

Comité V : a pour mission d'étudier les problèmes inhérents à la manipulation des isotopes radioactifs et à l'évacuation des déchets radioactifs.

Réunis à Genève en 1956, les Comités adoptèrent la plupart des recommandations de protection élaborées. En particulier, elles fixèrent les doses maximales admissibles en cas de contamination interne, pour tous les radionucléides connus, en tenant compte des organes critiques pour chaque cas particulier.

Au cours de la même session, le C.I.P.R. s'est affilié à l'organisation Mondiale de la Santé en tant que " Organisme non-gouvernemental participant ". Enfin, sur demande du "Comité scientifique des Nations-Unies pour l'Etude des effets des radiations ionisantes ", le C.I.P.R. et la " Commission Internationale des Unités Radiologiques " se réunirent en vue de coordonner leurs travaux. Il est en effet essentiel que les normes de protection, les unités de mesure et toutes les mesures préconisées soient partout les mêmes de façon à permettre les échanges internationaux des travailleurs et des chercheurs ainsi que le transport des produits radioactifs.

Une des premières mesures prises a consisté à abaisser la dose maximale admissible pour les travailleurs à 0,1 rem par semaine et 5 rem par an. Cette décision résulte des considérations génétiques qui avaient été négligées précédemment; en effet il fallait prévoir qu'une proportion beaucoup plus importante de la population allait être soumise à des irradiations intéressant les gonades et que le risque de mutations allait s'amplifier. Se basant sur la dose totale de radiations que les êtres vivants reçoivent depuis l'origine des temps à partir des rayons cosmiques, de la radio-activité naturelle du globe terrestre et des corps radio-actifs contenus dans le corps humain, les généticiens ont estimé que l'on pouvait doubler cette dose sans accroître de façon dangereuse le taux de mutations; cette dose totale a été répartie entre le nombre théorique de travailleurs qui seraient professionnellement exposés et le reste de la population. La Commission a conclu de ces travaux que la dose maximale

admissible serait de 5 rem par an pour les travailleurs professionnellement exposés, valeur réduite au dixième pour le reste de la population. Il convient de noter que l'on n'a pas fait intervenir dans ces calculs les radiations d'origine médicale (radio-diagnostic ou traitements). En effet, il s'agit toujours d'irradiations segmentaires et, d'autre part, la grande majorité des traitements par radiations concerne des sujets ayant dépassé l'âge de la reproduction. Des recommandations furent cependant faites aux médecins afin qu'ils limitent au minimum possible le volume des zones irradiées et évitent, chez les sujets jeunes, que le rayonnement touche les gonades.

Les valeurs ainsi proposées étaient pratiquement acceptables; elles restent toujours en usage. Elles servent de base à toutes les mesures de sécurité qui sont prises lors de la construction d'installations susceptibles d'émettre des radiations ionisantes. Elles ont obligé tous les services de radiodiagnostic et de radiothérapie à adapter leurs installations pour respecter ces normes; il a fallu en particulier accroître à grands frais les écrans protecteurs.

Depuis lors, les différents Comités ont publié de nombreuses brochures diffusant les résultats de leurs travaux sous forme de " recommandations ". Leurs activités se poursuivent en tenant compte de tous les faits expérimentaux nouveaux, et aussi en analysant tous les accidents qui sont portés à leur connaissance.

Mais on se heurtait toujours au même handicap : les " recommandations " du C.I.P.R. ne sont pas impératives. Autrefois, cela avait relativement peu d'importance, le nombre des individus intéressés étant relativement faible; de plus, leur niveau de formation était en général élevé et ils étaient fortement motivés. Il n'allait plus en être même dès lors que les radionucléides allaient être utilisés dans des domaines extrêmement divers; les " travailleurs professionnellement exposés " ne seraient plus motivés de la même façon et, les radio-lésions n'étant pas ressenties instantanément mais s'installant de façon insidieuse. Ils risqueraient de s'exposer inconsidérément à des dangers dont ils seraient incapables de réaliser l'importance. De plus, le coût élevé des mesures de protection risquerait d'être considéré comme prohibitif aussi bien par les chercheurs de laboratoire, toujours à court de crédits, que par les industriels soucieux de la rentabilité. Il était donc essentiel d'élaborer des " codes de radio-protection " et de les rendre obligatoires.

Pratiquement, dans tous les pays civilisés, les gouvernements ont élaboré des codes de radio-protection, en tenant compte de ce que les mesures préconisées devraient avoir une portée internationale et s'intégrer aux dispositions prises dans les autres pays. D'un commun accord, on a voulu réaliser un système unifié et cohérent, permettant le transport aisé des radionucléides et la libre circulation des travailleurs et des chercheurs. La base de ces travaux a toujours été les directives publiées par les divers Comités du C.I.P.R.

En 1956 a été signé le traité créant la Communauté Européenne de l'Énergie Atomique (EURATOM). Les chefs d'État signataires y exprimaient leur position dans les termes suivants :

...." Conscients que l'énergie nucléaire constitue la ressource essentielle qui assurera le développement et le renouvellement des productions et permettra le progrès des oeuvres de paix;

Convaincus que seul un effort commun entrepris sans retard promet des réalisations à la mesure de la capacité créatrice de leurs pays;

Résolus à créer les conditions de développement d'une puissante industrie nucléaire, source de vastes disponibilités d'énergie et d'une modernisation des techniques, ainsi que de multiples autres applications contribuant au bien-être de leurs peuples;

Soucieux d'établir les conditions de sécurité qui écarteront les périls pour la vie et la santé des populations;

Désireux d'associer d'autres pays à leur oeuvre et de coopérer avec les organisations internationales attachées au développement pacifique de l'énergie atomique "

Passant immédiatement aux actes, les sept pays de la Communauté chargèrent une Commission d'experts d'élaborer des " normes de base " qui permettraient la mise sur pied de législations nationales assurant la sécurité des travailleurs et de la population. Cette Commission comprenait des représentants des autorités administratives et des experts physiciens, médecins et biologistes; certains d'entre eux faisaient partie de Comités du C.I.P.R., ce qui assurait la coordination des travaux avec les dernières données récoltées par les instances internationales; l'un d'eux était également membre de l'Agence Internationale de Vienne, organisme qui subsidiait des travaux dans toute l'Europe et avait déjà prévu un programme de formation et de protection des travailleurs.

En 1959, la Direction de la Protection sanitaire de l'Euratom a publié le résultat de ces travaux sous forme de " Normes de base " .

Ce document précisait la définition des termes techniques de façon à éviter toute équivoque, reprenait les doses maximales admissibles pour les personnes professionnellement exposées et pour la population, déterminait les expositions et contaminations maximales admissibles, préconisait les principes fondamentaux de surveillance des travailleurs (contrôle physique et contrôle médical). Pour faciliter la mise en place des mesures de protection, la Commission avait réparti les radionucléides en quatre classes suivant leur degré de radiotoxicité, et les lieux de travail en trois catégories en fonction des risques courus.

En utilisant ces deux paramètres, on pouvait déterminer, dans chaque cas particulier, l'équipement de protection nécessaire et les conditions de travail, de façon à assurer aux travailleurs une sécurité efficace. En juin 1967, quelques modifications mineures furent apportées à ces normes. A partir des directives des Normes de Base, approuvées par le Conseil de l'Euratom, les différents Etats de la Communauté étaient tenus de prévoir une législation rendant impératives les mesures de protection préconisées. En Belgique, le Parlement a voté une loi relative à la " Protection de la population contre les dangers résultants des radiations ionisantes ". Cette loi a été complétée par plusieurs Arrêtés Royaux dont le dernier, qui date de mai 1972, régit actuellement l'ensemble des problèmes soulevés par l'utilisation des sources de radiations ionisantes.

Contrairement à la situation d'avant la guerre, les mesures ainsi prescrites sont impératives et tous les utilisateurs, y compris les médecins, doivent les respecter. Aucune dérogation n'est admise pour les situations acquises. Quelle que soit la catégorie à laquelle ils appartiennent, les candidats-utilisateurs doivent obtenir une autorisation préalable des autorités administratives, disposer de locaux répondant aux règles de sécurité prescrites et se soumettre aux contrôles réguliers d'experts physiciens et médecins qui ne dépendent pas d'eux. Les autorisations ne sont accordées qu'après une formation théorique et pratique sanctionnée par un examen; les universités ont été obligées d'organiser les enseignements adéquats. Les physiciens contrôleurs et les médecins chargés de la radioprotection doivent être agréés et avoir reçu une formation théorique et pratique où les méthodes de protection jouent un rôle important.

Voilà où nous en sommes. Nous disposons d'une solide infrastructure qui doit permettre un développement harmonieux et sans danger des multiples utilisations de l'énergie nucléaire, à condition que le code de radioprotection soit scrupuleusement respecté. Et c'est malheureusement là que le bât blesse : des forces centrifuges, nombreuses et souvent puissantes, risquent d'entrer en action et de contrecarrer les dispositions légales prévues.

Il y a d'abord les utilisations militaires qui, dans certains pays, sont soustraites au régime commun, au nom des secrets de la défense nationale. Nous sommes en droit d'espérer que les normes de sécurité y sont respectées et que ceux qui travaillent dans ce secteur sont suffisamment conscients des problèmes pour veiller à leur propre protection et à celle des populations vivant dans le voisinage de leurs installations. Mais ils ont un statut spécial et ne sont pas soumis aux critères élaborés par l'Euratom.

Le gros secteur des centrales nucléaires génératrices d'électricité, si controversé à l'époque actuelle, ne devrait pas poser de problèmes. Les autorisations ne sont accordées que lorsque les études et les contrôles d'essais ont montré que les normes de sécurité étaient respectées. Les experts-physiciens de classe I sont soigneusement sélectionnés et, responsables devant les autorités ministérielles, ils sont indépendants et soustrés aux pressions éventuelles des constructeurs. En Belgique, en particulier, le Conseil Supérieur d'Hygiène et la Commission Spéciale des Radiations Ionisantes sont des organismes d'Etat où se retrouvent les autorités administratives responsables et les professeurs universitaires experts en ces matières, et c'est d'eux que dépendent les autorisations nécessaires.

Récemment, le ministère des Affaires Economiques a fait faire dans ce domaine une étude approfondie concernant aussi bien les aspects techniques et économiques que les problèmes d'écologie et de santé que pose la création de nouvelles centrales nucléaires dans notre pays. La relève du charbon et du pétrole nécessaires pour la production de l'électricité que notre mode de civilisation réclame impérieusement ne peut se faire, à une échelle suffisante, que par l'utilisation de l'énergie nucléaire; mais il faut veiller à ce que des intérêts privés et un souci de rentabilité ne fassent pas négliger le respect des règles de protection. Les conclusions de ce travail en profondeur ont montré que le seul point vraiment névral-

gique est le problème des déchets radio-actifs pour lequel aucune solution vraiment satisfaisante n'a encore été trouvée. Il faut espérer que les recherches pour dominer la fusion en chaîne contrôlée finiront par donner des résultats satisfaisants et permettront de résoudre ce problème crucial. Mais, dans ce domaine également, le monopole militaire entraîne un secret des recherches qui n'est pas un facteur de progrès.

La sécurité est davantage menacée par la vaste catégorie des " petits utilisateurs " qui a très largement débordé le secteur médical d'autrefois. Les radionucléides artificiels sont légion et presque tous trouvent des utilisations dans l'industrie, l'agriculture, la biologie, l'hydrologie, l'archéologie; et chacun d'entre eux a ses caractéristiques propres tant au point de vue physique que biologique. En sources scellées, ils sont relativement faciles à contrôler; mais encore faut-il utiliser correctement les badges et comprendre leur raison d'être. En sources non scellées, ils sont beaucoup plus dangereux car les risques de contamination des locaux et des travailleurs sont très insidieux; ils sont souvent utilisés à l'échelle traceur et, vu les faibles quantités nécessaires, leurs utilisateurs ont trop souvent tendance à considérer que les dangers sont négligeables. Faire comprendre à des individus insuffisamment préparés les graves dangers des contaminations internes et de leur action cumulative est souvent très difficile. Il y a une telle disproportion entre la minime erreur ou négligence commise et la gravité des radiolésions qui en résulteront que de faire entrer cette conception dans l'esprit des intéressés est souvent un obstacle difficile à surmonter. La nécessité d'équiper à grands frais des laboratoires exclusivement réservés aux radionucléides, de les doter d'un outillage à leur usage exclusif, semble trop souvent constituer un gaspillage inutilement onéreux; la contrainte d'avoir l'agrément officielle des locaux avant d'être autorisé à utiliser les radionucléides alors qu'on a passé les examens de compétence paraît une brimade administrative dont on ne conçoit pas la justification.

C'est le rôle des experts-physiciens, mais surtout des médecins chargés de l'embauche et du contrôle de la radio-protection d'expliquer aux travailleurs intéressés les raisons d'être des mesures prescrites et de veiller inlassablement à ce qu'elles soient respectées. Il y a là une mission éducative extrêmement importante, qui déborde le cadre habituel des activités des médecins du travail.

Ma philosophie, au fond, c'est que quiconque approche ou utilise des émet-

teurs de radiations ionisantes doit être suffisamment motivé pour se rendre compte que sa protection et celle de son entourage dépend essentiellement de lui-même, de sa lucidité, de son sang-froid, de sa discipline. Toutes les rigueurs des lois seront inefficaces si chacun, dans son secteur, ne veille pas au respect scrupuleux des mesures, somme toute très simples, qui le mettront à l'abri des radiations. Notre civilisation ne peut pas faire machine arrière; nous devons, bon gré mal gré, intégrer l'énergie nucléaire dans notre équipement, et nous devons arriver à le faire sans suicide de l'humanité.

CONSEQUENCES ECOLOGIQUES DU FONCTIONNEMENT DES CENTRALES NUCLEAIRES.

Allocution du Professeur Dr. R.F. VERHEYEN, Chef de Cabinet de K. POMA, Secrétaire d'Etat à l'Environnement.

15 octobre 1976

Notre tâche dans le contexte de la Commission d'Evaluation en Matière d'Energie Nucléaire consistait à discuter et à évaluer les effets que l'on peut attendre des implantations existantes ou envisagées de Centrales Nucléaires dans notre pays, sur les écosystèmes et à fournir un certain nombre de recommandations à l'autorité supérieure. Aussi est-ce avec plaisir que j'ai accepté de répondre à l'invitation flatteuse de votre président, en venant vous parler des conséquences écologiques du fonctionnement de ces centrales.

1. Introduction

D'après les Ecologistes, on entend par Biosphère la partie de la terre (écorce terrestre, eau, couches inférieures de l'atmosphère), sur laquelle se déroule la vie.

De façon fortement simplifiée et à titre de modèle, on peut considérer la Biosphère comme un système de quatre compartiments très interdépendants : l'air, le sol, l'eau et les organismes. Ces compartiments réagissent entre eux, de sorte qu'ils exercent continuellement une influence réciproque et constituent un système plus ou moins fermé. Dans la biosphère, on distingue des unités toujours plus ou moins limitées, à l'intérieur desquelles les constituants structurels et fonctionnels sont l'objet d'une autorégulation permanente : les écosystèmes.

Un écosystème est donc constitué d'une biocénose, c'est-à-dire d'un ensemble d'organismes vivants interdépendants et du milieu physique qu'elle habite, dont elle dépend et qu'elle modifie tout à la fois.

En écologie nous considérons l'homme comme une des nombreuses espèces d'organismes existant dans la biosphère.

L'homme fait partie inhérente des écosystèmes et, par l'influence prépondérante qu'il exerce sur ces écosystèmes, il en est évidemment un des facteurs les plus importants, quelle que soit la forme de la société,

industrialisée ou non dans laquelle il vit.

Les effets éventuels de l'implantation de Centrales Nucléaires sur l'homme n'ont cependant pas été étudiés par le groupe " Ecosystèmes ", car ils ont été traités de façon très approfondie par le groupe " Santé Publique" dont le Dr. LAFONTAINE était l'assesseur; cependant, un échange de données et de conclusions entre les experts des deux groupes a eu lieu.

Après avoir expliqué ce que nous entendons par écosystèmes, nous voudrions vous faire remarquer que nous limiterons notre exposé à la discussions et à l'évaluation des effets, sur les écosystèmes, des pollutions, provenant des centrales nucléaires du type P.W.R. actuellement en service ou commandées.

Notre approche sera sectorielle, nous étudierons séparément les écosystèmes terrestres et aquatiques et nous examinerons dans chaque cas les pollutions radioactive, thermique et chimique. Les interférences entre compartiments seront également envisagées.

Tenant compte du fait que les écosystèmes subissent souvent les effets cumulatifs de nombreux facteurs polluants, nous nous permettons d'annoncer, autant que possible, un certain nombre de critères de qualité, c'est-à-dire les niveaux de pollution, qui ne peuvent être dépassés en tout ou en partie dans un milieu déterminé. Le respect de ces critères permettra d'intégrer un certain nombre d'activités humaines dans les équilibres dynamiques des divers écosystèmes : il est cependant évident que pour un certain nombre d'écosystèmes, ces critères de qualité sont depuis longtemps dépassés et qu'il y a lieu de réparer les dégats causés. Dans la planification des nouvelles activités humaines, telle l'implantation des centrales nucléaires, il faudra dorénavant prendre des mesures adéquates pour sauvegarder les critères de qualité proposés. La naissance de sites d'implantation d'une telle importance et aussi fortement artificiels amène également une perte considérable de valeurs biologiques et de sites naturels, provoquant même la disparition à peu près totale de certain écosystèmes caractéristiques.

2. L'Influence des Centrales Nucléaires sur l'Écologie du Milieu Aquatique

2.1. La stabilité des écosystèmes aquatiques est caractérisée par un équi-

libre dynamique entre les producteurs, les consommateurs et les décomposeurs. Ces derniers assurent en quelque sorte l'auto-épuration du système. Toute pollution tend à déséquilibrer ce système. Quand la pollution organique n'est pas trop grave, les décomposeurs parviennent à la résorber plus ou moins vite.

Lors de l'augmentation de la pollution thermique et organique on constate, même en l'absence de polluants toxiques, un net déséquilibre du système. On observe soit la prolifération de décomposeurs dont l'activité consomme plus d'oxygène que n'en produisent la photosynthèse ou la réaération ce qui conduit à une situation d'anaérobiose, qui est le développement anarchique de la production primaire, ne pouvant plus être utilisée par les consommateurs.

Dans le cas de pollution thermique chronique et en présence de polluants organiques et minéraux toxiques - radioactifs ou non, on élimine presque totalement la biocénose - tel est le cas de la Sambre à Charleroi.

2.2. Dans les effets de la pollution sur l'écologie du milieu aquatique, nous avons étudié l'effet des rayonnements ionisants et, tenant compte de la composition et de la dynamique d'une biocénose, nous avons également envisagé la contamination des chaînes trophiques aquatiques. Cette étude nous a permis de définir, dans une certaine mesure, des critères de qualité.

Etant donné l'importance des sédiments récents pour la vie benthique, nous disons également un mot sur la contamination des sédiments.

Les effets sur les organismes d'eau douce n'ont été étudiés, que dans la Columbia River et au Laboratoire d'Oak Ridge. Les autres informations sont le résultat d'extrapolations d'expériences réalisées en laboratoire, où les doses de rayonnement administrées sont plus élevées de plusieurs ordres de grandeur que celles reçues par les effluents des installations nucléaires en fonctionnement normal.

Les effets létaux : les doses létales varient très largement en raison des facteurs tels que l'espèce, l'âge, l'état physiologique et la taille. D'autre part, des interactions dues aux facteurs propres au milieu peuvent également intervenir. En tout état de cause, il semble qu'en fonctionnement normal, la contamination radioactive directe ne produise pas d'effets létaux.

Pour les effets sublétaux, on a pu démontrer que les doses nécessaires pour induire des effets somatiques sont considérablement plus élevées que celles rencontrées dans l'environnement. Par contre, pour les effets génétiques, même si on admet qu'aucun effet significatif dommageable n'a jamais été observé sur les populations d'organismes aquatiques, exposées à des niveaux de radioactivité, de l'ordre de ceux produits par les centrales nucléaires ou les usines de retraitement, les effets possibles à longue échéance de modifications génétiques, en particulier pour certains groupes d'organismes benthiques, préoccupent les écologistes. Les effets sur les organismes marins peuvent être définis comme suit : en ce qui concerne les effets létaux il semble que les niveaux d'irradiation requis pour tuer des poissons sont si élevés qu'il est maintenant impossible qu'une telle situation se produise sans accident. De plus, les formes primitives sont plus radiorésistantes que les organismes plus évolués.

Pour les effets sublétaux, les effets mentionnés sur un grand nombre de critères biologiques sont tellement contradictoires qu'il n'est pas possible de tirer quelque conclusion que ce soit dans un sens ou dans l'autre tant que les essais publiés n'auront pas été menés de façon plus convaincante.

Après avoir défini, de façon sommaire, l'effet de la pollution radioactive directe sur les organismes dulcicoles, d'une part, et marins, d'autre part, nous voudrions examiner son effet sur la contamination des chaînes trophiques.

dès l'abord, il faut signaler que le mouvement de nourriture à travers les organismes des divers niveaux trophiques marins peut être relativement différent de celui observé pour les organismes dulcicoles. En effet, les chaînes alimentaires aboutissant à l'homme peuvent être plus courtes que celles passant par les poissons supérieurs carnivores, puisque des végétaux marins, des crustacés, des coquillages et des mollusques sont directement utilisés à des fins alimentaires par l'homme.

D'une façon générale, aussi longtemps que les rejets restent faibles, nous ne prenons pas l'accident en considération, l'impact sur les communautés des écosystèmes dulcicoles et marins est très faible, même probablement négligeable, sauf peut-être pour le zinc, le fer, le cobalt et le manganèse dans les organismes marins. les isotopes stables de ces

éléments, biologiquement importants, étant cependant présents dans l'eau de mer, à des concentrations très faibles, il en résulte, après rejets, des activités spécifiques assez élevées. Cela pourrait à moyen ou à long terme, causer un problème d'environnement, surtout dans les estuaires et dans les eaux côtières.

Si l'impact sur les communautés aquatiques semble donc pratiquement négligeable, il n'en est absolument pas de même pour les conséquences sanitaires. Pour le site Meuse, la dose annuelle délivrée et la plus élevée résulterait de la consommation de végétaux cultivés sur des terres contenant des sédiments contaminés. Ceux-ci ne doivent donc servir qu'aux remblayages industriels. Pour le site Escaut, il faut tenir compte d'une consommation régulière de poissons et de moules provenant de l'Escaut maritime. Pour les deux sites, la dose annuelle délivrée dans ces conditions varie de quelques microrems/an à quelques dizaines de microrems/an selon que l'on considère le corps entier, le système gastro-intestinal, les os ou la glande thyroïde. Les conséquences de cette situation ont fait l'objet du rapport du groupe "Santé", nous n'en parlerons donc pas ici.

En ce qui concerne une usine de retraitement, l'étude des conséquences du rejet dans la Molse-Nete nous apprend qu'ici également, la dose annuelle la plus élevée résulterait de la consommation de végétaux cultivés sur des terres contenant des sédiments contaminés qui ne doivent donc en aucun cas, servir à cet usage. Les autres voies d'exposition sont l'eau de boisson et la chaîne alimentaire, poissons, produits laitiers, la viande et les oeufs, ces trois dernières contaminations provenant de l'eau d'abreuvement. La dose totale annuelle délivrée - dans les conditions de la Molse-Nete - varie de quelques dizaines de microrems/an à quelques centaines de microrems toujours suivant les organes cités plus haut.

2.3. Effets de la pollution thermique sur les écosystèmes aquatiques.

Notons dès l'abord, que nous avons envisagé trois types de refroidissement : circuit ouvert, tour de réfrigération humide, tour sèche. Il faut également ajouter que le problème ne se pose pas exclusivement pour l'énergie nucléaire; le rendement moins élevé et la taille des centrales nucléaires donnent toutefois une dimension nouvelle au problème.

L'influence directe d'une élévation de température sur les écosystèmes aquatiques est d'autant plus importante que pour beaucoup d'organismes, les températures létales sont très proches des températures optimales de développement et des températures maximales naturelles. Toute élévation de température peut donc perturber les écosystèmes pouvant même provoquer la disparition pure et simple de certaines espèces. De plus, il faut prévoir des phénomènes de migration et de substitution par des espèces plus thermophiles non souhaitable telles que, par exemple, crustacés et mollusques xylophages importés sur les coques des navires. Ces remarques valent aussi bien pour les organismes dulcicoles que pour les organismes marins et d'eau saumâtre.

L'influence directe est également très néfaste. Par influence indirecte, nous entendons les effets dûs à la diminution de la solubilité de l'oxygène, la disparition partielle ou totale de certaines espèces, nécessaires comme " maillon de la chaîne " à la survie de l'écosystème, dont elles font partie, et enfin, l'effet cumulatif, dû à la présence dans le milieu d'autres polluants.

L'effet perturbateur entraînant l'affaiblissement et l'appauvrissement, le travail de sape provoque presque toujours une réduction de la diversité spécifique, allant parfois jusqu'à l'élimination totale comme c'est le cas pour l'exemple déjà cité plus haut du milieu de la Sambre à Charleroi.

Les conséquences indirectes de l'effet thermique sur les microorganismes peuvent être également très nocives, même si l'on n'atteint pas des températures assez élevées pour être nocives directement. Le fonctionnement de ces microorganismes dépend, en effet, essentiellement du bilan d'oxygène.

Une perturbation de ce bilan, due à des causes externes, c'est-à-dire non naturelles, peut donc avoir des conséquences désastreuses en ce sens qu'une augmentation de quelques degrés peut modifier fondamentalement l'écosystème aquatique.

Pour la pollution fécale, il faut signaler que la croissance des bactéries fécales n'est possible que dans un milieu riche en matière organiques et de salinité relativement basse. Le risque d'une telle prolifération n'existe dès lors que dans les milieux d'eau douce, fortement chargés de matières organiques.

Concrètement, en analysant le site Meuse, on peut dire que la Meuse à son entrée en Belgique n'est que très peu polluée. Jusqu'à l'entrée de Liège, l'état peut encore être décrit comme satisfaisant. Une chute très importante de la teneur en oxygène dissout - pouvant amener une concentration de 2 mg/l en été - est causée par les rejets industriels et domestiques de l'agglomération liégeoise. La région liégeoise et la zone aval jusqu'à Visé, sont donc les plus sensibles à toute aggravation de pollution thermique ou chimique. Le modèle mathématique montre d'autre part, que des interférences se produisent entre les différents rejets thermiques, si bien que - même si on applique la contrainte légale limitant l'échauffement de la rivière à 5 degrés centigrades au point de rejet - les effets cumulatifs provoqueront des relèvements de température de l'ordre de 8 à 10 degrés centigrades par rapport à la température naturelle. Il est certain que de tels excès peuvent " déphaser " les différents cycles biologiques et altérer notablement le pouvoir de réaération de la rivière. C'est un facteur très important dans le choix du site d'implantation des centrales.

Pour le site Escaut, les rejets de chaleur, provenant des Centrales nucléaires, aggraveront considérablement l'intense pollution domestique et industrielle dont souffrent actuellement déjà nos estuaires. Le caractère oscillatoire du mouvement des masses d'eau et les différentes espèces chimiques impliquées dans les phénomènes micro-biologiques d'oxydo-réduction provoquent des processus réducteurs dans la partie amont des estuaires.

Ces phénomènes dégradent encore la qualité déjà très mauvaise de l'eau au niveau d'Anvers, par la production de sulfures. Si actuellement cette production n'apparaît qu'en été, il faudra, par contre, s'attendre à l'avenir à un étalement sur toute l'année.

Tenant compte du fait que les processus de récupération et en particulier de réapparition de l'oxygène dissout sont rejetés de 7,5 km (février - octobre) à 10 km en aval (mai - juillet), il faut en conclure que l'utilisation du circuit ouvert comme système de refroidissement ne devrait pas être conçu pour ce site.

2.4. La pollution chimique directe des écosystèmes aquatiques par les effluents est peu importante. Ainsi que nous l'avons montré plus haut, la pollution indirecte, causée par l'apport thermique, que représentent

les polluants chimiques, joint à l'impact thermique lui-même peut être très importante, dans la mesure où elle risque de modifier considérablement la distribution de métaux toxiques tels que le zinc, le cuivre, le cadmium et le mercure, entre sédiments récents, matières en suspension et l'eau.

Signalons pour terminer ce chapitre des effets de la pollution sur les écosystèmes aquatiques que, si les procédés de retraitement des effluents et les contrôles sont rigoureusement suivis, les rejets non-nucléaires provenant des usines de retraitement de capacité moyenne ne devraient pas avoir d'impact sur les écosystèmes aquatiques.

3. Influence des centrales nucléaires sur l'écologie du milieu terrestre.

3.1. Les effets des rayonnements ionisants sur les organismes vivants autre que l'homme.

En ce qui concerne les végétaux, l'exposition chronique ou aiguë provoque une gamme d'effets allant d'une réduction de la croissance ou d'anomalies de développement à une stérilité partielle ou complète et à la mort. De plus, elle entraîne des effets génétiques sous forme de mutations et l'on peut observer des altérations cytologiques, morphologiques et physiologiques.

Nous ne nous attarderons pas à l'énumération des doses létales ou sublétales ni aux degrés de radiosensibilité des différentes espèces : cela nous mènerait trop loin et en tout état de cause, ces données se trouvent aisément dans la littérature.

- Pour les microorganismes, signalons que les bactéries sont en général très radiorésistantes. Peu de données existent, par contre, quant aux effets des radiations sur les populations microbiennes naturelles mais on pense qu'elles souffriront moins que les populations végétales ou animales en cas d'irradiation. La radiosensibilité des animaux varie également de façon très considérables, selon leur degré d'évolution et la phase du cycle vital étudié. En général cependant, il semble que les animaux les plus évolués soient aussi les plus vulnérables et que les espèces les moins évoluées se révèlent parfois extrêmement résistantes, comme par exemple les insectes adultes.

- En conclusion, il semble que, tout comme pour les écosystèmes aquati-

ques, la dose induite directe annuelle permet de déduire que l'irradiation chronique autour des installations, ne devrait pas provoquer d'effets détectables au niveau des écosystèmes terrestres, dans des conditions d'utilisation normales.

3.2. L'effet des isotopes radioactifs sur les chaînes trophiques terrestres.

Le degré de rétention directe par les plantes dépend des caractéristiques des radioisotopes présents dans l'atmosphère et de morphologie des parties aériennes (surface de l'épiderme, base de la plante). Dans le cas d'irrigation par aspersion, il va de soi qu'une partie importante de radionuclides en solution peut être absorbée par les surfaces foliaires. Il faut encore noter qu'une certaine partie de substances retenues initialement se perd assez rapidement sous l'effet du vent, la desquamation des épidermes, etc....

La contamination indirecte par le sol dépend du type du sol, de la fumure, des caractéristiques de la plante et de l'élément considéré : le strontium est, par exemple, aisément absorbé tandis que le césium est fortement retenu par les sols non-organique.

Rappelons également ce que nous avons dit plus haut à propos de la contamination des chaînes trophiques aquatiques et de l'influence que celle-ci peut avoir sur les animaux aquatiques, les cultures irriguées et l'eau de boisson ou d'abreuvement.

Des études détaillées ont été publiées sur les processus de contamination radioactive des aliments d'origine végétale et animale : je ne citerai donc pas de chiffres mais je suis tout à fait disposé à les communiquer aux intéressés après mon exposé.

Je ne parlerai pas des polluants chimiques et thermiques provenant des centrales nucléaires, ceux-ci n'ayant aucune influence directe sur les écosystèmes terrestres.

4. Influence des centrales nucléaires quant au bruit, brouillard, précipitations, retombées de sel.

Pour les tours à ventilation naturelle, le bruit de cascade à 100 m de distance a un niveau de 65 à 75 dBA. Il faut de plus tenir compte, comme à Tihange, du phénomène des ondes sonores.

En ce qui concerne le climat local, la très grande majorité des plumets longs, c'est-à-dire supérieurs à 900 m, se produira la nuit et n'affectera pas l'insolation, le moment de la naissance des formations cumuliformes se produisant naturellement, sera avancé, les tours auront une action bénéfique sur le brouillard en agissant comme ventilateur, par vent calme, tandis que par vent fort, le plumet aura une base horizontale bien nette à une centaine de mètres au-dessus du sol. Enfin, en ce qui concerne les précipitations les conditions météorologiques sont généralement telles que les quantités d'eau déposées au sol par le plumet, dans les environs immédiats sont insignifiantes.

L'effet des gouttes produites à l'intérieur des tours se limite au voisinage immédiat, les gouttelettes étant généralement assez grosses et retombant dès lors très rapidement au sol.

Les retombées de sel posent un problème quand la salinité de l'eau de refroidissement est grande, ce qui est le cas dans les estuaires. Les dépôts se chiffrent à 250 mg par m² et par mois à moins de 1 km de la tour pour atteindre 1 mg par m² et par mois à 10 km. L'effet de ces retombées sur la végétation devrait être étudié de façon plus approfondie avant d'en tirer des conclusions valables.

Mis à part donc l'aspect esthétique et le problème de la retombée saline, la pollution provoquée par les tours de réfrigération à tirage naturel est insignifiante, si les conditions de constructions et de fonctionnement sont suffisamment strictes.

5. Recommandations.

Pour conclure nous voudrions attirer votre attention sur les recommandations faites par le groupe d'Etudes :

- Pour la pollution radioactive, le principe général énoncé dans la publication 22 de la Commission Internationale de Protection Radiologique, doit être observé : les rejets doivent être maintenus à un niveau aussi bas que possible. La prise en considération de valeurs déduites des concentrations maximales pour l'eau potable pourrait s'avérer insuffisante pour la protection de l'homme et des écosystèmes.

Des études plus poussées devraient examiner l'effet global des diverses formes de pollution sur le plus grand nombre de groupes d'organismes des écosystèmes concernés.

- Il est absolument impérieux de contrôler la destination des boues de dragage provenant des cours d'eau, chargés d'effluents radioactifs.

- Pour les pollutions thermique et chimique, la première jouant un rôle capital dans les écosystèmes aquatiques, des normes très strictes, adaptées à la saison et au milieu doivent être respectées. Il faudrait absolument réduire le gaspillage des calories actuellement perdues.

La pollution chimique directe ne semble pas poser de grands problèmes, si les critères de qualité proposés sont respectés.

L'interaction de cette pollution et de l'effet thermique impose cependant une approche pluridisciplinaire tant pour l'étude des sites que pour la surveillance du milieu au moment du fonctionnement.

- Enfin, les effets des différentes formes de pollution ne peuvent être dissociés du choix des sites de la conservation de la nature. Plus particulièrement, le groupe " Ecosystème " considère inacceptable le fonctionnement de Centrales à circuit ouvert tant à Zeebruges qu'à Nieuport.

En effet, on pourrait penser que la masse d'eau que représente la mer pourrait éliminer le problème des effets thermiques. Mais il ne faut pas oublier d'autres valeurs tout aussi importantes. Pour des raisons écologiques, dans le cadre de la conservation de la nature, le site de Nieuport doit être totalement exclu. Le site de Zeebruges constituerait un moindre mal, pour autant que les centrales fonctionnent en circuit fermé, du moins partiellement, pour respecter des critères très stricts.

L'île en mer à plus de 8 km de la côte, si attrayante pour certains, pourrait peut-être offrir une solution : il faudrait cependant faire des études approfondies des conséquences possibles pour les écosystèmes aquatiques, afin de pouvoir déterminer le lieu d'implantation et le mode de refroidissement compte tenu des contraintes écologiques. Pour les mêmes raisons écologiques, l'implantation auprès de lacs naturels ou artificiels, pour éviter le système coûteux de refroidissement, doit être rejetée.

Il importe donc qu'à l'avenir, pour toute nouvelle implantation, le choix d'un site ne se réalise qu'après une investigation systématique de toutes les possibilités et sur base d'un bilan global coûts - bénéfices intégrant les aspects techniques et économiques, l'ensemble des coûts sociaux et l'impact sur les écosystèmes, l'environnement et la Santé publique.

6. Remerciements.

Je ne voudrais pas terminer mon exposé sans souligner le travail remarquable des experts de ce que l'on a communément appelé la " Commission des Sages ". Je n'en veux pour exemple que de citer le projet de décision du Conseil des Communautés Européennes instaurant une procédure commune d'échanges d'informations sur les possibilités de diminuer l'impact sur l'Environnement des dispositifs de refroidissement. Les études menant à ce projet de décision ont été basées pour une bonne partie sur le contenu du rapport du Groupe Ecosystème de la Commission d'Evaluation Belge en Matière d'Energie Nucléaire.

Cet exemple est évidemment la meilleure preuve de la valeur, internationalement attribuée, aux travaux effectués, à titre gracieux par nos plus grands experts. Qu'il me soit donc permis de remercier en public, devant une assemblée aussi versée en la matière, les experts du groupe " Ecosystèmes ", Messieurs BILLEN, HUBLE, JEUNIAUX, MALET, MICHA, SMITZ, STERLING, VANDERBORGH, et tout spécialement Messieurs KIRCHMANN, BOURDEAU, CANTILON, DE CONINCK, ELSKENS, rapporteurs, pour l'aide inestimable qu'a constitué l'apport de leur compétence dans la réalisation de ce travail.

Je vous remercie de votre attention.

CALIBRATION OF DOSIMETERS.

Dr. P. PYCHLAU

Physikalisch-Technische Werkstätten, Freiburg.

15 october 1976

ABSTRACT

Dosimeters used in hospitals or for health physics purposes should be compared either directly or indirectly with the help of a reference instrument against primary standards in national laboratories.

During this comparison the instruments are irradiated in the useful beam of an X-ray machine or a radioactive source under precisely defined conditions in order to determine the chamber factor.

Finally a calibration certificate gives the chamber factor and describes as far as possible the conditions under which the comparison was carried out.

In the field the dosimeter is used very often under totally different conditions from those under which it was irradiated in the calibration laboratory.

In this paper the user of a dosimeter is told to decide with the help of the calibration certificate how far the dosimeter is capable for solving the measuring problem or what correction factors must be applied to the reading of the instrument.

In the great field of application of ionizing radiation in medicine, industry, and research it is common to use dosimeters to measure the exposure or exposure-rate. These dosimeters are in general calibrated by comparison against reference instruments which might be primary standards or secondary standards. Without any doubt one can say that the circumstances under which a field instrument is compared against a standard differs against the circumstances under which later-on the field instrument measures an unknown exposure or exposure-rate in the hospital, the factory or the research institute. Before a measurement is carried out in the field the user, therefore, must clarify what informations he can get from the calibration certificate and how this can be used for the measuring problem he is facing.

Mostly a field instrument is compared against a secondary standard and only the secondary standard is compared against the primary. The comparison against a primary standard is generally done in a national laboratory, specially designed for that purpose. The people working there know exactly how to make this comparison, but it can not be expected that they also

know all the different measuring tasks in the field.

The situation differs often when the comparison is made between the secondary standard and the field instrument. During this comparison one tries to imitate as far as possible the conditions in the national laboratory, but on the other hand knows how far these conditions differ from the later on purpose for which the field instrument is calibrated, which, for example, might be the measurement of depth dose distribution in a water phantom.

Figure 1 shows a simple setup for a comparison of a field instrument against a secondary standard. Both instruments are positioned on a sliding table so that the ionization chambers can be brought alternatively into the useful beam.

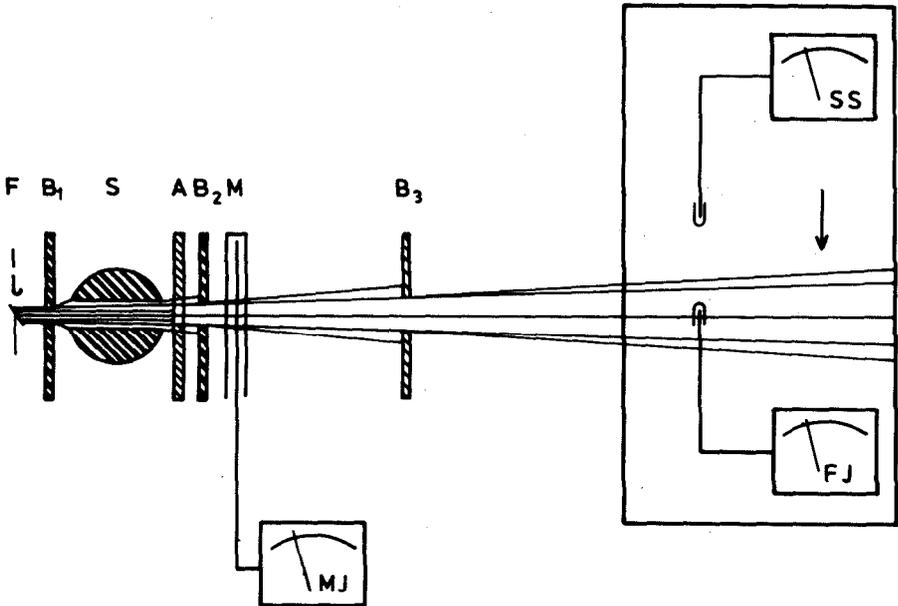


Fig. 1.

From the focus (F) the Bremsstrahlung passes the first diaphragm (B₁) and then the shutter (S) which is in the position " open ". This shutter is, for example, a rotating cylinder with a hole rectangular to the rotating axis. Turned by 90° the material of the shutter is thick enough to absorb the Bremsstrahlung by more than 99.9 %. Behind the shutter is the filter (A), for example 1 mm Cu in case of 100 kV Bremsstrahlung. The second

diaphragm (B_2) again reduces the field size. The transmission chamber (M) is connected to a monitor instrument (MI). The last diaphragm (B_3) also reduces the field size and keeps the penumbra around the useful beam as small as possible. A too short distance between the last diaphragm and the ionization chamber under comparison may result in unwanted scattered radiation from the edges of the diaphragm on the ionization chamber.

A complete exposure or exposure-rate meter for reliable measurements consists of the ionization chamber, the display unit and the radioactive check device which allows to measure the longterm stability of the whole apparatus. The comparison of a field instrument against a secondary standard should be therefore carried out in the following way :

1. Measurement of check time ;
2. Comparison against standard ;
3. Measurement of check time, again.

The use of the radioactive check device normally means to introduce the ionization chamber into the device and then measure the time for a certain reading in case of an exposure meter or read directly the indication in case of an exposure-rate meter.

Table I.

CALIBRATION CONDITIONS :

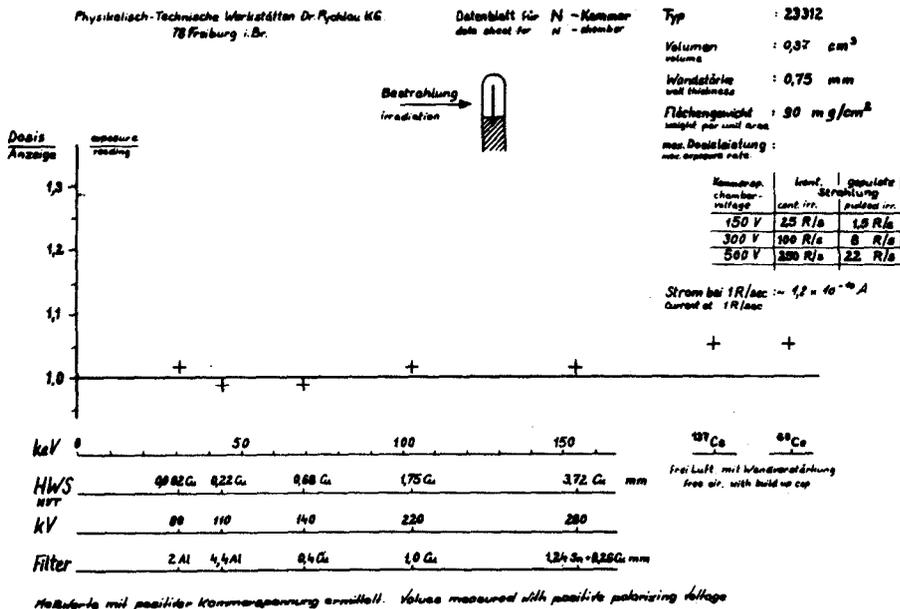
Energydependence
 Directiondependence
 Max. Exposure rate (Saturation)
 Max. Exposure per puls (Saturation)
 Min. Exposure rate (Leakage)
 Focus (Source) — Chamber distance
 Fieldsize (Radiation induced leakage)
 Airdensity (Temperature, Pressure)

Table I shows a list of informations which should be given in a calibration certificate to give user the possibility to see how the conditions during the calibration differ from the conditions when he uses the dose-meter.

1. Energy dependence.

Figure 2 shows a typical data sheet which gives information about one type of thimble chamber. Beside the figures for volume, wall thickness and maximum exposure-rate a diagramme shows the energy dependence of the cali-

bration factor.



Werte mit positiver Kammeranpassung ermittelt. Values measured with positive polarising voltage

Fig. 2.

In the abscissa one sees four different scales from which the conditions can be seen for the different measuring points. For example, a tube potential of 220 kV, a filter of 1 mm Cu was used, which gave a H.V.T. of 1.75 mm Cu. This corresponds to monoenergetic photons with 103 keV having the same H.V.T. For this Bremsstrahlung (220 kV, 1 mm Cu) a calibration factor of 1.02 was measured. If the user wants now to measure the depth dose distribution for a 200 kV Bremsstrahlung he obviously can use the factor 1.02 at the surface of the phantom. As the amount of scatter radiation increases in the depth, it is doubtful if this factor can be used or 1.01 or even 1 should be used, because for 140 kV Bremsstrahlung one can see that the calibration factor decreases to 0.96.

From depth dose tables one knows that for a field size of 10 cm by 10 cm in 15 cm depth we have 17 %, whereagainst for the extrapolated field size zero we have in 15 cm depth only 5 % depth dose. This means that in 15 cm depth for this Bremsstrahlung one third is unscattered primary radiation and two thirds are scattered radiation of lower energy.

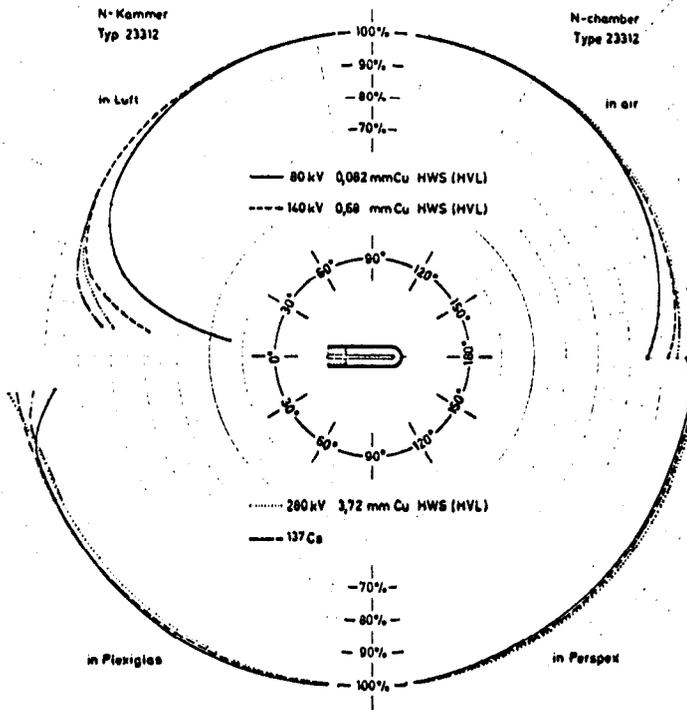
2. Direction dependence.

Figure 3 shows for the same type of ionization chamber the directional dependence.

Richtungsabhängigkeit

Directional Dependence

	6°	12°	18°	24°	30°	60°	90°	120°	150°	162°	174°	180°
80 kV	44.1	65.6	80.2	87.5	92.5	99.7	100.0	99.6	96.1	93.0	88.7	85.4
140 kV	68.7	82.9	92.2	95.0	97.4	99.7	100.0	99.4	97.7	96.5	94.5	91.9
280 kV	79.9	87.1	93.1	95.5	97.5	99.5	100.0	99.7	98.5	97.4	96.1	94.9
¹³⁷ Cs	83.2	91.1	94.6	96.0	97.1	99.4	100.0	99.4	97.5	96.8	96.0	94.6



	6°	12°	18°	24°	30°	60°	90°	120°	150°	162°	174°	180°
80 kV	97.2	104.3	106.4	105.9	105.4	103.0	100.0	97.8	98.1	98.8	99.4	97.1
140 kV	109.0	108.0	106.9	106.1	105.3	101.8	100.0	98.8	98.9	99.6	100.3	99.8
280 kV	111.3	107.1	105.0	104.2	103.3	101.2	100.0	99.4	100.0	100.6	101.2	100.6
¹³⁷ Cs	104.0	106.4	104.6	104.0	103.5	101.1	100.0	99.9	100.8	101.3	101.8	101.0

Fig. 3.

In this polar diagramme the upper part shows the directional dependence of this chamber type in air, whereagainst the lower part shows it in perspex. The chamber normally is compared against a standard in air irradiated under 90° , and from the diagramme one can see that for the range of 80 kV Bremsstrahlung to Caesium 137 (and also Cobalt 60) the chamber can be tilted from 60° to 120° with a change in response less than $\pm 0.3\%$. If the chamber is irradiated under 30° with 80 kV Bremsstrahlung it can be seen that the response decreases to 92.5 % which means that part of the photons are absorbed in the cable connected to the measuring volume. The situation differs completely when the chamber is used in a phantom. Here the cable material differs not very much from the material of the phantom and therefore the absorption around the ionization chamber is more equalized. In fact the cable has a different influence if one, for example, sees that the response increases to 111.3 % for a radiation under 6° with 280 kV Bremsstrahlung, because here little air gaps in the cable reduce the absorption.

Very often this influence of the cable is over-estimated because this polar diagramme shows it more dramatically than it affects the reading. This easily can be understood if one thinks of rotating the upper half of the polar diagramme which has then roughly the shape of an apple, and one easily sees that the part of the surface where the stalk is, is small compared against the whole surface of the apple.

3. Exposure-rate dependence.

Beside the energy dependence and the direction dependence the most important point is the range of exposure-rate in which an ionization chamber can be used. In general comparison of ionization chambers against standards are made with continuous radiation from X-ray machines or cobalt-sources. In this case the saturation conditions in the ionization chamber give the maximum exposure-rate under which the chamber can be used. This is described in great details by Boag (1). In case the field instrument is used to measure exposure in a radiation beam from an accelerator which delivers pulsed radiation, one has to calculate from the geometrical dimensions of the measuring volume and the polarizing voltage the maximum exposure per radiation pulse for certain saturation conditions (1). In some cases this information is given by the manufacturer. This calculation is easy as long as the time of the radiation pulse is short against the time

for collecting the ions in the chamber and this is short against the repetition time of the pulses.

The minimum exposure-rate is influenced by the leakage current and the wanted resolution of the reading. If, for example, an exposure-rate meter has a 4-digit display and a resolution of 1 % is wanted, then the smallest exposure-rate which can be measured in accordance with this requirement corresponds to the reading 0100. If also a leakage current is observed which corresponds to the reading 0005 and it is furthermore required that the smallest exposure-rate measured should not be influenced by more than 1 %, then the smallest reading with respect to this requirement is 0500. That means, before one can decide what the smallest exposure-rate is, first a measurement of the leakage current must be made. The leakage current itself might be influenced by air humidity which causes a current across the insulators and by a radiation induced current from irradiated cables which are near the ionization chamber in the useful beam. The longer this irradiated part of the cable is, the more current will be produced, which means that also the field size may influence the minimum exposure-rate, which can be measured fulfilling certain requirements.

4. Focus-chamber distance.

In the calibration certificate also the reference point must be mentioned to which the calibration factor is related. This point normally is on the symmetry axis of a thimble chamber or the centre of a spherical chamber. In the calibration certificate also the focus distance must be mentioned, that the user is able to calculate if the exposure-rate gradient in the volume of the ionization chamber differs considerably from the conditions under which the chamber was calibrated. If, for example, in 50 cm focus distance an ionization chamber with 1 cm diameter was calibrated, then with respect to the centre, the exposure-rate on the side of the chamber near to the focus was greater by 2.01 % (49.5 cm focus distance). Where-against the exposure-rate in 50.5 cm distance is smaller by 2.03 %. The difference is 0.02 % and therefore negligible.

The situation differs in the special case of membrane chambers, often used for soft X-rays. These chambers are for example calibrated in 30 cm focus distance and used in 5 cm focus distance. A typical chamber for that purpose might have a depth of 5 mm. The difference of exposure-rate in the chamber volume in 30 cm is 0.014 % and also neglectible, but for

5 cm the difference is 0.55 % and might influence the measurements.

5. Field size dependence.

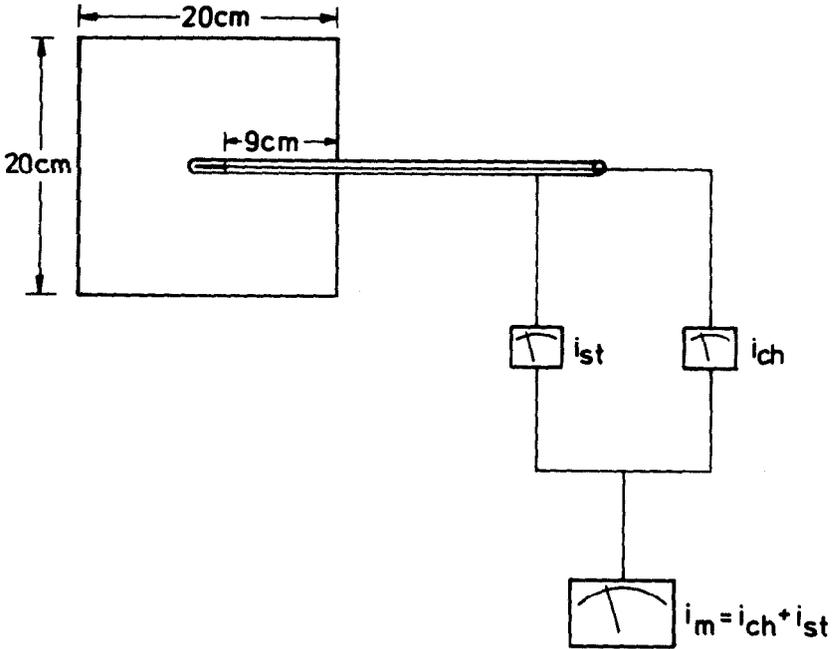


Fig. 4.

Figure 4 shows a thimble chamber of 1 cm diameter and 2 cm length in a centre of a field 20 cm x 20 cm. That means that 9 cm of the cable are irradiated and the current measured i_m is the sum of the current from the measuring volume of the chamber i_{ch} and the current from the irradiated part of the cable or stem i_{st} . The chamber might be irradiated with an exposure-rate of 1 R/s which produces a current in the chamber of 3.3×10^{-10} A. Each centimeter of the cable irradiated might give 3×10^{-13} A, which means that the current coming from the whole length of the irradiated cable is 2.7×10^{-12} A, which is 0.8 % of the chamber current. The reading of the instrument therefore is 0.8 % too great. Furthermore current might be produced by irradiating the insulator in the ionization chamber. Also scatter radiation coming from the irradiated stem or cable may cause an additional current in the measuring volume. For my feeling these two later influences have not importance because when

the chamber was calibrated it happened in the same way.

6. Air density dependence.

Often ionization chambers are used for intracavitary measurements, that means in a medium with a temperature of approx. 37° C which might be 10° or 15° warmer than room temperature under which the chamber was calibrated and checked.

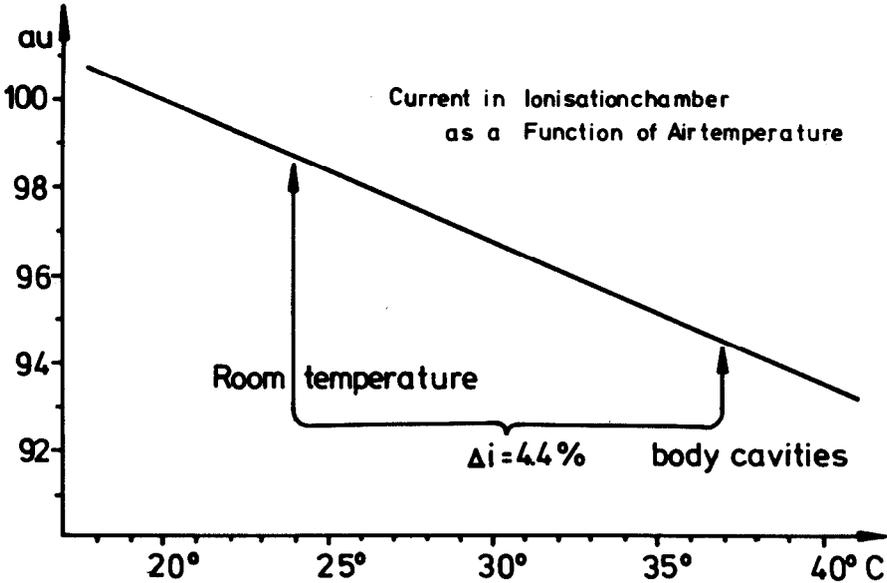


Fig. 5.

Figure 5 shows the current produced by a constant exposure-rate and constant air-pressure for different air temperatures in the ionization chamber. For a room temperature of 24° C and a body temperature of 37° C the difference in air density is 4.4 % and therefore a current produced at the higher temperature is smaller by 4.4 %. The chamber used under such circumstances must be checked for being sealed or " open ". In case of a sealed chamber the rise of temperature will not change the number of molecules in the measuring volume, but in case of an " open " chamber one must make an assumption how far the gas volume in the chamber will rise from room temperature to body temperature and how this may influence the measurements.

It is obvious that the so-called sealed chamber is the more comfortable

one, but it must be considered that from the material which is in general used for the construction of ionization chambers it is very doubtful that such chambers are really sealed for long periods of time. It therefore is sufficient to have an ionization chamber which fulfils the following requirements.

1. Before using the chamber in body cavities the check time is measured at room temperature with the radioactive check device.
2. The ionization chamber is introduced into the body cavity and the measurement is made for example over a period of one working day (8 hours).
3. The check time is measured as under 1) immediately after finishing the intracavitary measurement and no difference against 1) should be observed.

Finally in the calibration certificate the check time for an exposure meter is given. One should not forget that also this check time is influenced by leakage current which might differ between the day when the calibration was made and the day when the field instrument is used for a measurement. As the current in the chamber produced by the check device differs from the current produced in the X-ray beam the influence of the leakage current on both is different. For these reasons the calibration certificate also should give a leakage current for the whole dosimeter at the day of calibration.

I want to summarize the uncertainties coming from the different conditions. It may come for example from :

1. Energy dependence	1.5 %
2. Direction dependence	0.5 %
3. Exposure-rate dependence	0.5 %
4. Radiation induced leakage (field size)	0.5 %
5. Change in air density	0.5 %

Of course not all these uncertainties can be just added because they may compensate each other partly. But the square root of the sum of quadrature gives an uncertainty of ± 1.8 %. This is a figure which in some cases is negligible, but not always. At the end it must be said that a number of other influences might come up from the measuring circumstances, for example dose distribution in the object. I only wanted to mention the most common, but often overlooked influences.

SUMMARY : CALIBRATION OF DOSIMETERS.

Dosimeters used in hospitals or for health physics purposes should be compared either directly or indirectly with the help of a reference instrument against primary standards in national laboratories.

During this comparison the instruments are irradiated in the useful beam of an X-ray machine or a radioactive source under precisely defined conditions in order to determine the chamber factor. Finally a calibration certificate gives the chamber factor and describes as far as possible the conditions under which the comparison was carried out.

In the field the dosimeter is used very often under totally different conditions from those under which it was irradiated in the calibration laboratory.

In this paper the user of a dosimeter is told to decide with the help of the calibration certificate how far the dosimeter is capable for solving the measuring problem or what correction factors must be applied to the reading of the instrument.

RESUME : CALIBRATION DES DOSIMETRES.

Les dosimètres utilisés dans les hôpitaux ou pour des besoins de radioprotection devraient être comparés directement ou indirectement à l'aide d'instruments de référence, à des étalons primaires, dans des laboratoires nationaux. Pendant cette comparaison, les instruments sont irradiés dans le faisceau utile d'un générateur de rayons X ou d'une source radioactive dans des conditions bien définies pour déterminer le facteur de chambre. Finalement, un certificat de calibration donne le facteur de chambre et décrit autant que possible des conditions dans lesquelles la comparaison a été effectuée.

En pratique, le dosimètre est utilisé très souvent dans des conditions totalement différentes de celles dans lesquelles il a été irradié au laboratoire de calibration.

Dans cette communication, l'utilisateur d'un dosimètre est mis à même de décider à l'aide d'un certificat de calibration jusqu'où le dosimètre est capable de résoudre les problèmes de mesure et quels facteurs de corrections il doit appliquer à la lecture de l'instrument.

SAMENVATTING : KALIBRATIE VAN DOSISMETERS.

Dosismeters, gebruikt in klinieken of voor de stralingsbescherming, zouden met behulp van een referentie instrument op directe of op indirecte wijze moeten vergeleken worden met primaire standaarden in nationale laboratoria.

Gedurende deze vergelijking worden de instrumenten bestraald in de nuttige bundel van een röntgentoestel of van een radioactieve bron onder nauwkeurig bepaalde voorwaarden om de kamerkonstante te bepalen.

Uiteindelijk geeft een calibratiecertificaat de kamerkonstante evenals een zo goed mogelijke beschrijving van de voorwaarden waaronder de vergelijking werd uitgevoerd.

In de praktijk wordt de dosimeter zeer vaak gebruikt onder totaal andere voorwaarden dan deze bij de bestraling in het calibratiecentrum.

In dit artikel wordt aan de gebruiker duidelijk gemaakt om met behulp van het calibratiecertificaat te beslissen in hoeverre een dosimeter bruikbaar is voor het oplossen van een meetprobleem of welke correcties moeten uitgevoerd worden op het rechtstreeks afleesbaar meetinstrument.

ZUSAMMENFASSUNG :

Dosimeter, die in der Klinik, aber auch Dosimeter die im Strahlenschutz verwendet werden, müssen entweder direkt oder über Referenz-Dosimeter gegen ein National-Standard verglichen werden. Bei diesem Vergleich wird der Kammerfaktor bestimmt. Die Bestimmung des Kammerfaktors geschieht im Nutzstrahl einer Röntgenapparatur oder einer radioaktiven Quelle unter streng definierten Bedingungen. Über diesen Vorgang wird ein Prüfprotokoll ausgestellt, in dem Kammerfaktor angegeben ist und die dabei benutzten Bedingungen möglichst genau beschrieben sind.

Bei der Benutzung des Dosimeters in der Klinik oder im Strahlenschutz weichen die Verhältnisse unter denen das Dosimeter bestrahlt wird, oftmals wesentlich von denen im Kalibrierlabor ab.

In dem Aufsatz wird der Benutzer darauf hingewiesen, mit Hilfe des Prüfprotokolls abzuschätzen, wie weit sein Dosimeter für die zu lösende Messaufgabe geeignet ist und welche Korrekturen gegebenenfalls angewendet werden müssen.

BIBLIOGRAPHY

(1) BOAG, J.W., Ionization chambers. Radiation Dosimetry, Vol. 2. Academic Press Inc. , New York, 1966.

ABSOLUTE EXPOSURE MEASUREMENTS IN THE NETHERLANDS IN THE 10 - 250 kV X-RAY REGION AND FOR ^{60}Co -GAMMA RAYS.

G.H. HOFMEESTER and A. SOMERWIL

Rijks Instituut voor de Volksgezondheid (RIV), Bilthoven.

15 october 1976

ABSTRACT

A short review is given of the corrections and their uncertainties involved to define the absolute exposure for 10-250 kV X-rays and ^{60}Co gamma rays.

In the region 10-50 kV X-rays a direct comparison was made between RIV and the Bureau International des Poids et Mesures. A direct comparison of the ^{60}Co gamma exposure standards was also made, followed by an indirect comparison for X-rays generated at 100, 135, 180 and 250 kV. The difference in exposure standards for BIPM and RIV is less than 0.25 % for 10, 30, 135, 180 and 250 kV X-rays and for ^{60}Co gamma rays. For 50 and 100 kV X-rays these differences are 0.5 and 0.7 %.

1. The exposure standard in the 50-250 kV region.

The parallel plate free air chamber was described by Somerwil (1959). The height of the collector electrode is 32 cm, the distance between the parallel plates is 30 cm and the distance between the plane of reference (diaphragm) and the center of the 10 cm wide collector is 52 cm. The X-ray tube at RIV is a large Philips calibration tube with 1 mm Be inherent filtration. The target is 6 x 6 mm and the chamber diaphragm aperture has a diameter of 1.0061 cm. The correction for attenuation of the photons along the 52 cm path in the chamber is measured at RIV by varying the air pressure in a variable pressure tube.

The ionization caused by electrons which originate from scattered photons, gives rise to a correction K_s for loss ionization due to recombination. This was found by linear extrapolation of the measured values $1/I$ to zero value of $1/V$. The standard is normally operated at $V = 6,000$ volt between the plates, giving a field strength of 200 volts per cm. Transmission of radiation through the limiting aperture gives rise to a correction K_1 and has been measured by means of interception of the primary photon beam through the aperture. Transmission through the front wall of the standard

Table I.

Correction factors and their uncertainties.

Tube tension kV	100	-	135	-	180	-	250	-
Filtration 1 mm Be + mm Al	3,640	-	1,004	-	1,004	-	1,004	-
+ mm Cu	-	-	0,291	-	0,591	-	1,764	-
1st HVT in mm	4,027	Al	0,505	Cu	1,003	Cu	2,488	Cu
2nd HVT in mm	5,949	Al	0,826	Cu	1,634	Cu	3,261	Cu
Homogeneity	0,61	-	0,61	-	0,61	-	0,76	-
1 BAR - 20°C								
Air attenuation coefficient m^{-1}	0,0362	± 0,0005	0,0241	± 0,0004	0,0198	± 0,0002	0,0171	± 0,0004
K_R polarity effect	1,0001	± 0,04 %	1,0001	± 0,04 %	1,0002	± 0,04 %	1,0003	± 0,04 %
K_S recombination loss	1,0010	± 0,1 %	1,0010	± 0,1 %	1,0010	± 0,1 %	1,0010	± 0,1 %
K_L aperture transmission	1,0000	-	1,0000	-	0,9995	± 0,05 %	0,9990	± 0,05 %
K_P wall transmission	1,0000	-	1,0000	-	1,0000	± 0,03 %	0,9995	± 0,03 %
K_e electron dissipation	1,0000	± 0,00 %	1,0000	± 0,00 %	1,0010	± 0,1 %	1,0027	± 0,1 %
K_{sc} ionization gain	0,9916	± 0,1 %	0,9928	± 0,1 %	0,9933	± 0,1 %	0,9939	± 0,1 %
K_d field distortion	1,0000	± 0,2 %	1,0000	± 0,2 %	1,0000	± 0,2 %	1,0000	± 0,2 %
K_h humidity	1,0000	± 0,1 %	1,0000	-	1,0000	-	1,0000	-
Beam diameter (cm)	10,5	-	10,5	-	10,5	-	10,5	-
X (180 cm) at 4 mA tube current (R/m)	1,6	-	1,1	-	1,6	-	1,6	-

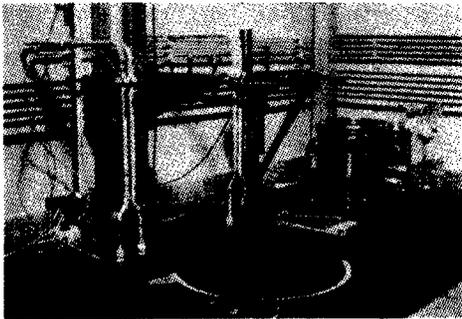
was measured (K_p) using a blind diaphragm.

The four radiation qualities that were used to compare the RIV standard with the BIPM standard are given in table I together with their uncertainties.

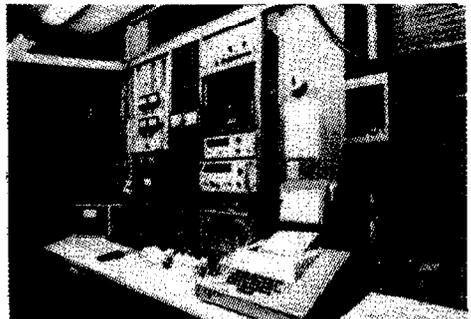
The uncertainties of the contributing parameters for the RIV exposure standard (50-250 kV) are listed in table II.

Table II. — Estimated uncertainties in a measurement made with the RIV exposure standard (50-250 kV).

		Relative uncertainty in percent
Collected charge	— potential	0.03
	— capacitor	0.03
Air volume	— diaphragm	0.01
	— collector	0.33
Polarity		0.02
Alinement	— collector plates	0.1
	— diaphragm	0.1
Air density	— pressure	0.03
	— temperature	0.02
Humidity		0.1
Saturation of ion collection		0.1
Scattering of photons by air		0.1
Inadequate plate separation		0.1
Attenuation by air in the standard		0.05
Penetration of radiation through diaphragm		0.05
Penetration of radiation through front wall		0.03
Collector potential		0.05
Leakage current		0.02
Sum		0.97 %
Square root quadratic sum		0.27 %



View of the gamma-radiation facility with exposure standard and climate-chamber for measurements in air with controllable humidity.



Control panel and ionization charge measurement device.

BIPM - RIV Comparison

The comparison with the BIPM standard was done indirectly with the aid of the transportable secondary standard NE-2550.

The estimated uncertainties in the determination of a calibration factor at RIV are given in table III.

Table III. - Estimated uncertainties in the calibration procedure.

	Percent
Exposure standard (linear sum)	0,97
Monitoring during calibration	
Volume fluctuation	0,1
Air density	0,08
Charge measurement	0,1
Distance	0,1
Stray radiation	0,1
Precision transfer instrument	0,2
Total sum	1,65 %
Square root quadratic sum	0,40 %

When the calibration factor is determined at BIPM the total uncertainty depends once more on the precision of the transfer chamber, the accuracy of the BIPM standard and the measurement conditions. The comparison results are summarized in table IV.

Table IV. - $\sigma R/R$ is the short-term standard error from the stated number of measurements.

Tension	$\frac{X_{BIPM}}{X_{RIV}}$	$\left[\frac{\sigma R}{R}\right]_{RIV} \cdot 10^3$	Number of sets (RIV)
100 kV	0,9929	1,2	10
135 kV	0,9980	1,3	17
185 kV	0,9987	1,6	15
250 kV	1,0010	1,4	8

2. The exposure standard in the 10-50 kV region.

The standard is a Greening type (1960) parallel-plate free-air chamber with a guard ring to ensure uniformity of the electric field in the collecting region. The standard has the following specifications :

Collecting potential	1600 V
Plate separation	4,0 cm
Collecting plate height	5,2 cm

Collecting plate width	1,0018 cm
Limiting aperture diameter	0,4996 cm
Measuring volume	0,1964 cm ³
Air attenuation path length	3,85 cm

The X-ray tube used at RIV is a Machlett type OEG-60 with 1.5 mm Be inherent filtration.

The ionization charge is measured by the Townsend method and a semi-automatic compensation device.

Table V. — Correction factors and their uncertainties.

Tube potential	10 kV	30 kV	50 kV
K_{sc}	0,99 ₆ ± 0,2 %	0,99 ₇ ± 0,2 %	0,99 ₈ ± 0,2 %
K_e	1,00 ₀ ± 0,1 %	1,00 ₀ ± 0,1 %	1,00 ₅ ± 0,2 %
K_s	1,000 ± 0,04 %	1,000 ± 0,03 %	1,000 ± 0,01 %
K_d	1,00 ₀ ± 0,2 %	1,00 ₀ ± 0,2 %	1,00 ₀ ± 0,2 %
K_f	1,000 ± 0,04 %	1,000 ± 0,2 %	1,000 ± 0,05 %

The correction factor K_e for the 50 kV radiation was estimated from the data of Ritz (1959). The correction factors K_1 (aperture transmission) and K_p (wall transmission) were taken to be unity with negligible uncertainties. K_f is the correction for the polarity of the collecting potential. A direct comparison with the low-energy X-ray exposure standard of the BIPM was made in 1968. Details of the BIPM standard are given by Boutillon (1963).



RIV exposure standard installation for high-energy X-ray measurements.

The measurement conditions during the BIPM comparison.

Tube tension (kV)	10	30	50
Filtration mm Be	~ 2,9	~ 2,9	~ 2,9
Filtration mm Al	—	0,2082	3,989
Filtration mg cm ⁻² air	59,4	59,4	59,4
1st half-value layer	~ 36 μm Al	~ 0,176 mm Al	~ 2,257 mm Al
μ, air attenuation coefficient	1,79 % mm ⁻¹	0,42 % mm ⁻¹	0,046 % mm ⁻¹

The diaphragms were separately ionometrically compared and the mean ratio for the three qualities (10 kV, 30 kV and 50 kV) was 0.9995.

Table VI. — Comparison results.

	10 kV	30 kV	50 kV
$\frac{X_{\text{BIPM}}}{X_{\text{RIV}}}$	1,0036	1,0036	1,0052
Number of measurements	8	9	7
Long-term standard deviation of the mean	0,03 %	0,02 %	0,03 %

After the comparison the correction for scattered radiation was reconsidered because of the different geometry of the BIPM (and Canadian) and RIV (and NBS) chambers.

A special grid chamber was constructed at RIV to investigate the influence of the beam path length in free air chambers (Somerville, 1972). As a result the differences at 10 kV and at 30 kV were lessened by 1.5 % and 0.5 %, respectively.

3. Exposure measurements of high energy gamma rays.

The absolute determination of exposure for ^{60}Co gamma radiation is accomplished in the RIV with two graphite cavity chambers.

One chamber is spherical, the second is cylindrical. The wall thickness can be varied in 5 steps from 0.361 g/cm² to 1.082 g/cm².

Table VII. —

Chamber	Cylindrical	Spherical
Volume	2,428 cm ³	4,845 cm ³ ± 0,01 %
Inner diameter	12 mm	21 mm
Outer diameter	20 mm	29 mm
Collecting potential	± 250 V	± 250 V
Normal wall thickness	0,722 g/cm ²	0,722 g/cm ²

The relation of exposure rate and ionization is given by the formula :

$$X = \frac{C(\Delta V/\Delta t)}{v\rho} \cdot \frac{(S/\rho)_c}{(S/\rho)_{\text{air}}} \cdot \frac{(\mu_{\text{en}}/\rho)_{\text{air}}}{(\mu_{\text{en}}/\rho)_c}$$

$$\cdot K_1 \cdot K_s \cdot K_h \cdot K_{st} \cdot K_{at} \cdot K_{ccp} \cdot K_{an} \cdot K_{rn} \quad (1)$$

where :

C is the capacitance to determine the collected charge ;
 $\Delta V/\Delta t$ is the rate of change of the potential of the capacitor, in volts per second ;

v is the volume of the cavity chamber ;

ρ is the air density under measurement conditions ;

(S/ρ) is the average mass collision stopping power for the materials graphite or air ;

(μ_{en}/ρ) is the mass energy absorption coefficient ;

K_1 is the correction for leakage current ;

K_s is the correction for loss of ionization due to recombination ;

K_h is the correction for the influence of water vapor in air ;

K_{st} is the correction for photon scattering of the chamber stem ;

K_{at} is the correction for photon attenuation in the wall to zero wall thickness ;

K_{ccp} is the factor which replaces the point of extrapolation from zero wall thickness to the mean center of electron production ;

K_{at} overestimates the photon attenuation ;

K_{an} is the correction for axial non-uniformity of the beam and is in our case taken to be unity ;

K_{rn} is the correction for radial non-uniformity of the photon beam.

The exposure rate is given at the reference plane (middle plane in our case) in the absence of the chamber.

The stopping power ratio was calculated following the Spencer-Attix theory (1) with a cut-off energy of $\Delta = 22$ keV for the cylindrical chamber and $\Delta = 30$ keV for the spherical chamber and with mean excitation-ionization potentials (2) $I_{air} = 86.8$ eV and $I_c = 78$ eV.

These I-values were used during BIPIM-RIV comparison in 1972, however the stopping power ratios for the RIV chambers are from 1973 based upon the latest I-values (3, 4).

Table VIII. — Correction factors and constants.

	Cylindrical chamber	Spherical chamber
K_{at}	1,021 ± 0,2 %	1,026 ± 0,2 %
K_{ccp}	0,995 ± 0,2 %	0,995 ± 0,2 %
K_s	1,0031 ± 0,03 %	1,0022 ± 0,03 %
K_{st}	0,9980 ± 0,05 %	0,9990 ± 0,05 %

$(S/\rho)_c$	$1,0068 \pm 0,5 \%$	$1,0064 \pm 0,5 \%$
$(S/\rho)_{air}$		
$(\mu_{en}/\rho)_{air}$	$0,9993 \pm 0,05 \%$	$0,9993 \pm 0,05 \%$
$(\mu_{en}/\rho)_c$		

$I_{air} = 93$ eV and $I_c = 81,3$ eV. For the reason the stopping power ratio in formula (1) was increased by 0.28 %.

In 1972 a comparison was made between the cavity chamber of the Bureau International des Poids et Mesures and the RIV chambers.

The measurements were done at a distance of 112 cm from the source of ~ 300 Ci in a beam of ~ 10 cm diameter at an exposure rate of 5,25 R/m [23 μ A/kg].

The non-uniformity correction factors were under the circumstances :

$$K_{an} = 1,000 \pm 0.15 \% \text{ and } K_{rn} = 1,0007 \pm 0.03 \%$$

The results of the comparison between the BIPM and RIV standards are :

$$\frac{X_{BIPM}}{X_{RIV-cyl.}} = 1.0021 \quad \frac{X_{BIPM}}{X_{RIV-spher.}} = 1.0008$$

The standard deviation of the ratio is in both cases 0.0070 %. The systematic uncertainties of the comparison are the following :

Table IX. — Systematic uncertainties in cavity chamber comparison BIPM/RIV.

Stopping power ratio	0.10 %
Capacity	0.01 %
Volume	0.10 %
Saturation	0.03 %
Stem influence	0.05 %
Non-uniformity radial	0.02 %
Non-uniformity axial	0.25 %
Wall correction	0.36 %
Sum	0.92 %
Square root quadratic sum	0.46 %

BIBLIOGRAPHY

- (1) SPENCER, L.V. and ATTIX, F.H., Radiation Research, 1955, 3, 239
- (2) BERGER, M.J. and SELTZER, S.M., Studies in penetration of charged particles in matter (Fano, U., Ed.). U.S. Nat. Acad. Sci., National Research Council, Washington D.C., Pub. 1133, p. 205, 1964.
- (3) DALTON, P. and TURNER, J.E., Health Phys., 1968, 15, 257.
- (4) TURNER, J.E., ROECKLEIN, P.D. and VORA, R.B., Health Phys., 1970, 18, 159.
- (5) SOMERWIL, A., J. Belge Radiol., 1959, 42, 87-91.
- (6) RITZ, V., Radiology, 1959, 73, 911.
- (7) SOMERWIL, A., Metrologia, 1972, 8, 2, 42-46.
- (8) BOUTILLON, M., HENRY, W.H. and LAMPERTI, P.J., Metrologia, 1969, 5, 1.
- (9) GREENING, J.R., Brit. J. Radiol., 1960, 33, 178.

RESUME

L'auteur donne un aperçu des corrections et de leurs incertitudes nécessaires pour définir l'exposition absolue à des rayons X de 10-250 kV et aux rayons gamma du ^{60}Co .

Pour des rayons X de la région 10-50 kV une comparaison directe est réalisée entre le R.I.V. et le Bureau International des Poids et Mesures. Une comparaison directe des étalons est aussi faite pour les expositions aux gamma du ^{60}Co tandis que pour les rayons X de 100, 135, 180 et 250 kV une comparaison indirecte est réalisée.

La différence entre les étalons d'exposition pour B.I.P.M. et R.I.V. est inférieure à 0,25 % pour les rayons X de 10, 30, 135, 180 et 250 kV et pour les rayons gamma du ^{60}Co . Pour les rayons X de 50 et 100 kV, ces différences sont de 0,5 % et 0,7 %.

SAMENVATTING

Er wordt een overzicht gegeven van de correcties en hun onnauwkeurigheden welke vereist zijn voor de absolute bepaling van exposie van 10-250 kV röntgenstraling en van ^{60}Co gammastraling.

Voor 10-50 kV röntgenstraling zijn de standaarden van het RIV en die van het Bureau International des Poids et Mesures (BIPM) direkt vergeleken, evenals de exposiestandaarden voor ^{60}Co gammastraling. De vergelijking voor röntgenstraling van 100, 135, 180 en 250 kV heeft indirect plaatsgevonden. Het verschil in standaarden is kleiner dan 0,25 % voor 10, 30, 135, 180 en 250 kV röntgenstraling en voor ^{60}Co gammastraling. Voor 50 en 100 kV röntgenstraling zijn deze verschillen resp. 0,5 % en 0,7 %.

ZUSAMMENFASSUNG

Es wird eine Übersicht gegeben über die für die Absolutmessung der Standardgleichgewichtionendosis von 10-250 kV Röntgen- und Kobalt-60-Gammastrahlung benötigten Korrekturfaktoren und deren Genauigkeit.

Für 10-50 kV Röntgenstrahlung und ^{60}Co -Gammastrahlung sind die Standard-

messkammern des R.I.V. mit denen des Bureau International des Poids et Mesures direkt verglichen worden ; für 100, 135, 180 und 250 kV war die Vergleichung indirekt. Die Differenz lag immer innerhalb 0,25 %, ausgenommen die Ergebnisse bei 50 und 100 kV Röntgenstrahlung wo sie 0,5 % bzw. 0,7 % betrug.

CALORIMETRIC STANDARD DEVICE FOR MEASUREMENT OF ABSORBED DOSE FOR HIGH ENERGY PHOTONS AND ELECTRONS.

K. HOHLFELD

Physikalisch-Technische Bundesanstalt Braunschweig.

15 october 1976

ABSTRACT

A calorimeter is described in detail designated for standard measurement of absorbed dose in graphite by photons with energies above 0.6 MeV and electrons with energies above 2 MeV. In the dose range above 0.5 Gy (50 rad) the total uncertainty is less than 0.5 % if due regard is given to the necessary corrections.

Temperature drift rates can be reduced below 10^{-6} K/min.

Three different methods using the calorimetric, ionometric and chemical principles to realize the unit of absorbed dose in water are compared to find systematic errors. For the direct determination of absorbed dose in water by calorimetry some preliminary experiments are carried out.

1. Introduction.

In the course of development of dose quantities absorbed dose now gained the position of being universally used as the basis of radiation dosimetry in medicine and biology. The magnitude of the unit of absorbed dose is till now established either by measurement of exposure or by available information on radiation yields in ionization or chemical processes. The situation is however changing since several national laboratories now put into operation absorbed dose calorimeters, and others have such calorimeters under design or construction or are assembling their devices. An intercomparison of absorbed dose calorimeters by the national primary standard laboratories at BIPM next year will confirm the development into this direction and so we can assume that the measurement system of absorbed dose will in future be based on calorimetric national primary absorbed dose standards. The application of absorbed dose calorimeters will be limited to photons with energies from about 0.6 MeV to the upper limit of interest in radiation therapy and for electrons from about 2 MeV.

2. The calorimeter.

In the following a calorimeter is described intended to serve as a primary standard device at the PTB to measure the absorbed dose in graphite. From the point of view of the radiologist the knowledge of absorbed dose in tissue is of main interest, or a least in water. Since till now absorbed dose determination in water by calorimetry is not yet realized because of a series of difficulties graphite was used for two main reasons :

a) Practically the whole energy imparted by radiation is converted into heat and can be measured. Chemical processes as possible in plastics cannot occur. Changes in the crystal lattice are practically of no influence.

b) The comparison with ionization measurements can be well done in a material like graphite, whose atomic number differs only a little from the effective atomic number of air.

By the definition of absorbed dose as a differential quantity a mass element the so called absorber must be thermally isolated at the point of concern in a large block of material, which is mostly demanded by dosimetric reasons.

The absorber should not be so great as to attenuate appreciably the flux density of the radiation within the absorber.

On the other hand the absorber cannot be made as small as desired, mainly owing to the ratio of heat transfer to heat capacity and the effect of foreign substances.

The thermal insulation of the absorber by vacuum gaps should not greatly alter the radiation field.

Owing to the small heat capacity of the absorber, the limited possibilities of its thermal insulation and the measuring time required for a sufficient rise in temperature caused by common radiation sources an adiabatic or quasiadiabatic mode of operation is recommended.

The radiation energy transmitted to the absorber is determined by comparing it with a precisely measurable amount of electrical energy supplied to the absorber. Equal amounts of radiation energy and electrical energy result in the same temperature increase supposed that.

1. the energies are fully converted into heat ;
2. the heat exchange between absorber and its surrounding materials is equal in both cases.

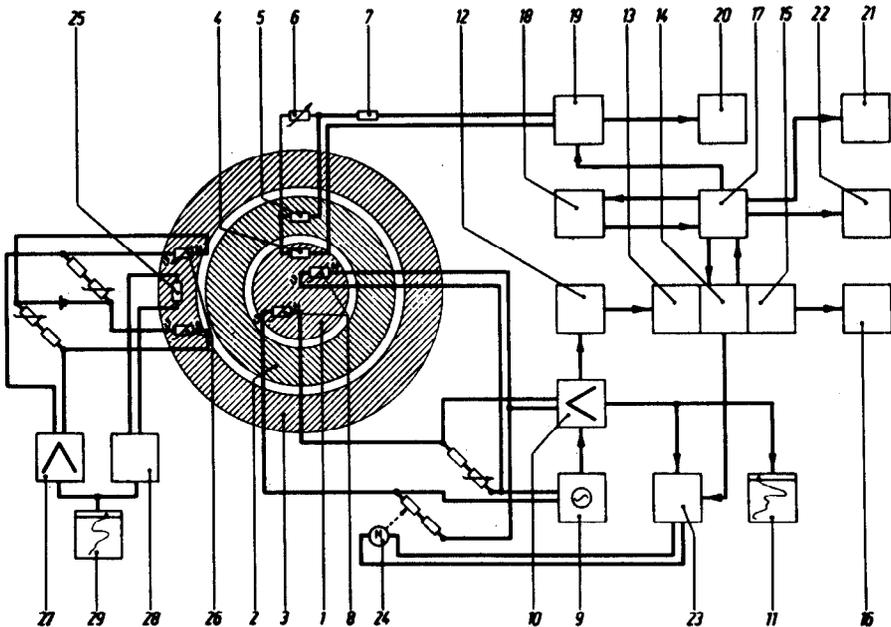


Fig. 1. - Block schematic of measuring, calibration and control circuits.

1 : absorber; 2 : jacket; 3 : mantle; 4 : resistive heater layer in absorber; 5 : resistive heater layer in jacket; 6 : shunt resistor to 5 adjust heater current; 7 : measuring resistor to determine heater current; 8 : thermistors to measure absorber temperature; 9 : R-C generator for bridge-voltage; 10 : lock-in-amplifier to measure bridge-balance-voltage; 11 : chart recorder; 12 : dvm; 13 : interface; 14 : cycle-programmer; 15 : interface to printer and puncher (teletype); 16 : teletype; 17 : control unit; 18 : timer clock; 19 : electrical heating; 20 : electrical power measuring; 21 : shutter; 22 : radiation switch; 23 : reset-unit; 24 : driven potentiometer; 25 : resistive heater for control circuit; 26 : thermistors in control circuit; 27 : d.c.-amplifier; 28 : on-off control; 29 : chart-recorder for control temperature.

Since the absorber and the surrounding is heated by almost equally distributed heat sources, when the energy is supplied by radiation owing to the only slight attenuation of the radiation, adiabatic behaviour is ensured. In the case of electrical heating a careful match of the heating rates has to be warranted. The large mass of the surrounding graphite prevents to fulfil this requirement with sufficient accuracy. Therefore a small part in the interior of the graphite block has been separated as jacket whose temperature can more easily be adapted to that of the absorber.

In addition the jacket strongly damps the effect of temperature differences in the surrounding material, the so-called mantle. The entire system thus consists of three parts the absorber, jacket and mantle, one inside the other (fig. 1).

The same heating current flows through absorber and jacket. The resistance heating layers in absorber and jacket are so chosen that the smallest possible temperature difference exists. The net heat exchange is thus largely brought to zero. With vanishingly small net heat exchange between absorber and jacket the temperature drift in the absorber remains constant. It can be found from the recorded temperature time curve before start and at the end of the measuring period. The absorber consists of two graphite discs 1.5 mm thick and 25 mm diameter. These two parts are glued together by a thin layer of epoxyresin mixed with graphite acting as a heating resistance layer for the comparative electrical heating. For thermal insulation the gaps between absorber and jacket and between jacket and mantle are evacuated. The graphite is coated with a 0.1 μm thin layer of vapour-deposited aluminium.

The three enclosing parts are suspended by 0.15 mm gauge nylon threads. The thermal capacity of the absorber is 1.8 J/K and the cooling constant $2 \cdot 10^{-3}$ /s.

The influence of absorber size was investigated. The gaps between absorber and jacket were varied from 2 to 0.5 mm. No change within the stated uncertainty of the measurement could be detected.

The complete device is contained in a vacuum vessel. To reduce the effect of fluctuation of room temperature this vessel was brought into an air-temperature controlled surrounding. Two small ventilators provide for the circulation of the air and each produces a basic heat of 10 W; two additional heating elements, each of 15 W, are switched on and off in a two point operation control governed by four thermistors distributed in the air mantle. By this arrangement, the air mantle is stabilized to a temperature lying about 10 degrees above the temperature of the surroundings. The duration of one switching period amounts to only 2 s, the amplitude of the temperature variation of the air mantle to some 10^{-2} K. The amplitude of the temperature variations extending to the absorber is 10^{-6} K.

3. Measuring calibration and control circuits (fig. 1).

Calibration circuit.

The electrical power is obtained from the voltage drop across a precision resistor with a compensator and also serves to obtain the adiabatic mode of operation.

Measuring circuit.

The increase in temperature in the absorber when electrical or radiation energy is supplied produces a change of resistance in a thermistor (relative change in resistance is about 4 % K).

Two thermistors are embedded in shallow bores at the absorber. A thin layer of araldit provides thermal contact and simultaneously the necessary electrical insulation. The time delay caused by this was found to be less than one second. The thermistors each form an arm of a Wheatstone bridge previously balanced. The bridge voltage caused by a temperature change is amplified by a lock-in-amplifier and recorded by a compensating recorder.

The sequence of the process of caloric measurement is automatized. During one measuring cycle—irradiation and electrical heating—the values of the temperature are punched on a tape and from these few hundred points of respective initial and final drifts the real temperature increases are obtained.

Control circuit.

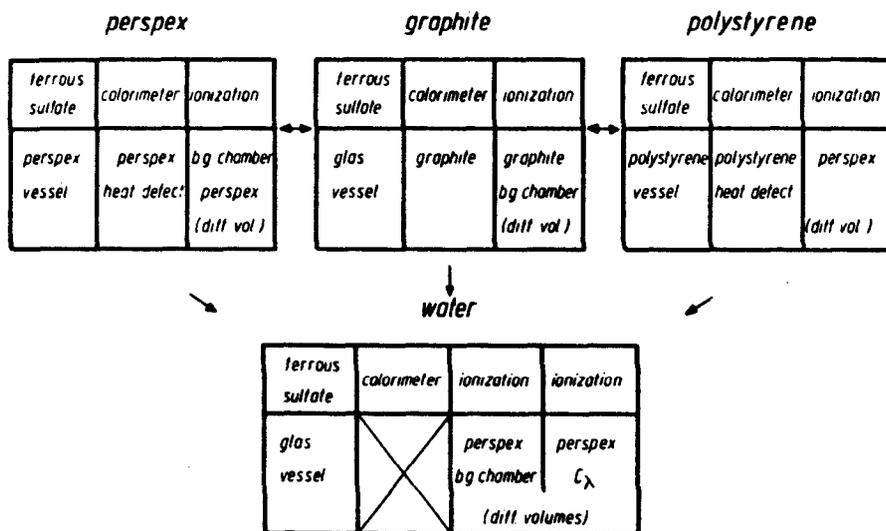
The mantle heating serves a double function : firstly it eliminates the very small fluctuations of temperature which would be passed on the interior of the calorimeter despite the maintenance of a constant ambient temperature. Secondly during electrical calibration it raises the temperature of the mantle by the same amount of temperature rise as expected in the absorber and it keeps the calorimeter at this new level. The temperature sensor in the mantle is a thermistor in a Wheatstone bridge too, balanced at the preset temperature. Owing to the intervening jacket any small difference in the heating rate has almost no effect. A short response time (less than one second) is obtained and large fluctuations of temperature are avoided by good thermal contact between thermistor and heater winding. The control amplitudes at the thermistor are $2 \cdot 10(-5)K$ and the longterm constancy of the mean temperature is better than $10(-5)K$.

4. Properties of the calorimeter.

Doses above 0.5 J/kg (50 rads) can be measured with an uncertainty of less

than 0.5 %.

Temperature drifts of less than $10(-6)K/min.$ can be achieved. In order to keep as small as possible any errors due to amplifier fluctuations, changes in the applied bridge voltage and a gradual rise in the temperature of the absorber account to the measuring procedure, the alternation between heating by radiation (measuring period) and electrical energy (calibration period) is repeated several times.



evaluation of absorbed dose in water for bremsstrahlung

Fig. 2.— Evaluation of absorbed dose in water. Determination of absorbed dose in different materials by different methods.

5. Corrections.

The energy imparted by the ionizing radiation to the absorber, has to be fully included by the measurement. For these requirement could not always be exactly satisfied deviations must be taken into account by corrections.

a) Correction for heat transfer.

With the quasiadiabatic calorimeter the residual transmission of heat is possible to determine in contrast to the adiabatic measurement. The heat transfer can be corrected using the same formalism as in case of calorimeters having a constant ambient temperature, i.e. to correct with the mean

drift during the heating period.

b) Correction for point measurement.

The center of the absorber is assumed to be the point of measurement. The dose generated at the center is not always equal to the mean dose as measured. The evacuated gaps (by changing the point of origin of the electrons liberated by photons) and any nonlinear attenuation may give rise to deviations.

For short distances between source and absorber or for the non isotopic distribution of bremsstrahlung the effect of lateral distribution of the dose becomes appreciable and must be considered.

c) Correction for foreign material.

Additional foreign material is introduced into the absorber, which consists of high-purity graphite, by the heating layer, the thermistors and the vapor-deposited aluminium. The coefficient of energy absorption and the electron stopping-power of the absorber are changed compared with the values for pure graphite by a factor of 0.998 for the used contaminations.

d) Energy not occurring as heat.

For graphite no corrections is required in contrast to plastics.

e) Correction for temperature gradients.

The temperature changes in the absorber are generally measured only at a point considered to be representative of the whole. Different temperature gradients on the surface of the absorber and the jacket during electrical and radiation heating lead to errors in the determination of the radiation energy.

f) Correction for inhomogeneity of graphite.

The density of graphite may change locally by small amounts.

6. Absorbed dose in water.

When the decision was made to build a calorimetric standard at the PTB the main aspect was to establish a possibility of calibration for high energy photon and electrons in graphite. But since then the aspects have changed and now it will be of main interest how to reach absorbed dose in a more commonly used phantom material e.g. water.

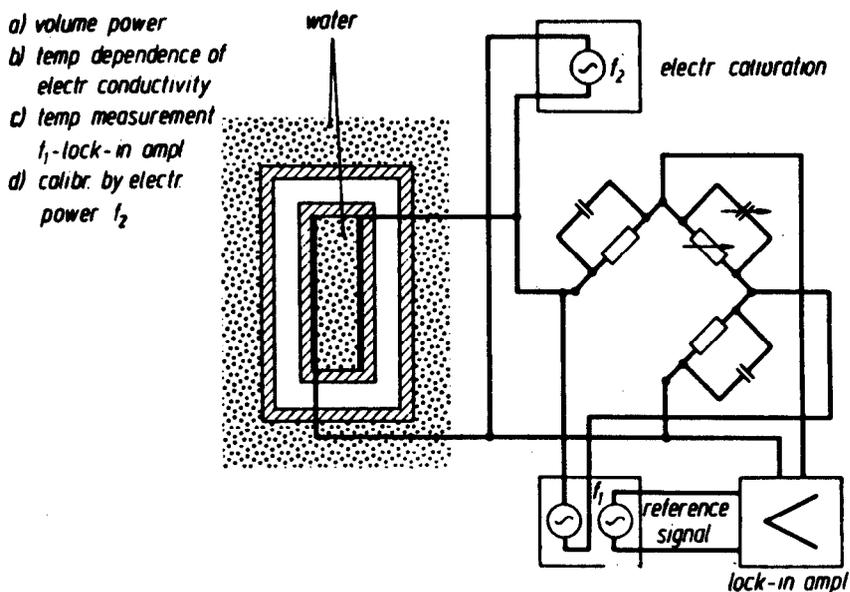


Fig. 3.— Direct determination of absorbed dose by a water calorimeter.

At high energy Bremsstrahlung of 42 MeV from the PTB-electron-synchrotron an intercomparison of the calorimetric, chemical and ionization method in different phantom materials is intended. In the same radiation field and at identical positions within the phantoms a direct determination of absorbed dose will be possible by three different methods, for graphite, perspex and polystyrene (fig. 2.). In water a direct measurement by calorimeter is not yet established. But the experimental results will support the calculations of transferring the absorbed dose from one material to the other.

For graphite the calorimeter is described in detail. As Bragg-Gray ionization chambers small graphite chambers of different volumes which are very well known (about 0.5 cm^3 , 1.5 cm^3 and 3 cm^3) will be used. These chambers serve at ^{60}Co -gamma-radiation as national primary standards of exposure and are internationally intercompared at the BIPM at Paris with the chambers of other national standard laboratories.

The Fricke solution is contained in glass vessels, fitting in the hole of the absorber in the jacket. Calorimeter systems of perspex and polystyrene allow direct determination of absorbed dose for the other phantom mate-

rials, but in this case values of the caloric defect, given in the literature must be used. Ionization chambers and irradiation vessel for the *Fricke solution are made in these cases of corresponding materials.*

In the case of the water phantom by the fact, that the ionization chambers are national primary standards for exposure and are now used for high-energy photons a possibility to compare a C_{λ} -value with a direct determination of absorbed dose is provided.

For the direct determination of absorbed dose in water by calorimetry some preliminary experiments are carried out (fig. 3).

The temperature dependence of the electrical conductivity of an aqueous salt solution of low concentration will serve as temperature sensor, detected by an a.c. Wheatstone-bridge with Lock-In-amplifier at a frequency f_1 . Volume heating for electrical calibration will be carried out at a frequency f_2 , not disturbing the temperature increase-measurement. The sensitivity of this method is by a factor 20 lower than in the case with graphite as absorber and thermistors as temperature sensors, but with a sufficiently strong radiation source, e.g. 5,000 Ci ^{60}Co or a linear accelerator this difficulty can be overcome.

RESUME

Un calorimètre pour la mesure de la dose absorbée dans le graphite pour les photons d'énergie de plus de 0,6 MeV et pour les électrons d'énergie de plus de 2 MeV, est décrit. Pour les doses absorbées plus grandes que 0,5 Gy (50 rad) l'incertitude totale est de moins de 0,5 % si les corrections nécessaires sont faites. La taux de la dérive thermique peut être réduit en dessous de 10^{-6} K/min.

Trois méthodes différentes employant des principes calorimétriques, ionométriques et chimiques pour réaliser l'unité de dose absorbée dans l'eau sont comparées afin de détecter les erreurs systématiques.

Pour la détermination directe de la dose absorbée dans l'eau par la méthode calorimétrique des expériences préliminaires sont en cours.

SAMENVATTING

Een calorimeter voor de standaard meting van de geabsorbeerde dosis in grafiet voor fotonen met energie groter dan 0,6 MeV en elektronen met energie groter dan 2 MeV wordt beschreven. Geabsorbeerde doses groter dan 0,5 Gy (50 rad) zijn meetbaar met een onzekerheid kleiner dan 0,5 % wanneer de nodige correcties worden doorgevoerd. De temperatuur drift kan gereduceerd worden tot minder dan 10^{-6} K/min.

Drie verschillende methoden (kalorimetrische, ionometrische en chemische) waarmee de eenheid van geabsorbeerde dosis in water bepaald kan worden, werden vergeleken om systematische fouten op te sporen.

Voor de directe metingen van de energie dosis in water met een calorimeter wordt voorbereidend onderzoek uitgevoerd.

ZUSAMMENFASSUNG

Eine Messerinrichtung zur kalorimetrischen Bestimmung der Energiedosis in Graphit für Photonen mit Energien grösser als 0,6 MeV und Elektronen mit Energien grösser als 2 MeV wird beschrieben. Energiedosen grösser als 0,5 Gy (50 rad) sind mit einer Unsicherheit von weniger als 0,5 % messbar, wenn die erforderlichen Korrekturen berücksichtigt werden. Temperaturdriften von weniger als 10^{-6} K/min. können erreicht werden.

Drei verschiedene Verfahren (kalorimetrisch, ionometrisch und chemisch), mit denen die Einheit der Energiedosis in Wasser für hohe Photonenenergien realisiert werden kann, werden verglichen, um systematische Fehler ermitteln zu können.

Für die direkte Messung der Energiedosis in Wasser mit einem Kalorimeter werden vorläufige Untersuchungen durchgeführt.