État de l'art des techniques de dosimétrie individuelle et analyse des besoins*

A. RANNOU¹, J. BARTHE², B. AUBERT³, B. BRÉGEON⁴,
J. CHAMPLONG⁵, P. COLSON⁶, M. ESPAGNAN⁷,
Y. HERBAUT⁸, J. C. THEVENIN¹, M. VALERO⁹

(Manuscrit reçu le 6 avril 1998, révisé le 23 juin 1998, accepté le 20 juillet 1998)

RÉSUMÉ

Les objectifs de la dosimétrie individuelle sont multiples ; leur hiérarchisation a sensiblement évolué au cours des dix dernières années : l'optimisation s'est peu à peu imposée comme un objectif majeur de la radioprotection des travailleurs. Les limites maximales admissibles vont être abaissées d'un facteur important. Les objectifs dosimétriques que se donnent les exploitants sont également fortement réduits année après année. Les situations d'exposition sont très diverses selon les secteurs d'activité. Les nouveaux procédés technologiques ont entraîné autant de nouveaux champs de rayonnements avec des spectres et niveaux de dose variés. Aucun détecteur ne répond parfaitement pour l'ensemble des champs de rayonnements rencontrés. Pour les photons, tous les dosimètres existants et utilisés en routine permettent l'évaluation de Hp (10) selon les spécifications des normes. Pour les neutrons, aucune technique existante ne satisfait les normes. Les informations complémentaires offertes par certains dosimètres peuvent entrer en ligne de compte dans le choix d'une technique plutôt qu'une autre. Les contraintes techniques et financières varient selon les solutions : un service dosimétrique complet comprend le dosimètre mais aussi son système d'exploitation et de gestion. L'exploitation des dosimètres passifs diffère complètement de celle des dosimètres actifs. Des procédures de validation des résultats doivent être imaginées dans le deuxième cas, en particulier les dosimètres actifs fournissent une masse importante de données dont il faudra sélectionner et valider certaines avant de les enregistrer dans un système de gestion centralisé. Les techniques évoluent, en particulier celles basées sur l'électronique : les techniques d'intégration permettent d'envisager raisonnablement dans un avenir de 3 à 5 ans la mise au point de dosimètres combinant les différentes fonctions : X , γ , β et neutron, mesure en temps réel. La réglementation devrait être suffisamment souple pour permettre aux utilisateurs de choisir au mieux la technique adaptée à leur besoin et laisser la possibilité de prendre en compte l'évolution à venir des techniques.

* Le Comité de rédaction souhaite informer les lecteurs que cet article a fait l'objet d'évaluations contrastées, mais qu'il a cependant pris la décision de le publier compte tenu de son caractère collectif.

¹ IPSN, BP n° 6, 92265 - Fontenay-aux-Roses cedex.

² CEA/DTA/DAMRI, BP 52, CE Saclay, 91193 Gif-sur-Yvette cedex.

³ Institut Gustave Roussy, Service de physique, 39, rue Camille Desmoulins, 94805 Villejuif cedex.

⁴ FRAMATOME, 10 rue Juliette Récamier, BP 3083, 69398 Lyon cedex.

⁵ DGA/DCE/CEB, 16 bis av. Prieur de la Côte d'Or, 94114 Arcueil cedex.

⁶ EDF - Production transport, EPN/DSRE, 6 rue Ampère, BP 114, 93203 Saint Denis cedex 1.

⁷ COGEMA Marcoule, BP 170, 30206 Bagnols-sur-Cèze cedex.

⁸ CEA/SPR, CE Grenoble, 17 rue des Martyrs, 38054 Grenoble cedex.

⁹ OPRI, BP 35, 78110 Le Vésinet.

ABSTRACT Review of individual dosimetry techniques and needs analysis

Objectives of the individual dosimetry are multiple; their hierarchization evolved appreciably during the last ten years: optimization is itself, little by little, imposed as a major objective of the worker radioprotection. The admissible maximal limits are going to be lowered of an important factor. The dosimetric objectives that give themselves operators are also greatly reduced year after year. Situations of exposure are very various according to sectors of activity. The new technological processes dragged many new fields of radiations with varied spectrums and dose levels. No detector answers perfectly for the whole of radiation fields. For photons, all existing dosimeters used in routine permit the assessment of Hp (10) according to specifications of norms. For neutrons, no existing technique satisfied norms. The complementary information offered by some dosimeters can be taken into account in the choice of a technique rather than an another one. Technical and financial constraints vary according to solutions: a whole dosimetric service understands the dosimeter but also its operating system and management. The passive dosimeters exploitation system is completely different of the active dosimeters' one. Procedures of result validation must be imagined in the second case, in particular the active dosimeters provide an important mass of data of which it will be necessary to select and to validate some before recording them in a centralised system of management. Techniques evolve, in particular those based on electronics: integration techniques permit to consider reasonably in a future of 3 to 5 years the development of dosimeters combining the different functions: X, γ , β and neutron, real time measurement. The regulation should be flexible enough to allow users to choose the best technique adapted to their need and to let them the possibility to take in account the evolution coming from the techniques.

Ce texte est l'œuvre d'un groupe de travail réuni à l'initiative de la Direction Générale de la Santé (Bureau de la Radioprotection) avec pour objectif d'établir un bilan des techniques de dosimétrie individuelle dans la perspective d'une révision de la réglementation liée à l'application en France de la directive européenne de 1996. Les conclusions de ce travail devraient être soumises dans cette perspective au Conseil Supérieur d'Hygiène Publique de France et au Conseil Supérieur des Risques Professionnels.

1. Introduction

La diversification et le développement croissant des activités utilisant des rayonnements ionisants (nucléaire, médical, recherche, défense, *etc.*) créent depuis plusieurs années des contraintes et des besoins de plus en plus spécifiques. À cet état de fait s'ajoute l'obligation de respecter des limites réglementaires plus restrictives et des objectifs de qualité croissante en matière de performances dosimétriques. Bénéficiant des progrès techniques réalisés dans de nombreux domaines, l'évolution des techniques de dosimétrie, que l'on remarque aujourd'hui, s'est fait l'écho de ces besoins.

La réglementation française en vigueur, datant de près de trente ans (article 1 de l'arrêté du 19 avril 1968), ne retient que le film photographique comme dosimètre représentatif de l'exposition externe de l'individu.

Parallèlement, d'autres techniques, dites complémentaires ou opérationnelles, se sont développées pour répondre à des spécificités d'ambiance radiologique et/ou de gestion : dosimètres thermoluminescents, à bulles, électroniques, *etc.* Certaines d'entre elles sont déjà utilisées de façon réglementaire dans plusieurs pays européens, alors qu'en France elles n'ont aujourd'hui aucun statut réglementaire.

L'objet de ce document est de faire un inventaire des techniques dosimétriques individuelles actuellement disponibles pour l'évaluation de la dose en profondeur qui résulte de l'exposition externe à des rayonnements pénétrants. Il s'agit aussi d'évaluer quelle est leur adéquation par rapport aux besoins, en fonction des performances et des fonctionnalités requises par les divers intervenants des domaines nucléaire, militaire et médical, en France et à l'étranger.

Les questions socioprofessionnelles attachées à la gestion des données dosimétriques ne font pas l'objet de la présente réflexion.

Il est important de noter qu'une réflexion sur le thème traité dans le présent document vient de démarrer au sein de l'EURADOS¹.

2. Objectifs de la dosimétrie individuelle

La dosimétrie individuelle fait partie intégrante du dispositif de radioprotection des travailleurs exposés. Selon la CIPR (publication 35, 1982), « l'objectif fondamental de la surveillance radiologique est d'obtenir une estimation de l'équivalent de dose moyen et de l'équivalent de dose efficace dans les tissus significativement exposés. Cette information est utile pour limiter les doses individuelles reçues par les travailleurs et démontrer le respect du système de limitation des doses recommandée par la Commission ainsi que des limites réglementaires ».

La directive 96/29/Euratom du conseil du 13 mai 1996 reprend (Article 6) les deux critères définis par la publication 60 de la CIPR que sont l'optimisation et la

¹ EURADOS (European Radiation Dosimetry Group) est une association scientifique créée en 1981 par des laboratoires européens travaillant dans le domaine de la métrologie et de la dosimétrie des rayonnements. Cette association qui compte aujourd'hui 180 scientifiques en provenance de 65 laboratoires poursuit ses activités dans le cadre d'un contrat soutenu par la Commission Européenne (DG XII).

limitation des doses pour les pratiques :

Chaque état membre veille à ce que :

a) dans le contexte de l'optimisation, toutes les expositions soient maintenues au niveau le plus faible raisonnablement possible, compte tenu des facteurs économiques et sociaux.

b) ... la somme des doses reçues du fait des différentes pratiques ne dépasse pas les limites de dose fixées ... pour les travailleurs exposés ...

L'objectif de la dosimétrie individuelle, par l'évaluation des doses reçues, est de contribuer à la satisfaction de ces critères (on notera au passage que la Directive Européenne considère, au même titre que la CIPR, en premier lieu le critère « d'optimisation »).

La dosimétrie individuelle doit permettre l'évaluation aussi correcte que raisonnablement possible des doses reçues compte tenu de la diversité des situations d'exposition et des contraintes existantes, et en fonction des différents objectifs suivants :

2.1. Optimisation

Les données de surveillance dosimétrique individuelle permettent de démontrer l'adéquation des pratiques et des conditions de travail - si besoin est de les corriger - par rapport aux objectifs dosimétriques fixés. Si l'optimisation correspond généralement à une étude préalable du poste de travail, l'information de dose est utile à la « personne compétente en radioprotection » pour vérifier, ou améliorer le risque d'exposition au niveau de ce poste.

L'analyse de l'ensemble des données par individu, par poste de travail, par type d'intervention permet ainsi d'améliorer les situations les plus critiques et de porter les efforts proportionnellement au bénéfice attendu en dose.

La précision de la mesure et l'exhaustivité des informations fournies sur le champ de rayonnement peuvent être considérées d'un intérêt secondaire par rapport à d'autres aspects, en particulier la possibilité de suivre « en temps réel » les doses reçues par le travailleur évoluant à son poste de travail. En pratique, seuls les dosimètres actifs permettent un tel suivi des doses reçues au cours du temps et offrent une possibilité de comptabiliser facilement ces doses par jour (voire heure par heure ou même selon un pas d'intégration plus resserré si les niveaux d'exposition le nécessitent) ou par intervention. Un autre intérêt majeur des dosimètres actifs est d'influer en temps réel sur la prise de dose dans un but de sécurité (arrêt d'un travail, modification d'un plan d'intervention, *etc.*).

2.2. Respect des limites de dose

La surveillance dosimétrique individuelle apporte la preuve quantitative des doses reçues par le travailleur et permet à l'employeur de s'assurer ainsi du respect des limites réglementaires. Elle permet aussi de situer les doses reçues par rapport à

des niveaux de référence donnés : niveau d'enregistrement, niveau d'investigation et niveau d'intervention (CIPR 35). Sur le plan légal et psychologique, le problème de la précision de la mesure (et de la concordance des résultats, s'il y a plusieurs dosimètres) présente une réelle acuité lorsque les doses reçues sont significativement élevées et voisines des limites maximales admissibles. Le résultat dosimétrique fourni doit être aussi fiable que possible et apporter le maximum d'informations notamment en cas de contentieux.

2.3. Situation accidentelle

Le dosimètre doit apporter toute information utile pour l'évaluation de la dose individuelle en cas d'exposition accidentelle. Dans ce cas, l'information qualitative est de nouveau très importante, généralement plus que la précision du résultat. Il est en effet utile en cas de fortes doses, de connaître le type et l'énergie du rayonnement, l'homogénéité du champ de rayonnement, l'orientation de l'individu par rapport à ce champ, et lorsque c'est possible, la durée d'exposition.

Bien entendu, l'idéal est de pouvoir détecter au plus vite une situation anormale et de permettre au travailleur d'être alerté avant même que l'exposition subie ne soit dangereuse ou tout simplement anormale (optimisation de l'action de prévention active). Actuellement seuls les dosimètres électroniques (pour les γ et X au-dessus d'un certain seuil en énergie) sont capables de fournir cette alerte « en temps réel ».

Cette fonction d'alerte, le suivi « en temps réel » et la gestion informatique des données, constituent la base de la dosimétrie opérationnelle qui précède les résultats de la dosimétrie réglementaire.

2.4. Autres objectifs

En plus des 3 objectifs essentiels précédents qui visent à répondre aux besoins de la surveillance individuelle de routine et à apporter des informations utiles en cas d'accident, il convient d'ajouter les objectifs suivants :

- **information des travailleurs ;**
- **information médicale et études épidémiologiques :** la dosimétrie est une donnée fondamentale pour le médecin du travail. Cette donnée doit être mise en perspective par rapport à d'autres sources de nuisances auxquelles les travailleurs peuvent être exposés. Elle est aussi indispensable pour les études épidémiologiques pour lesquelles les informations qualitatives sont utiles.

Bien entendu, tous les objectifs précités peuvent être jugés de façon plus ou moins prioritaires - et donc les critères de performances dosimétriques avoir plus ou moins de poids - selon les acteurs concernés (autorités, employeurs, médecins du travail, personne compétente, travailleurs, épidémiologistes) et selon les situations concernées.

3. Besoins dosimétriques

3.1. Situations d'exposition

Les individus peuvent évoluer, au cours de leur travail, dans des champs de rayonnements très diversifiés selon les secteurs de travail (nucléaire, industrie, recherche, médical, défense) et variables dans le temps et dans l'espace en fonction des activités concernées. Les rayonnements peuvent être classés en fonction de leur capacité à déposer de l'énergie en profondeur dans l'organisme :

- *les rayonnements faiblement pénétrants* : par nature, ces rayonnements sont rapidement arrêtés et n'irradient que les tissus superficiels (peau, cristallin de l'œil) et les extrémités : électrons ($E < 500$ keV), X et γ ($E < 15$ keV) ;
- *les rayonnements fortement pénétrants* : ce sont les rayonnements de plus grandes énergies susceptibles de délivrer une dose importante en profondeur.

Dans les installations nucléaires (civiles et militaires), les rayonnements β et γ sont ceux dus aux produits de fission (^{134}Cs , ^{137}Cs , Ru-Rh...) et produits d'activation (^{58}Co , ^{60}Co , ^{59}Fe ...) les X et γ étant également émis par les transuraniens (Pu, U, Am, Cm). Les spectres varient fortement selon les lieux et les matériaux présents dans l'environnement des sources.

Dans le domaine médical, le risque d'exposition externe existe dans différents secteurs : en radiothérapie avec les accélérateurs linéaires produisant des photons et/ou des électrons jusqu'à 30 MeV et dans quelques applications en basse énergie avec des rayons X de 50 à 250 keV, en cobalthérapie (γ d'énergie moyenne 1,25 MeV), en curiethérapie (γ de 296 à 468 keV pour ^{192}Ir ; γ de 662 keV pour le ^{137}Cs). L'utilisation de rayons X en radiologie expose également le personnel : rayons X jusqu'à 25-30 keV en mammographie, jusqu'à 30 à 50 keV en dentaire, jusqu'à 140-150 keV pour les examens conventionnels et la scanographie. Enfin, la médecine nucléaire et les laboratoires utilisent des sources non scellées : rayonnements γ de 140 keV du $^{99\text{m}}\text{Tc}$, et émetteurs β d'énergie moyenne 695 keV du ^{32}P .

Neutrons (0,025 eV à environ 15 MeV dans des installations de l'industrie nucléaire, jusqu'à plusieurs dizaines de MeV auprès d'accélérateurs de particules en radiothérapie, dans le domaine de la recherche ou celui de l'industrie). Là encore, les spectres en énergie sont extrêmement variés selon les sources et les protections mises en œuvre.

Les niveaux d'exposition externe dus aux rayonnements pénétrants varient en situation normale de l'ordre de 0,1 $\mu\text{Sv/h}$ (bruit de fond naturel) à quelques dizaines de $\mu\text{Sv/h}$. Des débits d'équivalent de dose beaucoup plus élevés peuvent être rencontrés dans certaines ambiances ou situations particulières : bâtiments réacteurs

par exemple (jusqu'à quelques dizaines de mSv/h). Le rapport n/γ peut être extrêmement variable selon les lieux, y compris dans une même installation, ce qui rend en pratique très aléatoire d'estimer, sauf cas particulier, les doses individuelles dues aux neutrons à partir de l'évaluation des doses γ .

En fonction du poste de travail, l'organisme peut être exposé de façon très homogène, mais l'exposition peut aussi être très localisée (irradiation dans le faisceau d'une source collimatée par exemple). La surveillance individuelle doit tenir compte de ces deux situations. Dans le domaine médical (radiologie interventionnelle), ou dans le cycle de fabrication du combustible (manipulation de produits actifs), la dosimétrie d'extrémité aura souvent une importance toute particulière.

Le choix de la durée d'intégration de la mesure doit tenir compte des conditions d'exposition et des objectifs dosimétriques visés : dans les situations où les débits d'exposition sont relativement élevés et variables au cours du temps, une mesure intégrée sur une petite durée est intéressante alors qu'une mesure intégrée sur une période d'un mois, ou plus, est largement suffisante dans beaucoup de cas.

Enfin, les caractéristiques des dosimètres individuels doivent être choisies à la lumière des conditions environnementales susceptibles d'affecter leurs performances sur leur lieu d'utilisation : température, humidité, champ électromagnétique...

3.2. Grandeurs dosimétriques de mesure

Le concept des grandeurs opérationnelles a été introduit par l'ICRU (ICRU 39, 1985) pour permettre la surveillance individuelle et celle de l'ambiance. Ces grandeurs visent à fournir une « estimation raisonnable » de la dose efficace et de la dose équivalente à la peau, par définition non mesurables. À noter que, en fonction de l'énergie des rayonnements et l'orientation de l'individu par rapport au rayonnement incident, des écarts plus ou moins importants existent entre l'évaluation de l'équivalent de dose individuel et l'équivalent de dose « vraie » (ICRP 74, 1974).

À chacun des deux types de rayonnements, définis plus haut, correspond une grandeur dosimétrique opérationnelle propre. Le dosimètre individuel « corps entier » correspondant aux rayonnements fortement pénétrants est porté sur la poitrine ; il doit permettre une évaluation correcte de l'équivalent de dose individuel Hp (10). Le dosimètre dédié aux rayonnements faiblement pénétrants doit permettre l'évaluation de l'équivalent de dose individuel Hp (0,07). Ce dosimètre est porté sur une partie du corps où la peau est exposée, par exemple à la poitrine et aux extrémités (doigts).

Les dosimètres individuels sont étalonnés dans des conditions conventionnelles, simplifiées, à la profondeur appropriée (10 mm ou 0,07 mm).

La qualité d'un instrument dosimétrique réside dans sa capacité à répondre correctement à la grandeur opérationnelle *ad-hoc*. Les différentes spécifications auxquelles doivent satisfaire les dosimètres individuels sont décrites dans des normes internationales (Tab. I).

TABLEAU I

Normes internationales fixant les spécifications relatives aux dosimètres individuels.
International standards specifying the requirements of personal dosimeters.

Dosimètres	Photographiques Indice 3 (20 keV - 9 MeV)	Thermoluminescents pour dosimétrie individuelle	Électroniques
Norme	ISO 1757	CEI-ISO 1066	CEI 1283 (X, γ , β) et CEI 1323 (v) - 1995 CEI 1525 (X, γ , β et v) 1997
Réponse au débit de dose			< 20 % jusqu'à 1 Sv/h (^{137}Cs pour les photons) ($^{241}\text{Am-Be}$ ou ^{252}Cf pour les neutrons)
Réponse en énergie	± 35 % pour les photons entre 20 keV et 1,2 MeV	± 30 % entre 15 keV et 3 MeV pour les photons ± 30 % entre 50 keV et 3 MeV pour les rayonnements β	± 30 % entre 0,5 MeV et 1,5 MeV par rapport au ^{137}Cs pour les photons - 50 %, + 100 % pour 6 MeV (test uniquement pour site réacteur) ± 50 % pour les neutrons entre 100 keV et 15 MeV
Réponse angulaire	± 30 % pour angles 0° , $\pm 30^\circ$, $\pm 45^\circ$, $\pm 60^\circ$ et aux énergies 58 keV ou ^{241}Am et γ du ^{137}Cs ou ^{60}Co	15 % pour les angles 0° , $\pm 20^\circ$, $\pm 40^\circ$, $\pm 60^\circ$ et pour les photons de 60 ± 5 keV	entre 0° et $\pm 75^\circ$: ± 20 % pour ^{137}Cs ± 50 % pour ^{241}Am ± 30 % pour $^{241}\text{Am-Be}$ ou ^{252}Cf

3.3. Incertitudes liées à la mesure

L'incertitude globale liée à la détermination de l'équivalent de dose individuel par un dosimètre provient d'une part de l'incertitude aléatoire liée à la lecture du dosimètre et d'autre part à de nombreuses incertitudes systématiques qui affectent la réponse de ce dosimètre : étalonnage, dépendances énergétique et angulaire, non-linéarité de la réponse, effets de la température et de l'humidité, de la lumière, du rayonnement électromagnétique, des chocs. Interviennent également des conditions indépendantes du dosimètre lui-même : rayonnement isotrope ou directif, position relative du travailleur par rapport à la source, position du port du dosimètre, *etc.* Sur la figure 1, la courbe dite « en trompette » établie par Böhm, pour les photons, représente les incertitudes maximales par rapport à l'équivalent de dose

conventionnellement vrai² qui peuvent être admises pour un dosimètre à lecture mensuelle, sur la base des recommandations de la CIPR 35. On peut noter que la tolérance est importante, ce d'autant plus que le niveau de dose à mesurer est faible. Ainsi, par exemple, pour un équivalent de dose mensuel reçu de 1 mSv, on peut admettre que la mesure dosimétrique correspondante soit comprise entre 0,5 et 1,6 mSv. La quasi-totalité des dosimètres satisfait à ces limites mais ne fait guère beaucoup mieux.

Il n'est donc pas rare ni incompréhensible que deux appareils portés par un même individu affichent des résultats différents. L'important est de rester dans les tolérances fixées.

Fig. 1. – *Equivalent de dose (mSv) en fonction (à gauche) de la répartition des doses moyennes mensuelles à EDF (en %) et (à droite) en équivalent de dose mensuel mesuré/dose vrai conventionnel.*

Dose equivalent (mSv) versus (left) Frequency distribution of monthly-averaged doses at EDF (in %) and (right). Measured dose equivalent / conventionally true dose equivalent.

À titre indicatif, nous avons placé sur la même courbe, la répartition des doses moyennes mensuelles des agents à EDF en 1996. On y voit que la tolérance sur l'incertitude maximale admise pour l'évaluation des doses, à ces niveaux d'exposition, peut être importante.

² La valeur conventionnellement vraie d'une grandeur est la meilleure estimation d'une valeur, déterminée à partir d'un étalon ou par un instrument de référence étalonné.

3.4. Informations complémentaires

Outre la connaissance de la dose intégrée qui permet le contrôle du non-dépassement des limites ainsi qu'un certain retour d'expérience, d'autres informations dosimétriques peuvent être utiles à l'optimisation ou dans des cas particuliers comme les situations accidentelles. Ce sont par exemple, les informations spectrales, la mesure du débit de dose, des informations concernant l'historique des doses (variations de l'exposition au cours du temps en dose ou débit de dose).

4. Contraintes

4.1. Étalonnage et assurance qualité

La bonne utilisation d'une technique dosimétrique donnée suppose d'une part que cette technique soit validée et d'autre part que les procédures d'exploitation et/ou les conditions d'utilisation soient bien respectées. Un programme d'assurance qualité doit permettre de s'assurer de la validité des résultats. On comprend qu'un tel programme ne sera pas élaboré avec la même approche selon qu'il s'agit de dosimètres de type actif (qui fournissent une lecture en temps réel et sont munis d'alarme ou donnent des informations en débit de dose qui permettent au porteur de réagir en conséquence) ou de dosimètres de type passif (qui intègrent les doses reçues et qui ne sont lus qu'à posteriori). Ainsi, chaque dosimètre passif ne peut pas forcément être étalonné individuellement (le film photographique par exemple ne peut être développé qu'une fois, un étalonnage le rend inutilisable). La validité du résultat obtenu pour un dosimètre exposé est en principe garantie par les procédures reproductives d'exploitation mises en œuvre et l'utilisation de témoins. Le contrôle de qualité des résultats des mesures réalisées à l'aide des dosimètres électroniques doit comporter un étalonnage initial de chaque dosimètre, suivi de vérifications périodiques portant sur des points de fonctionnement essentiels (charge des piles, vérification d'étalonnage, *etc.*). Ce type de contrôle de qualité suppose une organisation bien adaptée, probablement interne à l'entreprise si celle-ci est suffisamment grande (par exemple EDF, hôpital) ou faisant appel à un organisme extérieur. Cette organisation doit permettre à l'exploitant d'un parc d'appareils de démontrer la validité des résultats de routine, pour un coût raisonnable et sans immobilisation excessive du matériel pendant les tests.

Cela suppose aussi l'existence de laboratoires accrédités pour réaliser ces essais et étalonnages, et organiser les intercomparaisons.

4.2. Contraintes diverses

Outre les contraintes énumérées pour garantir la qualité des mesures, des contraintes de différentes natures pèsent sur chacune des techniques dosimétriques disponibles décrites au paragraphe 5.

- 1 – coûts pour l'exploitant (utilisateur) : investissements, détecteurs et son environnement, exploitation du dosimètre (piles, personnel pour assurer la qualité et/ou exploiter), maintenance, assurance qualité ;
- 2 – recueil et diffusion des données (interrogation possible à distance par exemple) ;
- 3 – ergonomie (unicité du dosimètre, simplicité, robustesse, stockage hors information, dimensions, poids...) ;
- 4 – capacité de réponse en situation accidentelle ;
- 5 – insensibilité aux conditions environnementales (humidité, température, compatibilité électromagnétique...).

Le tableau II ci-dessous présente les grandes tendances dans la situation actuelle. On n'y tient pas compte de cas d'espèce et celle-ci peut être amenée à évoluer. La comparaison des coûts ne figure pas dans notre analyse, elle demanderait la prise en compte de trop nombreux paramètres et justifierait une étude à part entière.

TABLEAU II

**Évaluation des caractéristiques des dosimètres individuels
(critères autres que performances dosimétriques).**
**Assessment of characteristics of personal neutron doseimeters
(other than dosimetric performances).**

Type de dosimètre	Critères			
	2	3	4	5
Film photographique	—	++	++	+
TLD	—	++	+(a)	++
RPL	—	++	+	++
Dosimètre électronique (b)	++	+	+	—

++ favorable

+ satisfaisant

— défavorable

- non entièrement satisfaisant

TLD : dosimètre thermoluminescent

RPL : dosimètre radiophotoluminescent

(a) Si l'on a connaissance d'un accident, une procédure particulière peut être mise en œuvre pour la mesure de doses élevées.

(b) On peut envisager moins d'un dosimètre par agent.

Un dosimètre « idéal » pourrait être défini, au sens dosimétrique, comme celui permettant, quel que soit le poste de travail considéré :

- d'une part, la mesure de l'équivalent de dose individuel intégré sur une période de l'ordre d'un mois avec une précision de l'ordre de $\pm 30\%$ sur une gamme de dose donnée (limite de détection inférieure à $100\ \mu\text{Sv}$ pour permettre de détecter des doses intégrées de l'ordre de $1\ \text{mSv}$ par an et seuil de saturation très supérieur au niveau correspondant à une dose accidentelle) ;
- d'autre part la mesure de la dose, selon un pas d'intégration plus resserré (heure ou moins selon le cas), pour permettre de réaliser des opérations selon le principe d'optimisation ;

- *La possibilité de confirmer le résultat de la mesure est également indispensable.*

La déduction du bruit de fond naturel doit également être effectué de sorte que seule la dose imputable à l'activité du travailleur soit considérée. L'évaluation de la contribution du bruit de fond naturel à la mesure globale doit être d'autant plus précise que la dose liée à l'activité professionnelle est faible.

5. Inventaire des dosimètres individuels

Les dosimètres individuels « organisme entier » peuvent être classés selon qu'ils sont passifs ou actifs : bien que ce classement soit aussi applicable aux dosimètres neutron, du fait de leur spécificité, ceux-ci ont été traités en particulier dans le paragraphe 5.3.

5.1. Les dosimètres passifs

Le détecteur ne fait appel à aucune source d'énergie pour fonctionner. Le résultat de la mesure représente la « dose intégrée » correspondant à la période d'exposition du dosimètre. La lecture, et donc la connaissance du résultat, sont connus en « temps différé ». Tous les dosimètres hormis ceux électroniques peuvent être classés dans cette catégorie.

Les dosimètres passifs peuvent être classés en deux catégories selon le type d'informations qu'ils fournissent :

- les dosimètres « élémentaires » dont la seule vocation est de permettre l'estimation de l'équivalent de dose individuel $H_p(10)$. Parmi ceux-ci, on trouvera par exemple le dosimètre constitué d'une simple pastille thermoluminescente ou le dosimètre radiophotoluminescent. L'exploitation du dosimètre consiste généralement en une lecture unique ;
- les dosimètres « multi-élémentaires » qui, outre la mesure de $H_p(10)$, apportent des informations complémentaires sur les caractéristiques du champ d'exposition : le type, l'énergie et la direction du rayonnement. Ces informations sont particulièrement utiles en cas d'accident et, d'une façon plus générale, pour analyser des situations d'exposition en champ de rayonnement complexe à des niveaux proches des limites réglementaires. Ces dosimètres sont le plus souvent constitués d'un ou plusieurs détecteurs munis d'écrans de numéros atomiques et d'épaisseurs différents. Les meilleurs exemples restent le dosimètre photographique et les dosimètres thermoluminescents utilisant plusieurs pastilles et équipés d'écrans (par ex. COGEBADGE®).

Les procédures d'exploitation des dosimètres et l'interprétation des résultats seront bien entendu d'une difficulté différente entre les deux catégories précitées.

Dans le deuxième cas, s'il est vrai que les procédures longues et complexes sont aujourd'hui le plus souvent automatisées par les laboratoires et font l'objet d'une attention particulière au plan de l'assurance qualité, il reste que l'interprétation des résultats notamment en situation d'accident reste délicate et repose sur le savoir-faire d'un nombre limité d'experts.

5.1.1. Le dosimètre photographique

Les films photographiques sont constitués de microcristaux de sels d'argent dispersés dans une gélatine. Sous l'effet du rayonnement, les ions Ag^+ donnent naissance à des grains d'argent sous forme métallique constituant une image latente invisible. Un traitement approprié du film révèle l'image définitive sous forme d'un noircissement visible à l'œil nu.

Il existe différents films (Kodak, Agfa, *etc.*) et des émulsions de sensibilité diverses permettant de couvrir des gammes de dose allant d'environ 0,1 mGy (limite de détection de l'émulsion la plus sensible, pour les énergies des photons du ^{60}Co) à 5 Gy (saturation de l'émulsion la moins sensible). La réponse en énergie du film pour les photons est pratiquement plate au-dessus de 300 keV mais augmente d'un facteur 20 à 50 pour des énergies plus faibles, avec un maximum de sensibilité aux alentours de 50 keV. Des écrans (2 à 7 selon les laboratoires) sont placés sur le détecteur, délimitant autant de plages présentant une réponse en énergie propre. La lecture de la densité optique sur chacune de ces plages permet d'obtenir la dose avec une précision de l'ordre de $\pm 20\%$ entre 15 keV et 3 MeV.

Avantages/inconvénients :

- le film est relativement sensible *aux conditions environnementales* (humidité et chaleur en particulier) et certains agents chimiques (mercure, ammoniac...). Il doit être conditionné dans un étui protecteur étanche (qui facilite aussi son port sur la poitrine de l'individu). Malgré toutes les précautions prises, le film présente des problèmes de « fading » (perte de densité optique avec le temps) ;
- *sensibilité aux neutrons thermiques* : une des plages, munie d'un écran de cadmium, permet d'estimer la dose due aux neutrons thermiques ;
- placé dans son étui, le film ne permet pas une mesure des *rayonnements bêta* (l'étui atténue très fortement ces derniers). Toutefois, les rayonnements bêta donnent sur la plage nue et sous l'écran de plastique une image caractéristique qui généralement se distingue de celle que donneraient des rayons X de faible énergie ;
- informations complémentaires :
 - *Homogénéité de l'irradiation* : une irradiation très localisée, la présence d'obstacles entre la source d'irradiation et l'individu ou, d'une façon générale, l'hétérogénéité de l'irradiation se traduit par une variation de la densité optique sous un

même écran. La netteté des traces d'écran ou d'objet permet de préciser si l'exposition a eu lieu de façon unique ou répétitive.

- Contamination : les taches apparaissant sur le film peuvent révéler la projection de matière radioactive sur le dosimètre.

- Témoin de développement : développé en même temps que les films portés issus du même lot, le témoin pré-irradié permet de contrôler la bonne qualité du développement et de garantir sans ambiguïté que si un film porté est « blanc », c'est qu'il n'a reçu aucune irradiation et non pas qu'il a été mal développé.

- Témoin du bruit de fond : la contribution du rayonnement naturel est prise en compte dans le traitement des dosimètres.

Avec de l'expérience, la personne chargée de la lecture de films arrive ainsi à exploiter beaucoup de petits détails qui sont utiles pour connaître les conditions de l'exposition du dosimètre.

- Parmi les autres avantages, on retiendra son faible poids, ses formes et dimensions (12 cm^2) bien adaptées au port individuel, la possibilité le cas échéant de l'intégrer dans un même boîtier avec d'autres dosimètres complémentaires (*cf.* le Cogebadge, développé par COGEMA). Il faut également souligner le fait que le film fournit une image visuelle directe de l'exposition, pouvant être conservée plusieurs années, (le faible encombrement du film autorise son stockage sur de nombreuses années).

- Il reste que la qualité de la mesure est fonction du nombre de plages mises en œuvre et des procédures d'exploitation (en particulier le degré d'automatisation), ce qui peut entraîner des coûts extrêmement variables d'un laboratoire à un autre. Si le dosimètre photographique a fait largement ses preuves en routine dans les différents domaines (nucléaire, médical), sa limite de détection relativement élevée ($\approx 0,1 \text{ mSv}$) rend difficile son utilisation pour des périodes d'intégration inférieures à un mois.

5.1.2. Le dosimètre thermoluminescent

Une petite part de l'énergie déposée dans les matériaux thermoluminescents par les rayonnements ionisants y est emmagasinée et peut être restituée sous forme lumineuse lorsque ceux-ci sont chauffés. La quantité de lumière émise dans des conditions données de chauffage, est proportionnelle à la dose reçue. Les dosimètres thermoluminescents (TLD) apparus à la fin des années 60 ont été très largement utilisés pour la surveillance individuelle mais aussi d'ambiance et dans l'environnement. Ils existent sous forme de pastilles extrudées, de frittés ou de poudre (celle-ci étant mise dans un conteneur plastique). On trouve toute une variété de matériaux qui peuvent être choisis au mieux selon leur application (sensibilité recherchée, représentativité de l'équivalent tissu, mesure des γ en champs mixtes $n, \gamma \dots$): LiF , $\text{Li}_2\text{B}_4\text{O}_7$, CaF_2 ou CaSO_4 dopés de divers éléments.

- *Réponse en énergie* : placé derrière un matériau équivalent tissu d'épaisseur appropriée (en l'occurrence 10 mm pour la mesure de Hp (10)) le TLD présente une réponse en énergie relativement plate pour des photons d'énergies supérieures à environ 200 keV. La sur-réponse des TLD, qui est plus ou moins marquée selon le matériau, entre 10 et 200 keV peut être compensée par l'adjonction d'écrans appropriés (à noter que le LiF est suffisamment proche de « l'équivalent tissu » pour ne nécessiter aucun écran).

- *Dynamique de mesure* : la limite de détection des TLD varie selon les matériaux, de quelques mSv pour les plus courants (CaSO₄ dopé au Dy) à environ 10 mSv (LiF dopé au Mg, Ti). La réponse est linéaire jusqu'à des doses intégrées relativement élevées : par exemple 1 Sv pour le LiF (Mg, Ti). Des campagnes d'expérimentations (auprès du réacteur Silène, IPSN) ont montré que cette technique présentait d'intéressantes capacités, pour donner rapidement une première évaluation, en ordre de grandeur, des doses reçues par le personnel en cas d'accident de criticité.

Comparé au dosimètre photographique, les TLD sont plus sensibles, réutilisables (plusieurs centaines de fois sauf cassures) et souvent plus proches de « l'équivalent tissu » en raison des plus faibles numéros atomiques concernés. Ils couvrent une gamme de dose plus importante que le film et pour la plupart présentent moins de « fading » (= perte progressive de l'information enregistrée au cours du temps). Il faut toutefois noter que certains matériaux sont affectés par la lumière ou l'humidité. Placé dans son conditionnement, le dosimètre TLD est une technique « robuste », pratiquement insensible aux conditions environnementales courantes. La mesure de la dose due aux photons en champ mixte n'est en général que très peu perturbée par la présence des neutrons. Certains matériaux sont cependant à proscrire ou peu recommandés dans les champs mixtes (par exemple le borate de lithium ou le ⁶LiF). Enregistreur fort bien le bruit de fond radiatif naturel, il doit être stocké à l'abri de ce rayonnement naturel, par exemple dans un château de plomb. La lecture du TLD a pour conséquence sa « remise à zéro » c'est-à-dire que le dosimètre ne peut être lu qu'une fois (contrairement au film). Toutefois, l'information de base que constitue le « thermogramme » peut être enregistrée par des moyens informatiques. Comme pour le film, un témoin de lecture pré-irradié et un témoin du bruit de fond naturel peuvent être utilisés. De plus chaque dosimètre peut être étalonné individuellement, ce qui permet de s'affranchir des problèmes de reproductibilité qui se posent à l'intérieur d'un même lot.

Il existe de nombreux lecteurs automatiques dans le commerce (Panasonic, Rados, Harshaw...) offrant une reproductibilité de 5 % à 30 % suivant la sélection faite sur les produits. La capacité de lecture peut aller de 100 à 500 dosimètres par heure. Le système informatique de tels lecteurs (par exemple HARSHAW8800) permet le stockage des coefficients de sensibilité de chaque détecteur, le stockage de tous les paramètres d'étalonnage du lecteur, le stockage des courbes de thermoluminescence et de leurs caractéristiques associées à chaque lecture. L'informatique contrôle en outre la qualité des lectures et la stabilité du lecteur pendant celles-ci grâce à un programme d'assurance de la qualité intégrée.

Autres applications des dosimètres thermoluminescents :

– Mis sous un film plastique de quelques mg cm^{-2} , les dosimètres TLD permettent de mesurer les équivalents de dose pour les rayonnements β et X de faible énergie. Il existe ainsi des bagues ou des languettes et des bracelets pour la dosimétrie d'extrémité. La courbe de réponse en énergie du LiF (matériau parmi les plus intéressants dans cette application) accuse une surestimation de près de 50 % aux photons d'énergie d'environ 50 keV.

– Le matériau F6Li est sensible aux neutrons thermiques (réaction ${}^6\text{Li} (n, \alpha) {}^3\text{H}$). Ce principe est mis à profit pour constituer un dosimètre neutron d'albédo (voir plus loin).

On voit ainsi les applications intéressantes de la dosimétrie par thermoluminescence. Cette technique fonctionne, en parallèle à la dosimétrie réglementaire, depuis plus de 15 ans tant au CEA qu'à la COGEMA ou à FRAMATOME.

5.1.3. Le dosimètre radiophotoluminescent

Cette technique, moins connue que les précédentes mérite un bref rappel historique. L'étude des verres phosphatiques radiophotoluminescents (RPL) a pris une certaine importance dès le début des années cinquante. En France, la première application à la dosimétrie des rayonnements ionisants débute en 1968. Malgré de nombreux espoirs, ce type de dosimétrie ne sera cependant pas immédiatement opérationnel en dosimétrie mensuelle du personnel, la prédose (ou dose en l'absence de toute irradiation) étant trop élevée : plusieurs mGy. Le verre RPL trouvera par contre son application en dosimétrie d'accident, placé en complément du film, pour lever tout doute éventuel de forte irradiation. On le trouve aujourd'hui encore dans ce même rôle.

L'arrivée des lasers impulsionnels à azote va permettre à la technique de faire un bond. Sous l'impulsion du Centre de recherche de KfK en Allemagne, TOSHIBA étudie, développe et commercialise dès 1986 un lecteur de verres RPL. Cette technique est aujourd'hui utilisée en dosimétrie opérationnelle du personnel à Karlsruhe (à notre connaissance, le seul laboratoire de routine au monde).

Principe :

Le rayonnement ionisant arrache des électrons à la structure du verre. Ces derniers, après un temps plus ou moins long, sont piégés par certains défauts ponctuels. Excités par un rayonnement UV continu, ils se dés excitent en émettant une luminescence orange. Dans le cas idéal, l'intensité de luminescence est strictement proportionnelle à la dose. Le verre n'étant pas parfait, les électrons piégés lors de sa fabrication lui donnent une « prédose » qui varie, selon la qualité de la fabrication, d'une fraction de mGy à plusieurs mGy pour les verres les plus mauvais. De par son principe,

la lecture n'est pas destructive et un dosimètre irradié peut être lu autant de fois que l'on veut. Le dosimètre peut toutefois être réutilisé une centaine de fois après « remise à zéro » (la dose est effacée par passage à environ 400 °C pendant 10 minutes). À noter que le dosimètre continue d'intégrer les doses après lecture. La seule façon d'archiver un dosimètre lu est donc de le placer en château de plomb.

Les dosimètres RPL sont réalisés à partir de verres commerciaux activés à l'argent et contenant des phosphates de différents éléments (Al, Li, K et Ba), se présentant sous forme de disques ou de petits cylindres. Un lecteur traditionnel de verres RPL correspond à un simple fluorimètre UV - visible. Le seul fabricant actuel commercialisant le système est TOSHIBA.

Réponse en énergie : celle-ci dépend du numéro atomique des éléments présents dans le verre. Même les verres de faible numéro atomique sont 3,6 fois plus sensibles à 50 keV qu'aux γ du ^{60}Co et doivent être corrigés par des écrans. De par ce fait, les verres RPL s'apparentent ainsi aux films et permettent dans les cas extrêmes, d'estimer la nature et l'énergie du rayonnement. Les verres ainsi compensés présentent une réponse en énergie relativement constante ($\pm 15\%$ pour une irradiation sur fantôme par des photons entre 12 keV et 1,2 MeV).

Réponse angulaire : la réponse angulaire en particulier aux photons de faibles énergies dépend de la forme et de la taille du dosimètre et du système d'écrans. Les verres plats ont une réponse angulaire pratiquement constante ($\pm 30\%$) entre 0 et 60° pour des énergies supérieures à 12 keV.

Dynamique de mesure : la limite de détection est de l'ordre de 1 mSv (données constructeur) mais varie selon la fluorescence résiduelle dans le verre. La réponse est linéaire jusqu'à des doses supérieures à plusieurs Sv.

Le lecteur automatique TOSHIBA offre une reproductibilité meilleure que 5 % pour des doses au-dessus de 0,1 mSv. Sa capacité est de 50 000 dosimètres et le temps de lecture de 10 à 20 secondes par dosimètre (180 à 360/heure).

Sensibilité aux neutrons thermiques : Les verres sont intrinsèquement sensibles aux neutrons thermiques (activation de l'Ag). Le signal dû aux neutrons reste toutefois très faible et ne représente au plus que quelques pourcent de celui dû aux photons. Cette technique pourrait être envisagée pour réaliser un dosimètre intégrateur tout au long de la vie d'un travailleur.

5.1.4. Le stylodosimètre

Pour compléter l'inventaire des dosimètres passifs, il faut ajouter le stylodosimètre. Il s'agit d'une chambre d'ionisation cylindrique, dont l'anode axiale à fibre de quartz est reliée à un électromètre destiné à mesurer la décharge de la capacité

due à l'ionisation produite dans le gaz par les rayonnements. Un système optique permet, d'après la déviation de la fibre de quartz, de lire directement la dose reçue (à l'œil ou grâce à un lecteur automatique). La remise à zéro est réalisée à l'aide d'un appareil permettant de recharger la capacité du système. Selon l'épaisseur et la composition des parois de la chambre, il est possible de mesurer les X et γ , les X mous et β , les neutrons thermiques.

À titre d'exemple, les stylodosimètres type SEQ 6 et 8 fabriqués par Saphymo Phy permettent la mesure des X et γ d'énergies comprises entre 10 keV et 3 MeV pour différents calibres de doses (1 à 50 mGy). La version SEQ 7 est destinée à la mesure des émetteurs β d'énergie supérieure à 500 keV, X et γ (5 keV - 3 MeV) avec un calibre de 5 mGy.

Par retour d'expérience, le stylodosimètre s'avère un matériel intéressant en opérationnel en offrant la possibilité de lecture en temps réel et en répondant convenablement en cas d'exposition accidentelle. Il est « rustique » mais simple d'emploi et assez fiable. Soulignons toutefois qu'il est relativement fragile (sensible aux chocs). Compte tenu de son système de lecture, ce type de détecteur offre un « index » de la dose et fournit une estimation grossière de l'exposition.

5.2. Les dosimètres actifs

Il s'agit en fait des dosimètres électroniques. Ceux-ci sont aujourd'hui intimement liés à la dosimétrie opérationnelle. Ils donnent une information en temps réel, en dose intégrée et en débit de dose, par un affichage lisible directement par l'opérateur. Les dosimètres électroniques disposent de plusieurs niveaux de seuils d'alarmes et de pré-alarmes, optiques et sonores, en dose et en débit de dose.

On peut leur adapter des modules de télétransmission permettant de gérer à distance, et en temps réel, la dosimétrie de plusieurs travailleurs (ce peut être plus de 50 agents). Ce suivi est particulièrement utile en cas d'intervention concertée en zone à un niveau de rayonnement élevé, et permet, suivant le principe d'optimisation, de gérer les déplacements et l'intervention du travailleur pour limiter les doses reçues.

Des lecteurs connectés en réseau permettent le suivi des doses à partir des bornes d'entrée et sortie de zone et, éventuellement, d'en contrôler l'accès. Les lecteurs servent également de contrôle de la programmation et du fonctionnement du dosimètre. Des dispositifs particuliers, pour la dosimétrie d'extrémité, par exemple, peuvent leur être adjoints. Dans ce cas le détecteur de petite taille est déporté en extrémité d'un fil.

Enfin, proposés par les fabricants, ou conçus par les utilisateurs, des logiciels de gestion des informations dosimétriques pour un ensemble de personnel peuvent être utilisés. Ces systèmes permettent, non seulement de conserver l'enregistrement

des doses prises par le personnel sur le long terme, mais aussi de mettre en application le principe d'optimisation (ALARA). À EDF, par exemple, le système de gestion DOSINAT permet un suivi, journalièrement actualisé, des travailleurs, au plan local d'une centrale, ou au plan national.

Le détecteur de rayonnement utilisé dans ces dosimètres individuels est généralement une diode à semi-conducteur (Silicium), ce peut aussi être un détecteur à gaz (Geiger-Muller, Compteur proportionnel équivalent tissu, ...).

Remarque : Les dosimètres électroniques sont, *stricto sensu*, les seuls appareils de dosimétrie individuelle capables de fournir une information en débit de dose, paramètre qui peut être important en cas d'accident d'irradiation.

5.2.1. Compteurs à remplissage gazeux

Les dosimètres électroniques de type compteur proportionnel équivalent tissu (CPET) simulent un site biologique de faibles dimensions et donnent un signal dont les caractéristiques sont liées au Transfert Linéique d'énergie du rayonnement détecté. Ce type de détecteur donne directement l'équivalent de dose, et la dose absorbée, sans discrimination du type de rayonnement (X, γ , neutrons, particules chargées). Alors que des appareils basés sur ce principe existent aujourd'hui pour la surveillance de zone, l'étude des CPET, dans leur version de dosimètre individuel, est encore en cours et ne devrait déboucher sur des appareils du commerce que d'ici plusieurs années. Ils présentent l'avantage de donner une information sur la « qualité du rayonnement » et constituent ainsi une méthode de choix pour des mesures dans des champs de rayonnements complexes (rayonnements mixtes n- γ , rayonnements cosmiques...). Il faudra, par contre, veiller à la compatibilité avec la réglementation, et éventuellement avec d'autres spécifications en rapport avec la dosimétrie opérationnelle, l'épidémiologie et les besoins éventuels du thérapeute, d'un détecteur qui donne la dose absorbée, l'équivalent de dose et le facteur de qualité moyen du rayonnement, mais ne permet pas toujours de préciser formellement la nature du rayonnement reçu.

Les dosimètres électroniques à compteurs Geiger-Müller ont été les premiers dosimètres électroniques individuels utilisés. Ils réunissent ou peuvent réunir les mêmes fonctionnalités que les dosimètres à diode et présentent la même gamme de sensibilité en énergie. Ils ont la taille d'une calculette et pèsent environ 400 g. Du fait de l'évolution des performances de l'électronique (abaissement des bruits de fond, circuits intégrés spécifiques) ils ont été généralement supplantés, pour la dosimétrie individuelle, par les dosimètres à diode.

5.2.2. Les dosimètres électroniques à diode silicium

Ces dosimètres détectent les rayonnements X, γ et β de haute énergie grâce à un détecteur au silicium compensé en énergie. Chaque interaction rayonnement/détecteur est

transformée en impulsion et convertie en équivalent de dose. Leur réponse entre dans les limites de variation autorisées par la norme CEI à partir de 60 keV jusqu'à 1 à 3 MeV. Le dosimètre à diode de SIEMENS est sensible aux photons à partir de 20 keV et l'utilisation d'une diode supplémentaire lui permet la dosimétrie des bêtas à partir de 250 keV.

Ces dosimètres n'ont vu le jour que récemment, au début des années 90 (DMC 100, DoxSi-2G, DOSICARD, ...). Aujourd'hui, certains dosimètres comportent une diode passive permettant d'évaluer la dose neutron reçue en cas d'accident de criticité.

Le dosimètre est généralement muni d'une structure passive ou mémoire morte (connue en électronique sous le nom d'EEPROM) qui conserve de manière permanente, même après 10 ans d'arrêt, sans alimentation, les dernières informations enregistrées (les quelques dernières interventions), dans la limite de la capacité mémoire. En cas de destruction du dosimètre ou de son électronique (flash nucléaire, accident de criticité, incendie, *etc.*) la mémoire EEPROM se conserve et peut être lue indépendamment. De plus, elle contient l'ensemble horodaté des séquences de l'exposition.

En fonctionnement normal, l'autonomie sur batterie est supérieure à l'année. Grâce à une mémorisation type « carte de crédit » et au couplage à des systèmes informatiques, les données peuvent être conservées sur le long terme (5 ans, ou vie). Le dosimètre peut acquérir et conserver en mémoire l'ensemble des informations concernant le porteur (identification, horodateur, doses, *etc.*). Il peut être attribué de manière permanente à un travailleur ou banalisé. Les informations d'identification et de dose sont accessibles au médecin du travail et à l'employeur par informatique.

Il serait certainement utile qu'une réglementation assure la compatibilité des différents systèmes de dosimétrie électronique et de leurs moyens de gestion alors que ces systèmes ont moins de 5 ans et sont encore en pleine évolution.

Parmi les dosimètres individuels électroniques à diode, proposés par des fabricants français ou européens, et associés à des systèmes informatiques de gestion, on peut citer : le DMC100 de MGPI très utilisé par EDF, le DoxSi-2G de SAPHYMO-phy, le DOSICARD d'EURISYS-mesures, l'EPDS de SIEMENS mis au point en collaboration avec le NRPB (UK), l'ADM-2000 de RADOS Technology fabriqué en Finlande.

Les dosimètres électroniques présentent encore, en majorité, l'inconvénient d'un manque de sensibilité en dessous de 50 keV, ce qui les rend inutilisables dans certaines situations (dans les ateliers où est manipulé le plutonium ou en radiologie médicale, par exemple). Par ailleurs, certains modèles sont sensibles aux parasites électromagnétiques.

5.2.3. Évolution des dosimètres électroniques

Plus encore que d'autres techniques, la dosimétrie électronique suit la continuelle évolution des besoins en dosimétrie et bénéficie de progrès technologiques rapides. Une nouvelle génération de dosimètres est en cours de développement. Ceux-ci sont basés sur la combinaison d'une chambre d'ionisation et d'un module de sauvegarde de l'information sur une mémoire de type EEPROM.

L'ELD (Electronic Legal Dosimeter) de RADOS Technology fabriqué en Finlande : l'élément détecteur associé à sa mémoire morte constitue un badge ne nécessitant pas de pile pour fonctionner. Un dosimètre est constitué de plusieurs détecteurs pour couvrir toute l'étendue de mesure souhaitée, typiquement quelques mSv à plusieurs Sv. Il peut alors être classé comme dosimètre passif et concurrent direct du film ou du dosimètre TLD. On peut en effectuer une lecture périodique. Ce badge peut aussi être connecté à un boîtier électronique qui permet de disposer d'alarmes et d'afficher dose, débit de dose, *etc.* pour une utilisation en dosimétrie opérationnelle. Le fabricant annonce des caractéristiques dosimétriques intéressantes, en particulier une sensibilité aux X et γ à partir de quelques 15 keV. De plus, l'appareil ne semble sensible à pratiquement aucun facteur environnemental extérieur. Ce dosimètre est en cours d'évaluation par l'OPRI.

De la même façon, un dosimètre prototype a été conçu en France (MGPI et GIAT) sur spécification du Ministère de la Défense. Basé sur un détecteur silicium, il permet la mesure des X et γ d'énergies comprises entre 50 keV et 1,5 MeV. Il couvre ainsi une gamme de dose allant de 10 mGy à 10 Gy, la fonction débit-mètre pouvant être masquée ou non. Suivant le modèle, la dynamique de mesure de débit de dose s'étend de 10 μ Gy/h à 2 Gy/h ou de 100 μ Gy/h à 20 Gy/h. Avec une autonomie de pile de 6 mois à un an, il offre en outre une sauvegarde permanente des informations grâce à sa mémoire EEPROM. Une diode de type PIN permet une évaluation, utile en cas d'accident de criticité, de l'exposition aux neutrons pour les fortes doses (> 200 Gy/eau). Un transistor PMOS-fet permet d'évaluer la dose $\gamma > 200$ mGy/eau délivrée en impulsionnel jusqu'à des débits supérieurs à 107 Gy/s. Ce dosimètre permet en outre un échange d'informations à distance avec des lecteurs ou balises.

D'ici quelques années, en fonction des études en cours et des progrès constants et rapides de l'électronique et de l'informatique, on peut penser que la dosimétrie des neutrons pourra également se faire par dosimètre électronique à diode. La réunion en un seul dosimètre de l'ensemble des fonctions de la dosimétrie individuelle (X, γ , β et neutrons ; dose, débit de dose, globalement ou pour chaque rayonnement) semble envisageable dans un proche avenir (3 à 5 ans).

5.3. Dosimétrie des neutrons

5.3.1. Dosimètres passifs : film, tld, émulsion nucléaire, détecteur de trace

Basés sur des principes totalement différents, les divers détecteurs passifs actuellement en usage pour la dosimétrie des neutrons ont en commun le fait qu'ils ne répondent que très partiellement aux besoins.

- Sur le dosimètre « film », une des plages, munie d'un écran de cadmium, permet d'estimer la équivalent de dose due aux neutrons thermiques (*cf.* § 5.1.1). À ce titre, le film joue tout au plus une fonction d'alerte en signalant la présence de neutrons.

- Le dosimètre photographique nucléaire à émulsion NTA détecte les protons de recul issus des interactions des neutrons avec l'hydrogène présent dans le matériau. Il ne permet pratiquement que la détection des neutrons d'énergie supérieure à 1 MeV, ce qui limite son domaine d'application à des spectres de neutrons « rapides », par exemple auprès d'un accélérateur à haute énergie. En pratique, ces dosimètres ne sont pas utilisables dans les centrales et s'avèrent insuffisants dans les installations du cycle du combustible. Le seuil de détection est de 0,4 mSv à 14 MeV alors qu'il est de 3 mSv à 0,4 MeV.

- Le dosimètre à albédo basé sur la thermoluminescence. La différence de lectures entre un TLD de ^6LiF sensible aux X et γ et aux neutrons et un autre de ^7LiF sensible seulement aux X et γ , permet une dosimétrie d'albédo des neutrons thermiques (quelques eV à 10 keV). La réponse de tels dosimètres décroît très rapidement au-delà de 10 keV environ. La sensibilité du dosimètre en équivalent de dose dépend donc très fortement du spectre dans lequel il est utilisé, ce qui oblige à appliquer un facteur d'étalonnage propre à chaque poste de travail. En corollaire, un dosimètre d'albédo ne devrait être utilisé que dans un lieu où le spectre de rayonnement neutronique est stable et bien connu. Ce dosimètre est généralement utilisé par exemple au CEA (PGP-DIN), en complément de l'émulsion photographique NTA, et à COGEMA (COGEBADGE®) ainsi que dans plusieurs pays étrangers (Allemagne, États-Unis...).

- Les détecteurs solides de traces, dont les plus courants utilisent le CR-39, sont basés sur la révélation des traces latentes produites dans le détecteur le long des trajectoires des particules ionisantes. Ce type de détecteur permet la mesure des neutrons au-dessus de 50 keV environ grâce à la réaction (n, p) sur les matériaux hydrogénés et des thermiques grâce à la réaction (n, α) sur des convertisseurs comme le bore ou le lithium. Le traitement électrochimique des détecteurs facilite le comptage des traces au microscope ou encore par des lecteurs automatiques aujourd'hui commercialisés (Autoscan 60 de chez BICRON NE). Un système complet comportant un dosimètre plat et un second pyramidal a été développé par le Service de radioprotection de la défense (DRPS) au Royaume-Uni. Chaque dosimètre est

lu en environ 30 secondes. Le seuil de détection est de 0,126 mSv pour le 1^{er} dosimètre et 0,21 mSv pour le second. La réponse du détecteur est linéaire jusqu'à environ 20 mSv, pour des neutrons de 1,2 MeV, 5,3 MeV et 15,1 MeV. Entre 20 mSv et 200 mSv, la lecture automatique reste possible en appliquant une correction pour tenir compte de la superposition des traces. Pour des équivalent de doses au-delà de 200 mSv, la densité de traces trop importantes oblige à compter le dosimètre au microscope. Comme pour beaucoup de dosimètres neutrons, la courbe de réponse en énergie décroît rapidement en dessous de 200 keV. De par sa géométrie, la réponse angulaire du dosimètre plat n'est pas exactement conforme aux normes tandis que le dosimètre de type pyramidal présente une réponse angulaire acceptable. Si sa réponse en énergie est considérée comme acceptable dans la plupart des cas, il faut cependant l'utiliser avec précaution selon les conditions de spectre.

Des variations significatives du bruit de fond et de la sensibilité propre des détecteurs peuvent se produire selon les lots. Selon les utilisateurs, ceci ne semble toutefois pas constituer un problème rédhibitoire pour l'exploitation en routine. Ce système a en effet reçu un agrément par le Conseil *ad-hoc* au Royaume-Uni où il est aujourd'hui entré en service dans le domaine militaire à bord des sous-marins. Au moins 3 autres laboratoires d'exploitation dosimétrique en Europe utilisent le dosimètre de traces pour les neutrons, un d'entre eux au Royaume Uni (NRPB), un en Italie (ENEA) et un en Suisse (PSI).

Le fabricant BICRON. NE vend le service complet : détecteurs type PN3, système de révélation des traces et le lecteur (Autoscan 60). Ce service est en cours d'évaluation en Suisse par le PSI et en France par l'OPRI.

5.3.2. Dosimètre à bulles

La mise au point du dosimètre à bulles remonte à une vingtaine d'années. Il est basé sur un gel porté métastable. L'énergie libérée dans le gel par les particules à TLE élevé, notamment lors des interactions des neutrons, provoque une vaporisation des microgouttelettes, déjà présentes dans le gel, jusqu'à une taille où elles deviennent visibles et peuvent facilement être comptées à l'œil (ou par un système optique). Les bulles peuvent aussi être enregistrées en temps réel par un dispositif acoustique, constituant alors un dosimètre de type actif ou plus exactement, un dosimètre de poing étant donnés ses dimensions et son poids (environ 1 kg). Deux fabricants nord-américains mettant en œuvre des approches légèrement différentes se partagent aujourd'hui le marché mondial.

Le dosimètre à bulles de type passif représente la meilleure solution adoptée par un groupe de travail français sur la « dosimétrie individuelle des neutrons » constitué des différents partenaires du nucléaire et de la défense (Évaluation de individuel newton dosimetry, 1997). Il présente des inconvénients (coût, coupure en énergie à environ 200 keV, sensibilité aux chocs, à la température, durée de vie

limitée...), mais permet d'évaluer l'équivalent de dose neutron à $\pm 50 \%$ et surtout, par son information visuelle, de sensibiliser les travailleurs à leur exposition. Deux améliorations importantes ont été introduites récemment : la possibilité de recon-denser les bulles à la fin de la mesure (pour une « remise à zéro ») et la compensation en température. Il est possible d'obtenir des dosimètres adaptés à la gamme de sensibilité souhaitée. La technique est toujours en évolution.

Les dosimètres BD100R (neutrons d'énergies > 200 keV), BDT (neutrons ther-miques) et BDP-ND (compensé en température) de BTI ont fait l'objet d'une éva-luation par le Centre Technique d'Homologation de l'Instrumentation de Radioprotection (CTHIR). Ils permettent la mesure avec une sensibilité de 0,03 à 3,3 bulle par μSv soit des limites de détection de 0,001 à 5 mSv qui les rendent bien adaptés à une utilisation journalière ou par intervention. La lecture peut être visuelle ou par un appareil spécifique pour les grands nombres de bulles. Ces dosimètres sont d'ores-et-déjà utilisés au CEA, à EDF, à COGEMA et à la défense. Le retour d'ex-périence est jugé assez satisfaisant mais les résultats ne peuvent pas encore être consi-dérés comme suffisamment sûrs dans toutes les circonstances pour en recommander l'utilisation systématique. Sa durée de vie est actuellement limitée à une centaine de cycles compression-utilisation (soit environ 3 mois d'utilisation en pratique).

Le tableau III présente une synthèse des caractéristiques des dosimètres pas-sifs pour les neutrons.

TABLEAU III

Caractéristiques des dosimètres individuels neutrons passifs les plus courants. La gamme de mesure donne les valeurs approximatives du domaine d'équivalent de dose couvert en pratique par ces différentes techniques.

Characteristics of passive personal neutron dosimeters commonly used. The range of measurement gives approximately the range of dose equivalent which can be measured in practice by the different techniques.

Type de dosimètre	Albédo (TLD)	Détecteurs à bulles	CR-39 (DST)	Film NTA
Réponse en énergie	limitée (< 100 keV)	acceptable	acceptable	très limitée (> 1 MeV)
Gamme de min mesure (mSv) max	0,005-0,2 > 100	0,005-0,02 1-10	0,02-0,3 > 50	0,3-0,8 > 100
Perturbation photon	faible (*)	non	non	faible
Coût détecteur	modéré	élevé	faible	faible
Influence des conditions environnementales	très faible	température et chocs	très faible	humidité et température

(*) en utilisant un système multiéléments (^6LiF - ^7LiF).

5.3.3. Dosimètres électroniques

Un seul dosimètre électronique a été commercialisé (ALOKA, Japon) mais il ne semble pas possible de l'acheter en Europe. Les essais réalisés en laboratoire par le PTB et le CERN, ont montré les piètres performances de ce dosimètre (sur-réponse aux neutrons épithermiques). Des développements sont en cours dans plusieurs laboratoires européens (en particulier à l'IPSN) sur le principe de l'utilisation d'une diode silicium ou sur le principe du dosimètre ELD de RADOS en utilisant un convertisseur hydrogéné associé à un convertisseur par réaction nucléaire (B, Li, Gd...). Les difficultés de ces développements sont liées à la discrimination du rayonnement γ et à la détection des neutrons intermédiaires (50 à 600 keV).

6. Pratiques en France et à l'étranger

Il est intéressant de voir quels types de dosimètres sont utilisés réglementairement dans d'autres pays que le nôtre. Les données qui suivent proviennent d'enquêtes faites d'une part par le réseau WANO (exploitants nucléaires), d'autre part par le CIRC (Centre International de Recherche du Cancer) dans le cadre de l'étude épidémiologique internationale sur les travailleurs exposés. L'enquête réalisée dans le secteur nucléaire en 1995 indique que films photographiques et dosimètres thermoluminescents (TLD) se partagent assez équitablement comme dosimètres obligatoires dans différents pays. Les résultats de l'enquête du CIRC montrent une évolution des techniques en Europe et hors d'Europe. Alors que le film photographique a constitué le dosimètre obligatoire dans pratiquement tous les pays du monde jusqu'au milieu des années soixante-dix, le TLD s'est peu à peu généralisé et imposé comme technique réglementaire dans la majorité des pays à partir de cette période.

6.1. Secteur nucléaire (d'après enquête WANO, 1995)

PAYS	Film photographique	Dosimètre thermoluminescent	autre
Allemagne	obligatoire		RPL
Belgique	obligatoire si pas de TLD	obligatoire si pas de film	
Canada		obligatoire	
France	obligatoire		
Espagne		obligatoire	
Suède		obligatoire	
Royaume-Uni	obligatoire		
USA		obligatoire	

RPL = Radiophotoluminescent

6.2. Enquête CIRC

Pays	Exploitant	Dosimètre	
Belgique	Belgonucléaire	filmbadge (57-84)	TLD (>85)
	Belgoprocess	filmbadge (<79)	TLD (>75)
	SCK/CEN	film (<79)	TLD (>80)
France	COGEMA	film (<87)	TLD+film (>88)
	CEA	film (>65)	
	EDF	filmbadge (>68)	
Allemagne	?	filmbadge (68-90)	? depuis 90
Espagne	Almaraz	filmbadge (<89)	TLD (>89)
	Jose Cabrera	filmbadge (<90)	TLD (>90)
	Sta M. Girona	filmbadge (<92)	TLD (>92)
	Asco	TLD (>83)	
	Cofrentes	TLD (>84)	
	Trillo	TLD (>88)	
	Vandellos II	TLD (>87)	
Royaume-Uni	- AEA Harwell	film (>56)	
	- AEA Dounreay	film (>51)	
	- Winfrith	film (51-70)	TLD (>70)
	AWE	film (>50)	
	BNFL Sellafield	film (>52)	
	Nuclear Electric	filmbadge (>61)	
	SNL		
	Hunterston	film (>64)	
	- Torness	TLD LiBO7 (>86)	
Australie	ANSTO	filmbadge (>57)	
Canada	AECL	filmbadge (44-72)	TLD (>72)
	Hydro Québec	filmbadge (71-79)	TLD (>79)
	Ontario Hydro	film (70-77)	TLD (>78)
	New Brunswick	TLD (>82)	
Finlande	IVO-TVO	TLD (>77)	
Hongrie	Paks	Filmbadge (>82)	
Japon	Toutes installations sauf 2	filmbadge (>57)	
	2 installations	TLD (>81)	
République Tchèque	Jaslovske Bohunice	film (67-92)	TLD (>92)
Suède	ABB Atom	filmbadge (57-75)	TLD (>75)
	Oskarshamn	filmbadge (70-75)	TLD (>75)
	Ringhals	filmbadge (<75)	TLD (>75)
	Studsвик	filmbadge (<74)	TLD (>74)
	Barseback	TLD (>74)	
	Forsmark	TLD (>80)	
Suisse	Beznau	filmbadge (<71)	RPL (72-88) TLD (>88)
	Gosgen	TLD (>78)	
	Leibstadt	TLD (84)	
	Mühleberg	RPL (71-88)	TLD (>89)
USA	Hanford	filmbadge (44-72)	TLD (>72)
	ORNL	filmbadge (44-76)	TLD (>76)
	PNS	filmbadge (52-74)	TLD (>74)
	Rocky flats	filmbadge (51-70)	TLD (>70)

Remarque : le dosimètre photographique désigné, selon le cas, par le terme de « filmbadge » ou de « film » peut comporter un nombre de pages variable.

7. Conclusion

Le dosimètre film est le dosimètre réglementaire pour les travailleurs de la catégorie A. Il est également souvent utilisé, alors que non obligatoire, pour les travailleurs de la catégorie B (exposition faible, visible sur 3 mois). En parallèle, se sont développés des moyens dosimétriques spécifiques correspondant à des besoins que la dosimétrie réglementaire en vigueur ne pouvait satisfaire : dosimétrie opérationnelle, dosimétrie TLD (cogebadge[®], Technicatome) *etc.*

La dosimétrie concerne des rayonnements de nature différente (rayonnement photonique surtout, mais aussi rayonnement β (e^-), γ et neutrons) dans des domaines d'énergie qui peuvent être très variables : de quelques eV à quelques MeV pour les neutrons, à partir de 500 keV pour les β , de quelques keV à plusieurs dizaines de MeV pour les γ . Il existe également des disparités entre les utilisateurs, par exemple le domaine médical est concerné par les rayonnements X (<150 keV) et les photons de quelques keV à plusieurs MeV, alors que le domaine des réacteurs est plutôt concerné par les γ supérieurs à 100 keV et le cycle du combustible par les γ de 10 keV à quelques MeV. D'autre part les différents domaines rencontrés en radioprotection sont souvent à la pointe des progrès techniques et amenés eux-mêmes à évoluer en créant parfois des conditions d'environnement radiatif différentes.

L'interaction de ces rayonnements avec la matière varie en fonction de leur nature et de l'énergie, ceci tant du point de vue des tissus biologiques que des matériaux utilisés en détection.

Les phénomènes physiques mis en jeu sont eux mêmes différents. De 10 keV à quelques MeV les effets dominants pour les photons vont de l'effet photoélectrique à la production de paire en passant par l'émission Compton. Pour les neutrons, la détection par proton de recul fonctionne bien au-dessus de 500 keV alors que pour les neutrons thermiques on utilisera des éléments à forte section efficace comme le bore. La mesure des neutrons d'énergies intermédiaires (les plus concernés pour la dosimétrie $W_R > 10$) pose toujours un problème aujourd'hui aux « dosimétristes ».

Le principe d'optimisation, en particulier dans le domaine nucléaire, incite à un suivi dosimétrique en temps réel auquel ne satisfont pas la plupart des dosimètres passifs. Dans le domaine médical, le suivi en temps réel semble être justifié de façon moins systématique et présente son intérêt pour les postes de travail les plus exposés (radiologie interventionnelle), pour des études de poste, pour la mise en œuvre de nouvelles techniques.

Une réglementation plus contraignante sur les limites nous conduira à abaisser les seuils de détection et les incertitudes de mesures et nécessitera une meilleure discrimination du rayonnement naturel. On notera, qu'avec la nouvelle

réglementation, le seuil d'exposition admissible pour le public sera souvent, en France, du même ordre que l'exposition au rayonnement naturel.

Il nous semble souhaitable que dans ces conditions et pour une meilleure dosimétrie individuelle, celle-ci puisse évoluer avec les progrès techniques et s'adapter aux cas d'espèce rencontrés dans tous les domaines de la radioprotection.

En l'occurrence, il nous paraît important que la réglementation prenne en compte l'ensemble des techniques de dosimétrie individuelle de radioprotection éprouvées en définissant le concept et les critères d'une bonne dosimétrie individuelle, sans pour autant se restreindre à adopter un dosimètre unique qui, on le voit, ne pourra jamais satisfaire totalement à la diversité des besoins.

Un texte réglementaire, s'appuyant sur les critères de base de la dosimétrie individuelle et prenant en compte un certain nombre de textes normatifs (AFNOR, ISO, CEI...) devrait permettre de bien situer la dosimétrie individuelle des travailleurs dans un cadre garantissant sa rigueur (autant que raisonnablement possible) tout en prenant en compte l'évolution des techniques. Le problème se pose de bien définir le cadre de l'acquisition, de la validation et de la conservation des données dosimétriques.

RÉFÉRENCES

Documents ICRU relatifs à la mesure des doses de rayonnements externes :

International Commission on Radiation Units and Measurements (1994). *Quantities and Units in Radioactivity Measurement*. Report 51.

International Commission on Radiation Units and Measurements (1992). *Measurement of Dose Equivalent from External Photon and Electron Radiations*. Report 47.

International Commission on Radiation Units and Measurements (1988). *Determination of Dose Equivalents from External Radiation Source*. Report 43.

International Commission on Radiation Units and Measurements (1985). *Determination of Dose Equivalents Resulting from External Radiation Sources*. Report 39.

Directive Européenne :

Directive 96/29/Euratom du Conseil, du 13 mai 1996, fixant les normes de base relatives à la protection sanitaire de la population et des travailleurs contre les dangers résultant des rayonnements ionisants.

Réglementation française :

Décret du 15 mars 1967

Arrêté du 19 avril 1968

Documents CIPR :

International Commission on Radiological Protection (1996). *Conversion coefficients for use in Radiological Protection against External Radiation*. ICRP Publication 74, Vol. 26, N° 3-4, Pergamon Press, Oxford.

International Commission on Radiological Protection (1991). *Recommendations of the International Commission on radiological Protection*. ICRP Publication 60, Vol. 21, n° 1-3, Pergamon Press, Oxford.

International Commission on Radiological Protection (1982). *General Principles of monitoring for Radiation Protection of Workers*. ICRP Publication 35, *Annals of the ICRP* 9 (4), Pergamon Press, Oxford.

Documents ISO relatifs aux champs de rayonnements de référence et procédures d'étalonnage associées :

ISO 8529 (1989), 8529-2 (1994) et 8529-3 (1994) pour les neutrons.

ISO 6980 (1990) pour les rayonnements bêtas.

ISO 4037 (1979) pour les rayonnements photons.

Normes ISO et CEI relatives aux techniques de dosimétrie :

La norme ISO 1757 (1992) définit la caractérisation des dosimètres photographiques par les influences de l'angle d'irradiation, de l'exposition de l'arrière du dosimètre, de l'énergie du rayonnement sur la réponse du dosimètre.

La norme CEI 1066 (1991) définit pour les dosimètres thermoluminescents des tests de caractérisation qui comprennent la réponse en énergie aux photons, aux rayons bêta et la réponse angulaire.

La norme CEI 1283 (1995) définit la caractérisation des dosimètres (moniteurs individuels) électroniques pour les photons X et γ et pour les bêta d'énergie élevée.

La norme CEI 1323 (1995) définit la caractérisation des dosimètres (moniteurs individuels) électroniques pour les neutrons.

La norme CEI 1525 (1996) de parution la plus récente, définit la caractérisation des dosimètres (moniteurs individuels) électroniques pour les photons X et γ pour les bêta d'énergie élevée et pour les neutrons.

Rapports scientifiques et techniques :

Christensen P., Julius H.W. and Marshall T.O. (1994). *Radiation Protection 73 - Technical Recommendations for Monitoring Individuals occupationally exposed to External Radiation*, Report EUR 14852 EN.

Document EDF - D4002-44/94-037/RDP.

Document EDF D4006-52/96-007/RDP.

Enquête CIRC.

Enquête WANO - Compte rendu de l'enquête menée auprès de WANO sur la dosimétrie - proposition pour l'intercomparaison.

Enquête WANO - Dosimétrie extrémités - Résultats de l'enquête menée auprès d'exploitants étrangers (réseau WANO).