

9

Méthodes physiques de dosimétrie rétrospective

Dans ce chapitre, il s'agit de présenter les techniques de dosimétrie rétrospective dites physiques et de discuter de la pertinence et l'apport potentiel de ces techniques dans le contexte de la reconstitution des doses reçues par les populations de Polynésie française suite aux essais nucléaires. Les données fournies par ces techniques ont été utilisées, en complément d'autres approches, pour reconstituer les doses aux individus liées à une exposition externe ou pour valider des méthodes d'évaluation de doses dans le cadre d'études épidémiologiques ou de suivis sanitaires de populations exposées. Les principales études dans lesquelles ces méthodes ont pu être mises en œuvre concernent l'exposition de populations et de travailleurs du nucléaire suite aux accidents nucléaires de Tchernobyl, du complexe industriel de Mayak ou suite aux essais nucléaires au Kazakhstan et aux États-Unis.

Les méthodes de dosimétrie décrites et discutées reposent sur l'utilisation de phénomènes physiques pour l'analyse des échantillons étudiés et la quantification de la dose absorbée, que ces échantillons soient issus de prélèvements biologiques humains (par ex. émail dentaire) ou de prélèvements réalisés dans l'environnement (par ex. briques et porcelaines). C'est en ce sens que ces méthodes dites physiques se distinguent des méthodes dites de dosimétrie biologique qui utilisent des processus et des observables biologiques comme la fréquence de chromosomes dicentriques dans les lymphocytes par exemple, présentée dans le chapitre 10 (« Dosimétrie biologique »). Les méthodes d'analyse présentées permettent d'étudier des phénomènes physiques induits dans des matrices solides spécifiquement par une irradiation aux rayonnements ionisants. En établissant une relation entre l'intensité du phénomène physique considéré à une dose absorbée dans le matériau considéré, il est possible de déterminer la dose absorbée dans des échantillons constitués du même matériau.

Préambule à la description des techniques de dosimétrie rétrospective

La dosimétrie rétrospective se rapporte à l'estimation de dose due à des expositions passées et limitées dans le temps (bombardements atomiques d'Hiroshima et Nagasaki, accident de surexposition en radiothérapie...) ou à des expositions sur de longues périodes, passées ou n'ayant pas encore pris fin (résidents des territoires contaminés). On comprend aisément que des situations très variées, tant en durée, qu'en niveau de dose ou encore qu'en type de rayonnement peuvent être adressées par les techniques de dosimétrie rétrospective.

Les techniques de dosimétrie rétrospective ne sont pertinentes que pour estimer les doses liées à une exposition externe. Les expositions liées aux retombées radioactives des essais nucléaires sont la combinaison d'une exposition interne et externe. Les techniques de dosimétrie interne ne sont pas abordées dans ce chapitre. Cependant, dans certains cas, la contamination interne pouvant significativement affecter l'estimation de la dose externe, ce point sera discuté notamment pour l'interprétation des analyses des échantillons biologiques.

Il faut également mentionner que des techniques de dosimétrie différentes sont considérées selon le type de rayonnements impliqués. Dans le cas d'une exposition avec une composante neutronique, des techniques spécifiques sont généralement considérées, telles que celles utilisées pour la quantification des radioéléments induits par l'interaction des neutrons avec la matière (activation neutronique). La quantification lorsque les demi-vies des radioéléments sont suffisamment longues peut être réalisée par le biais de comptages des émissions de rayonnements lors de la décroissance radioactive (comptage bêta et spectrométries gamma ou alpha) ou directement par spectrométrie de masse. Ces techniques ont été par exemple employées pour l'estimation des doses neutron pour les survivants des bombardements d'Hiroshima et Nagasaki (Rühm et coll., 1998) ou lors d'accident de criticité (McLaughlin et coll., 2000). Dans le contexte de cette expertise collective, comme aucune contribution due au neutron n'est à considérer, ces techniques spécifiques ne seront donc pas développées et discutées.

Les deux principales techniques d'analyses considérées dans la littérature dans des contextes similaires à celui de la Polynésie française sont d'une part la spectroscopie par résonance paramagnétique électronique (RPE) et d'autre part la luminescence stimulée thermiquement ou optiquement (Simon et coll., 2007 et 2010 ; Romanyukha et Regulla, 1996).

Ces deux techniques permettent d'après la littérature d'estimer des doses dans un éventail très large de matériaux (Trompier et coll., 2009 ; Woda et coll., 2009) et pour des applications très variées (datation de fossile et de sédiments, contrôle dosimétrique de faisceau, dosimétrie d'accident radiologique, exposition chronique...) (Ikeya, 1993).

Cependant, le contexte de l'étude impose un certain nombre de critères évidents quant au choix des matériaux d'intérêt analysables. En effet, il est nécessaire que :

- les matériaux considérés aient été présents sur le site considéré sur toute la période d'exposition ;
- les matériaux n'aient pas été manipulés ou déplacés ;
- l'information stockée dans le matériau suite à l'irradiation soit stable dans le temps ;
- les niveaux de doses mesurables soient compatibles avec les niveaux de doses estimés ;
- les niveaux d'incertitudes soient suffisamment faibles pour que l'information dosimétrique soient pertinente et exploitable ;
- les matériaux puissent être prélevés, car les analyses ne peuvent être réalisées *in situ*.

Au final, avec ces critères, un nombre très limité de matériaux a été considéré pour la spectroscopie par RPE et pour la luminescence dans des contextes similaires.

Ainsi, la spectroscopie RPE n'a été considérée que pour l'analyse de fragments d'émail dentaire issus de dents extraites pour raisons médicales. En effet, l'émail dentaire satisfait à l'ensemble des critères mentionnés ci-dessus. Les radicaux de l'émail dentaire sont extrêmement stables, à tel point qu'ils sont également utilisés pour la datation de fossiles de dents de mammifères. De ce fait, l'émail permet de mesurer la dose cumulée sur toute la vie de la dent y compris les expositions d'origine médicale (radiographie et panoramique dentaire par exemple), ce qui peut induire des biais lors de l'interprétation des doses mesurées. Les doses mesurables peuvent être aussi faibles que quelques dizaines de mGy dans le meilleur des cas (Wieser et coll., 2005 et 2006a). D'un point de vue dosimétrique, l'émail dentaire présente les meilleures caractéristiques parmi tous les matériaux utilisés en dosimétrie RPE. Mais du fait du caractère invasif évident du prélèvement des dents, le prélèvement est uniquement justifié pour raisons médicales. Le dernier critère de choix des matériaux listés précédemment n'est en fait pas complètement satisfait. Cette technique, bien que performante et bien documentée,

n’a pas pu être utilisée à grande échelle pour estimer des doses individuelles ; elle a été principalement utilisée pour valider les méthodes d’estimation de doses comme le montre la figure 9.1 (Chumak et coll., 2005 ; Romanyukha et coll., 2006 ; Ivannikov et coll., 2014) ou pour l’étude de groupe de population limitée (Skvortsov et coll., 2006 ; Zhumadilov et coll., 2016).

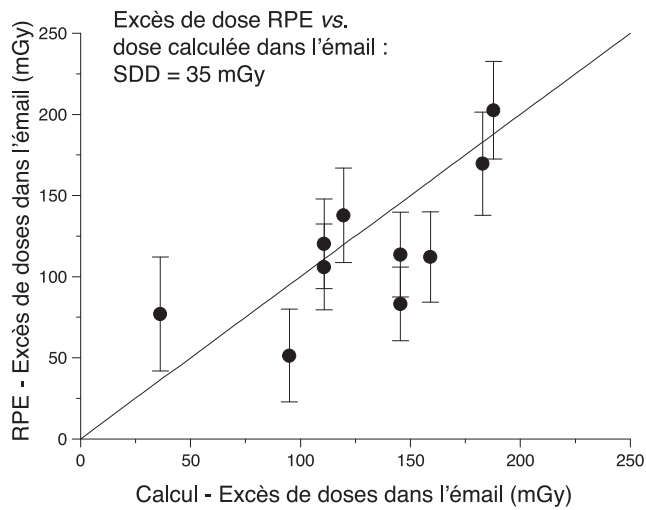


Figure 9.1 : Comparaison des excès de doses estimées sur la base de mesure d’émail dentaire par RPE avec les excès de dose estimée par calcul (Ivannikov et coll., 2014)

Une droite de pente égale à l’unité a été ajoutée pour visualiser l’accord des mesures avec le calcul. L’excès de doses individuelles est obtenu après correction de la dose dans l’émail afin de prendre en compte la contribution à la dose du bruit de fond radiologique naturel durant la vie de la dent.

Les techniques de luminescence peuvent être également appliquées à des matériaux biologiques tel que l’émail dentaire, mais les limites de détection associées (quelques Gy) sont beaucoup plus élevées que pour la spectroscopie RPE et le signal mesuré est par ailleurs instable (Dewitt et coll., 2010 ; Sholom et Desrosiers, 2014). Un certain nombre de matériaux (quartz, feldspath) utilisés initialement pour des applications en datation (couches sédimentaires, coulées de lave, dunes, fossiles...) du fait de la stabilité des signaux, présentent également des limites de détection de l’ordre d’une dizaine de mGy (Stoneham et coll., 1985) et sont présents dans des matériaux de construction ou dans des objets de la vie quotidienne (Bailiff, 1997 ; Bailiff et coll., 2000 ; Bailiff et Mikhailik, 2004 ; Göksu et Bailiff, 2006). De ce fait, les quartz présents dans les briques ainsi que les céramiques (isolateurs électriques, lavabo, cuvette de toilette, vaisselle...) ont été utilisés comme des dosimètres de zone ou d’ambiance (Stoneham, 1985 ; Haskell et coll., 1994 ; Takada et coll., 1999). L’interprétation des doses mesurées dans les matériaux et

l'estimation des doses aux individus à partir de ces données sont complexes et nécessitent un recueil d'information complet et précis auprès des populations (Meckbach et coll., 1996 ; Degteva et coll., 1994 et 2000 ; ICRU, 2002 ; Jacob et coll., 2003). Ce chapitre se limitant uniquement à la description des techniques de dosimétrie, l'analyse des données et le calcul des doses individuelles ne sont pas abordés (voir le chapitre 3 « Reconstructions dosimétriques dans les études sur les essais nucléaires menés en Polynésie française »).

Spectroscopie par résonance paramagnétique électronique (RPE)

Principe de la spectroscopie RPE

La spectroscopie RPE est une technique d'analyse non destructive capable d'identifier et de quantifier la concentration de radicaux ou de défauts dans un matériau solide, dans des solutions ou dans un gaz. Le principe est basé sur la propriété des électrons non appariés à absorber, puis réémettre l'énergie d'un rayonnement électromagnétique de type micro-onde lorsqu'ils sont placés dans un champ magnétique externe (figure 9.2). Cette propriété est analogue à celle des noyaux atomiques en résonance magnétique nucléaire (RMN). D'un point de vue pratique, c'est la dérivée première de l'absorption de la micro-onde qui est mesurée, une modulation en fréquence étant appliquée pour augmenter le rapport signal sur bruit. Une description détaillée de cette technique de spectroscopie et de ses multiples applications est documentée dans les ouvrages de P. Bertrand (Bertrand, 2010, 2014).

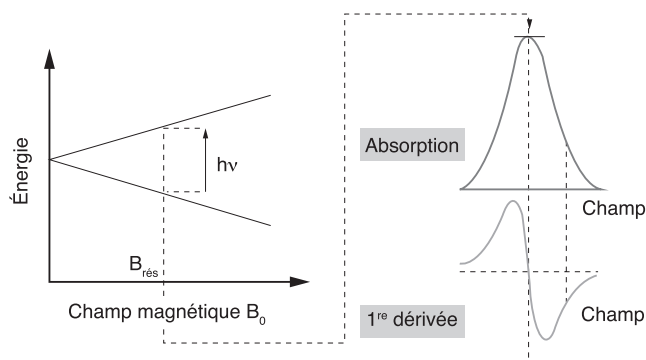


Figure 9.2 : Levée de dégénérescence des spins électroniques et spectre d'absorption du rayonnement micro-onde, et sa dérivée première

Principe de la dosimétrie par RPE

Les interactions des rayonnements ionisants avec la matière génèrent des entités paramagnétiques par excitation et ionisation des atomes et par rupture des liaisons entre atomes. Ces entités, radicaux, défauts ou ions, peuvent être détectés par spectroscopie RPE lorsque leur durée de vie est suffisamment longue. Les espèces paramagnétiques radio-induites sont généralement créées en proportion de la dose absorbée dans le matériau. Selon ce principe, il est possible d'établir une relation entre la dose absorbée et l'intensité du signal d'absorption en mesurant des échantillons irradiés à des doses connues. En dosimétrie RPE, notamment pour l'émail dentaire, il est possible d'établir des courbes d'étalonnage dites universelles, permettant à partir de la mesure d'une intensité de signal dans un échantillon d'en déterminer la dose correspondante.

Dosimétrie RPE sur l'émail dentaire

L'émail dentaire est principalement constitué de cristaux d'hydroxyapatite $(\text{Ca})_{10}(\text{PO}_4)_6(\text{OH})_2$ (96 % en masse) et également d'eau (3 %) et de matière organique (1 %). Les radicaux formés sous irradiation et utilisés en dosimétrie ne sont pas formés à partir de l'hydroxyapatite, mais à partir d'élément à l'état de traces (ions carbonates) contenus dans cette matrice.

L'émail dentaire présente de nombreux avantages :

- le signal induit par irradiation est considéré comme spécifique de l'interaction des rayonnements ionisants ;
- la composante du signal radio-induit utilisé en dosimétrie est extrêmement stable dans le temps (demi-vie de l'ordre de 10^7 années), ce qui est une propriété rare ;
- la production d'espèces paramagnétiques par unité de dose est très importante, ce qui permet de détecter des doses relativement faibles (la limite de détection est de l'ordre de 30-50 mGy pour 100 mg d'échantillon), les doses annuelles reçues sur l'émail en conditions normales sont de l'ordre de quelques mGy qui se cumulent au fil des années ;
- l'augmentation de l'intensité du signal radio-induit avec la dose est considérée comme linéaire et la variabilité inter-échantillon relativement faible (écart-type de l'ordre de 10 %), ce qui permet l'utilisation de courbes d'étalonnage préétablies (Wieser et coll., 2001).

La figure 9.3 présente le spectre RPE d'un échantillon d'émail dentaire ayant reçu une dose de 500 mGy et sa décomposition dans ces deux composantes principales (signal « natif » ou endogène et signal radio-induit).

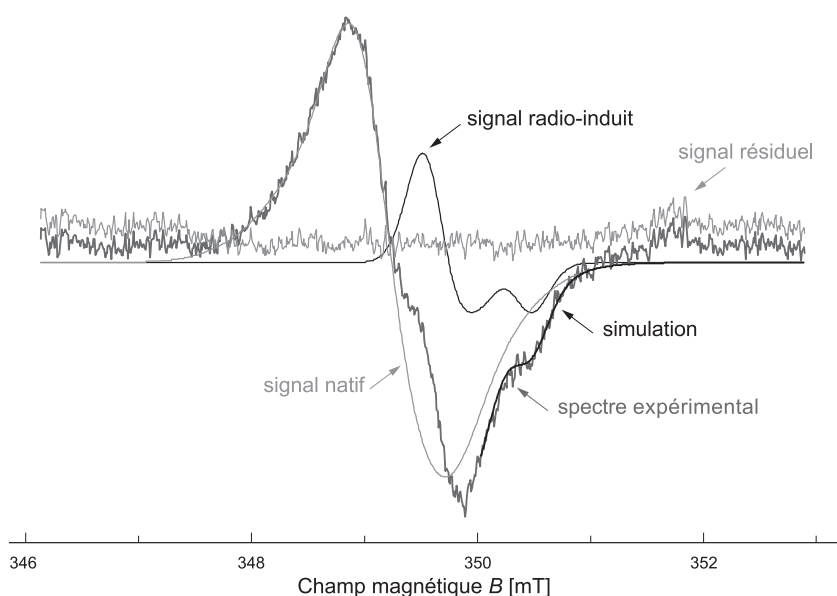


Figure 9.3 : Spectre RPE bande X d'un échantillon d'émail dentaire ayant reçu une dose de 500 mGy. La mesure est réalisée à température ambiante et à une puissance micro-onde de 2 mW (Bahain et coll., 2014)

Le champ magnétique B est exprimé en milli-Tesla (mT). Le signal est décomposé en sa composante radio-induite et sa composante dite « native ».

Les échantillons sont mesurés sous forme de petit grain d'émail ou de poudre dans des tubes de mesure de quelques mm de diamètre introduits dans une cavité de mesure dite cavité résonante. Préalablement à la mesure, il s'agit donc, à partir de la dent prélevée de préparer des échantillons mesurables. Les protocoles de préparation sont très précisément décrits et documentés et ont fait l'objet d'un travail d'harmonisation (IAEA, 2002 ; ISO, 2020⁷⁹). La pratique de la dosimétrie RPE a fait l'objet d'une première norme ISO portant sur les minima requis et une deuxième norme spécifique à la dosimétrie RPE sur l'émail dentaire est en cours de finalisation. Cette dernière norme décrit les différentes étapes de la préparation des échantillons à l'estimation de la dose et des incertitudes associées. Lors de la détermination de l'intensité du signal radio-induit et donc de la dose associée, plusieurs effets parasites peuvent

79. ISO 13304-1:2020. Norme internationale ISO. Radioprotection – Critères minimaux pour la spectroscopie par résonance paramagnétique électronique (RPE) pour la dosimétrie rétrospective des rayonnements ionisants – Partie 1 : principe généraux. ISO 13304-1, deuxième édition 2020-07-01.

ISO 13304-2:2020. Norme internationale ISO. Radioprotection – Critères minimaux pour la spectroscopie par résonance paramagnétique électronique (RPE) pour la dosimétrie rétrospective des rayonnements ionisants – Partie 2 : Dosimétrie ex vivo à partir de l'émail dentaire humain. ISO 13304-2, première édition, 2020-06-01.

induire un biais sur le résultat final (stress mécanique au moment de la préparation, exposition au rayonnement UV, contamination interne notamment au ^{90}Sr , présence de caries, d'implants dentaires...). L'ensemble de ces biais potentiels a fait l'objet de nombreuses études, ce qui permet soit de prendre en compte ces effets, soit de les éviter ou de les limiter (IAEA, 2002). Une revue récente et très détaillée de la littérature de ces 30 dernières années est consacrée à la mesure de l'émail dentaire par RPE (Fattibene et Callens, 2010).

La dosimétrie RPE a également fait l'objet de programmes de comparaison inter-laboratoires ayant pour objectifs d'évaluer et d'améliorer les performances de la technique et de tester les capacités des différents laboratoires (Wieser et coll., 2000a, 2005 et 2006a ; Hoshi et coll., 2007 ; Ivannikov et coll., 2007). Parmi toutes les techniques de dosimétrie physique rétrospective, la RPE sur l'émail dentaire est certainement la technique la mieux établie. Cependant, si la quantification de la dose absorbée dans les échantillons est bien maîtrisée, l'interprétation de l'information peut être compliquée, notamment pour déterminer l'exposition due à une source additionnelle artificielle comme celles liées aux retombées radioactives d'accidents ou d'essais nucléaires.

En effet, la dose absorbée dans l'échantillon est la résultante de différentes contributions :

- le bruit de fond naturel (hors exposition artificielle) avec une contribution comprise entre 0,9 et 1,7 mGy par an (NCRP, 1997), intégrée sur la vie de la dent. La contribution du bruit de fond naturel peut être affinée en prenant en compte la mesure du bruit de fond ambiant externe ;
- les expositions médicales peuvent contribuer notablement. Selon le type d'examen, d'appareillage et selon les réglages, la dose absorbée dans l'émail a été estimée entre 2 et 70 mGy par examen (Sholom et coll., 1997 ; Aragno et coll., 2000). L'analyse séparée de la partie linguale et externe de la dent permet de mettre en évidence une exposition aux rayonnements X de basse énergie comme ceux utilisés en radiologie. Mais l'estimation des doses médicales sera d'autant plus précise que l'historique radiologique est renseigné et détaillé que ce soit pour l'imagerie médicale ou en thérapie. En l'absence d'information, il est difficile d'interpréter les doses significativement supérieures aux doses estimées dues au bruit de fond naturel ;
- le rayonnement UV peut contribuer significativement à une dose apparente (Nilsson et coll., 2001). Les dents les moins exposées à la lumière du jour (molaires) sont donc préférées pour réaliser ce type d'analyse. Certains traitements dentaires utilisent également des lampes UV ou des lasers qui peuvent localement générer des radicaux ;

- les doses liées à l'ingestion ou l'inhalation de particules radioactives. Dans certains cas, les contaminants radioactifs peuvent significativement augmenter la dose déposée dans l'émail dentaire, ce qui ne permet plus de relier la dose estimée dans l'émail à une dose dite « externe » induite par les émissions radiatives des dépôts radioactifs dans l'environnement. C'est le cas du strontium 90 (^{90}Sr), émetteur bêta, qui possède des propriétés chimiques proches de celles du calcium, ce qui implique une fixation préférentielle dans l'émail dentaire lors de la croissance des dents ou dans la dentine (partie interne de la dent) avec des dépôts de dose localisés du fait du faible parcours du rayonnement bêta dans ces tissus. Ces dépôts localisés peuvent induire des doses locales significatives, non représentatives de l'exposition corps entier. De ce fait, l'interprétation des doses mesurées dans l'émail doit se faire avec précaution et nécessite bien souvent des mesures et calculs supplémentaires (Simon et coll., 2007). De telles contaminations ont eu lieu par exemple dans le bassin de la rivière Techa en Russie (Romanyukha et coll., 2001 ; Jacob et coll., 2003).

La RPE sur l'émail dentaire est une technique reconnue pour l'estimation de doses liées à une exposition externe que celle-ci soit récente ou ancienne, élevée ou faible. Cependant, l'interprétation des doses absorbées peut souvent être complexe, notamment lorsqu'il s'agit de mettre en évidence des niveaux faibles de surexposition. Pour interpréter au mieux les données dosimétriques, il est nécessaire de disposer au minimum des informations suivantes :

- âge du donneur ;
- nombre et type d'examens radiologiques au niveau de la tête ;
- nomenclature de la dent pour évaluer la date de sa formation ;
- raisons ayant conduit à l'extraction de la dent et statut sanitaire ;
- historique des traitements sur la dent et à proximité ;
- information sur d'éventuels traitements en radiothérapie ou d'examen en radiologie interventionnelle ;
- estimation de l'exposition professionnelle le cas échéant ;
- historique des lieux de résidence du donneur.

Nouvelles approches en dosimétrie RPE sur l'émail dentaire

L'une des principales limitations de cette technique est le caractère invasif du prélèvement. Au cours de ces 20 dernières années, des techniques de mesure dites *in vivo* ont été développées (Miyake et coll., 2016). Ces dispositifs permettent une mesure de la surface de la dent directement dans la cavité buccale d'un individu. Si l'approche semblait prometteuse d'un point de vue pratique,

ces techniques n'ont jamais pu atteindre les niveaux requis de sensibilité et d'incertitudes pour pouvoir être utilisées dans le cadre d'études épidémiologiques, ni même d'ailleurs pour des situations d'urgences radiologiques.

Une autre approche a été proposée plus récemment. Elle consiste à réduire la quantité d'échantillon d'émail nécessaire à une analyse RPE. L'approche conventionnelle en dosimétrie utilise des spectromètres RPE fonctionnant avec des micro-ondes de l'ordre de 9,8 GHz (bande X). La taille et la sensibilité des cavités de mesure de ces machines sont optimum pour les masses de l'ordre de 100 mg habituellement collectées sur une dent. Les échantillons de masse inférieure à 100 mg n'ont pas été considérés dans la plupart des études, ce qui peut représenter dans le cadre d'études épidémiologiques une perte non négligeable d'information. En augmentant la fréquence de la micro-onde, typiquement 34 GHz (bande Q), on réduit d'autant la taille de la cavité et, dans ce cas, la sensibilité des cavités associées est optimale pour des échantillons de quelques mg seulement. Cette approche a été appliquée avec succès à l'émail dentaire (Romanyukha et coll., 2007, 2014 ; Trompier et coll., 2011 ; De et coll., 2013). Les limites de détection associées à la RPE en bande Q sont de l'ordre de quelques centaines de mGy pour 5 mg d'échantillons. Les mini-biopsies d'émail dentaire sont prélevées très facilement en quelques minutes. L'IRSN a déjà réalisé avec cette technique une dizaine d'expertises, qui n'auraient pas pu être réalisées avec la méthode conventionnelle (par ex. : IAEA, 2018). Lorsque cette technique aura atteint le niveau de maturité de la RPE en bande X, on peut espérer que les limites de détection soient équivalentes. Si tel était le cas, la RPE en bande Q permettrait d'élargir de manière considérable les capacités de dosimétrie rétrospective en support aux études épidémiologiques ou au suivi de populations exposées à de faibles niveaux de dose.

Conclusions sur les aspects techniques de la dosimétrie RPE sur l'émail dentaire

Si cette technique est la plus aboutie et la plus mature des différentes techniques de dosimétrie rétrospective physique, son application reste, pour le moment, limitée par le caractère invasif du prélèvement. L'interprétation des données dosimétriques, lorsque les doses sont significativement supérieures aux doses attendues selon une exposition au bruit de fond naturel est complexe et nécessite de disposer d'informations détaillées et complètes sur le donneur. À l'inverse, lorsque les doses sont du niveau de celles attendues pour le seul bruit de fond naturel, il est relativement aisé de conclure à une absence d'exposition significative.

Luminescence stimulée thermiquement ou optiquement (TL/OSL)

Principe de la luminescence

La luminescence est un phénomène physique lié à la capacité de cristaux (typiquement pour des matériaux naturels tels des quartz et des feldspaths) d'accumuler l'énergie cédée par l'interaction des rayonnements ionisants et de restituer cette énergie sous forme de lumière selon différents modes de stimulation (électrique, thermique, chimique, mécanique ou lumineuse). Lorsque la stimulation est réalisée thermiquement, on parle de luminescence stimulée thermiquement (LST) ou de thermoluminescence (TL). Pour une stimulation optique, c'est-à-dire en utilisant une source lumineuse (lumière bleue, verte...), on parle de luminescence stimulée optiquement (LSO). La TL et la LSO sont les deux principales techniques de luminescence utilisées en dosimétrie.

Les principes de la luminescence sont complexes mais sont souvent décrits de manière simplifiée par un schéma en bandes d'énergies (figure 9.4). Dans un solide, les niveaux d'énergie peuvent être représentés par de larges bandes empilées les unes sur les autres. En effet, considérons un matériau non conducteur possédant une bande de conduction et une bande de valence séparées par une bande interdite possédant toutefois des pièges spécifiques (un cristal n'est jamais parfait, il contient de très grandes quantités d'impuretés et de défauts ponctuels dont certains peuvent constituer des sites « pièges » pour les électrons libérés par l'irradiation). Initialement, les

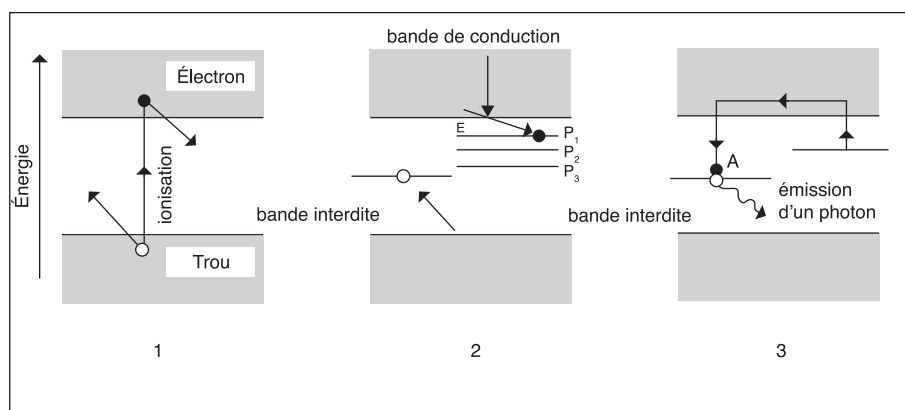


Figure 9.4 : Représentation schématisée du modèle des bandes pour expliquer le phénomène de luminescence

électrons se trouvent dans la bande de valence. Les rayonnements ionisants permettent de dissocier une paire électron-trou, les électrons passent de la bande de valence à la bande de conduction puis « tombent » dans les pièges situés dans la bande interdite.

Sous l'effet d'une stimulation externe, les électrons repassent dans la bande de conduction puis redescendent dans la bande de valence. La recombinaison avec les trous est associée avec une émission de photons lumineux qui constituent le signal de luminescence.

Principe de la dosimétrie par luminescence

La dosimétrie par luminescence repose sur la capacité des cristaux à accumuler les effets générés par irradiation. L'énergie stockée est proportionnelle à la dose absorbée par l'échantillon. Après stimulation, l'intensité de la luminescence est proportionnelle à l'énergie absorbée à la dose d'irradiation accumulée au cours du temps. Cette technique est destructive. Contrairement à la RPE, l'échantillon ne peut être analysé qu'une seule fois. Les pièges sont vidés, ce qui réinitialise les capacités de stockage de l'échantillon. Cette propriété est particulièrement intéressante pour la dosimétrie rétrospective, notamment dans les matériaux de construction, tels que les briques et les tuiles dans les poteries. Ainsi, lors de leur fabrication, les quartz contenus dans ces matériaux sont chauffés à des températures supérieures à 500 °C permettant de vider tous les pièges et de réinitialiser ce dosimètre naturel. La dose mesurée dans ces matériaux est ainsi la dose accumulée depuis cette remise à zéro. En connaissant la date de fabrication des objets et en déterminant la dose due au bruit de fond naturel, on peut donc, en mesurant la dose totale dans le matériau, en déduire la dose accumulée du fait de la présence d'une radioactivité artificielle due à un dépôt autour du point de prélèvement. On comprend aisément que plus la dose liée au bruit de fond naturel est élevée, plus il sera complexe de mettre en évidence des doses faibles. Une part importante de la dose naturellement délivrée dans le matériau est due aux radionucléides présents dans ces matériaux (^{40}K , $^{238}\text{U}/^{232}\text{Th}$ et descendants) qui s'ajoute au bruit de fond ambiant. La dose accumulée annuellement par le quartz présent dans la brique par exemple est de l'ordre de 2 à 4 mGy (ICRU, 2002).

La propriété de remise à zéro du signal présente un autre avantage. En ré-irradiant l'échantillon à une dose connue, on peut après relecture déterminer une relation directe entre luminescence et dose absorbée dans le matériau. Cette méthode d'étalonnage direct est plus précise que l'utilisation de courbes d'étalonnage réalisées avec des matériaux de même type, qui prend en compte

la variabilité naturelle de la réponse à la dose des matériaux considérés. Avec ces techniques, il est possible d'estimer des doses aussi faibles qu'une dizaine de mGy (Stoneham, 1985). En réalisant des prélèvements sur un nombre suffisant d'emplacements, il est possible, en combinant ces résultats avec des simulations numériques et des cartographies de débit de dose, de reconstituer le champ de rayonnement. Une description détaillée de ces méthodes peut être trouvée dans le rapport ICRU n° 68 (ICRU, 2002), de même que les approches permettant à partir de ces données d'estimer des doses d'exposition. Des programmes de comparaison inter-laboratoires ont également été organisés pour améliorer et valider l'application des techniques de luminescence sur les matériaux de l'environnement (Stepanenko et coll., 2006).

Matériaux utilisés en dosimétrie par luminescence

Pour les raisons expliquées précédemment, les céramiques cuites comme les briques, dalles, les tuiles, poteries et les objets à base de porcelaine sont les principaux matériaux utilisés pour l'application de ces techniques de dosimétrie basées sur la luminescence (Stoneham, 1985 ; Bailiff, 1997 ; Bailiff et coll., 2000 ; Bailiff et Mikhailik, 2004 ; Göksu et Bailiff, 2006).

Synthèse et comparaison des techniques de dosimétrie rétrospective physique

Le tableau 9.I permet de comparer les principales caractéristiques des techniques de dosimétrie décrites précédemment. Il faut considérer que ces deux techniques sont complémentaires et sont généralement utilisées dans une approche globale faisant intervenir d'autres approches, comme la simulation numérique, les recueils d'information par entretiens, les méthodes de dosimétrie interne, etc. Ces deux techniques n'adressent que la problématique de l'exposition externe. Dans la plupart des situations dans lesquelles ces techniques ont été utilisées, à l'exception des accidents radiologiques, l'exposition était combinée (interne et externe). La RPE sur l'émail dentaire peut permettre une évaluation individuelle de la dose reçue, alors que les techniques de luminescence sont utilisées dans une approche environnementale de l'estimation de la dose.

Tableau 9.I : Synthèse et comparaison des principales caractéristiques des techniques de dosimétrie physique décrites (d’après le rapport ICRU n° 68, page 102, tableau 6.1 [ICRU, 2002])

Méthode	Matériau	Type de rayonnement mesuré	Limite de détection	Objet de la mesure	Délai	Remarques
RPE	Émail dentaire	Gamma et X	30-100 mGy	Radical	Pas de limite	Prélèvement invasif
TL/OSL	Céramiques	Gamma	10-50 mGy	Électrons piégés	Pas de limite	Prédose naturelle influence la limite de détection

RPE : Résonance paramagnétique électronique ; TL/OSL : Luminescence stimulée thermiquement ou optiquement.

Bilan des études ayant inclus les techniques de dosimétrie rétrospective physique

Avant de discuter de la pertinence de l'utilisation de ces deux techniques dans le contexte de l'exposition des populations de la Polynésie française aux retombées des essais nucléaires, il convient de passer en revue leurs nombreuses applications. Les tableaux 9.II et 9.III font la synthèse des différentes études ayant utilisé les deux techniques décrites dans ce chapitre. On peut noter qu'un nombre important d'études ont fait appel à ces techniques. De plus, lorsque les doses sont relativement élevées, comme pour les survivants d'Hiroshima et Nagasaki ou pour les liquidateurs de Tchernobyl, la RPE est systématiquement utilisée en complément de la dosimétrie biologique et le cas échéant avec d'autres techniques de reconstitution de dose qui incluent la luminescence. Pour les études de population, notamment en support aux études épidémiologiques, la RPE sur l'émail dentaire a été largement utilisée, que ce soit pour la reconstruction individuelle des doses ou pour la validation des méthodes d'estimation des doses. Cette technique a permis de mettre en évidence des excès de dose par rapport au bruit de fond naturel attendu de quelques dizaines de mGy. Ainsi pour les populations résidant dans les territoires contaminés russes suite à l'accident Tchernobyl, des excès de dose atteignant 70 mGy ont été mis en évidence (Stepanenko et coll., 2003). Une bonne corrélation a été trouvée entre les doses reconstruites et les doses mesurées dans l'émail dentaire avec une déviation moyenne quadratique de 34 mGy entre les deux approches (Ivannikov et coll., 2004). Concernant les études sur la population de la rivière Techa, un excès de dose de 36 ± 29 mGy a par exemple été mis en évidence par Wieser et coll. (2014) et qui est d'après les auteurs en bon accord avec les doses reconstruites par approche analytique. Cependant, dans le cas des doses

Tableau 9.II : Synthèse des études épidémiologiques ayant utilisé la RPE (Résonance paramagnétique électronique) (mise à jour du tableau issu de Fattibene et Callens, 2010)

Étude	Nombre de doses évaluées	Autres méthodes d'évaluation	Références
Survivants des bombardements d'Hiroshima et Nagasaki, Japon	Environ 100	Cytogénétique Reconstitution analytique, activation neutronique et TL/OSL	Ikeya et coll., 1984, 1986 ; Ikeya et Ishii, 1989 ; Tatsumi-Miyajima, 1987 ; Tatsumi-Miyajima et Okajima, 1991 ; Nakamura et coll., 1998
Liquidateurs de Tchernobyl, Ukraine	660	Cytogénétique Reconstitution analytique et TL/OSL	Sholom et coll., 2000 ; Chumak et coll., 1998, 1999, 2005
Liquidateurs de Tchernobyl, Russie	Environ 100	Cytogénétique Reconstitution analytique et TL/OSL	Skvortsov et coll., 2000 ; Sevan'kaev et coll., 2005, 2006
Population des territoires contaminés par les retombées de Tchernobyl, Russie	Environ 2 500	Reconstitution analytique et TL/OSL	Ishii et coll., 1990 ; Serezhnikov et coll., 1992 ; Ivannikov et coll., 1997, 2000, 2004 ; Stepanenko et coll., 1998, 2003 ; Skvortsov et coll., 2000 ; Takada et coll., 2000 ; Gualtieri et coll., 2001
Travailleurs du nucléaire, Mayak, Russie	Environ 100	Dosimétrie individuelle	Romanyukha et coll., 1994, 1996a, b et c, 2000 ; Wieser et coll., 2006b
Population du bassin de la rivière Tcha, Russie	Environ 300 + 229	Reconstitution analytique et TL/OSL	Degteva et coll., 2000, 2005 ; Romanyukha et coll., 1996a et b, 2001, 2002a ; Shishkina et coll., 2001, 2003, 2005 ; Tikunov et coll., 2006 ; Tolstykh et coll., 2003 ; Wieser et coll., 1996, 2000a et b, 2006a et b, 2014
Population autour du polygone de test de Sémipalatinsk, Kazakhstan	Environ 30	Reconstitution analytique et TL/OSL	Ivannikov et coll., 2001, 2004, 2006 ; Romanyukha et coll., 2002b ; Simon et coll., 2003 ; Skvortsov et coll., 2006 ; Stepanenko et coll., 2006 ; Zhumadilov et coll., 2006, 2007, 2016
Témoin du test nucléaire Totskoye, Russie	10	-	Romanyukha et coll., 1999
Vicime de l'accident de Goiania, Brésil	6	Cytogénétique et signes cliniques	Rossi et coll., 2000
Sous-marinier, Russie	40	Cytogénétique	Sevan'kaev et coll., 2006
Population, bruit de fond, Russie	150	-	Ivannikov et coll., 1997 et 2000 ; Skvortsov et coll., 2000
Population, bruit de fond, Inde	50	-	El-Faramawy, 2005

TL/OSL : Luminescence stimulée thermiquement ou optiquement.

Tableau 9.III : Études ayant utilisé les techniques de luminescence

Étude	Autres méthodes d'évaluation	Références
Hiroshima et Nagasaki, Japon	Reconstitution analytique	Maruyama et coll., 1987
Population territoire contaminé Tchernobyl, Ukraine		Baillif et coll., 2004b
Semiplatinsk, Kazakhstan		Baillif et coll., 2004c
Bassin de la rivière Techa, Russie	Reconstitution analytique, mesure de terrain	Bougrov et coll., 1998 ; Degteva et coll., 1994, 2000 ; Jacob et coll., 2003 ; Taranenko et coll., 2003 ; Göksu et coll., 2006
Nevada test site, États-Unis	Reconstitution analytique	Haskell et coll., 1988, 1994 ; Llyod et coll., 1990
Ville de Pripyat, Ukraine	-	Stoneham and coll., 1993

estimées autour de Semipalatinsk, même si celles-ci sont bien plus élevées, les doses mesurées par RPE et estimées par méthode analytique ne sont pas en accord. Pour le village de Dolon par exemple, les doses mesurées par RPE sur les prélèvements d'émail étaient de l'ordre de 140 mGy (au-dessus du bruit de fond naturel), alors que les reconstitutions de dose analytique donnaient des doses de l'ordre de 500 mGy (Stepanenko et coll., 2006). Ces différences observées entre les différentes méthodes ne sont *a priori* pas encore comprises. Cela montre bien toute la difficulté et les limites de l'application de ces méthodes et la nécessité de déployer des approches multi-techniques.

Dans le cas de la luminescence, les doses mesurées dans les matériaux sont intégrées dans une méthode analytique pour estimer ensuite les doses aux populations. Ces méthodes ont certainement permis d'affiner les estimations finales de dose et ont été appliquées également dans de nombreuses études (comme par exemple pour Tchernobyl, rivière Techa, Semipalatinsk, Nevada).

Un nombre important d'études ont été menées visant à évaluer l'impact sanitaire de l'exposition de population à des rejets accidentels de matières radioactives ou à des retombées suite à des accidents nucléaires majeurs ou de tests aériens d'armes nucléaires. Ces études ont fait appel à de nombreuses approches techniques ou méthodologiques pour évaluer les doses aussi précisément que possible. Les techniques de RPE et de luminescence ont été utilisées dans ce cadre comme données d'entrée ou pour valider les approches analytiques et toujours en complément d'autres techniques. Ces techniques de dosimétrie ne se sont valables que pour la composante dite externe de l'exposition.

Conclusion : discussion sur l'application des techniques de dosimétrie physique rétrospective en Polynésie française

Si la contribution de l'exposition externe est considérée comme faible (au plus de l'ordre de quelques mSv), des mesures par RPE pourraient confirmer le cas échéant les niveaux d'exposition. Il est important de considérer que même sans contribution liée aux essais nucléaires par exemple, il est possible d'estimer la dose vie de l'émail (dose intégrée depuis la formation des dents). Ce type d'analyse a été réalisé avec succès sur des populations non exposées. L'aspect le plus complexe restera l'analyse des doses mesurées dans le cas où celles-ci seraient significativement supérieures aux doses attendues du fait du bruit de fond naturel. Dans le cas contraire, l'analyse aura montré que l'exposition externe liée aux retombées est négligeable.

D'un point de vue pratique, ce type de mesures ne peut être envisagé que dans le cadre d'un projet de longue durée, avec des moyens conséquents et avec un soutien technique local pérenne (dentiste par exemple).

L'utilisation des techniques de luminescence est dans un premier temps conditionnée par la présence de matériaux analysables (briques, tuiles en terre cuite, poterie, céramique...). Si tel était le cas, il faudrait évaluer attentivement la pertinence de ces mesures par rapport aux données déjà disponibles. Ces techniques pourraient éventuellement apporter des éléments d'information pour des sites qui n'avaient pas initialement fait l'objet de mesure de terrain mais qui se sont avérés par la suite impactés par les retombées.

En dehors de l'aspect dosimétrie, la revue de la littérature montre que l'émail dentaire conserve l'information d'une contamination au ^{90}Sr , bien au-delà de la vie de l'individu. Si la contamination a lieu au moment de la formation des dents, alors le ^{90}Sr se trouve piégé de manière permanente dans la matrice de l'émail (hydroxyapatite). Des techniques de spectrométrie de masse ou de scintillation liquide peuvent être employées pour mettre en évidence la présence de ^{90}Sr dans des dents prélevées (Badie et coll., 1987). Dans ce type d'étude, il est nécessaire de ne considérer que l'émail dentaire pour la minéralisation des échantillons, le ^{90}Sr n'étant pas fixé définitivement dans la dentine ou dans les racines, ce qui a pour conséquence d'induire un biais minimisant l'activité de ^{90}Sr . En cas de niveau de contamination plus élevé, des systèmes de plaques d'imagerie au phosphore ou basés sur des CMOS⁸⁰ peuvent être utilisés pour mettre en évidence la contamination. Ce type de test devra être réalisé si

80. *Complementary Metal Oxide Semiconductor.*

des échantillons analysés par RPE présentent des doses anormalement élevées, ou si une contamination au ^{90}Sr est attendue.

Selon la même approche, il pourrait être envisagé d'utiliser la coquille de bénitiers pour monitorer les apports du ^{90}Sr dans le milieu marin. Les analyses réalisées par l'IRSN sur les bénitiers dans le cadre de la surveillance de l'environnement ont concerné uniquement les chairs de ces mollusques. De la même manière que pour l'émail, le ^{90}Sr , du fait de son analogie chimique avec le calcium, devrait être piégé dans la coquille constituée de carbonate de calcium. Les bénitiers pouvant vivre plusieurs centaines d'années et compte tenu de la quantité d'eau filtrée, leurs coquilles pourraient garder la trace des éventuelles contaminations du milieu marin. Comme dans les cernes d'un arbre, il devrait être possible de dater une éventuelle contamination, la coquille pouvant être considérée comme un chrono-indicateur de la contamination.

RÉFÉRENCES

Aragno D, Fattibene P, Onori S. Dental radiography: tooth enamel EPR dose assessment from Rando phantom measurements. *Phys Med Biol* 2000 ; 45 : 2671-83.

Badie C, Arnould J, Sarbach, *et al.* Teneur en ^{90}Sr de dents humaines collectées en Polynésie française. *Radioprotection* 1987 ; 22 : 325-32.

Bahain JJ, Dolo JM, Falguères C. La dosimétrie des rayonnements ionisants. In : Bertrand P, ed. *La spectroscopie de résonance paramagnétique électronique – Applications*. Grenoble : EDP Sciences, 2014 : 1-24.

Bailiff IK. Retrospective dosimetry with ceramics. *Radiat Meas* 1997 ; 27 : 923-41.

Bailiff IK, Bøtter-Jensen L, Correcher V, *et al.* Absorbed dose evaluations in retrospective dosimetry: methodological developments using quartz. *Radiat Meas* 2000 ; 32 : 609-13.

Bailiff IK, Mikhailik VB. The use of calcium silicate bricks for retrospective dosimetry. *Radiat Meas* 2004a ; 38 : 91-9.

Bailiff IK, Stepanenko VF, Göksu HY, *et al.* Comparison of retrospective luminescence dosimetry with computational modelling in two highly contaminated settlements downwind of the Chernobyl NPP. *Health Phys* 2004b ; 86 : 25-41.

Bailiff IK, Stepanenko VF, Göksu HY, *et al.* The application of retrospective luminescence dosimetry in areas affected by fallout from the Semipalatinsk nuclear test site: an evaluation of potential. *Health Phys* 2004c ; 87 : 625-64.

Bertrand P. *La spectroscopie de résonance paramagnétique électronique – Fondements*. Grenoble : EDP sciences, 2010.

Bertrand P. *La spectroscopie de résonance paramagnétique électronique. Applications.* Grenoble : EDP Sciences, 2014.

Bougrov NG, Göksu HY, Haskell EH, *et al.* Issues in the reconstruction of environmental doses on the basis of thermoluminescence measurements in the Techa River side. *Health Phys* 1998 ; 75 : 574-83.

Chumak V, Likhtarev I, Sholom S, *et al.* Chernobyl experience in field of retrospective dosimetry: reconstruction of doses to the population and liquidators involved in the accident. *Radiat Prot Dosim* 1998 ; 77 : 91-5.

Chumak V, Sholom S, Pasalskaya L. Application of high precision EPR dosimetry with teeth for reconstruction of doses to Chernobyl populations. *Radiat Prot Dosim* 1999 ; 84 : 515-20.

Chumak V, Sholom S, Bakhanova E, *et al.* High precision EPR dosimetry as a reference tool for validation of other techniques. *Appl Radiat Isot* 2005 ; 62 : 141-6.

De T, Romanyukha A, Trompier F, *et al.* Feasibility of Q-Band EPR dosimetry in biopsy samples of dental enamel, dentine and bone. *Appl Magn Reson* 2013 ; 44 : 375-87.

Degteva MO, Kozheurov VP, Vorobiova MI. General approach to dose reconstruction in the population exposed as a result of the release of radioactive wastes into the Techa river. *Sci Tot Environ* 1994 ; 142 : 49-61.

Degteva MO, Vorobiova MI, Kozheurov VP, *et al.* Dose reconstruction system for the exposed population living along the Techa River. *Health Phys* 2000 ; 78 : 542-54.

Degteva MO, Anspaugh LR, Akleyev AV, *et al.* Electron paramagnetic resonance and fluorescence in situ hybridization-based investigations of individual doses for persons living at Metlino in the upper reaches of the Techa River. *Health Phys* 2005 ; 88 : 139-53.

Dewitt R, Klein DM, Yukihiro EG, *et al.* Optically stimulated luminescence (OSL) of tooth enamel and its potential use in post-radiation exposure triage. *Health Phys* 2010 ; 98 : 432-9.

El-Faramawy NA. Estimation of radiation levels by EPR measurement of tooth enamel in Indian populations. *Appl Radiat Isot* 2005 ; 62 : 207-11.

Fattibene P, Callens F. EPR dosimetry with tooth enamel: a review. *Appl Radiat Isot* 2010 ; 68 : 2033-116.

Göksu HY, Bailiff IK. Luminescence dosimetry using building materials and personal objects. *Radiat Prot Dosim* 2006 ; 119 : 413-20.

Göksu HY, Stepanenko VF, Bailiff IK, *et al.* Intercomparison of luminescence measurements of bricks from Dolon' village: experimental methodology and results of European Study Group. *J Radiat Res* 2006 ; 47 : A29-A37.

Gualtieri G, Colacicchi S, Sgattoni R, *et al.* The Chernobyl accident: EPR dosimetry on dental enamel of children. *Appl Radiat Isot* 2001 ; 55 : 71-9.

Haskell EH, Kaipa PL, Wrenn ME. Pre-dose TL characteristics of quartz inclusions removed from bricks exposed to fallout radiation from atmospheric testing at the Nevada test site. *Nuc Tracks Radiat Meas* 1988 ; 14 : 113-20.

Haskell EH, Bailiff IK, Kenner GH, *et al.* Thermoluminescence measurements of gamma-ray doses attributable to fallout from the Nevada test site using building bricks as natural dosimeters. *Health Phys* 1994 ; 66 : 380-91.

Hoshi M, Toyoda S, Ivannikov A, *et al.* Interlaboratory comparison of tooth enamel dosimetry on Semipalatinsk region : Part 1, general view. *Radiat Meas* 2007 ; 42 : 1005-14.

IAEA (International Atomic Energy Agency). *Use of the electron paramagnetic resonance dosimetry with tooth enamel for retrospective dose assessment. Report of a co-ordinated research project.* IAEA-TECDOC-1331. Vienna : IAEA, 2002.

IAEA (International Atomic Energy Agency). *The radiological accident in Chilca.* STI/PUB/1776, ISBN 978-92-0-101817-5. Vienna : IAEA, 2018.

ICRU (International Commission on Radiation Units and Measurements). *Retrospective assessment of exposures to ionising radiation.* Report 68, J. I.C.R.U., 2 n° 2, 2002.

Ikeya M. *New Applications of electron spin resonance. Dating, dosimetry and microscopy.* Singapore : World Scientific Publishing, 1993.

Ikeya M, Ishii H. Atomic bomb and accident dosimetry with ESR natural rocks and human tooth in vivo spectrometer. *Appl Radiat Isot* 1989 ; 40 : 1021-7.

Ikeya M, Miyajima J, Okajima S. ESR dosimetry for atomic bomb survivors using shell buttons and tooth enamel. *Jpn J Appl Phys* 1984 ; 23 : L697-9.

Ikeya M, Miki T, Kai A, *et al.* ESR dosimetry of A-bomb radiation using tooth enamel and granite rocks. *Radiat Prot Dosim* 1986 ; 17 : 181-4.

Ishii H, Ikeya M, Okano M. ESR dosimetry of teeth of residents close to Chernobyl reactor accident. *J Nucl Sci Technol* 1990 ; 27 : 1153-5.

Ivannikov AI, Skvortsov VG, Stepanenko VF, *et al.* Wide scale EPR tooth dosimetry. Results and problems. *Radiat Prot Dosim* 1997 ; 71 : 175-80.

Ivannikov AI, Skvortsov VG, Stepanenko VF, *et al.* Tooth enamel EPR dosimetry: sources of errors and their correction. *Appl Radiat Isot* 2000 ; 52 : 1291-6.

Ivannikov AI, Zhumadilov ZH, Gusev BI, *et al.* Individual dose reconstruction among residents living in the vicinity of the Semipalatinsk nuclear test site using EPR spectroscopy of tooth enamel. *Health Phys* 2001 ; 83 : 183-96 (and Erratum in *Health Phys* 2004 ; 86 : 633).

Ivannikov AI, Gaillard-Lecanu E, Trompier F, *et al.* Dose reconstruction by EPR spectroscopy of tooth enamel: application to the population of Zaborie village exposed to high level of radiation after the Chernobyl accident. *Health Phys* 2004 ; 86 : 121-34.

Ivannikov A, Zhumadilov K, Tieliewuhan E, *et al.* Results of EPR dosimetry for population in the vicinity of the most contaminating radioactive fallout trace after

the first nuclear test in the Semipalatinsk test site. *J Radiat Res* 2006 ; 47 (suppl. A) : A39-46.

Ivannikov A, Toyoda S, Hoshi M, *et al.* Interlaboratory comparison on tooth enamel dosimetry on Semipalatinsk region: Part 2, effects of spectra processing. *Radiat Meas* 2007 ; 42 : 1015-20.

Ivannikov AI, Skvortsov VG, Stepanenko VF, *et al.* Comparative analysis between radiation doses obtained by EPR dosimetry using tooth enamel and established analytical methods for the population of radioactively contaminated territories. *Radiat Prot Dosim* 2014 ; 159 : 125-9.

Jacob P, Göksu H, Taranenko V, *et al.* On an evaluation of external values in the Techa river dosimetry system (TRDS) 2000. *Radiat Environ Biophys* 2003 ; 42 : 169-74.

Lloyd RD, Gren DC, Simon SL, *et al.* Individual external exposures from Nevada test site fallout for Utah leukemia cases and controls. *Health Phys* 1990 ; 59 : 723-37.

McLaughlin TP, Monahan SP, Pruvost NL, *et al.* *Review of criticality accidents, 2000 Revision*. Los Alamos : National Laboratory, 2000.

Maruyama T, Kumamoto Y, Ichikawa Y, *et al.* Thermoluminescence measurements of gamma rays. In : Roesch WC, ed. *US-Japan joint reassessment of atomic bomb radiation dosimetry in Hiroshima and Nagasaki. DS86. Dosimetry system 1986. Vol. 1*. Hiroshima, Japan : Radiation Effects Research Foundation, 1987 : 143-184.

Meckbach R, Bailiff IK, Göksu HY, *et al.* Calculation and measurement of depth dose distribution in bricks. *Radiat Prot Dosim* 1996 ; 66 : 183-6.

Miyake M, Nakai Y, Yamaguchi I, *et al.* In-vivo radiation dosimetry using portable L band EPR : on-site measurement of volunteers in Fukushima prefecture, Japan. *Radiat Prot Dosim* 2016 ; 72 : 248-53.

Nakamura N, Miyazawa C, Akiyama M, *et al.* A close correlation between electron spin resonance (ESR) dosimetry from tooth enamel and cytogenetic dosimetry from lymphocytes of Hiroshima atomic-bomb survivors. *Int J Radiat Biol* 1998 ; 73 : 619-27.

NCRP. *Ionizing radiation exposure of the population of the United States*. NCRP Report No. 93. Bethesda, USA : National Council on Radiation Protection and Measurements, 1997.

Nilsson J, Lund E, Lund A. The effects of UV-irradiation on the ESR dosimetry of tooth enamel. *Appl Radiat Isot* 2001 ; 54 : 131-9.

Romanyukha AA, Regulla D. Aspects of retrospective dosimetry. *Appl Radiat Isot* 1996 ; 47 : 1293-7.

Romanyukha AA, Regulla D, Vasilenko E, *et al.* South Ural nuclear workers – comparison of individual doses from retrospective EPR dosimetry an operational personal monitoring. *Appl Radiat Isot* 1994 ; 45 : 1195-9.

Romanyukha AA, Degteva MO, Kozheurov VP, *et al.* Pilot study of the population of the Ural Region by EPR tooth dosimetry. *Radiat Environ Biophys* 1996a ; 35 : 305-10.

Romanyukha AA, Ignatiev EA, Degteva MO, *et al.* Radiation doses from Ural region. *Nature* 1996b ; 381 : 199-200.

Romanyukha AA, Regulla D, Vasilenko, *et al.* Verification of occupational doses at the first nuclear plant in the former Soviet Union. *Appl Radiat Isot* 1996c ; 47 : 1277-80.

Romanyukha AA, Ignatiev EA, Ivanov DV, *et al.* The distance effect on individual exposures evaluated from the Soviet nuclear bomb test at Totskoye test site in 1954. *Radiat Prot Dosim* 1999 ; 86 : 53-8.

Romanyukha AA, Ignatiev EA, Vasilenko EK, *et al.* EPR dose reconstruction for Russian nuclear workers. *Health Phys* 2000 ; 78 : 15-20.

Romanyukha AA, Seltzer SM, Desrosiers M, *et al.* Correction factors in the EPR dose reconstruction for Techa River side residents. *Health Phys* 2001 ; 81 : 554-66.

Romanyukha AA, Mitch MG, Lin ZC, *et al.* Mapping the distribution of Sr-90 in teeth with a photostimulable phosphor imaging detector. *Radiat Res* 2002a ; 157 : 341-9.

Romanyukha AA, Desrosiers MF, Slepchonok OF, *et al.* EPR dose reconstruction of two Kazakh villages near the Semipalatinsk nuclear test site. *Appl Magn Reson* 2002b ; 22 : 347-56.

Romanyukha AA, Schauer DA, Malikov YK. Analysis of current assessments and perspectives of ESR tooth dosimetry for radiation dose reconstruction of the population residing near the Semipalatinsk nuclear test site. *J Radiat Res* 2006 ; 47 : A55-A60.

Romanyukha A, Mitchell CA, Schauer DA, *et al.* Q-band EPR biodosimetry in tooth enamel microsamples: feasibility test and comparison with X-band. *Health Phys* 2007 ; 93 : 631-5.

Romanyukha AA, Tromprier F, Reyes R. Q-band electron paramagnetic resonance dosimetry in tooth enamel: biopsy procedure and determination of dose detection limit. *Radiat Environ Biophys* 2014 ; 53 : 305-10.

Rossi AM, Wafcheck CC, de Jesus EF, *et al.* Electron spin resonance dosimetry of teeth of Goiania radiation accident victims. *Appl Radiat Isot* 2000 ; 52 : 1297-303.

Rühm W, Kellerer AM, Korschinek G, *et al.* The dosimetry system DS86 and the neutron discrepancy in Hiroshima – historical review, present status, and future options. *Radiat Environ Biophys* 1998 ; 37 : 293-310.

Serezhnikov V, Domracheva E, Klevezal G, *et al.* Radiation Dosimetry for residents of the Chernobyl region: a comparison of cytogenetic and electron spin resonance methods. *Radiat Prot Dosim* 1992 ; 42 : 33-6.

Sevan'kaev AV, Lloyd DC, Edwards AA, *et al.* A cytogenetic follow-up of some highly irradiated victims of the Chernobyl accident. *Radiat Prot Dosim* 2005 ; 113 : 152-61.

Sevan'kaev A, Khvostunov I, Lloyd D, *et al.* The suitability of FISH chromosome painting and ESR-spectroscopy of tooth enamel assays for retrospective dose reconstruction. *J Radiat Res* 2006 ; 47 (suppl A) : A75-80.

Shishkina EA, Shved VA, Degteva MO, *et al.* Description of the computer database "tooth" and discussion of requirements for EPR measurements to support a validation study of external doses calculated by use of the Techa river dosimetry system-2000. Urals Research Center for radiation medicine and University of Utah; Chelyabinsk and Salt Lake City. Final report for milestone 2, Project 1.1. Office of Health Studies. U.S. Department of Energy, 2001 : 60 p.

Shishkina EA, Shved VA, Degteva MO, *et al.* Issues in the validation of external dose: background and internal dose components of cumulative dose estimated using the electron paramagnetic resonance (EPR) method. Final report for milestone 7, Part 1. US-Russian Joint Coordinating Committee on Radiation Effects Research. Project 1.1., 2003 : 67 p.

Shishkina EA, Goksu HY, El-Faramawy, *et al.* Assessment of ^{90}Sr concentration in dental tissue using thin-layer beta-particle detectors and verification with numerical calculations. *Radiat Res* 2005 ; 163 : 462-7.

Sholom SV, Chumak VV, Pavlenko J. The doses from diagnostic X-ray procedures in the EPR spectroscopy technique with tooth enamel. In : *Proc. IRPA Regional symposium on radiation protection in neighboring countries of Central Europe*. 8-12 September 1997, Prague : 571-4.

Sholom SV, Chumak VV, Pasalskaja LF. Some aspects of EPR dosimetry of liquidators. *Appl Radiat Isot* 2000 ; 52 : 1283-6.

Sholom SV, Desrosiers MF. EPR and OSL emergency dosimetry with teeth: a direct comparison of two techniques. *Radiat Meas* 2014 ; 71 : 494-7.

Simon SL, Baverstock KF, Lindholm C. A summary of evidence on radiation exposures received near to the Semipalatinsk nuclear weapons test site in Kazakhstan. *Health Phys* 2003 ; 84 : 718-25.

Simon SL, Bailiff IK, Bouville A, *et al.* BiodosEPR-2006 consensus committee report on biodosimetric methods to evaluate radiation doses at long times after exposure. *Radiat Meas* 2007 ; 42 : 948-71.

Simon SL, Bouville A, Kleinerman R. Current use and future needs of biodosimetry in studies of long-term health risk following radiation exposure. *Health Phys* 2010 ; 98 : 109-17.

Skvortsov VG, Ivannikov AI, Stepanenko VF, *et al.* Application of EPR retrospective dosimetry for large-scale accidental situation. *Appl Radiat Isot* 2000 ; 52 : 1275-82.

Skvortsov V, Ivannikov A, Tikunov D, *et al.* Considerations regarding the implementation of EPR dosimetry for the population in the vicinity of Semipalatinsk nuclear test site based on experience from other radiation accidents. *J Radiat Res* 2006 ; 47 : A61-9.

Stepanenko V, Skvortsov V, Tsyb A, *et al.* Thyroid and whole-body dose reconstruction in Russia following the Chernobyl accident: review of progress and results. *Radiat Prot Dosim* 1998 ; 77 : 101-6.

Stepanenko VF, Orlov MY, Petin DV, *et al.* Individual retrospective dosimetry in the settlement with high radioactive contamination. *At Energ* 2003 ; 95 : 503-9.

Stepanenko VF, Hoshi M, Bailiff IK, *et al.* Around Semipalatinsk nuclear test site: progress of dose estimations relevant to the consequences of nuclear tests (A summary of Third dosimetry workshop on the Semipalatinsk nuclear test site area, RIRBM, Hiroshima University, Hiroshima, 9-11 March 2005). *J Radiat Res* 2006 ; 47 (suppl. A) : A1-13 (and the rest of the issue).

Stoneham D. The Use of porcelain as a low dose background dosimeter. *Nucl Tracks Radiat Meas* 1985 ; 10 : 509-12.

Stoneham D, Bailiff IK, Göksu Y, *et al.* TL Accident dosimetry measurements on samples from the town of Pripyat. *Nucl Tracks Radiat Meas* 1993 ; 21 : 195-200.

Takada J, Hoshi M, Nagatomo T, *et al.* External doses of residents near Semipalatinsk nuclear test site. *J Radiat Res* 1999 ; 40 : 337-44.

Takada J, Hoshi M, Endo S, *et al.* Dosimetry studies in Zaborie village. *Appl Radiat Isot* 2000 ; 52 : 1165-9.

Taranenko V, Meckbach R, Degteva MO, *et al.* Verification of external exposure assessment for the upper Techa riverside with luminescence measurements and Monte Carlo photon transport modeling. *Radiat Environ Biophys* 2003 ; 42 : 17-26.

Tatsumi-Miyajima J. ESR dosimetry for atomic bomb survivors and radiologic technologists. *Nucl Instrum Meth A* 1987 ; 257 : 417-22.

Tatsumi-Miyajima J, Okajima S. Physical dosimetry at Nagasaki: Europium-152 of stone embankment and electron spin resonance of teeth from atomic bomb survivors. *J Radiat Res* 1991 ; 32 (suppl) : 83-98.

Tikunov DD, Ivannikov AI, Shishkina EA, *et al.* Complex experimental research on internal tooth dosimetry for the Techa river region : a model for ^{90}Sr accumulation in human teeth formed by time of intakes. *Radiat Meas* 2006 ; 41 : 565-76.

Tolstykh EI, Shishkina EA, Degteva MO, *et al.* Age dependencies of Sr-90 incorporation in dental tissues: comparative anr River. *Health Phys* 2003 ; 85 : 409-19.

Trompier F, Bassinet C, Wieser A, *et al.* Radiation-induced signals analysed by EPR spectrometry applied to fortuitous dosimetry. *Ann Ist Super Sanita* 2009 ; 45 : 287-96.

Trompier F, Bassinet C, Della Monaca S, *et al.* Overview of physical and biophysical techniques for accident dosimetry. *Radiat Prot Dosim* 2011 ; 144 : 571-4.

Wieser A, Romanyukha A, Degteva M, *et al.* Tooth enamel as a natural beta dosimeter for bone seeking radionuclides. *Radiat Prot Dosim* 1996 ; 65 : 413-6.

Wieser A, Mehta K, Amira S, *et al.* The second international intercomparison on EPR tooth dosimetry. *Radiat Meas* 2000a ; 32 : 549-57.

Wieser A, Aragno D, Baiankine S, *et al.* Dose reconstruction for workers of Mayak and for the Techa river population. GSF-Report19/00. GSF-National Research Center for Environment and Health, Neuherberg, 2000b.

Wieser A, El-Faramawy N, Meeckbach R. Dependencies of the radiation sensitivity of human tooth enamel in EPR dosimetry. *Appl Radiat Isot* 2001 ; 54 : 793-99.

Wieser A, Debuyst R, Fattibene P, *et al.* The third international intercomparison on EPR tooth dosimetry: Part 1, general analysis. *Appl Radiat Isot* 2005 ; 62 : 163-71.

Wieser A, Debuyst R, Fattibene P, *et al.* The third international intercomparison on EPR tooth dosimetry: Part 2, final analysis. *Radiat Prot Dosim* 2006a ; 120 : 176-83.

Wieser A, Vasilenko E, Fattibene P, *et al.* Comparison of EPR occupational life time external dose assessments for Mayak nuclear workers and film badge dose data. *Radiat Environ Biophys* 2006b ; 44 : 279-88.

Wieser A, Vasilenko E, Aladova E, *et al.* Electron paramagnetic resonance measurements of absorbed dose in teeth from citizens of Ozyorsk. *Radiat environ Biophys* 2014 ; 53 : 321-33.

Woda C, Bassinet C, Trompier F, *et al.* Radiation-induced damage analysed by luminescence methods in retrospective dosimetry and in emergency response. *Ann Ist Super Sanita* 2009 ; 45 : 297-306.

Zhumadilov K, Ivannikov A, Apsalikov KN, *et al.* Radiation dose estimation by tooth enamel EPR dosimetry for residents of Dolon and Bodene. *J Radiat Res* 2006 ; 47 (suppl A) : A47-53.

Zhumadilov K, Ivannikov A, Apsalikov K, *et al.* Results of tooth enamel EPR dosimetry for population living in the vicinity of the Semipalatinsk nuclear test site. *Radiat Meas* 2007 ; 42 : 1049-52.

Zhumadilov K, Ivannikov A, Stepanenko V, *et al.* EPR dosimetry study for population residing in the vicinity of fallout trace for nuclear test on 7 august 1962. *Radiat Prot Dosim* 2016 ; 172 : 260-4.